

石田研究室報告
Report of Ishida Laboratory

1993-2003



十周年記念号

- 10th anniversary issue -

京都大学大学院情報学研究科社会情報学専攻
Department of Social Informatics, Kyoto University

ご挨拶

研究室が工学部情報工学科に生まれたのは、1993年7月でした。初年度は4回生が3名だけの小さな研究室でした。それから毎年、構成メンバが増えていきました。学生のコンピュータを確保するために、研究費獲得に頭を悩ます毎日でした。1998年に情報学研究科が生まれたときには30名を超える大所帯になりました。新しい研究科では、連携分野が生まれ、デジタルシティプロジェクトが始まり、今では研究室のメンバを特定し、人数を数えるのも難しくなりつつあります。研究室は“Growing”から“Networking”への転換期にあるのかもしれない。

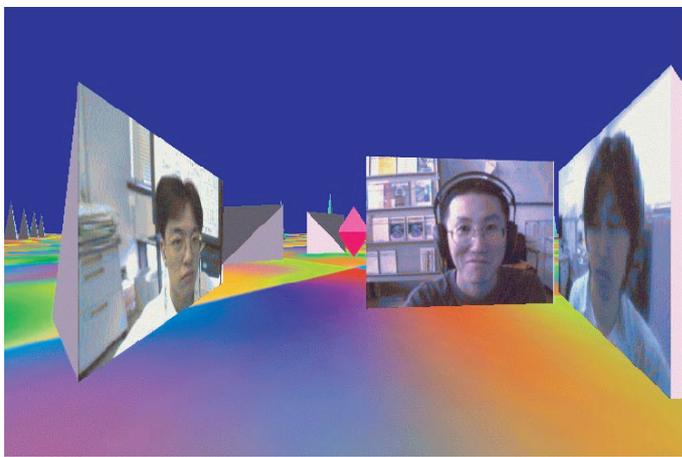
この10年を振り返ると、情報工学時代と情報学時代で研究室の雰囲気が変わったように思います。技術主導で人工知能やロボティクスが中心だった前半に比べ、後半はコラボレーションやヒューマンインタフェースのウェイトが大きくなりました。京大出身、工学出身、男性が中心だった前半に比べ、後半は出身も多様化し男女比も改善されました。

研究成果の代表的なものは、この冊子にまとめられています。基礎研究としては、状態空間探索、市場計算モデル、情報検索、社会心理分析などが、基盤技術としては、全方位カメラ、社会的ロボット、仮想空間システム、シナリオ記述言語などが、大規模な実証実験としては、モバイルアシスタント、デジタルシティ、異文化コラボレーションなどがありました。150件を超える査読付論文、30件を超える新聞報道に、研究室の構成メンバの活動が記憶されています。何よりも、11名の課程博士、4名の論文博士を始め、多くの修士、学士が生まれたこと、構成メンバが他大学の教員として活躍を始めていることが、研究室の成果だと思います。

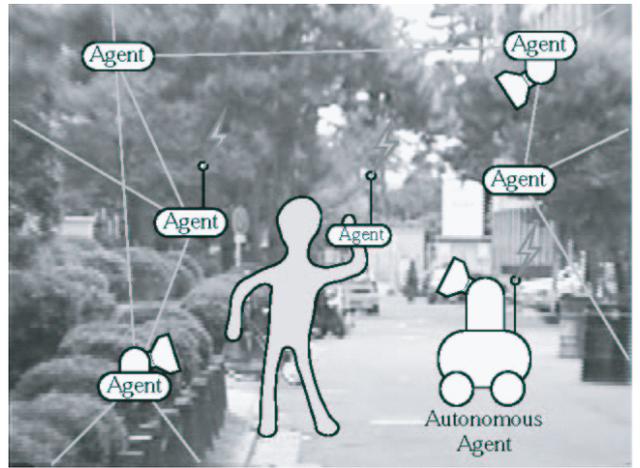
多くの思い出が、研究を媒介として生まれました。私から見えるものは一部に過ぎませんが、研究成果以上に貴重なものだと思います。研究室で毎年開かれるパーティでは、秘書さんや留学生、大学院生がいつも美味しい料理を作ってくれます。ソフトボールには、オリンピック並みのエネルギーが注がれ続けています。研究室合宿は、登山を含む本格的ツアーとして完成の域に達しつつあります。論文発表を兼ねた海外出張では、学生の皆さんと大学の中とは違う交流ができました。上海交通大学、パリ第六大学、スタンフォード大学とは研究室ぐるみの付き合いが続いています。NTTコミュニケーション科学基礎研究所、NICT、ATRなどけいはんなの研究機関との交流も実り多いものでした。

一方で、研究室が、構成メンバにとって必ずしも成功体験の場とならないケースも、増えてきているように感じています。構成メンバの多様化に研究室という空間が対応しきれていないのだろうと思います。今後は、研究集団としての側面と、社会の触媒としての研究空間という側面のバランスを模索していきたいと思っています。変わらぬご指導、ご支援をお願いいたします。

2005年1月
石田 亨



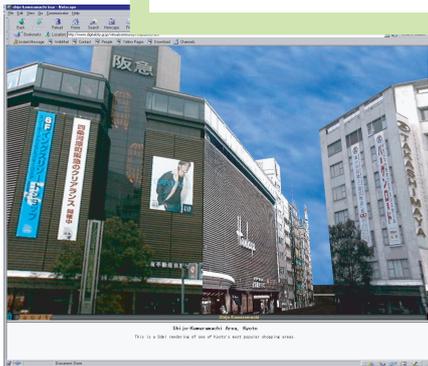
FreeWalk



街に出よう！



全方位カメラ画像



四条河原町ウォークスルー



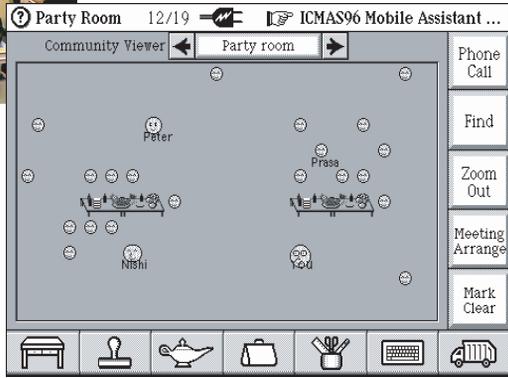
GeoLink



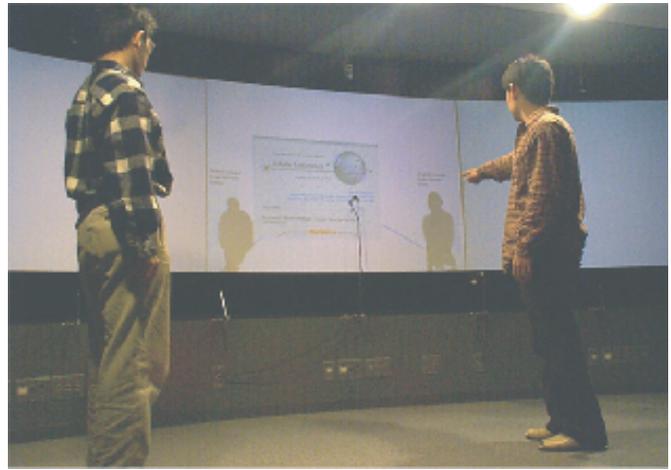
FreeWalk 仮想避難実験



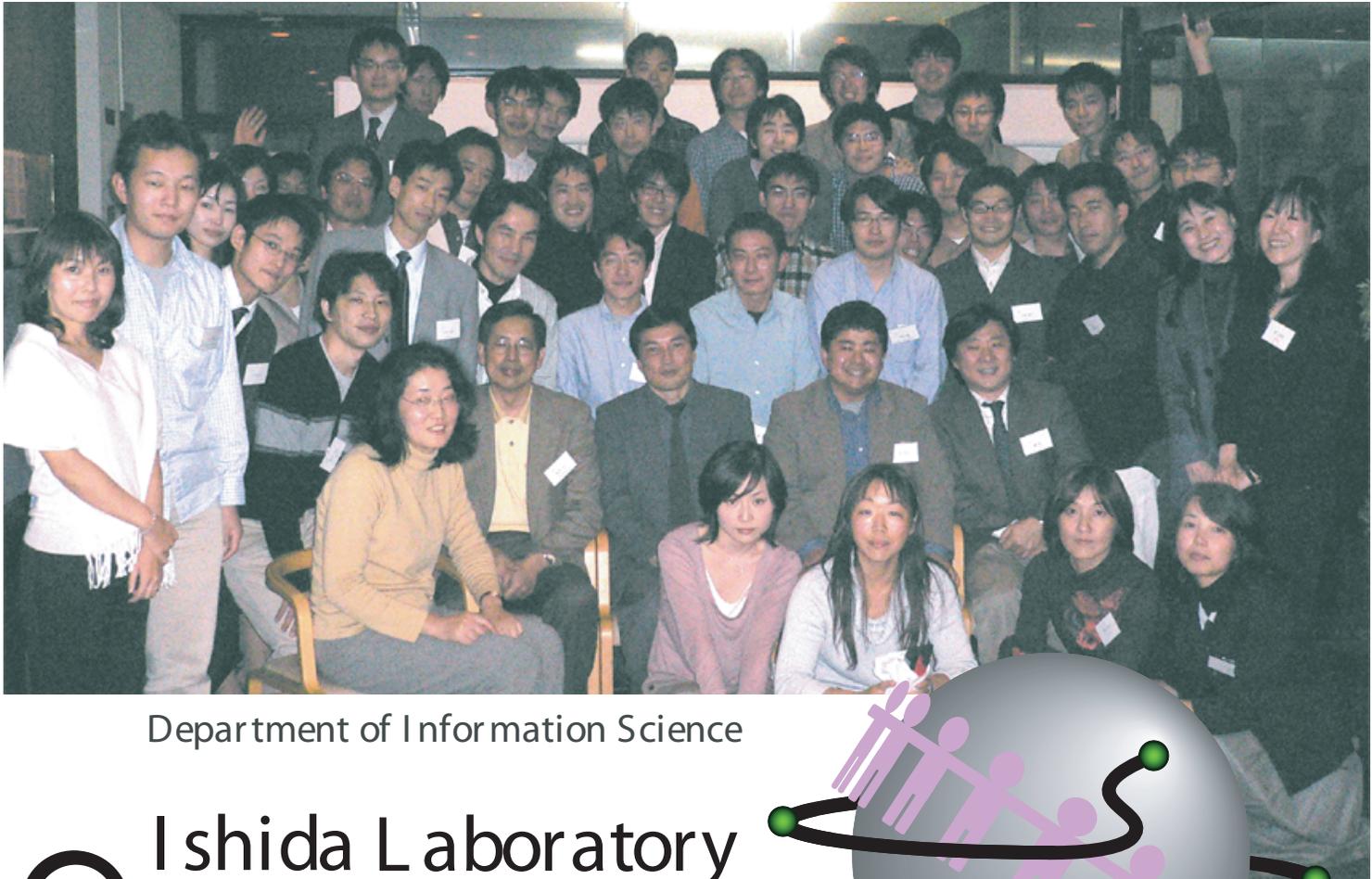
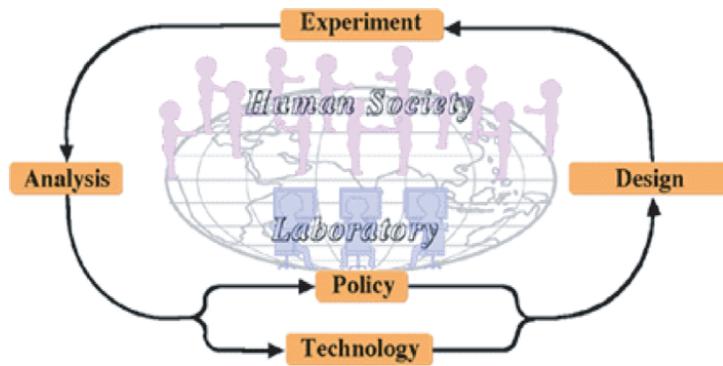
ICE2002



ICMAS96' 国際会議支援



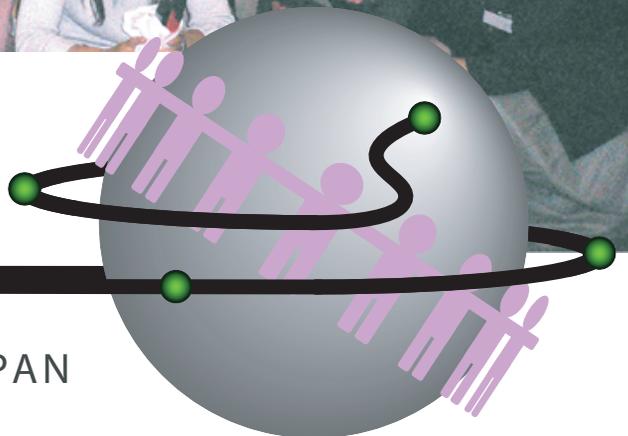
Silhouettell



Department of Information Science

Ishida Laboratory

Kyoto University, JAPAN



目次

10年間の研究	
街に出よう！（石田亨）	1
視覚（石黒浩）	2
探索アルゴリズム（新保仁）	4
市場計算モデル（八槇博史）	5
コミュニティウェア（石田亨）	6
FreeWalk（中西英之）	7
ICMAS96 Mobile Assistant Project（石田亨）	8
街ロボット（石黒浩）	9
デジタルシティ京都（石田亨）	12
ヘルパーエージェント（中西英之）	13
検索隠し味（小山聡）	14
シナリオ記述言語 Q（石田亨）	15
杉万実験（中西英之）	16
視覚センサネットワークシステムの 地下鉄京都駅への導入と実証実験（小泉智史）	17
Intercultural Collaboration Experiment 2002 (ICE2002)（野村早恵子）	18
10周年に寄せて	19
メンバー紹介	45
OB・OG一覧	53
博士論文概要（2001年度～2003年度）	55
修士論文概要（2001年度～2003年度）	61
特別研究報告書概要（2001年度～2003年度）	83
博士論文・修士論文・特別研究報告書 題目一覧	93
活動記録（2001年4月以降）	99
研究成果一覧	107
受賞	135

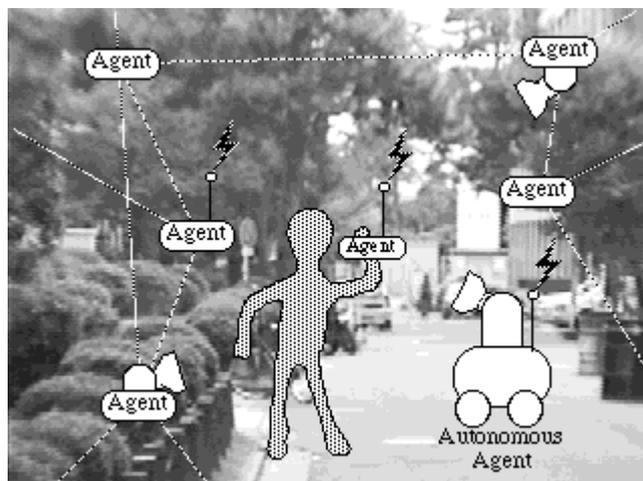
10年間の研究

街に出よう！（石田亨）

1995 年頃だったと思う。石黒先生（当時助教授）が着任し、どういうコンセプトで研究室を作り上げていくかを相談した。まだ、Windows95 も出ていない頃だ。「これからはユビキタス」だとはさすがに言わなかったが、コンピューターームでの研究はやめようと心に決めた。寺山修司が「書を捨てて街に出よう」と叫んだように、コンピュータを捨てて（当時は重かった）街に出ようと決意した。コンピュータを捨ててどう研究するのか、もとより成算がある訳ではなかったが、思えば、それが今の研究に繋がった。Wayback Machine に当時の Web が残っていた。それを見ると....

「街に出よう」を合い言葉に、街を理解し、街を記憶し、街で活動するための情報処理研究を始めようと議論している。人工知能、能動視覚、計算機ネットワークなどの技術を背景に、人間の住む世界に情報処理研究の場を移すことにより、情報処理の新たな可能性を探求したいと考えている。基本的なコンセプトは以下のとおりである。

- Intelligent Agent から Adaptive Organization へ
人間同様の知的なエージェントを指向するのではなく、多数の単純なエージェントにより柔軟な人間-機械システムを実現する。単純な情報処理機能を環境に埋め込み、分散的に情報を処理する組織を構成する。そうした環境の支援を受けて、個々人の情報処理活動が実現される。
- Groupware から Communityware へ
特定の人々からなるグループを支援するのではなく、不特定多数の人々からなるコミュニティを支援する。特にコミュニティの形成過程を支援することを特徴とする。
- Network Computing から Spatial Computing へ
計算機あるいはネットワークに閉じた計算環境から踏みだし、家庭、街角など生活空間での情報処理を研究対象とする。屋外での携帯端末、無線通信の活用を特徴とする。



おやおや、十分「ユビキタス」のようです。

分散視覚(石黒浩)

分散視覚の研究は、私（石黒）が画像認識を専門としていたことから、石田研に招かれた後に始めた研究である。元々、ロボットの視覚システムを作ろうとして、人のように目をきょろきょろさせながら環境を見る能動視覚の研究に取り組んでいた。しかし、能動視覚の研究は、基本的に人間の機能を模倣するため、難しい点が多い。そこで、考えたのが、全方位視覚である。環境全体を見渡す 360 度の視覚情報があれば、画像の解析が容易になるだけでなく、様々な実用的な応用が考えられる。

石田研に招かれた後も、全方位視覚の研究を続けたいと思っていた。全方位視覚は、能動視覚に比べて工学的に多くのメリットを持つ。しかし、それでも、ロボットの視覚認識としては難しい点が残る、実用的技術かという点も必ずしもではない。何が難しいかという点、それがロボット上に搭載された視覚だということである。ロボットは動き回りながら、視覚情報から広い環境のモデルを構築し、環境の様子を認識する。動き回るロボットから得られる視覚情報を元に、環境のモデルを作るというのは、ロボットの性能や視覚認識のために都合いいように十分注意して準備された、いわば人工的な環境であればある程度可能であるが、実用的には不可能と言ってもいい。

そういった、全方位視覚の問題に悩みながらも、当時は非常に高価だった全方位カメラを安価に作るアイデアをある時思いついた。そのアイデアにより実際にかなり安く作ることができるようになり、多数の全方位カメラを研究でも利用することが可能となった（下図）。



小型全方位カメラ（詳しくは www.vstone.co.jp 参照）

多数のカメラが利用できるとなると、問題がかなり変わる。ロボットに搭載された 1 台のカメラが環境中を駆けずり周り情報を収集するのと、環境に密に配置されたカメラが必要な情報を提供してくれるのと、どちらのほうが高い実現性を持つか？明らかに後者である。コンピュータが小型化されユビキタスコンピュータと呼ばれる利用形態が始まったのと同じように、視覚認識を行うカメラも、ユビキタス、すなわち分散視覚が可能となったのである。



分散視覚システム

分散視覚ではカメラの配置そのものが、環境のモデルとなる。むしろ難しいのは、大量のカメラを用いた時に、カメラの位置をどのように測定するか。異なるカメラで観測する同一の物体をどのように同一であると見分けるかという、位置決めと同定が問題となる。この問題を、多くの学生と一緒に、定量的な方法から定性的な方法まで、網羅的にアルゴリズムの開発に取り組んだ。

この分散視覚の研究によって視覚システムが実用的になったかという点、未だ多くの可能性はあるものの、明らかな結果は出ていない。研究用システムでは一部利用されているが、世の中に貢献するほどではない。しかし一方で、分散視覚に取り組むきっかけとなった小型で安価な全方位カメラは、多くの注目を集め、私（石黒）と大阪市の中小企業が産学連携ベンチャー企業 **Vstone**(www.vstone.co.jp)を創設するきっかけを作った。しかしながら、その技術でさえも世の中における貢献は難しい。小型全方位カメラは今でも少しずつ売れているが、まだ、実用的アプリケーションと結びついているかという点そうではない。全方位の視野は多くのメリットをもたらすが、デメリットもある。実用化の難しさをまざまざと感じている。

全方位視覚や分散視覚の研究をあきらめているわけではない。徐々にではあるが、可能性は着実に広がってきているという実感はある。長く続ければ、石田研究室で取り組んだ分散視覚の基礎的な研究も必ず、世の中で利用されると確信している。

そして、この分散視覚の研究は、これが最終地点ではなく、むしろ折り返し地点である。問題の難しさ、コンピュータによる情報処理の難しさから、能動視覚、全方位視覚、分散視覚という流れとたどってきた。今度は逆に、情報処理技術を発展させ、分散視覚から全方位視覚、さらには能動視覚に回帰することが、真に知的な情報システムを作る道だと信じている。

探索アルゴリズム(新保仁)

実時間探索. 自律エージェントの基本アーキテクチャの探求は、石田亨が京都大学赴任前より継続して取り組んだ課題である。石田が注目した手法の一つに、“実時間探索”があった。

A*をはじめとする従来の AI 探索法が、プランニング（目標達成までの完全な動作系列の発見）のみを取り扱い、動作の実行については一切考慮しないのに対し、実時間探索では、短期的な先読みに基づき次動作を決定し即座にその動作を実行する。そして、先読み・動作実行という一連の手順が、目標が達成されるまで繰り返される。結果として、問題全体の完全なモデルがあらかじめ既知ではない場合や、問題解決過程で生じた状況の変化に対応する柔軟性が生まれる。

石田が実時間探索に注目したもう一つの理由は、それが備える学習能力にあった。実時間探索では、短期的な先読みに基づき動作が決定されるため、実行された動作系列が最適という保証はない。しかしながら、ある種の実時間探索アルゴリズムには、同一あるいは類似の問題に対し繰り返し適用すると、最終的に最適な動作系列を発見する、という性質がある。この性質は、アルゴリズムが試行錯誤を通じて、正しい動作を“学習”する能力を持つことを示している。

自律的に学習するエージェントとは、まさに石田の望むところであった。研究室発足初年度には、水野智文とともに、実時間探索の学習性能評価を行なった。この研究は、後に研究室最初の学術論文として人工知能学会誌に採録された。水野との研究によって明らかになった実時間探索の問題点への解法として、さらに石田は新保仁と**重みつき実時間探索**および**上界値を用いた実時間探索**の提案を行なった。これらの手法はいずれも、エージェントアーキテクチャとしてより望ましい手法は何か、という観点から実時間探索の有効性を探ったものである。

探索アルゴリズムに基づく配列整列問題の解法. 配列整列問題は複数の遺伝子配列間の近さを測るタスクであり、遺伝機能の予測などに用いられる。7 配列程度であれば従来の A* 探索で対応できるが、8 配列以上に対してこの方法を用いると、メモリ不足に落ちいってしまい解くことができない。この難問の解決を研究テーマとして突き付けられたのが三浦輝久である。

探索においてメモリ不足緩和の常套手段は、反復深化である。ただ、問題空間が束 (lattice) をなす配列整列問題においては、問題空間内の同一の節点を通る数多くの経路が存在するため、出発節点からの経路を順次たどる反復深化とは恐ろしく相性が悪い。事実、反復深化 A* を用いて現実的な時間で解くことができる問題の規模は、3 配列程度にすぎない。

このため過去、限られた大きさのキャッシュを反復深化と併用する、いわば A* と反復深化 A* の中間的な手法が各種提案されてきた。これらはいずれも基本的に、やみくもに訪問節点を記憶しキャッシュが一杯になった時点で反復深化に変更する手法であった。

結果として、出発節点に近い節点ばかりが記憶されることになるが、効率の観点からは、より多く訪問される節点こそが記憶されるべきである。三浦は、この観察に基づき、**確率的節点記憶方式**を提案した。確率的節点記憶方式では、反復深化の過程で節点を訪問する都度コインを投げ、その節点をキャッシュに記憶するか否かを判断する。この手法により、節点が記憶される確率はその節点の実際の訪問回数を反映したものになり、結果として従来法に比べ 3 倍の高速化につながった。その後、吉住貴幸と三浦は、配列整列問題の持つ問題空間の性質（分岐率が大きいいため、A* の生成節点数が展開節点数に対してはるかに大きくなる）に着目し、A* 探索の節点展開時にすべての子節点を生成するのではなく、有望な節点のみを順次展開する**段階的節点展開方式**を提案し、従来解くことができなかつた 8 配列の整列に成功した。彼らが着目したのは、束をなす問題空間に共通する性質であり、提案手法の適用範囲は極めて広い。

市場計算モデル(八槇博史)

1996年の2月(だったと思います)、石田先生の部屋に呼ばれ、「来月ミシガン大学のWellmanというのが2週間ほど来て、何か共同でやってICMASに出そうという話があるのだけど、やってみませんか?」と言われたところから始まった研究です。当時M1で、学部ではSociaというデスクトップミーティング環境Socia(いまや知ってる人は皆無ですね)の開発をし、M1のときは赤外線通信をいじったりしていたのですが、それとの関連性などもあまり深く考えずに「はい」と返事をしたような記憶があります。

後には、「マルチメディア通信における通信資源に関する競合を調整するため、個々人の効用をもとに無駄のないパレート効率的な資源配分を行う。この配分を分権的に行うため問題を計算的市場としてモデル化し、そこでの競争均衡から資源配分を求めるというアプローチをとる」などというトップダウンな説明がつくわけですが、最初の段階では、「とにかくWellmanの話とFreeWalkをつないで何かしよう」というレベルから始まっていました。

その場で、Wellmanの1993年の論文と、当時まだ執筆段階だった「分散人工知能」の8章の原稿を受け取り、ミクロ経済学の入門書など読みつつ準備を進めました。で、翌月Wellmanがやってきて研究がスタートします。Wellmanが持ってきたWALRASをMac Common Lispの上にインストールし、石田・Wellman・八槇ミーティングで市場モデルを考えては、八槇がWALRASで実装して結果を出して報告、を1~2日周期で行うという密度の高いやりかたで、これが実質10日間ぐらい続きました。この中で、

- 財を、利用者がアプリケーションから直接に受けるサービスの品質と、そのサービスを実現するために使われるネットワーク資源とに分ける
- 財に現在の財と未来の財という区別を設けて、利用者選好の動的な変化に対応できるような市場を構成する

という、この研究の特徴といえる部分が形になっていきました。

Wellman帰国後、プログラムの再実装(MCL上では非常に遅かったのと再利用に不都合があったのが理由)、実験の再実行、FreeWalk上への実装を行い、その成果をけいはんなプラザで行われたICMAS96で発表することになります。

モデルの構築は概ねこの研究で完成なわけですが、これの実用性という方面からの研究がその後に続きました。特に、WALRASアルゴリズムというのは収束するまでに膨大な数のメッセージ送受信が必要となるため、FreeWalkの制御などに使おうとすると、割り当てが求めたころにはとっくに状況が変わってしまい効率的な制御とはいえなくなっている、というジレンマに行き当たっていました。

具体的には、オンラインで本方式を使用したときに計算の精度と追従性との間などに生ずる空間的・時間的トレードオフの評価、利用者の選好を取り込むためのインタフェースの試作、市場計算の際に問題となる通信遅延対策のためのモバイルエージェント技法の適用、追従性を重視した非模索過程の適用などを行いました。これらと直接同じシナリオにしたがってはいませんが、オークションを行うエージェントを実装し、ICMAS2000で行われたTrading Agent Competitionに参加したりもしました。

個別にはうまくいったものもあればそうでないものもありますが、市場にもとづく計算について、特に動的な環境に適用した場合に関する問題提起を行うことのできた研究だと思っています。

コミュニティウェア(石田亨)

何かいい言葉がないか...と思っていた。グループウェア研究は、企業内のチームを対象にしているように思えた。もっとオープンにインターネットで繋がった人々を対象にしたかった。その頃、神戸大の田中先生（現在京大）、阪大の西尾先生、奈良先端の西田先生（現在京大）と、4大学ミーティングと名づけた合同研究会を年に数回開いていた。そこに、阪大の下條先生も遊びに来ていた。S先生「コミュニティウェアはどうですか」、I「それは、いいですね。そういう言葉があるのですか」、S先生「今、思いつきました」、I「それ、もらいます」。

それから、コミュニティウェアという言葉を使い始めた。カタカナで書くと感じがいいが、communitywareと書くとyの後にwが来て収まりが悪い。土屋先生（千葉大学）にも英語的でないと言われた。不安を感じながらも、1997年に京都で Social Interaction and Communityware というワークショップを手作りで企画した。当時のCFPを見ると...

In the 1980s, research into groupware was triggered by the advance of local area networks. Groupware typically supports the collaborative work of already organized people. People in a project of the same company synchronously/asynchronously work using workstations connected via local area networks.

グループウェアを「既に組織された人々」の支援と位置づけた。

On the other hand, communityware is intended to support more diverse and amorphous groups of people. We think that communityware will become important with the advance of public communication systems such as the Internet and mobile communications. Communityware typically supports the process of organizing people who are willing to reach some mutual understanding. In other words, compared to groupware, communityware focuses on an earlier stage of collaboration: group formation from a wide variety of people.

コミュニティウェアを「コラボレーションの初期の段階」の支援とし、グループウェアとの違いを強調した。

手作りワークショップは大成功だった。欧米の社会学者や MIT Media Lab などから続々投稿があった。芝蘭会館では熱心な討論が続いた。西田先生（現在京大）がグループ別討論を上手にまとめて下さった。3ルートもあるエクスカージョンを学生が企画し好評だった。（この頃から、研究室にツーリズムの伝統が生まれた？）十二段屋でのしゃぶしゃぶには、皆大満足で、ベジタリアンまで食べ始めたのには驚いた。新しいアイデアや新しいつながりが生まれた。初めて、ワークショップの意味を体感できた。

前後して、研究室でもコミュニティウェアの研究が始まった。最初のテレビ会議システムは Socia という。スケジュールリングなしで自然に始まるミーティングというコンセプトだったが、実装にはかなり無理があった。しかし、それが次の FreeWalk に繋がる。大スクリーンを用いた Silhouettell も生まれた。両方とも卒論なのだが、CSCW に採録され、日経産業新聞の第1面に載ったのは予想外の喜びだった。モバイルアシスタントの構想が ICMAS96 を舞台に現実のものとなったのもこの頃だ。

FreeWalk(中西英之)

私が4回生として石田研究室に配属されたときに与えられたテーマがインフォーマルコミュニケーション支援のための無予約型ミーティングだった。どの時間にミーティングを行いたいかわ各自が入力しておくエージェントが適当にアレンジしてくれる **Socia** というシステムが既に開発されていた。ユーザインタフェースに興味のあった私が入力インタフェースを、チェン君がエージェント間交渉の改良を分担することになった。しかしながら、単なるパラメータ入力のインタフェースに工夫の余地を見出すのは難しかった。そこで私は考えた。「集まりたい時間を入力するなどというのは面倒くさい。集まるという行為をできるだけ簡便に行えるようにすれば良い。**DOOM** とビデオ会議システムを組み合わせればそれが可能だ。」1995年5月下旬の出来事である。

その後、吉田力との協力により **FreeWalk** は完成し、その成果を **CSCW96** という国際会議で発表することができた。この国際会議への投稿が大変であった。投稿することが決定したのが締切りの数日前であり、このとき存在したのは私が書いた完成度の低い日本語原稿のみである。今でこそ論文の投稿など **Web** 上で簡単に済ませられるが、当時はそうではない。南港の **FedEx** に直接持ち込むというプランでぎりぎりまで編集作業が続けられた。先生方のご尽力によりなんとか論文が仕上がったが、あと10分で出町柳発の特急に乗らないと間に合わないという状況まで追い込まれた。10号館を駆け降り、自転車で猛ダッシュした結果なんとか間に合った。危機一髪であった。もしこのとき間に合っていなければ今の私は存在しないであろう。1996年3月下旬の出来事である。

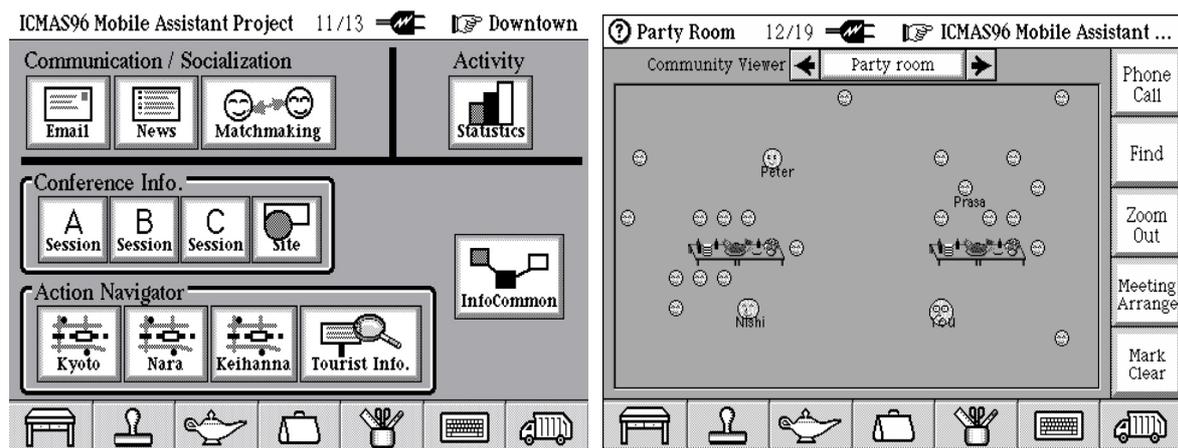
1996年8月、ミシガン大学に一ヶ月間滞在することになった。学生実験室で **FreeWalk** を動かしていると隣に座っていた学生がそれを見ていきなり「Cool!」と言ってきたのを覚えている。この滞在時に **FreeWalk** を日米間で動かそうと試みた。当時のインターネットの通信容量は今とは比べ物にならないくらい貧弱であり、大学間といえどもアメリカとの間となれば普通にウェブを見るのも苦勞するぐらいであった。**FreeWalk** を動かしてみると、映像の通信量をほとんど0にしても、音声途切れ途切れで会話ができなかった。そこで私は考えた。「そうだ、パケット送信部分を単純に数回ループさせればいい。同じパケットをいくつも送って冗長性をもたせれば、その分だけ仮想的にパケットロス率は低下するはずだ。」やってみると音声の途切れが減少した。しかし、後に **OpenGL** 版 **FreeWalk** を開発することになる中野博樹は猛烈に抗議した。「インターネットはもはや実験ネットワークではない。そんな多くの人に迷惑をかける使い方は許されない。」実際にどれくらい多くの人に迷惑をかけたのかは定かではないが、日米間のインターネット回線を埋め尽くしていた可能性は否定できない。

1997年6月29日、**FreeWalk** を評価するために被験者を使った実験を行った。被験者は当時の情報学科1回生から募られ、その中には後に石田研究室に配属されることになる者もいた。実験内容として7人が参加する多人数会議を計画したため7台のグラフィックワークステーションが必要となったが、研究室には3台しかなかった。そこで上林研究室から1台、美濃研究室から1台、日本SGIから2台をレンタルして行うこととなった。実験では、ハードウェアもソフトウェアも不安定なうえに、3つの部屋に分散配置された7台を操作する必要があった。さらにレンタルしている都合上被験者を再募集してやり直す期間が無いため、失敗が許されない状態であった。このように実験はまさに困難を極めたが、研究室中の力を借りてなんとか無事に乗り切ることができた。この実験の結果は後に **IEEE MultiMedia** に掲載されることとなった。

ICMAS96 Mobile Assistant Project(石田亨)

4大学ミーティングにはNTT研究所も参加していた。NTT研究所では、モバイルエージェントの先駆けとなった Telescript を用いた研究が行われていたが、その成果を実証する場を探していた。一方、研究室ではコミュニティウェアの研究を始めていて、やはり実証の場を求めている。折から、第二回マルチエージェント国際会議(ICMAS)を1996年12月に京都でという話が決まり、石田がプログラムチェアを引き受けることとなった。実際には運営の全てに関与する立場だった。4大学ミーティングの議論の中から「モバイルエージェントを用いて国際会議を支援する」というアイデアが生まれ、奈良先端大の西田先生のグループ、NTTの西部さんのチームと共同で開発が始まった。研究室では、会議での参加者のインタラクションを可視化するコミュニティビューワの作成が始まった。石田が初期プロトタイプをLispで作り、当時4回生の古村君と西村先生が Magic Cap 上で完成させた。

こういう実証実験は大変だろうとは思っていたが、企業から大学に移籍して間もないことだったので、大学での開発が、どれほど大変か実感がなかった。京大チームの出足は遅かった。「早くしないと間に合わない」と何度も言うのだが、若い教員、大学院生にはソフトの開発経験がなく、試験の前日に徹夜する習慣が染み込んでいて、仕事は直前にするものだと思っている。恐れていたとおり、夏休みが明けても軌道にのらない。国際会議の1月前になって、ようやく目の色が変わってきたが、時既に遅し。ある者は下痢が止まらなくなった。ある者は喉の痙攣が止まらなくなった。ドクターストップをかけようと機能縮小を提案すると、充血した目で「ここまでやらせておいて今更やめるのか」と言う。困ったのは初めて大学との共同開発を経験したNTTのチームも同じだった。担当者は「もう大学とは一緒にやらん」と叫んでいた。考えてみると、難しいシステムに挑戦したものだ。国際会議は日程が決まっているから1日も遅れることはできない。学生が作るソフトも端末に組み込まれるので、エラーを起こすと端末全体がフリーズする。エラーも遅れも許されない。



左：機能一覧 右：研究室作のコミュニティビューワ

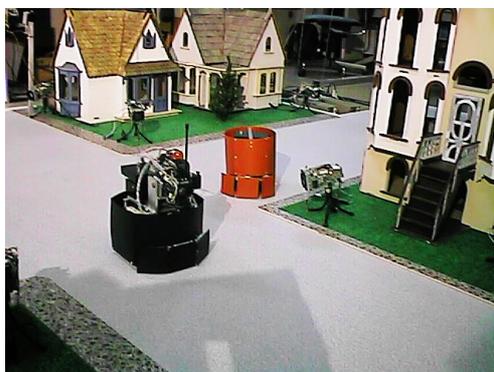
国際会議の日が訪れたときには、動かすことだけが目標になっていた。徹夜続きの開発チームの組み上げたシステムは見事に動作し、会期中一度もエラーを起こすことがなかった。ところで研究の目的は何だったって？ログが解析され論文が書かれたのは、それから1年後のことだった。

街ロボット(石黒浩)

街ロボットプロジェクトは、石田先生からの単純な問いかけに始まる。“どうしてロボットは動かないの？”と聞かれ、とまどってしまった。どうして動かないかという最も基本的な問いは、ロボットの研究開発を専門としている研究者なら、当然、常日頃考えているべき最も基本的な問いであるはずなのに、答えがすぐにでなかった。それは、その基本的な問いを忘れて、細分化されたロボット研究の狭い専門領域でのみ研究することを、無意識によしとしていたためであり、自ら馬鹿の壁を作って、大きな目標を見失いかけていた。

“街で動くロボットをつくってください？”という続く石田先生の質問に、2、3日して出した私の解答は、“街のあちこちにたくさんセンサを取り付けない限り無理です。ロボットが単体で動くのではなく、ロボットは街の中のたくさんのセンサの助けを借りながら動きます。それならやれます。”というもので、思えばこれが街ロボットの形を決めた。

この街ロボットを実現するために、まず、ミニチュアの屋内システムの製作から始めた。アメリカ製のドールハウスをいくつかかかってきて、研究室に4,5軒の家と、道路と歩道と芝生からなる模型を作り、その上に多数のカメラを配置した。その模型の街の中を2台の小さいロボット動き回る。このシステムのおもしろい点は、ロボットにはカメラは搭載されてなく、ロボットは模型の街に設置されたカメラの情報だけを用いて動き回ることである。プログラムは、修士学生の田中や十河たち、多くの学生が幾度となく作り直し、1997年に日本で開催された人工知能に関する国際会議(IJCAD)で、論文発表とデモンストレーションを行った(下図)。



街ロボットプロトタイプ

模型の次は実際の街である。屋外でも動けるロボットを作って、実験を始めた。このとき、再び大きな問題にぶつかった。ロボットは屋外で何をするのか？すなわち、ロボットのタスクが問題となった。これも、考えれば不思議な話で、何かやらせたいことがあるから、ロボットを作ると考えるのが普通である。しかし、ロボットはその時点ですでにパソコンと同じで、ロボットを作れば、何かいいことがあるというイデオロギーがロボット研究者には満延していた。故に、ロボット全体を見ることなくロボットの部品作りに集中できてきたわけだが、実際にロボット全体を作るとなると、ロボットの目的を明らかにせずには作れない。

それまでのほとんどのロボット研究が掲げていた目標は、ナビゲーション(誘導)であった。目的地まで移動するというタスクである。1960年代後半に米国で始まった人工知能を持つロボットの研究以来、ずっと掲げられてきたタスクである。でも本当に、移動するだけの

目的で、ロボットらしいロボット必要なのだろうか？車輪だけついていれば、いいのではないか？自分は、車輪だけあればいいようなロボットを作りたいのか？それがロボットの可能性なのか？と考えると、答えは明らかに NO であった。その時点でもはやナビゲーションは、自分のロボットの目標では無くなっていった。

理屈で考えれば、ロボットらしいロボットが必要なのは、ロボットがその身体全てを使ってロボットにしかできないことをやるからであり、その唯一の答えは、人間との対話（広くは相互作用）である。人は全ての対象を擬人化するが、ロボットは理想的な擬人化対象になり得る。すなわちやるべきことは、人と相互作用するロボットの開発であり、インターアクション（相互作用）の研究である。論理的に答えを導けても、この未知の問題へ踏み出すには、かなりの時間を要した。

他に例の少ない研究をやり続けるのは楽ではない。論文もなかなか思うように書けない。この問題と一緒に取り組んでくれたのが、当時修士学生の神田たちである。地下の実験室で、辛抱強くロボットの開発を続けてくれた。開発したロボットが下図のロボットである。



街ロボット

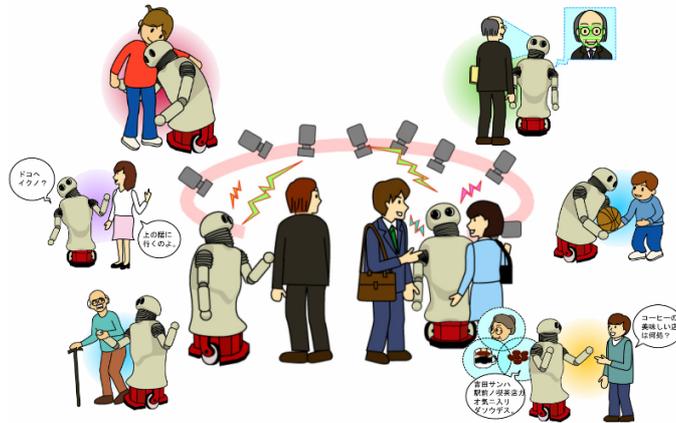
その後この研究は、私が客員室長を務める ATR に拠点を移し、日常活動型ロボット Robovie の研究へと発展する。当初のロボットから比べると、姿形や動作はかなり人間に近づいてきた（右ページ上）。Robovie は今日でも未だ多くの改良を重ねながら進化を続けている。

今年、総務省でネットワークロボットフォーラムというプロジェクトがスタートした。これは、ATR を含む、日本を代表するロボット開発に携わる大企業が協力して、日常的な環境で働くロボットを開発するというプロジェクトである（右ページ下）。図に見るように、これはまさに、最初石田研究室で作った街の模型と同じである。環境に埋め込まれた多数のセンサの助けを借りながら、ロボットが街で働く。自分たちから見れば、石田研究室で始めた街ロボットのプロジェクトが、国家プロジェクトの一部になったのである。



日常活動型ロボット Robive(写真提供：ATR 知能ロボティクス研究所)

“世の中を変える研究をしてください”。この石田先生から頂いた最初の言葉は，博士課程で教えをいただいた阪大の辻三郎先生の“基本問題を考えなさい”という言葉と共に，常に私の頭の片隅に宿っている。世の中を変えられるかどうかは，まだわからないが，世の中を変える準備はできてきたと思っている。

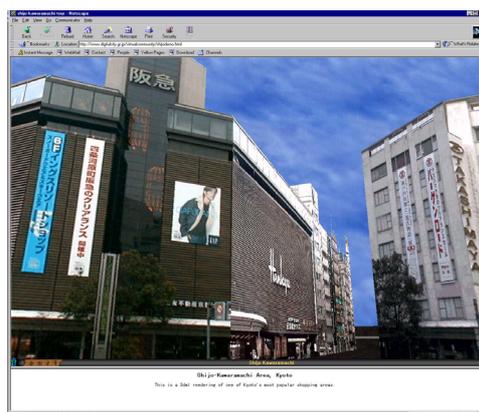


ネットワークロボットフォーラムの目標

デジタルシティ京都(石田亨)

1997年の Social Interaction and Communityware のワークショップに Peter van den Besselaar がやってきた。Digital City Amsterdam のプレゼンに、社会情報学の鮮やかな姿に、目から鱗が落ちた。翌年、情報学研究科が生まれ、社会情報学専攻がスタートする。丁度その頃、NTT コミュニケーション科学基礎研究所ではオープンラボの企画が持ち上がった。当時の研究部長の服部先生（現在立命館）から、やってみないかとお誘いを受けた。テーマを考えたときに頭に浮かんだのが、デジタルシティだった。

1998年10月、NTT オープンラボでデジタルシティが発足した。地図をベースにした GeoLink、京都の仮想都市などの開発が始まった。研究成果の見通しは、これっぽっちもなかった。企画書の書けない研究を認めていただいた NTT に感謝している。方向性は正しいと自分の勘を信じた。デジタルシティが注目を集めたのは、Stefan が作った河原町四条の3Dがあったからだと思う。こんなに簡単に仮想空間が作れるのかと興奮した。四条繁栄会に持ち込むと驚きの声が上がった。実は Stefan は仮想二条城に興味があったのだが、無理を言って河原町四条を作ってもらった。最終的には街との接点ができたと喜んでくれた。GeoLink も神戸大の田中先生（現在京大）を訪れて指導いただいた。平松さん（NTT）の博士論文が完成してほっとした。



1999年10月から、デジタルシティ京都実験フォーラムが始めた。芝蘭会館での立ち上げの会議には、デジタルアーカイブ研究センターや京都新聞社も参加して下さった。フォーラムのメンバーは100名を越した。自治体、大学、企業、商店街、新聞社、寺院、ボランティアなど所属も多様、動機も多様だった。小山先生（当時博士課程学生）や平松さんがオーガナイザを引き受けてくれた。ワーキンググループと称して数ヶ月毎にミーティングを実施した。いつも50名程度が集まり、討論の後、酒を飲む.....高台寺で夜桜を見ながら議論したこともあった。新しい企画はなかなかうまく行かなかったが、交流の意義は大きかった。京都という街が少し分かったような気がした。

しかし、2年間の期限とした実験フォーラムは、NPOの立ち上げを果たせず終結してしまう。2001年に野村さん（現在UCSD）がデジタルシティ特集をbitに組んでくれた。それがなんと30年続いたbitの最終号になった。その後、JSTデジタルシティプロジェクトが始まった。先端技術研究に焦点を当てた5年間のプロジェクトだ。全方位カメラ、仮想空間、エージェントなどに、研究室の技術が生きている。

ヘルパーエージェント(中西英之)

1998年夏、Silicon Valleyに2ヶ月滞在する機会を得た。詳細は過去の年報を参照。Stanfordとの共同研究の準備を途に来た岡本昌之と行った。Nass先生に初めてお会いしたときはネットワーク設定にきたNTTのエンジニアと間違われた。結局マシンの設定をするはめになったが、私にそんな技量はなく全て岡本が行った。(ちなみに、このとき彼は設定内容を付箋紙に書いてマシン付近の壁に貼り付けた。2000年に5ヶ月間滞在したとき、マシンは撤去されていたがこの付箋紙はまだ残っていた。2002年3月に訪問した時点でもまだ残っていた。いったいいつまでそのままののだろうか。)

とあるスタートアップ企業やNTTの研究所にて垣間見た仮想世界ビジネスの厳しい現状に打ちひしがれて帰国した私を待っていたのはNTTオープンラボ・デジタルシティプロジェクトの発足であった。そして、Nass先生のもとで博士号を取りポスドクとして参加していたKatherineと共同研究に従事することとなった。Nass先生から提案されたテーマは「FreeWalkのビデオ画像にチームを表す色枠をつけて内集団効果が発生するのを観察する」という完全にMedia Equation的なものであった。普通のビデオ会議システムで可能な実験なので却下である。Katherineはそれまで、キャラクタ・インタフェースに関する研究を行ってきた。そこで「FreeWalkの仮想空間の中でSilhouetellのような話題提供を行うキャラクタ」になった。京大とStanfordのPCから入れる仮想空間における日米間の異文化コミュニケーションを支援するエージェントの開発が進められた。

Sproull先生に「統計的じゃないからイマイチ」と思われてしまった2年前の実験のリベンジの意味も込めて、多数の被験者を用いた実験を1999年5月に実施した。これが前回にも増して困難であった。被験者の条件が「簡単な日常会話を英語で行えるが海外滞在経験が少ない学部生」という微妙なもので、この条件のもと時間的制約の折り合う65名を1ヶ月余りの間に自力で集める必要があった。何のノウハウも無く手探り状態で、国際交流会館、外大、英会話スクール、TOEIC試験会場、英会話サークルの例会等々、手当たり次第勧誘した。英語能力の影響をランダム化するために、英検、TOEFL、TOEICのスコアをもとに3ランクに分類して実験条件間で均一に割り当てた。このような被験者集めの苦労があったからこそ、次の2つの問題が引き立つのである。まず、当時はまだインターネットによって日米間で映像や音声を通すのは難しく、NTTから専用回線を借りて実験を行った。そして案の定トラブルが何度か起こった。たいていルータのリセット等で済んだが基幹部分の不具合が発生したこともあり、その日に計画していた5回の実験(被験者5人分)は全ておじゃんとなった。しかしながら、そのようなトラブルもStanford側の「no show」に比べれば屁の河童である。「no show」とは被験者が現れないという意味で、つまりすっぽかしである。通常は1割未満だそうであるこの「no show」が、なんと2割も発生したのである。結局この「no show」とネットワークトラブルとで20名の被験者が無駄になる羽目となった。さらにこんなこともあった。原因不明のフリーズがStanford側だけで発生する状態が実験期間半ばになっても直らない。Stanford側はFreeWalkのデバッグを求めてくる。全く原因が掴めないためOSの再インストールをしてもらったところ見事に直った。後になって聞いたところによると、実験用の共有マシンにもかかわらず、フライトシミュレータゲームが勝手にインストールされていたらしい。Win版FreeWalkの開発者である中田稔には要らぬプレッシャーをかけてしまった。てんやわんやの中でなんとか無事に完遂したこの実験の結果はCHI2000にて発表された。

このHelper Agent実験は後に、2000年夏のJSTデジタルシティプロジェクト発足と同時に始まったBalance理論実験(AAMAS2003で発表)へと発展していくことになる。

検索隠し味（小山聡）

西暦 2000 年、京都の街中に、一つのプロジェクトがあった。プロジェクトの目的は、多くの人々が簡単にインターネットを利用できるシステムの開発であった。家電メーカーからプロジェクトに参加していた山田晃弘（三洋電機）は、家庭の主婦にでも簡単に Web が検索できるシステムを作りたいと思った。ある日、彼は牛肉のレシピを検索しようとして、検索エンジンに“牛肉”というキーワードを投入してみた。すると、料理レシピのページは僅かであり、狂牛病のページや、牛肉の貿易、牧畜に関するページなど、料理とは無関係なページばかりが多く検索された。うんざりしながら検索結果を眺めていた時、ある考えが閃いた。“牛肉 and 塩”と検索エンジンに入れてみた。検索結果のほとんどのページが、料理レシピのページになっていた。彼は驚いて言った。これは正に「検索隠し味」だ！これを見た北村泰彦（現関西学院大学）は京都大学の学生でプロジェクトに参加していた小久保卓（現 NTT ドコモ）に言った。検索隠し味を一般化して、色々な分野の専門検索エンジンを作れないだろうか？

数ヵ月後、小久保は模索を続けていた。“塩”よりも良い検索隠し味はないのだろうか？料理レシピ以外のページにも、検索隠し味のようなキーワードを見つけるにはどうしたらいいのだろうか？プロジェクトリーダーであった石田亨（京都大学）は、博士課程学生で機械学習に興味を持っていた小山聡に言った。決定木のような機械学習のアルゴリズムを用いて、検索隠し味を Web ページから自動的に発見することはできないだろうか？決定木というのは、yes/no の判定を行う手順を木の形に表したものである。小山はキーワードを含む／含まないという判定からなる決定木を、キーワードを and, or, not で結んだ論理式に変換し、ユーザの入力キーワードに加えることを考えた。通常はページの分類のために用いる決定木を、汎用検索エンジンへの質問の修正に用いることで、専門検索エンジンを構築しようというのである。正に、逆転の発想であった…

小久保と小山は数千もの Web ページを収集し、それらを一つ一つ人手で確認して料理レシピのページとそれ以外のページに分類した。このようにして作成した訓練集合に、決定木学習のアルゴリズムを適用してみた。ところが、得られた決定木は複雑なものになり、数十ものキーワードが含まれる巨大な論理式が生成された。検索エンジンは 10 個程度のキーワードしか受け付けず、このような検索式を投入することはとても不可能であった。決定木を単純化する既存の方法を試してみたが、大きな効果はなかった。決定木を分類に用いる際には問題とならなかったことが、検索に用いる場合には大きな障壁として立ちはだかった…

何か上手い方法はないだろうか？彼らは既存の単純化の手法を見直してみた。すると、そこに一つの共通点があることが分かった。既存の手法は適合率のみを重視し、適合率が低下すると思われる場合は、単純化を行わなかったのである。これが、決定木が十分に単純化できない理由であった。しかしながら、情報検索においては、適合率だけでなく、再現率も重視しなければならない。しかも、元の適合率が非常に高い場合、僅かに適合率を犠牲にするだけで、再現率は大きく向上し、検索式のサイズもずっと小さくなるのである。彼らは、検索エンジンの評価手法として用いられる、適合率と再現率の調和平均を単純化の指標として用いることにした。これにより、適合率と再現率のバランスの取れた論理式が抽出できるようになった。キーワードの数も数個程度に抑えられ、検索エンジンに投入することが可能となった。こうして、検索隠し味は完成した…

シナリオ記述言語 Q(石田亨)

イメージ情報科学研究所のプロジェクトでマイクロソフトエージェントを使ったことがある。3体のエージェントを同時に使ったのだが、そのとき、シナリオ記述言語が必要だと思った。しかし言語の設計には躊躇があった。エージェント指向言語は提案が多いが、使われたものはほとんどない。以前、NTTの桑原さん（現在ATR）とAgenTalkを設計したが、実際には使わなかった。言語設計の労力、処理系の維持管理を考えると、使えないものを作っても続かないという気持ちが強かった。一方で、エージェントの研究室であるなら、学生が学ぶツールが欲しいという思いもあった。

2000年にJSTデジタルシティプロジェクトが始まり、河原町二条にスペースを借りた。3Fにイメージ情報科学研究所のラボで、2Fにデジタルシティプロジェクトのラボを構えた。デジタルシティプロジェクトではFreeWalkエージェントを制御するための言語を必要としていた。2000年後半にFreeWalkの開発をした中西先生（当時博士課程学生）がスタンフォードに長期出張していたのだが、その間、FreeWalkの内部に触れないために、他の学生の研究が進まないという問題が生じた。エージェントシステムの外部から、シナリオを与えてエージェント群を操作する、という発想はこの経験から生まれた。

Qの開発を決めたのは、その有用性に確信が持てたからだ。研究という位置づけではなく、有用性のみを考えて、言語仕様書を書き始めた。数百、数千のエージェントのシナリオを並行制御するためにSchemeを母言語とすることにした。学生に開発を任せるのは無理があるので、Schemeが書けるプログラマを探した。数理システムの黒田さんからemailが届いたのは2001年6月だった。(define (KURODA Hisao) (email kuroda@msi.co.jp))というシグネチャを見て即決した。この会社しかない。



数理システムが参加して、Qの開発は動き始めた。プロトタイプができたので、2001年後期のM1演習で、学生グループにシナリオの作成を依頼した。出来栄を見て驚いた。Webコンテンツとマイクロソフトエージェントを用いた素晴らしい京都の紹介システムが短期間に出来上がっていた。Qは研究室での学生の研究（修士論文、卒業論文など）に随分貢献してきたと思う。ツールを持つことのメリットは大きいですが、維持するためのコストも大きい。これまでは研究室の中での成功だが、それを世の中に出して通用するかどうかは今後の知恵と感性にかかっている。

杉万実験(中西英之)

あれからまだ 2 年しか経っていないのが信じられないくらい遠い過去のように思われる。2002 年 9 月、土日のデジタルシティ研究センターを借り切って、20 台の PC を接続した FreeWalk バージョン 4 のデバッグ作業が繰り返し広げられていた…

2000 年度末、5 カ月間の Stanford 滞在から帰国早々、泥沼化の一途を辿る Balance 理論実験 (Helper Agent 実験参照) に中澤諭とともに四苦八苦していた。そんな中、下吉博之の電撃的プロジェクト脱退によって完全に頓挫したバージョン 3 の開発を吸収する形で始まったバージョン 4 の開発に参画することになった。これはそれ以前のバージョンとは異なり完全にソフト発注である。1 年後の杉万実験に向けて 6 月に開始された実装は線票どおり順調に進んでいるかに見えたが、コード内部に次々と問題を抱えつつあったことを我々は知る由もなかった。そして 2002 年度 5 月、担当エンジニアが突然変更されるという事件によって大混乱が起きる。実験が 2 ヶ月後に迫っているにもかかわらず、20 台を接続して動くはずのソフトがたった 3 台でフリーズする実態が暴露される。絶望的状况の中、7 月という実験実施予定の死守を約束した「東京駅 5.21 合意」が石田先生と業者との間で締結された。しかしながら事態は予想を超えて深刻であり、8 月になっても 5 台でしか動かなかった。我々はバグ出しに、業者はデバッグに追われる日々が続いた。土日のデジタルシティ研究センターを舞台に合同でバグの原因を追求する稼動テストを行ったりもした。この開発の成果は VRST2004 において発表される。

結局、杉万実験は当初予定より 7 ヶ月延期され、2003 年 2 月に実施の運びとなった。仮想災害避難訓練という構想を石田先生が打ち立ててから早くも 2 年半が経とうとしていた。被験者は総勢 144 名であり、Balance 理論実験に参加した人数 (2000 年 11 月に 74 名、2001 年 2 月に 94 名、6 月に 232 名、10 月に 24 名、11 月に 32 名、計 456 名が参加) に比べれば小規模であるが、たった 3 日間の実験である。つまり、一日当たり 48 名、1 つの実験枠 (1 時間半) 当たり 12 名の被験者をさばく必要があった。12 名の被験者を 3 名ずつの 4 グループに分け、各グループを実験者の学生が誘導して河原町二条ビルの 2 階 (デジタルシティ研究センター) と 3 階 (NRI フロンティアテクノロジー・ラボ) を分刻みのスケジュールで往復するタイトなものであった。そして、二つのグループが合同で行うタスクがあったため、途中何度かグループ間での進行具合の同期を取る必要があり、1 グループの遅れが全体のボトルネックとなった。さらに、1 人被験者が欠けると 11 人が無駄になってしまうため、補欠要員を準備せねばならなかった。菱山さんが Excel 上に綿密にまとめた時間割に沿って全員がマシンのように動いた結果、無事遂行することができた。さて実験当日、私はお役に立てないので適当に写真を撮っているだけであった。何故なら私の手は乾燥しており、3 階玄関のロック (指紋認証装置) を解除できなかったからである。この実験の結果は京都駅における誘導システムの開発へと発展し、その内容は CHI2004 において発表された。

杉万実験は、総合人間学部教授の杉万先生が 1985 年に消防署の地下室で行った実験を、河添智幸が開発した FlatWalk という 2 次元空間上を点々が動くだけのシミュレータで再現するところからスタートした。2003 年 2 月の実験では 3 次元仮想空間内を 6 人の被験者のアバター (+14 体のエージェント) が動き回るものになり、2004 年 2 月に行われた実験では 12 人の被験者のアバター (+8 体のエージェント) で再現することができた。そして、次回の実験では現実空間を動き回る被験者が仮想空間上のシミュレーションに参加することになっている。現実が仮想に取り込まれ、それが現実にフィードバックを与えるわけである。

視覚センサネットワークシステムの地下鉄京都駅への導入と実証実験(小泉智史)

デジタルシティプロジェクトでは、発足当初から実証実験として、石田教授を筆頭に、都市での危機管理をテーマに避難訓練実験を計画していた。京都大学の岡崎教授がアイマークレコーダを用いた空間認知実験を地下鉄今出川駅で行いつつ、今出川駅の仮想空間の構築をプロジェクト初期から行ってきていた。その頃より、石田教授は都市での危機管理のためには、仮想空間とセンサーを組み合わせることを思案されており、2002年より、仮想空間とカメラを融合するために、私がデジタルシティ研究センターに常駐することとなった。その春に行われたコアミーティングで、大阪大学の石黒教授より、視覚センサネットワークが紹介された。これは、石黒教授を筆頭とする研究グループが、テーマとしている知覚情報基盤のプロトタイプといえるものであった。

当初は、京都市交通局に協力いただいて、今出川駅で行うことを計画していたが、視覚センサネットワークシステムの導入に向け、交通局との最終確認の段階で、大きな問題が浮上した。それは、今出川駅が烏丸通りの直下にあることから、土地の権利上、機材設置が困難ということであった。そこで、交通局から提案があり、交通局だけが管理している駅の一つである京都駅での設置が決まった。我々にとって、1日数十万人以上が利用する京都駅での設置は、願っても無い申し出であった。そして、2003年の2月上旬、2日間の夜間工事により、地下鉄京都駅構内に、28台の自由曲面ミラーカメラで構成された視覚センサネットワークが設置された。



このシステムを利用した実証実験は、主に中西氏が牽引している **FreeWalk** 研究グループが行う仮想避難誘導実験と、石黒教授の知覚情報基盤研究グループが行う日常行動認識実験の二つがある。前述の実験のために、彼らは、設置した視覚センサネットワークシステムを用いて、それを仮想空間上で実世界にいる旅客をエージェントとして再現し、且つその空間を超越的な視点から誘導者が観察することで、指示を実世界の人間に送れるシステムを開発した。これは、全体的な状況を把握しながら、個別に避難誘導を行える利点を持つ。現在、このシステムを利用した避難誘導実験を行うために、独立行政法人消防研究所の協力を得て、京都市と協議しているところである。後述の実験では、獲得された映像情報を入力として、人間の日常行動をメモリーベースで認識するシステム開発し、その検証を行っている。現在、6、7割程度の認識率ながら、その環境の状況を把握するのに有用であることが示されている。

Intercultural Collaboration Experiment 2002 (ICE2002) (野村早恵子)

2001年末、私は当時、博士課程2回生で、そろそろ博士論文執筆に向けて焦りを感じ始めているころだった。そんなある日、石田先生から、9・11事件をきっかけに、インターネットを介した異文化間のコミュニケーションの橋渡しをする研究を始めたいが、一緒にやらないかと声を掛けられた(当時の思いについては同著者別項参照)。

インターネット上での異文化コミュニケーションを支える手段としては、機械翻訳サービスに注目。世界中の言語間の翻訳サービスを徹底的に調べ、翻訳言語間の大きなマトリックスを作った。ヨーロッパ言語間は比較的サービスが充実している。でも、アジアの国々との間のマスは空白が目立った。私たちはアジア人だ。アジアでのインターネットの普及が激化している今、ターゲットをアジアにしようではないか。アジア言語で翻訳技術が使えるものとして注目したのが、日中韓、そしてNTT MSC Sdn.Bhd.が開発・運営をしているマレー語だった。早速、当時NTT MSCの所長をしていらっしゃった小寺さんに連絡を取り、マレーシアに飛んだ。この出張には、研究協力大学を探すという目的もあった。

結果的に、ICE2002には、日中韓マ4カ国5大学(京大、上海交通大、ソウル大、半ドン大、マラヤ大)から総勢40名強の学生と教員が集まった。また、機械翻訳サービスも、Arcnet/Sangenjayaの他に韓国語を得意とする高電社と契約した。

実験での多言語会話の場として、上記2社の機械翻訳サービスを組み込んだTransBBSおよびTransWebを開発・参加者に提供した。両ツールの開発には、山本さん(JST)のほか、中塚君や岡本君(現(株)東芝)や石田研の多くの学生の協力を得た。実験は、2002年5月-7月と10月-12月の2回行われた。実験オーガナイザとしては、山下さんと船越さん(NTT CS研)、安岡さん(現 東京大学)、私の4人体制で臨んだ。アジアのネットワーク事情を鑑み、分散型にしたTransBBSの同期がうまく行かず、休日も夜遅くまで各国の学生と電話でやり取りした。TransBBS自身も実験ごとにアップデートされ、必要な機能がその都度追加された。どう工夫しても翻訳がうまく行かない場合には、韓国からの留学生のチョさん達の協力を得た。膨大な会話ログを解析した結果、ICE2002は、機械翻訳技術が人々のコラボレーションを支える技術になる見通しを与えてくれた。

実験が進むにつれ、当初懐疑的だった自然言語処理研究者も積極的に議論に参加して下さるようになった。本研究成果が、NTTの小倉さんや林さんなどの協力を得て、自然言語処理の国際会議で発表されたことは特筆に値するだろう。アジア太平洋機械翻訳協会(AAMT)参加の研究者の方々にも、特に機械翻訳技術のメンタルモデル研究などにおいて定期的にご議論いただいている。

ICE2002が、今後さらに高まる異文化間、多言語間コラボレーションサポートの研究活動に対し、一石を投じたものとなっていることを強く願う。



10 周年に寄せて

石黒 浩（大阪大学大学院工学研究科知能・機能創成工学専攻・教授）

- 半円形テーブルの言い訳 -

10年前を思い返せば、まず最初に石田先生に京大に呼ばれた時のことを思い出します。私は、石田研の最初の助教授として、石田先生が京大に来られた直後に、阪大から呼んでいただきました。

最初に、石田先生を京大に訪ねたとき、先生は、私が助教授のころ使っていた部屋を教室として使っておられて、その部屋には、教授用の机一つと、どこからか拾ってきたような壊れかけた木製の半円形のテーブルだけがあって、後は丸椅子が幾つか散らばっていました。半円形のテーブルは、もう片方がないをごまかすかのように、壁にくっつけて置いてあり、その前で、2人で丸椅子に座りながら、これからどんな研究をするか、話をしたことを覚えています。その話の中で、石田先生が半円形のテーブルを見ながら、“この方がミーティングしやすいんだよ”と言われて、阪大では基礎工学部長をされていた辻先生の大きな研究室にいた私にとっては、そのアイデアとも言い訳とも取れぬ提案がなぜか斬新に思われ、なるほどそうかと納得させられました。その後もいろんな小さなアイデアを試されていたのを懐かしく思い出します。あのころは、どのような研究室にするか、小さなことからいろいろ頼みしみながら積み重ねていたように思います。今の忙しい石田先生や急がし研究室からはとうてい想像できないのですが、小さなわくわく感が毎日あって、私はそれで結構満足していました。

でも、石田研はその後、成長と拡大の一途をたどり、京大だけでなく、私が阪大に移り、最初の助手であった西村先生が立命館に移って、他にも多くの関係者が石田研を離れるとともに、その勢力を関西一円に、さらには全国にまで拡大しつつあります。私はといえば、京大で6年お世話になった後、和歌山大学で自分の研究室を持ちました。私の場合は、石田先生のように企業から裸一環で移ってきて研究室を立ち上げるのとは違って、準備も十分にできた上で立ち上げた研究室ですから、半円形のテーブルにわくわくするようなことは一切なく、いきなり大きな顔をして研究室を持ちました。まだ阪大に移って2年ですが、今では忙しさも、規模も石田研に引けをとらないほどになっています。

この原稿は、徹夜明けにヨーロッパに向かう飛行機の中で、半分居眠りながら書いています。この10年で何があったかなと思いを巡らし、最初に出てきた感覚が、この半円形テーブルのわくわく感です。石田先生や研究室には、他にもたくさんのことを教えてもらい、学ばせてもらいました。それは今でも続いています。でも眠い頭に最初に思い浮かんだ、半円形テーブルのわくわく感は、石田研や私が多くを得る代わりに、無くしてしまった大事なもののように思えます。一週間で海外出張から戻りますが、日本に戻ったら、もう一度自分の研究や研究室を見直してみようと思っています。

平成16年9月2日 ドイツに向かう機中にて

八槇 博史（講師）

ありきたりですが、もうあれから10年たつのかというのが素直な印象です。もうちょっと素直になると、「おいおい、10年も居座ってるんじゃないよ」と自分に突っ込みたくなっています。古株にも程というものがありますね。

何を書いたらいいか迷ったので、古いなりにとりあえず昔の話、それも私が研究室にきたころをしてみようかと思えます。主な研究である市場モデル関連は別に書きましたし。

私は1994年に4回生配属で、石田研究室の学生としては2期生にあたります。前年度

には教授が1人に学部生が3人、それも石田先生のご着任が7月なので、最初の3ヶ月は堂下研（すでにありませんね。今の奥乃研の前身です）にお世話になっていたとのことです。今の30人以上の状況からは考えられないですね。私が来たときでようやく教授1人・秘書1人・博士課程1人・修士課程3人・学部生6人です。一研・二研で十分おさまる人数です。私は一研にいましたが、入り口すぐのスペースに広大なスペースがあり、誰かがどこからかひろってきたバレーボールでサッカーなどしては叱られたりしていた記憶があります（無茶です、真似しないでください>今の人）。サッカーといえば、この年はアメリカワールドカップで、研究室で見たいがためにアンテナ線をせがんで石田先生にうるさがられたような記憶がすこしだけ。

これだと完全に遊んでみたいのですが、もちろん研究はしています（とってつけたように・・・）。当時は人数が少ないこともあって、石黒先生のご着任までは全学生が石田先生の直接指導でした。今とは違って工学部・工学研究科で、当然ながら研究内容も上から下まで完全に工学です。皆、人工知能と直結の研究をしていました。私は学部生3人で、**Socia**というデスクトップミーティング環境を作っていました。これは、ワークステーションがカメラを通じて利用者が前にすわっているかどうかを判断し、事前に入力されている効用関数と比較しながら、ベストのタイミングでデスクトップ会合ができるようにしよう、というものでした。この話で初めての対外発表をしたわけですが、まあボロボロにつっこまれて立ち往生した記憶だけがあります。

当時の研究環境ですが、今のようにPCがありあまっているという状況ではなく、これから機械を揃えていこうという時期でした。基本的におさがりで、サーバが堂下研のおさがりから脱却して初代wing(SS10)が稼動しはじめ、学生用の端末は前年度に学生実験室をお払い箱になったΣstationが二人に一台(!)です。そこから、PCを購入して、当時はやりはじめのLinuxを入れたりしながらすすめました。私自身の話をすれば、研究室に入ってくるいろんな機械に手をだしては、勝手にいろんな設定をしていたように思います。研究としてやっていたわけでもないのですが、そうやって身についたものというのは確かにあるように思います。

こうやってみてきてみると、最初のころとくらべて学生がずいぶんおとなしくなったなという印象があります。やはり入ったときに先輩がたくさんいると遠慮してしまうのかなと思うことも時々あります。もうちょっと、「これやりましょうよ」と言い出す人が多くてもいいかなとは思いますが。まあ、当初の我々のような動きを今のサイズでやってしまうと破綻してしまうでしょうし、昔はよかったなんて言う話でもありません。

そんなところで、昔の話をつらつらと書いてみました。将来にむけても当然考えていかないといけません、プロジェクトの今後やそういう話はこの記念誌の別のところで扱われているでしょうから、この文章としてはここまでということで。

中西 英之（助手）

1995年4月に見事じゃんけんに勝利して石田研究室に配属されてから、居座り続けて10年が経とうとしている。私にとっては二十歳すぎから三十路までの10年であり、ちょうど人生の3分の1を占める。そこで人生を3等分して振り返ってみる。1歳から10歳は生まれてから小学校4年生までの10年である。11歳から20歳は小学校5年生から大学3回生までの10年である。どちらも何もかもが大きく変化していった10年である。では21歳から30歳はどうか。立場は学部生から教員まで遷移したが、所属は同

じ研究室のままである。しかもやっていることもあまり変化がない。配属されてすぐの5月にひらめいたアイデアが卒業研究になり、学位論文の一部になり、現在の研究の出発点として存在感を保っている。だからといって、この10年が「失われた10年」だったというわけではない。自分自身としてはもっとも充実した10年だった。

年齢が高くなるほど年月の進み具合を速く感じようになると一般的に言われるが、そうとは限らないのではないか。私の場合は、だんだん年月の進み具合が遅くなっていると感じる。この30年を振り返ったとき、10歳までの10年よりも20歳までの10年のほうが、20歳までの10年よりも30歳までの10年のほうが長かったと感じる。最近、1年前を振り返って、「あれからまだそれだけしか経っていないのか」と思うことが多々ある。人生の残り時間が仮想的に伸びていくのは良いことである。今後の10年はこれまでの10年よりもさらに長いものにしていきたい。

誰でも心の持ちようで人生の残り時間を仮想的に延ばすことは可能であると思う。結局は自分の人生の内側における相対的な比較の問題である。だから、自分の人生の外側にある他人の人生との比較は行ってはならない。例えば、石田先生と私は20歳違いであり、10年後の私の年齢は石田研究室を発足させた10年前の石田先生と同じ年齢である。はたして10年後に私はまだ「だんだん年月の進み具合が遅くなっている」などと言っているのだろうか。

何はともあれ、石田研究室10周年おめでとうございます。

久保田庸子（コーディネータ）

研究室の影の存在である私にとっても、石田研究室が10周年を迎えられたのは感慨深いものがある。1993年7月1日に石田先生が京大で研究室を立ち上げてから今年の7月で11年経った。私が採用されたのは、石田先生の着任からほぼ1年半後。採用された当初こんなに長い期間石田研究室でお世話になるとは思ってもいなかった。石田先生との出会いは、元上司がかけてくれた1本の電話がきっかけだった。

1995年2月〇日。（はっきりした日はわからない）の夜。元上司から、「京大の教授が秘書を探してるんだけど、行ってみない？」というような内容の電話がかかってきた。バイトということだったので、次の仕事が見つかるまでのつなぎのつもりで気軽に返事をした。（この時は、まだ若かったので、どこかに正社員で就職するつもりだった。）元上司が一番に名乗りを上げてくれたおかげで、面接にこぎつけた。

1995年2月10日（金）午前中。元上司から石田先生の電話番号を聞いて、面接の日時を指定していただくべく電話した。「今日の午後〇〇時に履歴書をもって来てください。」といわれた。「なんと急な。それは、無理だ。」と思った。まず、京大への行き方がわからない。履歴書も書かないといけないし、髪の毛もカットに行かなければ。（何しろ半年近く家にいたから、社会人の顔つきでなくなっている。）この日は丁重にお断りして、翌週の月曜日にしていただいた。（今から考えると忙しい石田先生にとって、そんな悠長なことを言っている場合ではなかったに違いない。）

1995年2月13日（月）。面接は、石田先生と石黒先生の二人だった。元上司の最初の電話で、石田先生のことは、40歳すぎで、企業経験者とは聞いていたのだが、私がイメージしていた『教授』とは違っていた。教授、助教授ともに非常に若く、潑刺とした感じだった。面接といっても、私だけで、最初から採用していただけるような感じだった。募集条件のMacと電子メールが使えて、経理ができては、クリアしていたのだが、もう一つの条

件「男はどうしようもないってことをわかっている人」が、どういうことかよくわからなかった。(後で、石田先生に聞いても言った覚えがないとのことなので、なぞのままだ。)この時、「英語が話せる。」が条件になかったのが、私にとっては幸いだったのだが、未だに英語がうまくならないので、石田先生はきっと失敗したと思ってらっしゃるに違いない。後でわかったのだが、大学の2月3月は、年度の締めで、猫の手も借りたい時期だったのだ。そのお陰だったのかもしれない。

1995年2月14日(火)。めでたく初出勤となった。研究室での秘書と企業の秘書とはちょっと違っていた。来客対応、学生対応、経理処理、企画っぽいこと、掃除機かけにゴミすてと何でも屋だった。最初、(自分なりのイメージの)秘書としての振る舞い、服装までも気にしたものだが、そのうち回りの雰囲気になんか溶け込んでしまった。

こうやって回想していると、いろんなことが浮かんでくる。何しろ石田研究室での9年8ヶ月は早かった。毎年違った仕事が出てくる。定型業務でないので飽きないのだ。英語もできないのに国際会議の事務局や石田先生がIEEE PAMIのassociate editorだった4年間(当時まだ電子化されていなかった)査読者への論文送付や督促などの事務作業もさせていただいた。ありがたいことである。留学生も増え、だんだん国際的な活動が増えてきた石田先生にとって、英語の苦手な私は、役に立たなかったことも多かったと思う。石田先生をはじめ皆さんが支えてくださったお陰で何とかやってこられたと感謝している。

中西さんには「もうすぐ冗談じゃなくなりますよ。」といわれるのだから、私は研究室のお母さんのような気であるのだ。石田お父さんとの子供たち(学生)の間に立って、うまく事が運ぶように仲介役になればと思っている。これからどのぐらい居られるかわからないが、学生さんが教授や会社の重役になるまで居て、訪ねてきた元学生さんに「〇〇くん(さん)も偉くなったわね。」と言ってみたい。それまでここに居られるかどうかかわからないが、私を必要としてくださる限り、お役に立てるよう努力したいと思う。

最後になりましたが、石田先生、石田先生在っての研究室ですから、20周年、30周年が迎えられるよう、どうぞ健康に留意して素晴らしい研究を続けてください。

武田 純 (1995年卒)

石田研究室でお世話になった武田純と申します。研究室では1994年度の1年間、学部4回生の間お世話になりました。石田先生ならびに研究室の皆さんには非常にお世話になり、多くの経験をさせていただきました。

京大を卒業後、大阪大学大学院基礎工学研究科を経て藤沢薬品工業株入社、現在開発本部臨床統計企画部というところに所属しております。その名の通り臨床開発の部門であり、臨床データの解析を行っております。社会人となって数年たち、漸く仕事の面白さや厳しさも分かってきたところです。

現在の最大の関心事は、何と言っても進行中の山之内製薬との合併の行方です。我々のような末端までは、進捗に関する情報はほとんど届きません。イライラ感も高まる今日この頃なのですが、会社合併の当事者であるということはなかなか経験できないものでもあり、一社員として見守っていきたいと思います。

仕事柄、石田研究室の関係者の皆さんとは学会などで会う機会はあまりないかもしれませんが、お会いできた際には酒でも酌み交わすことができればと思っております。

顧 程 (1996 年卒)

■ 思い出

皆さんと同様に、大学四年生の時に研究室に配属されました。しかし、その時に、先生はまだ来ていません・・・先生よりも学生の方が先に配属（着任）されるのは恐らく始めてではないでしょうか。研究室はまだなかったため、初めて先生と会ったのは、大学の向かいの喫茶店で先生を含めて4人でした（寂しかった?）！今思えば、それが石田研の最初のミーティングで、研究室活動の始まりでもあったように思います。

卒論を書く当時は、まだ日本語も学問も低いレベルでした。論文を先生に提出する度に、赤ペンで多々修正された物が返ってきます。それを自分で、時には先生の言葉を丸ごとお借りしながらも直して提出し、それがまた真っ赤で返ってきます。なかには、自分で直したところは勿論、先生ご自身が修正した物も真っ赤で返ってきます・・・その繰り返しで、やっと論文が仕上がり、卒業することが出来ました。さらに、そのおかげで国際カンファレンスの審査も通り、オランダへ（ついでにパリも）行き国際会議に参加することも出来ました。ここまで出来たことには自分でも驚いていました。でもよく考えると、この論文は私自身が書いたというよりも、むしろ先生に書いて頂いたと言った方がより正確のような気がします。ですが、その過程で私は2つの事を学ぶことができました。1つは、物事に対する信念や熱意、何事もあせらずに良いものを追求していくという姿勢です。もう1つは、日本語です。間違いなく、この論文は、それまでに私が書いた文書の集大成だったと思います。日本語のレベルも確実に上がりました。今でも、その恩恵を受けているように思います。

■ 近況

6年前に独立し、現在は日中間でソフトウェア開発の仕事に関わっています。日中それぞれ1ヶ所ずつ開発拠点をかまえており、最近は特にオフショア開発に力を入れています。日中は文化が似ているとはいえ、やはり近来は国家的な背景や民族性の違いから、思わぬところで苦勞をするケースが多々発生します。そのギャップを埋めるのは、私のような日中文化、言語が分かる人の役目のようにも感じています。遣り甲斐は勿論、そして、期待もあります。

岡田 慧 (1997 年卒)

石田研10周年、おめでとうございます。

2年間学部生をやらせて頂いて末に1997年に卒業した岡田です。石田研究室に在籍中は石黒助教授（当時）のご指導の下、分散視覚ロボットに関する卒業研究をおこなっていました。

その後、東大の井上・稲葉研究室に進学し引き続き視覚について、ロボットについて研究を進めることになり、気がつけば博士課程を修了し現在は同研究室の特任助手として研究者の道に進むことになりました。4年生への進学時に石田研を選択していなければ、今の自分がなかったわけで、研究者としてのスタートの機会となった石田研究室に大変感謝しております。

現在は等身大ヒューマノイドを用いた実時間三次元視覚、全身動作・移動・センシング計画、携帯可能なパーソナル手乗りロボットのアプリケーション開発、実時間Lispを用いたロボットシステム構成法などの研究を行っております。

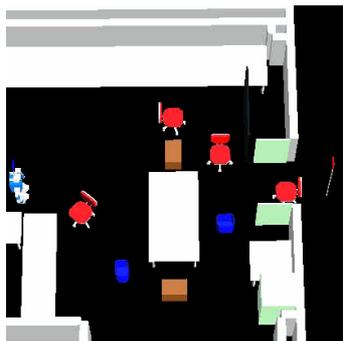
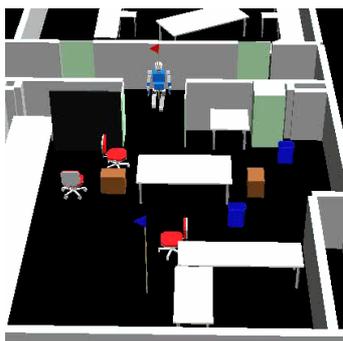
当時研究会で石田先生が「なんでみんなLispつかわないんだろう」とおっしゃっていたこ

とがありました。当時はまったく意図を理解できませんでしたが，進学先の東大の研究室がロボットを動かすために Lisp を用いていたこともあり，今ではすっかり Lisp にどっぷりの毎日になり，行末に ; がなくて) だけでも違和感がなくなっているために Lisp 以外の言語を使った際の Syntax Error が抜けません。また最近では実ロボットにおけるプランニングの研究も行っており，教わり足りないことがいっぱいあったなと思うとともに，改めて不思議なつながりを感じています。

今後ともますますのご発展とご活躍をお祈り申し上げます。



上) 全身行動プランナを用いた行動例
 左) 学部生を対象にしたヒューマノイド演習
 右下) ポータブルロボットによる状況通知
 左下) 可動障害物操作行動プランナ



新保 仁 (1997 年卒)

10 周年おめでとうございます。

昨冬，久しぶりにスキーに行きました。以前行ったときに比べて，スキーの長さは短く，形もカービングスキーとかいうスタイルに変わっており，リフトの改札も自動化されていて驚きました。考えてみると，スキーは学生時代，石田研で田中君たちと行って以来なのでやはり 10 年近く経っていたことになり，変わるのも当たり前か，と納得しました。

と，ここでわが身を振り返って，10 年間ほとんど進歩していない自分に愕然とします。そんなことはどうでもいいのですが，その間石田研はというと，僕が在籍した頃とは研究テーマもずいぶん様変わりし，常に前進し続けてきたようにお見受けします。石田先生はこれからさらに新しいテーマに着手されるとお聞きしますので，大変楽しみにしています。

植田浩司 (1998 年卒)

私が研究生として石田研究室にお世話になったのは，当時，日々更新されるネットワークや IT 関連技術に関して，さらにはアカデミックな研究という部分に対して自分はまがりなりにもキャッチアップしているのだろうかと思問した時，明確にイエスと答えられない

ことにいだちを感じていたのがきっかけです。幸いにも、上司のご配慮、同僚たちの理解に恵まれ、週に数回、石田研究室へ通うことになりました。自分にとっては研究室で学ぶというフレッシュな空気—実際、学内で吸う空気は周りに木々が多いためか、常に新鮮に感じました—に包まれ、普段の業務から解放された気分に入ることができました。図書館や研究室、なかでも研究室の大学院生のみなさんとの会話によって、自分が数年若返ったようで、なんでも吸収することができるような気がしました。

しばらくネットワークの勉強をした後、研究テーマを、個人的に非常に興味を持っていた人工生命としました。自身の修士論文のテーマでもあった遺伝アルゴリズムを進化・成長に応用することと、オブジェクト指向プログラミングの見地からプログラムを設計・実装することが目標でした。石田先生のご紹介で ATR 人間情報科学研究所にも出入りすることが許され、そこでも最新の情報を得る機会が与えられました。研究員の方々との討議を通じて得難い知的刺激を受け、いくつもの新たな発見をすることもできました。しかしながら結局、在籍していた期間中には所期の研究成果は出せませんでした。周りに理解者が多くいたにもかかわらず、社会人と学生との両立をうまく実現できなかったことは、とても残念に思います。

しかし、石田研にお世話になったことがきっかけで、デジタルシティの研究へ、京都コンピュータ学院として参加しませんかというお誘いをいただくことができました。この活動には、京都コンピュータ学院で当時私が教えていた学生たちも加わり、京都駅周辺を 3D で表示するインターフェースを作成し、インターネットを通じたウォークスルーを、塩小路通りについて堀川通りから京都タワーあたりまで実現しました。

研究生当時を思い起こすと、私が Unix の日本語入力や操作に関して不案内であったため、よく大学院生の高野さんや三浦さんに迷惑をかけたと思います。私とは年齢も離れてはいたのですが、同じ研究室仲間として親しくしていただき、ほんとうに学生だった頃に帰ったような気がしました。三浦さんにはよく研究室のコーヒーマーカーで本格的なコーヒを入れてもらったのを覚えています。

最後に私の近況をお話しますと、この原稿が校正されている頃にはアフリカのモザンビーク共和国にいます。JICA の専門家派遣として約 1 月間、現地大学にてコンピュータネットワーク学科のカリキュラム開発を行う予定です（およそ 10 年間、京都コンピュータ学院はアフリカ諸国に対するコンピュータ研修プログラムを JICA より委託されており、私は当初から全体のカリキュラム設計とコーディネイト役を担ってきました）。あわただしい出発準備の中で、改めて石田研究室に在籍中の貴重な経験が、現在の私の礎になっていることを強く感じています。ありがとうございました。

10 周年おめでとうございます。

花野 真也 (1999 年卒)

1999 年修士の花野です。石田研究室 10 周年おめでとうございます。私が石田研を卒業して、早いものでもう 5 年にもなります。最近、石田研 Web サイトを訪問しましたが、私がいた頃と比べてとてもすっきりしたデザインになりましたね。

今年の 4 月まで NTT の武蔵野研究所でストリーミング放送の研究開発に携わってきました。その傍ら、ここ 3 年は春に京大の電気・情報系の研究室を訪問して学生さんに NTT の研究所の紹介をするリクルーター活動も行ってきました。このリクルーター活動、実は、毎年楽しみにしていました。なぜなら、年に一度（年によっては 2、3 回来たこともあり

ますが、、、)、京大を訪問できる機会であり、石田研や、京大キャンパス、大学周辺の移り変わりを見る事ができるからです。ここ3年の変化で気づいたことは、石田研の研究室がリフォームされたこと、京大正門横におしゃれなカフェができたこと、百万遍周辺が整理されたことでしょうか。あと、私が学生のころは持っている人が少なかった携帯電話を、最近の学生さんはほとんど全員が持っていることに隔世の感があります。

また、見た目の変化だけでなく、石田研の研究活動の変化にも驚かされています。在籍時の私の席は **FreeWalk** 部隊の部屋（エレベータの裏。一研でしたっけ？）にあったので **FreeWalk** 関連の議論がされているのを当時よく耳にしていたのですが、石田研 Web を見るとエージェントが登場したりするなど、研究領域がどんどん拡大していているようですね。そのほか、**Web** で様々な研究活動が紹介されていますが、なにぶん大学を離れて随分経ってしまっており学術的研究から少し縁遠くなってしまいましたので、理解がおぼつかなくなっています。石田研10周年記念年報でわかりやすく説明されていることを期待して、年報の発行を心待ちにしております。

さて、少し私の近況をご報告しておきます。今年の4月にNTT情報流通プラットフォーム研究所からNTTドコモの知的財産部に異動しました。業務内容は第三世代携帯電話に関するドコモ保有特許の評価です。もう少し具体的にいうと、第三世代携帯電話の国際的な特許管理団体があり、その団体に対してドコモ特許が第三世代携帯電話サービスに必須の特許であることを主張し認めてもらうように、特許評価や主張書を作成する仕事です。認められれば、その団体が世界中からかき集めた第三世代携帯の特許ライセンス料を、主張した数に応じた割合でもらえるという仕組みです。特許ライセンス料はほぼそのまま利益となるため、第三世代携帯電話特許の評価はとてもやりがいのある業務だと思っています。最後になりましたが、石田研のますますのご発展をお祈りいたします。

村上 直 (1999年卒)

東京大学大学院理学系研究科情報科学専攻坂村研究室にて、電子チケット流通、電子ブックに関する研究を行う。マセマテック株式会社(アルバイト)にて、新理論によって電子回路のゲート数を数十分の一にする研究開発の補助を行い、浮動小数点エミュレータの作成、mpeg2デコーダのハッキングなどに従事。フューチャーシステムコンサルティング株式会社にて、既存システムのリプレース作業に主に従事。株式会社ゆめみにて、携帯Webサイトの構築に従事。一妻一子(♀)。五里霧中。

武馬 慎 (2000年卒)

ご存知かもしれませんが、公務員には異動が頻繁にあります。私は総務省（入省当時は郵政省）に入省して今年で5年目になりますが、新任研修のための異動を除いて、今いるところが3つ目の部署になります。最初は移動無線局の免許審査や無線LANの高度化のための制度改正に携わり、次に総務省内の国会対応の総括（省内に流れる情報の交通整理や作業のとりまとめ）というおよそ学生時代の専門分野とはまったく関係のない仕事に携わりました。そして現在は情報セキュリティ対策や電子署名・認証制度の運用に関する仕事に携わっています。

電子署名そのものについての説明は不要だと思いますが、電子署名に関係する法律が存在することはあまり知られていないのではないのでしょうか。その名も「電子署名及び認証業務に関する法律（通称電子署名法）」といい、平成13年の4月から施行されています。そ

の主な内容は(1)電磁的記録の真正な成立の推定(2)特定認証業務に関する認定の制度の 2 点です。

(1)電磁的記録の真正な成立の推定

これは、電子文書に電子署名がなされていれば、その電子文書はその本人が作成したことが推定されるというものです。紙の世界では、文書にサインか押印がなされていれば、その文書を作成したのが本人であることを推定すると定めた法律が既に存在していますので(民事訴訟法第 228 条)、電子署名法規定されているのはその電子版と言えます。

(2)特定認証業務に関する認定の制度

「認証業務」というのは、電子署名を行ったのが本人であることを証明する業務、簡単に言えば電子証明書を発行する業務のことをいいます。そして、そのうち電子署名のアルゴリズムに①RSA 又は RSA-PSS 方式 (モジュラスとなる合成数は 1024bit 以上) ②ECDSA 方式 (楕円曲線の定義体及び位数は 160bit 以上) ③DSA 方式 (モジュラスとなる素数は 1024bit) を用いているものを「特定認証業務」と呼びます。電子署名法では、この特定認証業務が用いる設備や業務の実施方法がある一定の基準を満たしている時に認定を与えることにしています。この制度は、認定を取得しなければ特定認証業務を行うことができないというものではなく、国がその特定認証業務に対して「この業務は十分信用に足りる」というお墨付きを与えるという任意認定制度です。

暗号の分野は日々進歩していますので、認定のための基準もそれに併せて変えていく必要があります。関連の技術動向を調べて認定基準をメンテナンスしていくというのが、現在の私の主な仕事の一つです。

以前石田研の年報に原稿を載せていただいた時には、まだ入省して 1 年くらいしか経っていなかったので、その当時に感じていた公務員文化のもの珍しさについて書かせていただきました。ところが、入省して 4 年も経つとすっかり朱に交って赤くなってしまい、客観的に見て何が珍しくて何がおもしろいのかかわらなくなりました。(久保田さんに言わせれば私は研究室にいた頃からあまり変化していないそうですが、それはそれで嬉しかったりがっかりだったり複雑な気分です。) これからどんどん「お役人サマ」臭くなっていくのでしょうか。私自身、またこの場で近況報告させていただくのを楽しみにしています。

梁 連秀 (2001 年卒)

◇自己紹介からはじめます。

1998 年 6 月から 2001 年 3 月まで石田先生、久保田さん、その他石田研究室の皆様にお世話になっておりました。最初石田研究室に所属したときは日本語の聞き読みが少しできる程度で、話す、書くことができませんでした。またマシン環境にも慣れていないため、周りの皆さんに本当にご迷惑をお掛けしたと思います。

そんなスタートでしたが石田先生の配慮でデジタルシティプロジェクト、イメラボのような大きなプロジェクトを経験することができました。デジタルシティプロジェクトでは世界のデジタルシティの研究を調査し、ステファンさんと 3 次元京都を作りました。イメラボでは学習対話エージェントのテーマで Wizard of Oz 手法を応用した実験システムを作り、データ収集と分析を行いました。

修士課程を修了した後は韓国 S 社の内定をもらいましたがなぜか戻りませんでした。石田先生は私のお父さんのように心配されたと思いますが、(株)東芝に就職して今年で 4 年

目になります。入社当時の所属は駅前探検クラブ、フレッシュアイなどインターネットビジネスを主に行う事業部でしたが、現在はソフトウェア技術センターに移っております。仕事もいろいろ経験し、今はユニバーサルデザインのテーマでウェブコンテンツ変換システムを開発しております。面白くない自己紹介はこの程度にしておきます。

◇次は石田研究室での思い出です。

石田研究室に入るとき石田先生は私が人気者になるだろうと予言されました。その予言が当たったのか中西さんのいたずらなのか分かりませんが私のファンクラブができました。活動内容はいまだに不明ですが、5〜6名くらいまでメンバーが増えました。この場をお借りし当時のメンバーの方に感謝の気持ちをお伝えします。活動はともかく面白かったのです。

修士2年生のときは研究室とイメラボの皆さんと出張を兼ねた韓国旅行に行きました。ソウルに到着しロッテホテルへ向かうため漢河の遊覧船を利用する予定でしたが最終運行時間に間に合わず、タクシーで行く失敗をしました。ホテルで一息した後、ヤンゼドンに行きました。芸術の殿堂と言う所の国楽劇場で伝統公演を観覧しました。夕食は韓国伝統定食を食べました。石田先生は高校時代に韓国を旅行されたことがあり一般市民の文化生活、食生活の発展で驚いたそうです。残り2日間は先生と他の皆さんとはスケジュールが異なったためそれぞれ半分程度の時間を割り当てご案内しました。先生とはソウル大学、KAISTを訪問しデジタルシティの研究を紹介しました。他の皆さんとは景福宮、国立中央博物館、南大門市場などに行きました。夕方、先生とミョンドンで待ち合わせしサンゲタンを食べました。とても美味しいと良い評判でした。そのときは私の弟と親友も一緒でした。楽しい思い出の一つとして残った3日間の韓国旅行でした。この他にも述べたいですが、紙面には限りがありますよね。

◇最後にご挨拶です。

石田研究室10周年、真におめでとうございます。これからも石田研究室のますますの繁栄を心からお祈りします。

石田研究室での生活と研究室の皆様や同じプロジェクトに参加された企業の皆様を知ることができたのを私の貴重な財産だと思えます。私にできる恩返しは偉くなって石田研究室の誇り人になることでしょうか。まあ、そんなことより幸せになるのが先生のお望みだと思いますが…。はい、このように見えても今年で30歳になりますので早く結婚して幸せになりたいと思います。石田先生、皆様も健康に気をつけながらお幸せになってください。それではこれで失礼します。

小山 聡 (2002年卒)

平成14年3月に博士課程を修了し、4月から同じ社会情報学専攻の情報図書館学分野(田中克己教授の研究室)で助手をしています。石田先生は人工知能が御専門でしたが、田中先生はデータベースが御専門ですので、人工知能の研究室からデータベースの研究室に移ったことになります。私自身は、機械学習やデータマイニングの技術をベースに、Webやマルチメディア検索の研究に取り組んでいます。研究室が変わったことで、参加する学会やお会いする研究者の方々もデータベース関連が多くなりました。データベースに関しては春と夏に国内の大きなワークショップがあります。日本の主要なデータベース研究者はほとんど参加しており、データベースコミュニティの結束の強さを感じています。

また、昨年5月から今年の3月まで、21世紀COEプログラムの一環としてシリコンバレー拠点に滞在し、スタンフォード大学のChris Manning先生と研究を行いました。彼

は自然言語処理が専門ですが、機械学習（特に統計的学習）にも関心があり、エンティティマッチングを機械学習の手法を用いて解くという研究を共同で行いました。エンティティマッチングとは、例えば引用データベースに現れる二つの“K. Tanaka”が実世界の同じ人物に対応しているか否かを判定する問題です。データベースの世界では古くから研究されてきた問題ですが、最近機械学習の研究者の興味を集めています。自然言語処理は人工知能と関連が深い分野ですが、Manning 先生は InfoLab というデータベース関係のグループの一員でもありました。私もデータベースグループのミーティングに参加することができ、スタンフォードでも人工知能とデータベースの両方の分野の研究者と交流する機会がありました。

人工知能の研究者とデータベースの研究者は、実は同じ問題に取り組んでいることが多いのですが、お互いの研究をあまり評価していないように感じています。これは、人間の知能という複雑なものを理解し、それに迫るものを作るという人工知能研究の当初の目的と、大量のデータを効率よく取り扱うシステムを構築するというデータベース研究の目的の違いから来ていると思います。人工知能の研究室の学生が、“エージェントって何ですか？”という質問に立ち往生する光景はよく目にしますが、データベースの研究発表で、“テーブルって何ですか？”という質問は起こりません。また、例えばニューラルネットワークはモデル自体が複雑で、その性質について多くの研究者の興味を集めましたが、連想ルール自体は、人工知能の研究者からすれば、無味乾燥で全くつまらないものに見えます。ところが、大量のデータから効率よく連想ルールを発見することは実は奥の深い問題で、何百という論文がデータベースの研究者によって書かれました。データベースの世界には、“There are three important things in databases: performance, performance, performance.”という言葉があるそうです。こういった背景の違いから、データベースの研究者からは、多くの人工知能の研究はよく定義できていない言葉や得体の知れないモデルをもてあそんでいるように見え、人工知能の研究者からは、多くのデータベースの研究は細かな実装やどちらの手法が早い遅いといった比較ばかりでつまらなく見えるのではないのでしょうか。もちろん、石田研も田中研も、従来の人工知能やデータベース研究の枠に収まらない研究をしていると思います。両方の分野から評価される研究—コンセプトが面白くしかも明確に定義できて、スケーラビリティがあって実社会にインパクトのある研究—は大変難しいですが、私はこれを目指して行きたいと考えています。

野村 早恵子 (2004 年卒)

2002 年初頭から始まった ICE2002(本誌別項参照)は、私の人生を大きく変えたプロジェクトと言っても過言ではない。石田先生から、博士論文と同時並行して ICE2002 を始めないか? というお話もらったときは、相当面白そうだった反面、博士論文研究停滞への不安をぬぐいきれず躊躇した。結局思い切って始めた ICE2002 の運営。多忙さと自分の力不足から、投げ出してしまいたいと思ったことも何度もあったが、石田先生をはじめ周りの方々に助けていただき、実験としては一応の成功を収めることができたと思う。ICE2002 は、社会ネットワークを広げてくれ(本当に多くのすばらしい人と巡り合えた!), 真から楽しいと思える研究分野への道を提供してくれた。今の米国でのポストクライフがあるのも、ICE があってのことである。プロジェクト中には何度も泣いて迷惑をかけた石田先生には、感謝しても仕切れない思いである。

2004 年 1 月から、私は、University of California, San Diego, Cognitive Science

Department, Distributed Cognition and HCI Laboratory (DCog-HCI Lab)に所属している。DCog-HCI Labは、Jim Hollan および Ed Hutchins の2人の教授、システムアドミン1人、大学院生4人、学部生2人、そしてポスドク2人から成る小さな組織だ。研究室のメンバー全員のスペースがひとつの大部屋に配置されており、インフォーマルな会話が絶えない。NSF 関係のプロジェクトをいくつか抱えており、UCSD 内外の計算機科学、コミュニケーション学、教育学などとの研究室との共同研究も活発である。

当研究室での研究手法は、認知科学の王道を行く統制実験ではなく、「現象を観察する」エスノグラフィーである。ビデオテープに収められたデータをトランスクリプトし、グループディスカッションするという日々が続いている。また、分析の理論的枠組みは、Hutchins が提唱した分散認知である。分散認知は、認知は人間個人に閉じたものではなく、状況に埋め込まれたものであると説明する。つまり、周りの人やアーティファクト、また個人の経験などとのインタラクションにより認知が形成されるというものだ。私は、この研究室で、世界に分散した研究者のビデオ会議でのインタラクション分析、一般家庭における情報メディア利用のあり方、さらにコックピットにおけるパイロット間のインタラクションという3つのプロジェクトに参加し、分散認知の枠組みからの分析をしている。英語に苦しみながらも、これまでとは全く研究分野の違う人たちとのやり取りで非常に刺激的な毎日を過ごしている。

さて、UCSD のキャンパスは、サーフィンの楽しめる La Jolla Shore まで歩いて5分という絶好のロケーションである。研究室にはウェットスーツがかかっており、ビルの外壁にはサーフィン用シャワーが設置されている。夏休み期間には、教授も早朝一番にサーフィンを楽しんでから仕事を始めるといった具合だ。そのような環境なので、私も朝7時過ぎには研究室に行き、明るいうちに自宅に戻るといった健康的な生活を送っている。髪は洗いざらし、ゾウリにジーパン、T シャツ姿にザックを背負っての通勤姿。日本ではちょっと考えられない。楽ちんすぎるこの生活から抜けだせるのだろうか。



UCSD のある La Jolla の夕日

最後になりましたが、石田先生をはじめ皆様、京大での6年間、本当にお世話になり、ありがとうございました。今後とも、皆様のご健康と研究室の益々のご発展を心よりお祈りしております。

板倉 陽一郎 (2004 年卒)

10 周年おめでとう御座います。

連携分野、市場・組織情報論修士学生として2002年度より2003年度まで在籍致しました。市場・組織情報論の篠原・横澤先生は本拠地が関東に在ります故、大学においては専ら石田研にてお世話になりました。現在は、慶應義塾大学法務研究科(法科大学院)にて研究ならぬ勉強に追われつつ、篠原・横澤先生の調査に関わったり、通信競争政策の研究を進めたりなどしてそれなりに多忙な日々を過ごしております。

石田研時代の思い出と致しましては、FreeWalk の大規模な実験、ソフトボールのリーグ戦などが思い起こされます。

FreeWalk の大規模実験は、二条ラボ二階と、今は亡き三階をフルに用いた避難実験でして、研究室総出にて二日間連続で終日被験者を集めて実験をし、その日のうちに仮集計をしては実験を改善するという壮絶なものでした。子供のころ、実験といえばフラスコやビーカーに色とりどりの薬品を入れては妙な新しいものが出来るという漫画イメージを抱いていたなあと思いつつながら、スーツ姿で被験者の世話をした覚えがあります。

ソフトボールは出席率の関係もあってか（家が近かったのです）、シーズン途中より投手を勤めさせて頂きました。丁度 18 年ぶりの阪神優勝のシーズンと重なりまして、石田研も快進撃を続け、前期総合 3 位という、始まって以来の好成績を収めることが出来ました。シーズン後に石田先生にご馳走頂いたことは大変嬉しく覚えております。リーグはこれからも続いていくでしょうから、是非ともこれを超える成績を上げられますこと期待致します。

短い期間で御座いましたし、連携学生としてフレキシブルに関わっていた私がどれほど石田研に貢献出来たかは定かでは御座いませんが、社会情報学の研究のなんたるか、という神髄を垣間見せて頂いたことは一生の財産になっております。東京で何らかの手が必要な際、法科大学院に進学されたいというご希望がある方が現れました際には一報頂ければ喜んで協力申し上げたいと存じ上げます。

研究室の益々の御発展を御祈り申し上げます。

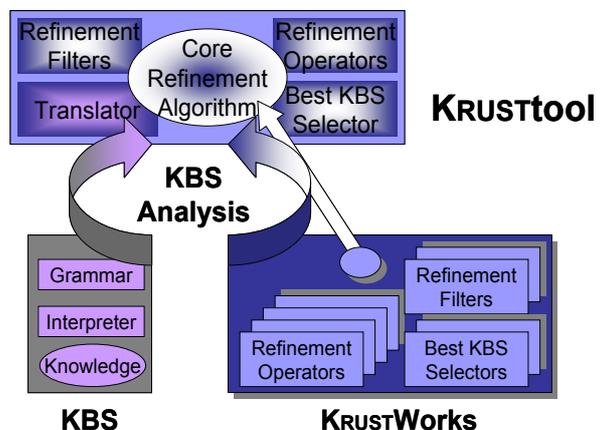
Susan Crow



Professor Susan Crow was a visiting researcher from The Robert Gordon University in Aberdeen, Scotland in the summer of 1994. Her research was Automated Refinement of Production Rule Systems and Constraint Based Optimisation. These fitted well with Professor Ishida's research on Organization Self-Design of Distributed Production Systems and Distributed Constraint Satisfaction. His work introduced her to the challenges and power of distributed systems, an area which

developed quickly into the now popular multi-agent systems.

She enjoyed many interesting and useful discussions with Professor Ishida and his students. She also experienced Japanese life, its culture and customs. One highlight was joining the lab's outing to the Daimonji Fire Festival. Later she noted that the "Dai" symbol was a very powerful and suitable logo for the (D)istributed (A)rtificial (I)ntelligence conference Professor Ishida was arranging in Kyoto!



KRUSTWorks

Her refinement work was funded by an EPSRC research grant in 1997 and this project developed a refinement framework KRUSTWorks that defines a set of generic KBS concepts and refinement steps, and an extensible toolkit provides refinement components to achieve these steps. KRUSTWorks is unusual in providing refinement facilities that can be applied to different KBSs. Publications in IML95, IEEE ICTAI'97, AAAI'99, KBS journal 99, IEEE ICTAI'00.

The optimisation project finally applied a Multi-Objective Genetic Algorithm to achieve optimised land-use planning on upland farms where economic and ecological constraints are conflicting. The GA-based tool was able to balance conflicting priorities more effectively than teams of humans (Publication in GECCO'00).

Her current KBS research focusses on Case-Based Reasoning (CBR) systems. Similarity and adaptation knowledge is learned introspectively from the case knowledge at the heart of a CBR system. Publications in EWCBR'00. Computational Intelligence journal 01, IJCAI'01, ECCBR'02, ICCBR'03, BCS SGAI'04.

Her latest research interest applies Machine Learning to improve the organisation and browsing of websites. This project grew from a sabbatical at UCI in California. Reinforcement Learning proved an attractive approach after knowing Professor Ishida's research on Moving Target Search. This Web project fits well with her latest 750,000 research grant to establish SmartWeb a centre of excellence in intelligent computing technologies for Web-based systems and services. SmartWeb is housed in a new state-of-the-art 2million Computing Technologies Research Centre. This is an excellent facility to offer research visitors.



Michael Wellman

At the time of my visit to Ishida Lab (March 1996), the focus of my research was on "market-oriented programming" (MOP), a methodology for solving distributed resource allocation problems by modeling them as competitive markets. In the MOP approach, two types of agents—consumers and producers—represent the activities that employ resources. Consumers own the initial resources, and obtain value for consuming final products. Producers transform some kinds of resources into others. Market prices regulate the exchange of resources across agents. The market equilibrium is a set of prices and allocations such that the producers operate to maximize profits, and consumers maximize their utility. Equilibria can be calculated in a distributed manner through a price-adjustment protocol, and the resulting allocation is often quite efficient.

I was quite excited by the invitation to visit Kyoto University to pursue this

research, given the experience of Professor Ishida (in collaboration with Kuwabara) in market-based methods, and multiagent systems more generally. The group was developing at that time a new community meeting tool called "FreeWalk", and Hirofumi Yamaki (a graduate student at the time) was exploring network resource allocation in this environment. During the visit, we created a simple market model of bandwidth and QoS allocation in FreeWalk, capturing some of the salient aspects of this domain, in particular the variability of individuals' demand for resources depending on their proximity in FreeWalk meeting space. A key innovation of our approach was the use of a simple two-period rolling horizon model to partition resources into current and future, and thereby allow agents to trade resources across time. We were able to demonstrate that even this binary partition provided many beneficial trading opportunities, since the agents have divergent yet predictable needs over time. A paper based on this model and our simulation results was presented at the International Conference on Multiagent Systems, held in Kyoto in December 1996. The market-based FreeWalk project was a unique effort at the time, instrumental in development of the MOP methodology. For this reason, the Kyoto collaboration was quite fruitful, and productive. Eight years have passed, and my work has progressed from MOP to market design for electronic commerce, and currently emphasizes trading strategies for market games. Although the specific topics have evolved, my research focus has remained on computational markets. My visit to Ishida Lab was a most enjoyable and memorable event, and I maintain fond recollections of my time in Kyoto.

Marianne Hoffmann



I am Marianne Hoffmann. I visited Ishida Lab from August 1998 till February 1999. This was right after my graduation in business informatics at Wuerzburg University in Germany. My research project at Ishida lab was about a training and presentation tool for the ERP-software SAP. The tool called "Live AG" has been developed by the laboratory of Professor Thome at the faculty of business informatics of Wuerzburg University in cooperation with the German SIEMENS company. The aim of my research was to analyse differences between German and Japanese business processes concerning the SAP modules FI (finance) and CO (controlling), in order to create a Japanese version of the tool later on. I really enjoyed my stay at Ishida lab and the kindness and hospitality of all members which I am still in touch with some of them. They not only helped me with my research, but also introduced me to Japanese culture during our free time.

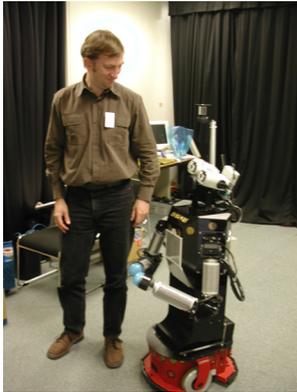
After returning to Germany I started my job in Munich as a Service Manager in the IT outsourcing environment at DaimlerChrysler/debis Systemhaus in May 1999. About three years ago this company was sold by DaimlerChrysler to the "Deutsche Telekom" (German Telecom). The company part I work at is now called T-Systems (www.t-systems.com). My customers are three international subsidiaries of the German Mobile Telecommunication Service Provider "debitel AG" in Paris, Copenhagen, and

Amsterdam. They have outsourced their billing process to us, and I am responsible for the delivery of service and the fulfilment of contract.

Besides my work at T-Systems I am studying Japanology at Munich University. I am planning on issuing my final paper next year. During my free time I am practising Aikido, Nordic Walking, hiking, reading, and eating good food (sometimes Japanese). I would like to take the opportunity to thank Professor Ishida again for having accepted me as an exchange researcher in his laboratory.

Best wishes from Marianne Hoffmann

Jean-Pierre Briot



I had the great pleasure to visit Professor Toru Ishida's lab during Spring 2001 as well as during Winter 2001. A PhD student of mine, Frederic Peschanski, also made a summer visit to the lab. My visit was a good chance to learn more about the excellent research conducted in the lab. During my stay, I worked on the dynamic adaptation of multi-agent systems, and more specifically to support fault-tolerance. I also had various discussions on general issues of adaptation, on control architectures and on linguistic issues. The excellent intellectual and supportive environment of the lab and of the university, as well as the quiet sabbatical spirit, also gave me opportunity to think about new research topics, notably reinitiating research on computer music. On the artistic side, I actually had also the chance to meet with some excellent Japanese musicians and to build up a small jazz project with some original compositions. Overall, I am very thankful to Professor Toru Ishida for his invitation which had a great impact on my current projects. I also want to thank Yoko Kubota, Shoko Toda, Hideyuki Nakanishi, Yohei Murakami, and many others members of the lab, for making my stay so smooth and fruitful. I would also like to thank the University of Kyoto as well as JSPS for their support.

Bruce Schatz



I was a Visiting Professor in Professor Ishida's Laboratory for one year from August 2001 to August 2002. While on sabbatical from my University, I was doing research for a book on "The Evolution of the Net". This discusses present and future trends in global network infrastructure. A draft of some chapters can be found on my website at www.canis.uiuc.edu. Also included are the slides of the talk I gave at the end of my stay at Kyoto University, summarizing my investigations.

The students and staff in Ishida-sensei's laboratory were very kind to me, during my stay. They helped me with computers and with culture, suffering through my poor attempts at speaking Japanese and speaking English with me. I tried in return to give them some experiences from America, both from informatics research and everyday life.

I gave a series of lectures on the Interspace, the next generation of the Net where concept navigation across community repositories is routinely possible. My summary talk also discussed how the infrastructure of the Net would improve as technology improved, from words to concepts and beyond.

Part of my time in Kyoto was spent studying Zen Buddhism at Hanazono University and major temples. In Zen, there is a formal system for moving beyond words and concepts, with a thousand years of practice underlying the system. I believe that Informatics must embrace Eastern philosophy in the 21st century, just as Physics did in the 20th century. Hopefully, this may give good advantage to Japanese researchers living in Buddhist culture.

Professor Ishida had sponsored a JSPS Fellowship for Postdoctoral Researchers during my sabbatical year and kindly sponsored a later JSPS Senior Invitation Fellowship. This enabled me to spend another period at Kyodai during Summer 2003. During this period, I investigated universal representations for community knowledge. The new researchers in the laboratory were very helpful in sharing their own technologies and results. I also gave a lecture on “Capturing the Structures of Everyday Life”, discussing how social science ideas could be incorporated into information infrastructure.

I hope that my experiences as a sympathetic outsider helped bring new perspectives to the Ishida laboratory. Best wishes for another ten years of great research and education!

Katherine Isbister

I worked with Professor Toru Ishida as a post-doctoral researcher in 1998-1999, then later as a visiting researcher at JST-Crest in 2003. During my postdoc, we created a system called Helper Agent, and ran a cross-cultural study of student interactions with and without a conversational agent. We had undergraduates from Kyoto University and Stanford University chat for 20 minutes, and we looked at whether the agent could help them have a better conversation.



Helper Agent

We found some evidence that this could be true. Our findings were presented at the CHI conference in 2000. I also worked on developing a tour guide agent to give chat tours of a 3-D model of Nijo Castle in Kyoto, with members of Professor Ishida's research team. This work was presented at an AAI Fall Symposium, and written up in a book chapter (published by John Benjamins).

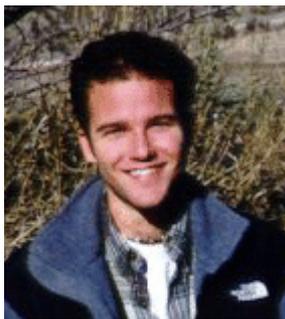
The work that I did in 2003 as a visiting researcher was focused on the nonverbal signals of trustworthiness in virtual humans. I believe the review of the literature that I completed helped Professor Ishida and Dr. Nakanishi in creating their subway agent avatars and studies. Professor Ishida and I worked together on the first Digital Cities

workshop in 1999, and co-edited a book based upon that workshop. I attended the second Digital Cities workshop, and chaired a session there. I am very glad to have worked with Professor Ishida. The experience I gained during my postdoc was valuable in training me for both research and industry work. After leaving his lab, I worked for a start-up company in San Francisco for 3 years, and then began teaching a course at Stanford University on the design of computer game characters. I accepted an Associate Professor position this year at RPI (www.rpi.edu) where I am building a games research lab, and helping to develop a major in Game Design. Here I hope to continue my work on the design of interface agents and other social and emotional interfaces to technology.



Digital City Tour Guide

Scott Brave



In the summer of 2001, I spent six weeks at Ishida Lab. My time at the lab was both intellectually and personally rewarding. On the intellectual side, I had two tasks. The first was to design an experiment investigating potential advantages of FreeWalk as an interpersonal communication medium. Because much of my previous research revolved around the area of nonverbal communication in virtual spaces, I created an experiment which investigated the psychological effects of physical positioning and movement of avatars in FreeWalk's virtual space. With the help several members at Ishida Lab, the experiment was implemented and conducted, in both Japan and the US, with great success and intriguing results.

My second task was to team up with Ishida Lab member, Hideyuki Nakanishi, to design a unique new class for the coming fall semester. The class, taught by Prof. Ishida at Kyoto University and Prof. Nass (my advisor) at Stanford University, brought together students from Japan and the US into small international research teams. The student teams collaborated (using FreeWalk as a telecommunication tool) to design, implement, and run social-psychological experiments in Virtual Reality. The class was an incredible experience for teachers and students alike. Many of the students, to this day, still speak fondly about the class and several were even encouraged to pursue a career in research based on their experience.

My time at Ishida Lab was extremely rewarding personally as well. It was my first time in Japan and the Ishida Lab members immediately made me feel at home. Everyone was extremely friendly, considerate, and kind. I thoroughly enjoyed spending many weekends seeing the sites of Kyoto with my new friends, and I am very thankful that many of these friendships have continued to this day. I feel very lucky

to have had the opportunity to spend my summer with such an intelligent and kind-hearted group of people.

Zhiqiang Liu

Time past quickly and before I knew it I was waiting for the flight back Shanghai in the Kansai airport. When I looked down at the blue sea in the flight, I felt everything was same as before, But the experience in Kyoto would be cherished forever.

When I arrived at the Kyoto University, I was struck by both the natural beauty of the campus and the big family of the lab. In a big meeting room, there are lots of people sitting around the wall having lunch and talking. It's so difficult for me to remember their full names. For a long time, I did not realize that Mr. Murakami is Yohei.

When I was familiar with the life in the lab, I was attracted by the spirit of this place, its openness and unrestricted style. Prof. Ishida always convinces me that there really is an unlocked door just waiting for me to open it. The members in the lab are good and sweet and kind to me. All of these let me feel well. We were like a big, happy family--not only with students but with the entire lab! I can concentrate on my research and make progress little by little with their help. I miss the life I had in Kyoto and I would like to thank all of them for contributing so much to the pleasure of my stay in Kyoto University.

Now I continue my research in Department of Computer science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University and I hope I can have chance to visit Ishida Lab in the future.



Gao Zhiqiang

When I was a middle-school student, I knew Kyoto very much from the TV play series about Yikkyu Daishi. I was attracted by his intelligence and wisdom, as well as by the beauty of the city. When I was sponsored by Japanese government to do researches in Japan for 2 years, I did not hesitate to select Kyoto University and Ishida Lab. as my first candidate.

It was the end of September, 2000, that we arrived at Kyoto. Osmanthus flowers smelled well, and persimmon became ripe. Every thing seems mature, easy and without anxiety. When I met Professor Ishida for the first time, he suggested me to learn more English (not Japanese), and read classical text books. These two suggestions helped me to change from mechanical engineering to computer science and engineering, and guided me to do researches and instruct students even after I became an associate professor. Therefore, it was Prof. Ishida who introduced me to the field of artificial intelligence.

I first stayed in Nijo Lab. for 6 months. I learned a lot from researchers of NTT and Kyoto

University, including Yamaki sensei, Nakanishi sensei, Umezawa san, Shimoyoshi san, etc. I constructed part of the VRML model of Kyoto. Meanwhile, I observed how they did researches. Then, I joined Q group in the spring of 2001, and worked on interpreter and meta-level of Q together with Fukumoto san. Unfortunately, I could not do a good job due to my mechanical background. I regretted this even if the project had been finished. However, Prof. Ishida encouraged me all the way. It is lucky for me to meet Prof. Ishida and join Ishida Lab. Later, I changed my attention to nature language understanding and machine learning.

Now, I am working for the Department of Computer Science and Engineering, Southeast University, Nanjing, China. Two years has passed, and I extended the syntax of Q language, and re-implemented it in XML. I also do researches about Semantic Web and Grid Computing. I am interested in knowledge capture, i.e., how to transform legacy web resources into structured ones automatically. Virtual space ontology and multi-agent planning constrained by scenarios is also attractive to me.



Lejun Zhu



From Oct. 2002 to Jun. 2003, I was in Ishida Lab as an exchange student. I was a graduate student then, just finished my courses and was looking for some interesting topic for my dissertation. On the first day I came to this lab, Ishida sensei introduced me to the Semantic Web, an emerging research area. I knew little about this area before, but I thought it must be interesting! I joined in the Semantic Web research group in Ishida Lab, and worked with Arai sensei, Cho san, Murakami san and Sugimoto kun. Under the guidance of Ishida sensei, we read a lot of published papers and looked for some point to research. Sometimes other colleagues joined our small seminar and provided opinions on related topics. Thanks to all your help, I got much knowledge in this area.

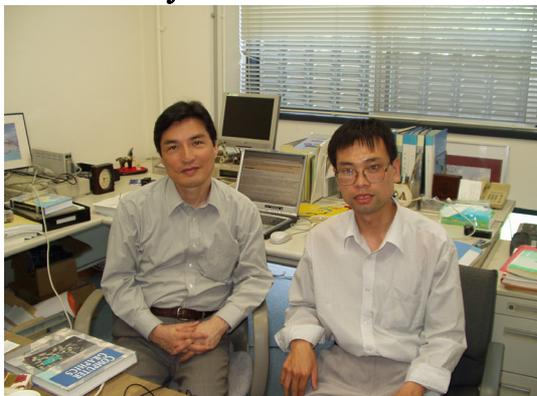
With the invaluable advice from Ishida sensei, I made much progress on my research and finished my thesis after my return.

I also enjoyed a happy life during my stay in Kyoto as well as doing my research work. I'm quite impressed by the beauty of this ancient city despite of some language

barrier. The first morning I woke up in Kyoto, I witnessed leaves fall from trees dancing in the wind of early autumn. And I walked on the Philosopher's Road in the season of cherry blossom. These are quite amazing scenes I've ever seen. But the best thing of all is to meet all of you in Ishida Lab, to work in the same room, to have parties, and to enjoy coffee or tea together. Hope you take me as your friends like I regard you all.

I have graduated from Jiao Tong University, and am now working as a software engineer in Intel China. I sincerely hope that our Lab will grow fast and be successful in various research areas, and wish you all be happy in research and in life.

Wan Zhenjie



“It will be a good experience to you”, Ishida Sensei said to me in an e-mail, until now I still remember these words exactly. Certainly, not only were there many stories in Ishida Lab and in Kyoto University, but also were there many beautiful memories about Kyoto city. In Next, let me tell you these beautiful memories in my mind one by one.

In my mind, I remember that there are six rooms in ishida lab, five of which locates in the fourth floor and one of which locates in the third floor. When I arrived the ishida lab just now, my seat was arranged at one small room that faces to the office of ishida professor in the forth floor. In this seat, I finished the first programming task that professor assigned to me. The first task was how to automatically segment Kimono of colorful photo as cloths by use of computer. I spent more than two months upon this task. Although I was tired, I was surprised that I could finish the unfamiliar task. Next, I selected the Semantic Web as my research direction. Under the help of professor Ishida, I know which direction I should do. Later, after I went back to Shanghai Jiao Tong University, I decided to select ontology of the Semantic Web as my doctor thesis. I cannot forget that this direction makes me win my doctor degree. Whenever I see the following photo, I can remember all these.



Except the research in ishida lab, I contacted other members in my daily life. They are Kubota san and Gao san, two secretary of ishida lab. They help me to apply for scholarship, residing room, etc. You can find much familiar person from the following photo.

In Shugakuin International House, a beautiful place, I lived through eight months. Here, I met many friends, including

professors and students from China, Indonesia, Korean, American, Russia, and many countries in Europe. I chatted, played table tennis, shopping, enjoy beautiful landscape with them.



The beautiful cherry blossom, the clean river, and the street railway in Kyoto City will stay in my mind forever.



Wang Xiaodong



Firstly, I want to express my profound respect to Prof. Toru Ishida and heartfelt congratulations to the anniversary of Ishida lab. The memory in Kyoto is the most valuable treasure of my life. The achievement of research in Ishida lab impressed me deeply. And Prof. Ishida's wisdom achievement on science research and his kindness gave me a fantastic experience for my first abroad study. I am also grateful to the faculty and students in the lab for their kindness. Without the help from Yamaki-san, Kubota-san, Toda-san and others I could have not overcome the difficulties on the arrival in Japan.

Fortunately I could join the project of Digital City. Without Prof. Ishida's help and guidance I could not finish my work in Japan. Those I got from him also helped me to complete my final thesis of my master course. Prof. Ishida's sagacity for science research, kindness to students and personal charm are what that I will always give my homage to.

It is auspicious for me to know so many friends. I regret that I could not speak Japanese and at that time my English were also very poor. But the warmth and kindness from my Japanese friends dissolve these isolations and my shyness. After I arrived Kyoto the lab gave me warm welcome party. I knew many new friends on the party, especially Shindome-san, his face and smile are always livid in my mind. I also sometimes remind me of the fragrance from the coffee Nomura-san cocked. When I worked in Shijo, Toda-san, a lovely girl, also gave me much help. Her dance and singing were important part of the lab.

For me Kyoto is a dreamful city. It is the most beautiful place where I have ever been. It is full of culture, sage and fantastic charm.

Now I am in Germany and study the information technology for business. Though it

is a complete new area for me to study, what I got for Prof. Ishida and friends in Kyoto still always benefit to me. The experiences in Kyoto have been my most important part of my life. As the 10th anniversary of Ishida lab I want to give my homage to Prof. Ishida and extend my best wishes to him and the lab.

Best Regards to Prof. Ishida, faculty and students in the lab!

Mao Wei Liang

Time is always passing so very fast and it has almost been four years after leaving Ishida lab. However, time does not fade away any of my beautiful memories of stay in Kyoto. Days there seem to be the same clear as ever and people there seem to be the same familiar and lively as ever. So many of times, they quietly come to my mind when I am in peacefulness. I deeply know that the experience with Ishida lab has been one part of my life.

I miss my advisor, Prof. Ishida, who gave me so much help and instructions. I had the great pleasure and fortune to have Prof. Ishida as my advisor. It is really very hard to exaggerate about how happy I am about this. His willingness to patiently share his



expertise coupled with a gentle guiding hand and high expectations inspired me to seek excellence. Prof. Ishida's brilliance, creativity, energy and of course personality, made this era of my life such a great experience.

I miss all the other people in Ishida lab, with them I had such a good time there. Kubota-San, Toda-San, Sogo-San, Yamaki-San... , whenever I recall the fond remembrance with them, happiness always comes to me. I know I will hold their friendship in my mind forever, though it is true I don't know whether I will have the chance again to see them.

I miss Kyoto University, though I am just one exchange student of hers. I had passed almost one year there. The beautiful campus, the library, the November Festival, the sightseeing activity for foreign students,..., I experienced the university life that I can't have in China.

I also miss the beautiful Kamo River, along which I went to the Nijo Digital City Research Center every day by bicycle. I believe I will never forget the sweet feeling of sitting along Kamo River, watching the sunset, the flowing water and the lovers there.

Now I have graduated from university for about 2 years and been one researcher in Shanghai Mobile. The experiences in Ishida lab, especially the edifications from Prof. Ishida, have been my precious wealth, which instruct and spirit my daily work and life. With them, I have been more confident of my successful future.

On the occasion of the 10th anniversary of Ishida lab, I would like to express my

heartfelt appreciation to Prof. Ishida again and send my best wishes to him, to all the friends there! I do believe Ishida lab's future must be more successful!

Ding Peng



I came to Ishida Lab in Sep 1999 as exchange student between Shanghai Jiaotong University and Kyoto University. 10 months life in Kyoto and Ishida Lab is an unforgettable experience for me.

The sightseeing of Kyoto is very beautiful. I often came to temples and mountains by bicycle alone and enjoy the winds and sunshine.

Every-week-seminar in Ishida Lab is very important to me. Before came to Japan, there was not such a regular seminar in my lab in Shanghai Jiaotong University, so that students in my lab have no good chance to discuss with each other. After the experience of seminar in Ishida lab, I got many ideas and comments from professors and other students. Now, I usually organize seminar in my lab and have very good results.

Ishida is a very good professor, not only because of his research experiences and achievement, but also his personality. He often gives us humors answer in discussion and makes us feel easy after a long time hard working.

Yoko gave me much help during the period of my staying in Ishida lab, especially in life living. Without her help, I would have to spend much time in arranging my living, such as looking for house, making bank cards and so on.

Too many other people gave me help, and live, discussed with me in that time. I cannot write down all of them because of word limitation of this article.

In the end, I'd like to say all of them: Thank you!

番外編

インド旅行記（藤代 祥之）

学校を休学して少しの間インドに行ってきた。インドはたくましく、何でもありな国だった。旅の中から実際のエピソードをいくつか紹介してみよう。

インドの東の方、湖に面したきれいなウダイプルという町の靴屋でのこと。この地方の人々は日本のスリッパみたいな形をしたラクダの革製の独特なサンダルをよく履いている。そのサンダルが欲しくなった僕は、チャイをご馳走になりながら靴屋のおっちゃんのだすサンダルを履き較べていた。なかなか気に入ったデザインが見つからず悩んでいると、なんととしてでも商品売りたいおっちゃんが

「どれがいいんだ？」なんて聞いてくる。

「この形でもっと色の濃いものがない？」と答えると、おっちゃんがすぐさま

「じゃあ、俺が塗ってやろう」なんて言い出した。冗談かと思ったけど、確かにものすごい色むらのあるサンダルが周りに並べてあったりする。「ああこれ、あなたが塗ったのね、なるほど。」と妙に納得する。さすがに塗ってもらうわけには行かないので、

「けど、塗ってもすぐ色落ちするでしょ。」と慌てて答えると

「じゃあ試してみるか？」と自信ありげにおっちゃんが言う。水をもらって色むらのあるサンダルに少したらししてみると、やっぱりきれいに色が落ちる。ほらねという顔を向けるが、おっちゃんは全く気にしていない様子。

「色が落ちたら、自分で塗ればいい」と笑顔で言う。

おっちゃんのその思考の素直さに完敗した僕は、結局そこでサンダルを買った。

さらに東のジャイサルメールという町でのこと。この辺りは内陸部で雨が少ないため砂漠地帯になっている。道路にラクダが荷を引いて歩いていたりとなんともものどかなところだ。そこで僕は前から楽しみにしていたキャメルサファリにいった。これはラクダに乗って砂漠を移動し寝泊りして帰ってくるというなんとも楽しげなツアーだ。

砂漠を進むラクダの動きは意外に早くて、鞍を持つ手をゆるめると背中から放り落とされそうになる。当然回りは砂だらけで、遠くを見ると砂丘が波のよううねっている。足元では風に吹かれたレースのカーテンのように、砂がなびいて流れていく。

夜になり星空の下に簡易ベッドを広げる。昼の暑さはなくなり、涼しい風が同じ方向からずっと吹き続けている。たまたま居合わせた羊飼いの青年が色々な話を聞かせてくれた。

「一人で寝ていると物音がして、遠くのほうから数人の人影が近づいてくるのがわかった。」このあたりでは夜中に寝ているところを襲い家畜をトラックで奪っていく家畜強盗がたまにあるそうだ。「すぐに猟銃を用意して、撃って二人を殺したよ。ほかの奴らはそれを見て逃げてった。次の日になって警察に連絡したよ。」と楽しげに言う。

彼はその同じ目・同じ表情で「羊の放牧でためたお金で自分のらくだを買って、キャメルサファリのガイドをするのが夢だ。観光客と話すのがすごく楽しいんだ。」と語っていた。

日本での凝り固まった思考や倫理観を持ってると、インド人のこの目的と手段が直結したような思考についていけなくなる。こんな調子で10億人も人が住んでいるのだからインドというのはなんとも不思議な国なのだ。

メンバー紹介

教員, スタッフ

石田 亨 (教授)

異文化コラボレーション実験を始めてから、中国に行くことが多くなりました。今年は5回も行きます。黄山で5時間、階段を昇り降りしてダウン。駄目ですねえ。足腰を鍛えるために、近くのジムに通いだしました。5年続いたデジタルシティプロジェクトもようやく終わります。こちらは、ちょっと一息です。

八槇 博史 (講師)

石田研二期生で、四回生での配属以来、かれこれ10年いすわっています。博士論文で行なった市場モデルを中心に、マルチエージェントとネットワークの関係のあたりをいろいろやってきました。研究と関係ありませんが、体重も順調に増加しており、この間四回生当時の写真をみて愕然としました。減らさないと・・・

中西 英之 (助手)

ここ数年、自分の席が10号館と二条ラボの2箇所にある状態が続いています。自転車による往復は疲れますが運動になります。たとえ自宅で寝ていても、もう片方のオフィスにいると思われまふ。二条ラボでは虫が頭上から降ってきたりしません。でも地下のクラブの騒音で机が振動します。そんなときは10号館で過ごします。このようなプチ二重生活を可能にしてくれたプロジェクトももうすぐ終わりです。私については、<http://www.lab7.kuis.kyoto-u.ac.jp/~nuka/>を参照。

荒井 幸代 (COE 客員助教授)

2003年1月より石田研。意思決定論、制御理論(古典&現代)、人工知能では「Planning」(中でも Reactive Planning), 「Machine Learning」(中でも Reinforcement Learning)が背景知識。人間&集団行動が嫌いな故に「ロボットの知能(中でも群知能)」実現に興味を抱いて研究開始するも、今は人間の可塑性(Plasticity)に辟易&感動。人間が人間より上等の物を創る鍵は“マルチエージェント系”か?

久保田 庸子 (コーディネータ)

今年度から秘書改めコーディネータという職名をいただきました。コーディネータを辞書で引いてみますと「いろいろな要素を統合したり調整したりして、一つにまとめ上げる係。また、そういう職業。」となっています。石田研の調整役が務まりますよう努力したいと思います。ここ数年、石田研の研究プロジェクトが中国との関わりが深くなったことへの影響か、中国に興味を持つようになりました。昨年秋から中国語会話を始めましたが、英語と同様こちらは今ひとつ。中国語が話せて二胡が引けるコーディネータをめざします。

デジタルシティプロジェクト

神田 智子 (JST 研究員)

デジタルシティ研究センターの研究員の神田智子です。1998年に私が当時勤めていた会社から石田先生に突撃インタビューをさせていただいたのがきっかけで、石田研にお世話に

なることになりました。異種の仮想空間を相互に接続するユニバーサルインタフェースの開発と、異文化間コミュニケーションのためのユニバーサルキャラクタの研究をしています。

小杉 照美 (JST 職員)

金融機関勤務などを経て 2001 年 8 月に石田研究室着任。

以来、連携部屋の住人となっている。

当初は大学研究室という独特の環境に戸惑い、緊張しながら過ごしていたが、このごろになってようやく馴染んできたように思われる。これからも、少しでも研究室のお役にたてるよう努めたいと思っている。京都生まれ。

研究員

Yang Jin (外国人共同研究員)

I am an associate professor in the College of Computer Science and Information Engineering, Chongqing Technology and Business University (CTBU). I was born in Chongqing P.R.CHINA, on December 4, 1968. I received B.E. and M.E. degrees from Chongqing University, China in 1991 and 2000. My major is computer science and information engineering. In 1991~1997, I worked in Southwest Aluminum Company as an engineer. I joined CTBU as a teacher and researcher in 2000. The primarily interest of my research is multimedia applications on the computer network. Now, I am a visiting researcher in Ishida lab, the Department of Social Informatics, Kyoto University. The period will last 1 year from April 1, 2004. The subject of mine is applications of Multi-Agent System. It is exactly Traffic Signal Control based upon distributed MAS.

博士課程学生

正木 幸子 (D3・社会人ドクター)

社会人学生。

勤務先：大阪商業大学。

現在休学中。

菱山 玲子 (D3・社会人ドクター)

東京都出身。博士課程進学と共に東京を脱出、京町家の工房で、世界一といわれる西陣の織物技術を凝縮した復元能装束を見て感動し、西陣に住んで2年半。最近、論文誌ではなく京都新聞のコラムに、京の暮らしや文化の話題を書いたエッセイが採択され、原稿料をもらいました。絶えず繰り返される研鑽に支えられ、過去から未来へと進化する西陣織の如く、学生生活も、京の暮らしも、極めたい、この頃です。

林田 尚子 (D3)

Computer Mediated Communication の研究をしている。しかし、本人の研究室での口数

は、極端に少なく、日本語での文章発話もかなり怪しくなっている。また、自宅住所が学校と同じ、なくらい、極度の面倒くさがり屋。最近、テニスにはまりだしたので、筋肉が少々つきすぎの感がある。岩塩好きである。

中塚 康介 (D3)

大阪府出身。ネットワーク、セキュリティと、移り気に課題を変えながら、現在は異文化コラボレーション実験ツールの開発に取り組んでいる。最近プログラミング強化月間中(のつもり)。歯の矯正中で、口の中が痛むのと頭痛がするため、いつも眠い。眠くないのは寝ている時だけだとも思う。この頃は寝ている時も眠いような気がする。方々に御迷惑をおかけしてばかり。すみません。

赤埴 淳一 (D2・社会人ドクター)

村上 陽平 (D2)

石川県出身。でも「出身は？」と聞かれれば「金沢」と答える。「へー横浜？」と神奈川と勘違いされるが「金沢」と答える。それぐらい金沢を愛する男。うーん、いつの間にやら石田研に5年、京都に8年。もう金沢に住むことないのかなあ。研究は僕の4回生のときに産声をあげたQをかれこれ4年以上続けている。そういやあの時はシドニーオリンピック、今年のアテネ。月日が経つのは早い。いつの間にやら長老 No.2！そろそろ世代交代か。

鳥居 大祐 (D2)

東京生まれ京都市育ち。富田研で学士号、市場・組織情報論分野で修士号を取得。現在、石田研にて博士課程在籍中。マルチエージェントシミュレーションにおけるモデル構築手法を研究テーマとする。実家が大学から近すぎて下宿ができないのが不満。趣味は、野球とヴァイオリン。学部時代は、京都大学交響楽団(京大オケ)に所属。その間、ヴァイオリンだけじゃ飽き足らず、オケ内野球サークル dengyo's を創設、大会への参加や他チームとの交流試合を積極的に行う(現在も活動中)。

修士課程学生

深田 浩嗣 (M2)

菅山 光城 (M2)

CHO Heeryon (M2)

家族みんな声がかいんです。父はもともと、母は父の影響、私と姉は多分遺伝のせい。五つの小学校、二つの中学校、二つの高校、二つの大学に通い、新聞社とベンチャー企業で働きました。もう一度やりたいことはスカイダイビング。もう絶対やりたくないことは爆弾酒(ポクタンジュ)の一气飲み。将来の夢はクレイ数学研究所のミレニアム懸賞問題を解くことです。夢は大きく！(でかすぎるっっちゃうねん。) 韓国ソウル出身。

板倉 豊和 (M2)

みなさん、岡山県といえば何でしょう？誰もが口をそろえて桃太郎！マスカット！さびしいですね。「他に何が？」と言われると困ってしまいますが、素晴らしいものがいっぱいですよ。研究室で岡山県旅行が計画されず悔しい限りです。僕は生粋の岡山県人。京都に来て早や6年、住民票も移さず関西弁にも侵されずやってきました。最近手に入れた憧れの車、旧ミニ・クーパーももちろん岡山ナンバー。見かけても煽らないでくださいね。

杉本 悠樹 (M2)

八槇先生と鳥居さんの血を引く洛星高校ブランドです。
いや、ブランドというほどではないかもしれませんが。
いや、それ以前に出身高校が一緒だからといって、何があるわけではありません。
いや、それほど自分の高校を卑下しているわけでもありません。
いや、やる気がないわけでもありません。

杉山 香織 (M2)

1980年4月18日生まれ。B型。大阪の北部で育つ。趣味は観葉植物栽培（我が家では南国産の生命力の強い植物しか育たない）。書道三段。性格はものぐさそのものになってきました。土壇場にならないとやる気を起こさない。最近、真面目だったころの自分を取り戻したいと切に願っています。

藤代 祥之 (M1)

M1の後期から一年間休学していましたが、今年の後期から復学しました。研究は休学前から携わっていたICE関係を続ける予定です。休学中は、結婚・インド旅行・子供誕生と色々なイベントがありました。インドは本当の異文化でしたが、結婚や出産も言語こそ同じであれ驚くようなことばかりで異文化は意外と身近にあるものだと思い始めました。異文化理解はまだまだ研究の必要がありそうです。

椎名 宏徳 (M1)

千葉県出身。A型。修士課程から石田研に在籍。エージェントチームに所属し、研究テーマを模索中。趣味は寝ることと言えるほどよく寝ているかもしれない。熱烈に応援する球団はないがプロ野球の結果をチェックするのが日課。ジャグリングサークルに所属していたが、最近さっぱり練習していないので研究室では未披露。

田仲 正弘 (M1)

奈良育ち。ピアノ演奏が唯一の趣味にして生活の中心。特定の音楽団体には所属していないが、たまにカフェやレストラン・ミニコンサートなどで弾いたり、アマチュア楽団に手伝いに行ったりしている。また甘いものが好きで、京都中のあらゆるケーキ屋を制覇したいと思っている。専門はチョコレートケーキ。

中島 悠 (M1)

石田研1年目。マルチエージェントの研究をする予定。去年までは大阪大学のシステム系の学科にいた。出身は東京だが、関東と関西を行き来しているため、あやしげな標準語と

関西弁を操る。最近の趣味は、一人で市内を散策すること。中学時代に修学旅行で訪れた場所が近くにあることに軽く感動を感じる。

中村 大介 (M1)

いつも笑顔を絶やさぬ、自称石田研の癒し系。ラーメンをこよなく愛する。ラーメンの食べすぎでビタミンが不足し、口内炎が頻繁にできるのが最近の悩み。趣味は漫画集め。生活がどんなに困窮しようともそれだけはやめられない。将来の夢は自分の家に漫画専用の書庫を持つこと。夢実現のために毎日がんばっております。

三田 泰正 (M1)

兵庫県西宮市出身。好奇心が強く、興味を持ったものに対しては分野を問わずすぐに首を突っ込む性格。ただし飽きっぽいので、何事も長くは続きません。現在は、就職活動が半年後にひかえているので資格取得や英語の勉強に励む毎日です。知財に興味があるので、難しいですが在学中に弁理士の資格を取得したいと思っています。

森本 智史 (M1)

修士課程学生(連携分野:市場・組織情報論)

津田 宜秀 (M2)

片岡 俊行 (M2)

平成11年の大学院在学中に会社を設立して、早5年が経とうとしています。その間、研究室に籍を置きながらビジネスを中心に行っていますが、東京の居住しているため、なかなか京都の様子がぼんやりとしています。学部の頃から、インターネットとコミュニティーに非常に興味があり、その延長でビジネスができてるのは非常に楽しい毎日です。

井筒 清史 (M2)

連携分野篠原研究室 M2 の井筒 清史です。大阪府出身です。同志社大学工学部機械システム工学科からやってきました。中学・高校とサッカーでキーパーを、大学1, 2回生ではトライアスロンを、3回から現在まで空手道場に通っています(初段)。趣味は音楽鑑賞, カラオケ, 映画鑑賞, 空手, ショッピングなどです。一度はバンドでボーカルをしたいという野望をいただいています。現在は企業 PR のためのインターネット情報分析手法の開発というテーマで研究を進めています。

渡辺 亮 (M2)

吉村 琢 (M1)

ある種の静寂と沈黙に対して恐怖さえ感じ、常に話をしている変わり者。また情報学には珍しい? 肉体派で、体を動かすことをこよなく愛するが、食べることも大好きなためなかなか痩せず、悩み中。バイトに精を出し、学費を稼ぐ苦学生?

修士課程学生(連携分野:情報セキュリティ)

長尾 若 (M2)

現在、情報セキュリティに関して研究しています。特に暗号に関して研究していますが、研究だけでなく旅行や温泉に行くこと、なんか芸術的なこと?も最近興味あります。ドライブも好きで、よく北陸なんか出かけます。でも、食べることも寝ることも好きで運動やらねばと思う今日この頃です。サッカーとか好きなんですけど、人が集まらないとできませんので、誰か誘ってください(笑)

土居 誠司 (M1)

香川県出身。何よりもうどんが好物。地元以外ではうどんは一切口にしない。ただし、冷凍うどんは除く。好きなことは、いい意味で人の期待(思惑)を裏切ること。好きな言葉は、「ルールは破るが、マナーは守る」(出处不明)。ヘルニアを患い、20代にしてもう走れない体になっている。長時間のデスクワークも厳しい。特に冬場は。

牧田 俊明 (M1)

兵庫県出身。2004年京大工学部情報学科卒。趣味は特にはないですがスポーツは好きです。最近は運動していないので体がなまっています。中学は軟式テニス部、高校のときはバスケットボール部でした。大学では主に硬式テニスをやっていました。最近はソフトボールが楽しいです。

学部生

鐘本 英輝 (B4)

岩部 正明 (B4)

香川県高松市出身。周りの雰囲気飲み込まれず、かたくなに京都で讃岐弁を守り通す讃岐人の鑑。ただ、関西弁と讃岐弁の間に大きな違いがないため、そのことは誰にも知られていない。讃岐うどんと釣りとOH!くんをこよなく愛する。今シーズンは台風が多く海が荒れていたために、釣りに行ける機会が例年より少なく残念に感じている。そのうえ釣果も最悪であったため、少々欲求不満気味。気を少しでも紛らせるために、早くも来シーズンに向けての計画を立てはじめている。

大石 隆俊 (B4)

今年から石田研に配属された大石です。FreeWalkを使った避難行動シミュレーションの研究をしています。趣味はテニス...のはずだったのですが最近はあまりやってません。たまに試合をすると翌日必ず筋肉痛に襲われる羽目に。テニスの他には音楽&映画鑑賞もします。(最近のお気に入り映画「ラストエンペラー」)

小西 信次 (B4)

自転車であちらこちらを旅行してみても回ることが大好きな学部4回生の小西と申します。研究ではAgentグループに所属し、FreeWalkに関連した研究をさせてもらっています。

石田研究室の暖かい雰囲気の中、いろいろと精進していきたいと思っていますので、どうかよろしくお願いします。

谷塚 俊輔 (B4)

京都大学工学部情報学研究科石田研究室 4 回生。兵庫県尼崎市出身かつ在住。現在は **FreeWalk** を用いた仮想災害訓練の避難シミュレーションの研究を行っている。その他に興味を持っているものにコンピュータを介した人間同士のコミュニケーションなどがある。

宮崎 真介 (B4)

静岡県浜名郡出身。趣味はバレーボール・マラソン・水泳・カラオケ・飲み会・釣りなどなど。まだまだ行ったことの無い都道府県が多いのでそれを減らすことがテーマです。まずは北海道に行きたいです。石田研での生活ですが、様々な人がいて日々発見の毎日です。先輩方にいろいろなことを教わりつつ日々を大切にしていきたいと思います。

山根 昇平 (B4)

広島県生まれ大阪府育ちの鳥取県出身。研究室内ではコーヒー嫌い（においがダメ）の **Scheme** 好きとして知られ、現在はメガナビゲーションのプラットフォーム開発に関する研究をしている。趣味は TV ゲーム。どんなに忙しくても、睡眠と TV ゲームの時間はきちりとしてしまうのが欠点である。

渡邊 亮 (B4)

石田研究室 4 回生渡辺亮といいます。研究室の先輩に同姓同名の方がおられるので先輩方からは **Jr.** と呼ばれています。研究室配属時には石田先生の「同姓同名だから」というご配慮 (?) により同じ部屋に割り当てて頂きました。しかし **FreeWalk** の研究をすることになり、現在は二条ラボで活動しています。水泳部に所属していた為、夏場は「黒い」と皆から会えばまず言われました。最近は白くなってきています。

OB・OG 一覽

2004年

劉 志強(交換留學生)
野村 早恵子(JST 研究員)
伊藤 英明(D)
陳 磊(M)
福本 理人(M)
河添 智幸(M)
三木 武(M)

坂本 知子(M)
志水 信哉(M)
板倉 陽一郎(M)
西垣 秀哉(M)
河合 拓也(B)
藤井 雅雄(B)
柳沢 祐二(B)

2003年

高 志強(ポスドクフェロー)
朱 樂駿(交換留學生)
平松 薫(D)
神田 崇行(D)
岡本 昌之(D)
野村 早恵子(D)

中田 稔(M)
新留 憲介(M)
早水 哲雄(M)
安岡 美佳(M)
山中 信敏(M)
田辺 克宏(M)

2002年

Wang Zhenjie(交換留學生)
十河 卓司(D)
小山 聡(D)
中澤 諭 (M)
松原 啓明(M)
南 一久(M)

吉住 貴幸(M)
Tu Cheng Liang(M)
田中 裕一郎(M)
松本 賢治(B)
横井 隆宏(B)

2001年

Wang Xiaodong(交換留學生)
服部 文夫(D)
三浦 輝久(D)
梁 連秀(M)
小久保 卓(M)

羽河 利英(M)
金子 善博(M)
佐藤 哲郎(M)
Teh Siew Ling Christine(B)

2000年

石黒 浩(教授)
Ding Peng(交換留學生)
Mao Wei Liang(交換留學生)
山内 裕(M)
竹内 健治(M)

武馬 慎(M)
田中 慎司(M)
Martin David(M)
東 康平(B)

1999年

西村 俊和(助手)
福原 美三(D)
花野 真也(M)
上原子 正利(M)
中野 博樹(M)

村上 直(B)
林 幸一(B)
川村 武志(B)
久貝 智洋(B)

1998年

Marianne Hoffmann(研究員)
木元 克己(ポスドク)
高野 真一(M)
濱田 伸一郎(M)
登 忠 (Zhong Deng)(M)

佐川 立昌(B)
高瀬 俊郎(B)
惠 亮 (Hui Liang)(B)
植田 浩司(R)

1997年

新保 仁(D)
篠原 拓嗣(D)
田中 吾一(M)
吉田 力(M)
河原 功志(M)
和田 洋征(M)

岡田 慧(B)
古村 隆明(B)
伊藤 暢康(B)
北村 宜之(B)
後藤 忠広(R)

1996年

佐藤 律子(M)
顧 程 (Cheng Gu)(M)
梶原 史雄(B)
浅山 和典(B)

Cheng Soon Giap(B)
川西 隆仁(B)
常 兵(R)
伊藤 実奈子 (旧姓)(S)

1995年

草地 良規(B)
佐藤 克彦(B)
杉本 崇行(B)

武田 純(B)
大坪 基秀(R)

1994年

前山 浩二(B)

水野 智文(B)

博士論文概要
(2001年度～2003年度)

2003年度博士論文

ANALYSES OF ACADEMIC COMMUNITIES USING

INFORMATION ON THE WEB (野村 早恵子)

本研究の目的は、実世界における研究コミュニティがどの程度 Web 上に反映されているかを明らかにすることである。本研究では、研究対象として計算機科学研究者の個人 Web サイトを選んだ。当該分野では *CiteSeer* の影響から、個人 Web サイト上に論文情報などを発信する傾向が高いからである。分析には、以下の二つの手法が用いられた。

1. Web 内容分析

まず、個人 Web サイト上に研究者がどのような情報を発信しているのかを明らかにするため、Web サイトの内容解析を行い、ドイツ、日本、韓国、米国の4カ国を比較した。データは200大学に所属する987人の計算機科学の研究者である。結果として、個人 Web サイトに発信される情報は国によって違いがあることが認められた。米国の研究者は、詳細な研究内容、出版リスト、pdf形式の論文掲載など、“研究者”としてのアイデンティティを強調する。他方、日本では、研究に関してはあまり詳細に述べず、趣味などの個人情報および学歴が他国に比べて詳細に報告される。韓国では所属機関および学歴が強調される傾向にあり、ドイツの研究者は学歴についてほとんど述べていないことがわかった。

2. Web 引用解析

Web 引用解析は、文献引用解析を Web に適用したもので、Web サイト間の共引用関係および直接引用関係を調べるものである。計算機科学研究者によって制作された3,000余りの Web サイトと8,000本あまりの論文を調査した。その中から、Web・文献の両方で被引用数の高い上位200人の研究者を対象として、Web 著者共引用解析および Web 相互引用解析を行った。その結果、1) Web 著者共引用解析が、文献著者共引用解析により得られるクラスタのスーパーセットとなる強い傾向を得た(図1)。また、2) Web 相互引用関係に対する共著関係の割合は、Web 引用関係に対するそれよりも有意に大きいことがわかった。

さらに、研究コミュニティに関する著名なサイトを抽出するため、直接引用解析を用いた HITS アルゴリズムを分析・改善した。よく知られる topic drift 問題に対し、本研究では2つの改善手法、1) 部分空間への射影法 および 2) 計算サイト集合縮小法を適用した。その結果、あらゆるトピックにおいてユーザが意図するコミュニティを抽出することに成功した。また、3,878人の計算機科学研究者の Web サイトに適用したところ、各分野に分かれて抽出されたベクトル上で、有名な教科書や論文の執筆者、プログラム言語を開発した研究者の Web サイトを抽出することに成功した。

以上のことから、計算機科学分野では個人 Web サイトは十分当該コミュニティの様相を反映したものであることが確認された。



図1. クラスタと因子負荷量でソートされた Web (左) と文献 (右) 著者共引用行列 ($n=200$)

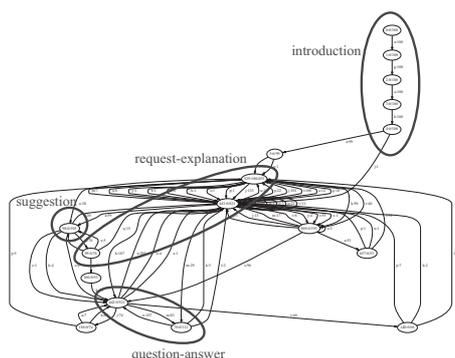
2002年度博士論文

Design and Applications of Learning Conversational Agents (岡本昌之)

本研究の目的は、人々のコミュニティに参加する学習対話エージェントを構築するために必要な2つの課題の解決である。

- 対話を通じて情報提供を行うエージェントの構築手法
- 共通理解を促進するための情報共有環境の構築

前者に対しては、エージェントの構築手法として Wizard of Oz 法と呼ばれる対話事例の収集手法と対話モデル学習を組み合わせた漸次的な対話エージェント構築手法を提案し、Web上で動作するエージェントシステムを構築した。対話事例収集では、タスク毎にあらかじめ決められた発話タグを過去の発話履歴から推論・付加することで人間の負担を抑えながら機械による処理を容易にする手法を提案した。また、対話モデルには有限状態機械を利用し、その学習アルゴリズムとして、キャッシュを用いて漸次的なデータの増加に対する再計算コストを減らす拡張を行った状態マーキング法による確率決定性有限オートマトンの学習アルゴリズムを提案した。観光案内対話での評価実験を通じて、計算コストと対話事例収集の負荷の両面から本手法の有効性を確認した。



学習された対話モデルの例



ユーザの振る舞いに基づく
シーンドリブン対話の様子

後者に対しては、対話エージェントが話題を提供し、人間同士のコミュニケーションを支援する環境として、大型スクリーンを用いた話題提供環境を構築した。等身大の大型スクリーンによるインタフェースを備え、参加者が容易に個人同定を行いつつ互いの背景やプロフィールを共有するコミュニケーション支援システムを設計・実装した。言語や文化的背景が異なるなどの困難を伴う異文化コミュニケーション環境において、実世界およびリモートの環境でそれぞれ実験を行い、その有用性を確認した。

また、実際の対話では検索・案内・教育等で行われるタスク指向対話だけでなく、街中で歩いている時にふと目にしたものについて話すなどの、前後の文脈に依存せずその場の状況がきっかけで発生する対話も重要である。本研究では、そのような対話をシーンドリブン対話と定義し、シーンドリブン対話を行う対話エージェント、および実際に利用しながらシーンに応じた対話ルールを組込む手法を提案し、多数のユーザが参加するコミュニケーション環境における対話エージェントシステムを構築した。

構成的アプローチによるコミュニケーションロボットの開発（神田崇行）

近年のロボット工学の進歩により、人間型ロボットが盛んに開発されるようになってきた。人間型ロボットは、その腕や頭部と言った人間に類似した身体機能を用いることで、表情や身振り、視線といった非言語情報による対話ができ、人間同士で対話する場合と同様の自然で円滑なコミュニケーションを可能とする。また将来的には、物理的サポートだけでなく、コミュニケーション面からも人間をサポートするような、日常生活の中で人間のパートナーとして活動するコミュニケーションロボットが実現されると考えられる。

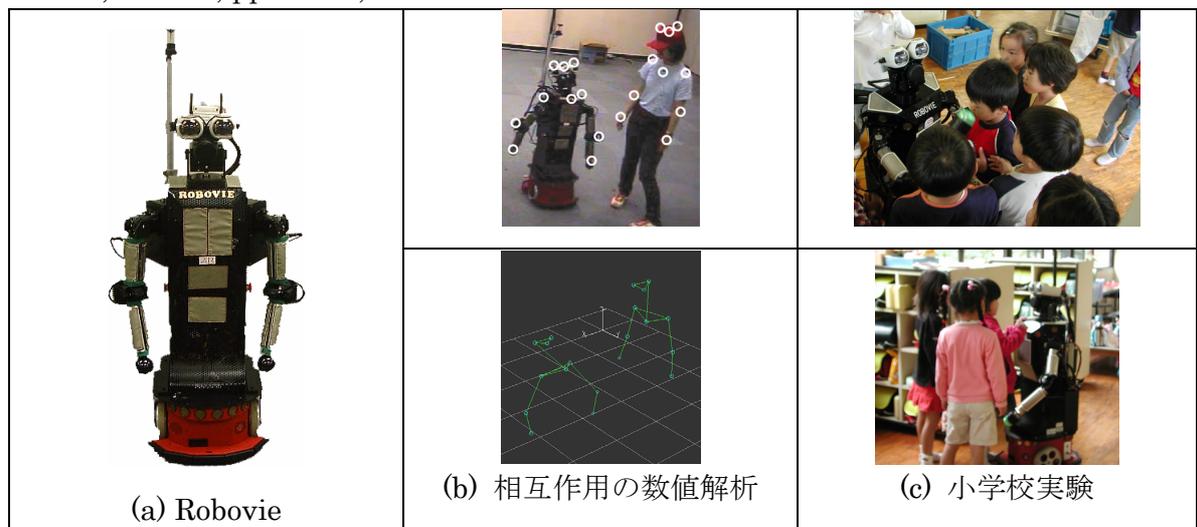
コミュニケーションロボットの実現を目指し、これまでに自律対話型ロボット Robovie の開発を行ってきた（図(a)）。Robovie は視覚・聴覚・触覚センサとその処理機能をすべて内蔵した完全自立型のロボットであり、人間似の身体機構によるゼスチャや合成音の発話により人々に働きかけ、また主にその反応を認識することにより自律的に人々と相互作用を続けるように設計された。これまでに、握手、あいさつ、じゃんけん、抱擁といった 100 種類の対話ビヘービアとそれを制御するための 800 の簡単なルールが実装された[1]。

また、人ロボット相互作用の評価のため、実験室環境において SD 法のような心理学的な主観評価法とモーションキャプチャシステムからの身体動作の客観観察法（図(b)）を比較する中で、手の動きや移動といった単純な相互作用行動の大きさよりも、むしろアイコンタクトや腕の動きの同調といった協調的動作の重要性が見出された[1]。

さらに、ロボットが将来的にコミュニケーションタスクを主体として活躍する可能性を見出すため実験を行った。実験では、ロボットが転校生のように英語のみを日本の小学校において話しながら子供たちと相互作用を続けた（図(c)）。二週間に渡るこの試みにより、子供たちの英語の聞き取り能力に対してポジティブな効果が見出されたことから、将来的なコミュニケーションロボットの活躍の可能性が示されたと言える[2]。

[1] T. Kanda, H. Ishiguro, M. Imai, T. Ono, "Development and Evaluation of Interactive Humanoid Robots," *Proceedings of the IEEE*, 2004. (to appear)

[2] T. Kanda, T. Hirano, D. Eaton, H. Ishiguro, "Interactive Robots as Social Partners and Peer Tutors for Children: A Field Trial," *Journal of Human Computer Interaction*, Vol. 19, No. 1-2, pp. 61-84, 2004.



図：コミュニケーションロボット Robovie とこれを利用した実験風景

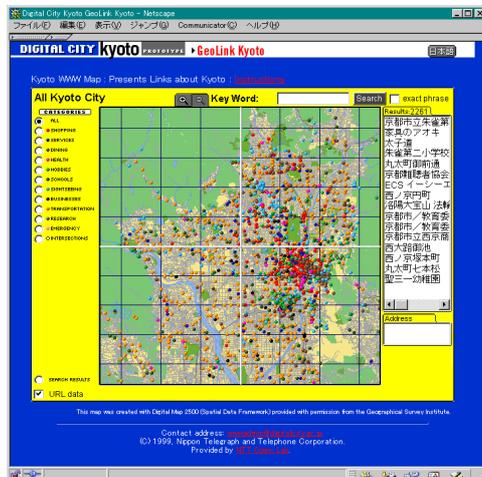
地理的関連性を用いた Web 検索技術の研究（平松薫）

世界中の情報へアクセスできるインターネットにおいても、地域性を持った情報流通形態が注目を集めはじめており、地域ポータルサイトやデジタルシティの構築が各地で始まっている。都市に関する情報も増加する傾向にあり、Web ページの形でネットワーク上に大量に発信されつつある。ただ、現在発信されている都市に関する主な情報は、街中の繁華街にあるレストランの情報や駐車場の空き情報など、人口や建物と同様に都市中心部に集中する傾向にある。従来から、地域限定のニュースやイベント情報、地図情報などを提供する情報サイトはインターネット上に存在している。しかし、これらのサイトが提供する情報検索手段は、都市部に集中する大量の情報から必要な情報を選び出すためには不十分と考える。

この地域情報検索に関する問題は、インターネット上の電子的な情報空間と都市の物理的な空間を融合させ、使いやすいユーザインタフェースから利用できるようにすることで解決されると予想している。さらに、こうした情報空間を都市に住む人々が共有できるようになれば、情報を媒介としたコミュニティが形成され、街への帰属意識も高まっていくと予想される。しかし、インターネット上の Web サイトを都市生活のための新たな社会基盤として機能させるためには、それに付随する様々な要素技術の開発が必要となる。

そこで、都市の日常生活に密着した地域情報サービスを実現することを目的として、電子化された地理情報を利用してインターネット上の Web ページ間に地理的なリンクを動的に生成し、Web 情報空間を拡張する拡張 Web 空間を提案した。この拡張 Web 空間では、Web ページの属性に関する条件とハイパーリンクと地理的なリンクに関する条件を組み合わせ、Web ページの列を検索することができる。また、拡張 Web 空間に対する問い合わせを SELECT-FROM-WHERE 形式で記述できる検索言語を定義し、複数の検索例を用いてその記述性を確認し、実際のインターネット上の Web ページと京都の地理情報を用いて、同提案に基づき試作した情報検索システムの最適化手法の検討を行った。

また、1999 年から 2001 年にかけてデジタルシティ京都の実験サイトにて公開運用を行った。上記のうち、地域情報検索のための地図インタフェースは、実験期間中に Web サーバに記録されたアクセスログの分析を通して、地理的に情報が集中する地域におけるユーザの検索行動も明らかにした。



Query Refinement for Domain-Specific Web Search (小山聡)

本論文は、World Wide Webにおける情報検索の困難を解消する手段としての、特定のドメインに特化した専門の検索システムを、利用者の質問の精錬を通して実現するための研究をまとめたものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

(1) Webからドメインに関係するページだけを検索できる専門検索エンジンを構築するための新しい手法を提案した。“検索隠し味”と呼ばれる、ドメインのページを分類するキーワードのブール式を利用者の質問に付加し、汎用検索エンジンに転送することで、専門検索エンジンを実質的に構築する。この手法により、単純なシステム構成で、応答性能の良いドメイン専門検索エンジンを構築することが可能になった。

(2) 検索隠し味をWebページの訓練集合から抽出する機械学習のアルゴリズムを開発した。決定木を用いて抽出された初期の複雑なブール式を、検証集合に対する適合率と再現率の調和平均に基づいて単純化することで、適合率と再現率のバランスのとれたブール式を、汎用の検索エンジンに投入可能な小さなキーワード数で抽出できる。この手法を用いれば、分類されたWebページの集合があれば、専門的知識なしに専門検索エンジンを構築できる。料理レシピ検索のドメインで評価実験を行い、本手法で抽出された検索隠し味の有効性を実証した(図1)。

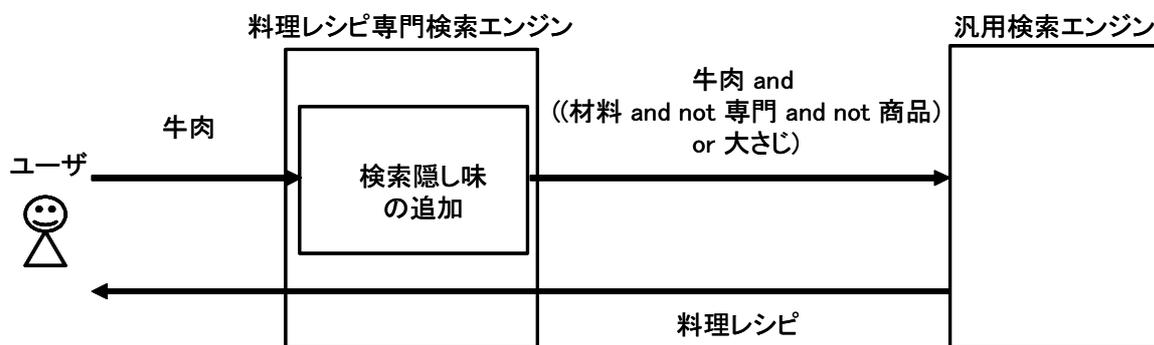


図1:料理レシピ専門検索エンジンの構築例

(3) ドメインのWebページ集合内で利用者の要求を満たすページを検索する問題に、連想ルールを適用する手法を提案した。ドメインに固有の検索対象の属性を考慮して連想ルールを適用することにより、検索の制約条件の緩和や制約条件の追加といった質問の精錬を行うことを可能とした。

(4) ドメインのWebページ集合から抽出された連想ルールを、キーワードのクラスタリングと統計的検定を用いて精製する手法を提案した。この手法により、ドメイン内での検索に有効な連想ルールの割合を向上させることができる。レストラン検索のドメインにおいて、提案手法の有効性を実証した。

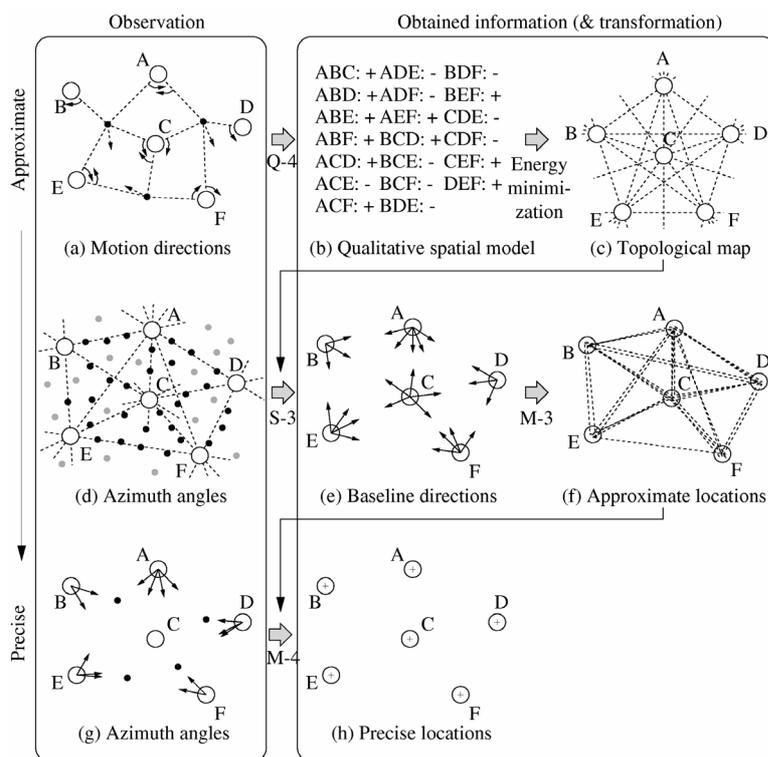
Localization of Sensors and Objects in Distributed Omnidirectional Vision

(十河卓司)

複数の視覚センサからなる複数視覚システムは、実用的な視覚システムとして近年注目されている。本論文では、そのようなシステムの一つの枠組みである分散全方位視覚について、その基本技術の一つであるセンサや物体の位置決め手法と、応用システムについて議論している。

1章の序論に続き、第2章では、分散全方位視覚におけるセンサや物体の位置決め手法として、ステレオ視などの既存の手法を適用し、既知の情報、観測可能な情報などの条件の違いにより5通りに分類して述べている。

このうち物体の観測に基づくセンサの位置決め手法は、非線形な数式を用いるため解が不安定になるという問題がある。そこで、そのような数式を用いないセンサの位置決め手法として、第3章では物体の観測情報を統計的に分析してセンサの位置を求める手法、第4章では物体の移動方向という定性的な情報のみに基づいてセンサの定性的な位置を求める手法を、従来にない新しい手法として提案している。第5章では、これらの手法を実際のシステムに応用する際の組み合わせ手法や問題点などについて議論している。



第6章では、分散全方位視覚の応用としてロボットの誘導システムを提案しており、事前のセンサの位置決めを必要としない誘導手法について述べている。第7章では、実時間人間追跡システムを提案しており、実時間で物体の対応を求め、観測誤差を補正する手法について述べている。

本論文の成果は、新たに提案する統計的・定性的な情報に基づく位置決め手法を含め、分散全方位視覚におけるセンサや物体の種々の位置決め手法を、その利点・欠点とともに明らかにしたこと、および実システムの構築により分散全方位視覚の頑強性を実証したことである。

修士論文概要
(2001年度～2003年度)

2003年度修士論文

モバイルエージェントによる証明書認証の効率化（福本理人）

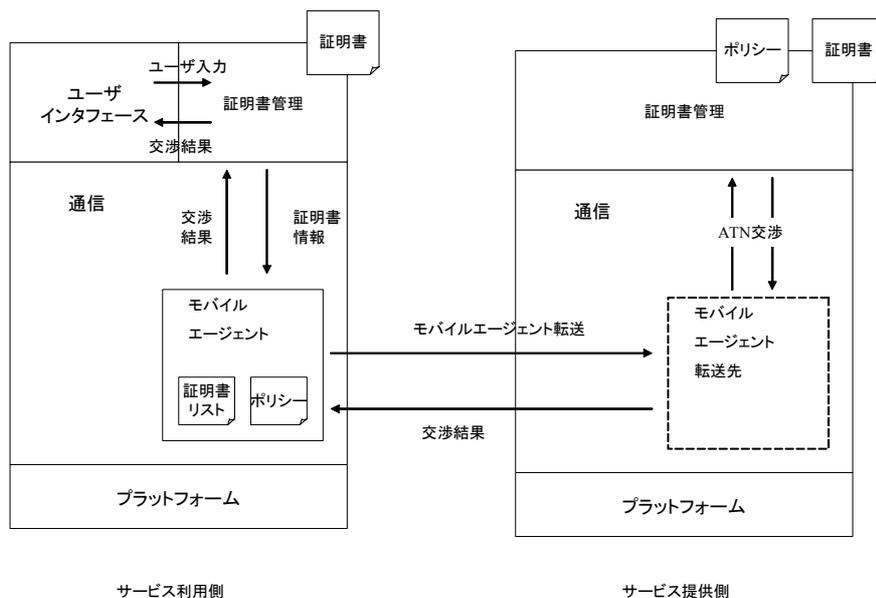
近年、あらゆる機器をネットワークで結び、連携される「ユビキタスネットワーク」システムの提案が多く行われている。このユビキタス環境において証明書による認証を実現される際の問題点を指摘し、それに対する解法としてモバイルエージェントを用いた方式を提案した。

証明書による認証を自動化して実現させるための先行研究として ATN(Automated Trust Negotiation)がある。ATN は、証明書のやりとりを介して取引相手との信頼関係の構築を目指す。ATN では、サービス利用側とサービス提供側は共に、証明書集合と、証明書を開示するための方針であるポリシーを保有し、開示できる証明書を交互に伝達することで、信頼構築を実現させる。

しかし、実際に ATN をユビキタス環境で利用するための問題としては無線による通信における接続確立等にかかる時間の問題や、多数のサービス提供主体に対して同時並行で交渉を行う必要がある問題などがある。それらを解決するために、モバイルエージェントを用いたアーキテクチャを提案した。

一方、モバイルエージェントを用いることで、新たに発生する安全性に関する問題もある。例えば、モバイルエージェントの盗用や、モバイルエージェントの持つ内容がサーバ側に盗聴されてしまうこと、またモバイルエージェントの不正な実行などがそれに当たる。これらに対する解決法として、モバイルエージェントのアーキテクチャの中で、内部情報の暗号化や、エージェントの難読化、耐タンパ性を持つハードウェアキーのような客観的に安全性が保証されることが保証される部分の上での実行などが考えられる。

以上を踏まえ、今回提案したアーキテクチャを以下の図に示す。



仮想避難訓練のためのエージェントの行動ルール構築（河添智幸）

現在、災害が発生した場合に備えての避難訓練が様々な場所で行われているが、大規模な建物でこうした避難訓練を行うことは現実には難しい上に、避難者が本当に危険な状況にさらされるような訓練を行うこともできないなどの問題がある。しかし技術の進歩により、現実空間で起こる現象をコンピュータ上でモデル化してシミュレーションとして行うことや、リアルタイムに三次元空間を表示し、その中で自由に行動することができるようになってきている。こうした技術を用いることで、仮想空間の中で避難訓練を行い、現実で訓練することが難しい場所や状況での訓練を行うことが可能になる。

こうした避難訓練を行う際に、コンピュータが動かすエージェントを仮想空間内に多数参加させることができれば、実際に避難する人が一人しかいない場合でも、多人数での避難を体験することができる。しかし、このようにエージェントを避難訓練に参加させる場合、エージェントがどういった行動ルールに従って避難を行うのか、つまりエージェントが行う意思決定のプロセスを定める必要があるが、こういったエージェントの構築方法については一般的な手法が確立されておらず、行動ルールをどのように決めていけばよいのかという点から調べていく必要がある。また、仮想空間で人間とエージェントが共に避難を行う場合、エージェントが自分の意思を人間に理解させるためにはどのように行動すべきなのかという点についても調べなければならない。

本研究では、仮想空間で避難訓練を行うために必要なエージェントの行動ルールを構築するというを目的として、3段階のステップを踏むことで段階的に行動ルールを詳細化していくという手法をとる。各ステップでは、シミュレーションや実験の結果から知見を得て、それをエージェントの行動ルールに反映させていくという手法をとることで、エージェントの能力を段階的に高めていく。

第一のステップでは、全てのエージェントがコンピュータによって動かされるシミュレーション用の行動ルールを、実世界で行った実験を基にして作成する。第二のステップでは、仮想空間内のエージェントの動きを被験者に見せて学習させるという実験を基に、エージェントが人間の目から見て不自然な行動をとらないように改良を行う。第三のステップでは、被験者に仮想空間内で避難実験を行わせ、その結果を基にしてエージェントがどういった意思決定を行うのかという点を改良し、最終的なエージェントの行動ルールを作成する。

最後に、上記の三段階のステップによってシナリオを作成した際の構築方法についての分析を行った。その結果、第一のステップでシナリオの骨組みを作った後に、第二のステップではエージェントの外面的な振る舞いを、第三のステップではエージェントの内面的な振る舞いをそれぞれ修正することになり、その結果としてより高度なシナリオを作成することができたということが判明した。

以上より、本研究の貢献として、仮想空間内で避難訓練を行う場合のエージェントの行動ルールをシナリオという形で作成することができたこと、およびその際のシナリオの構築方法を一般化することで、各ステップがどのような意味を持っているのかについて明確化することができたことが挙げられる。この研究の成果は、将来大規模な避難訓練を仮想空間内で行う場合に、エージェントのシナリオの作成という面において大きな助けとなるだろうと考えている。

セマンティックアノテーションを用いた Web リンク解析 (三木武)

Web のリンク構造が人間の社会構造をどう反映しているかを解明するため、本研究はリンクを Web サイトの著者らの間の社会的な関係として捉え、大規模な Web サイト群から人間関係ネットワークとしてのコミュニティを抽出する。データとして *CiteSeer* から抽出した 8,811 論文の引用・共著関係、さらにそれらの論文の著者の Web サイト 3,878 件を用いる。

まず、同じ分野の研究者をクラスタリングする書誌引用解析手法である共引用解析を、Web リンクに適用した。結果、Web 共引用解析が抽出したクラスタは、文献共引用解析で抽出したクラスタをいくつか含む構造が現れ、Web 共引用解析は文献共引用解析に比べて広い研究分野を表すことが示された。また Web の相互リンクは、そのうち 67%が共著者や学会の共催者など相互認知関係と一致し、現実の社会関係を近似できることがわかった。

次に、リンクが表す社会関係をメタデータとして表現するため、研究者 Web サイトのリンクが表す社会関係のクラス階層を定義するオントロジーを提案した。これは実際のリンクから社会関係の種類などを洗い出したものである。200 人の計算機科学研究者の Web サイトにメタデータを付与し、リンクの社会ネットワークを抽出した結果が図 1 である。節の色は Web 共引用解析で抽出した研究分野、枝の線種はリンクのクラスを表している。これにより Web リンクに

表現された研究者の社会ネットワークが、研究分野に対応する複数の部分グラフを連結した構造を持つことが確認された。また各分野の中にはワークショップの共催者や共同研究者など、特定の社会関係を表すリンクで連結された部分グラフが形成されていることが確認された。

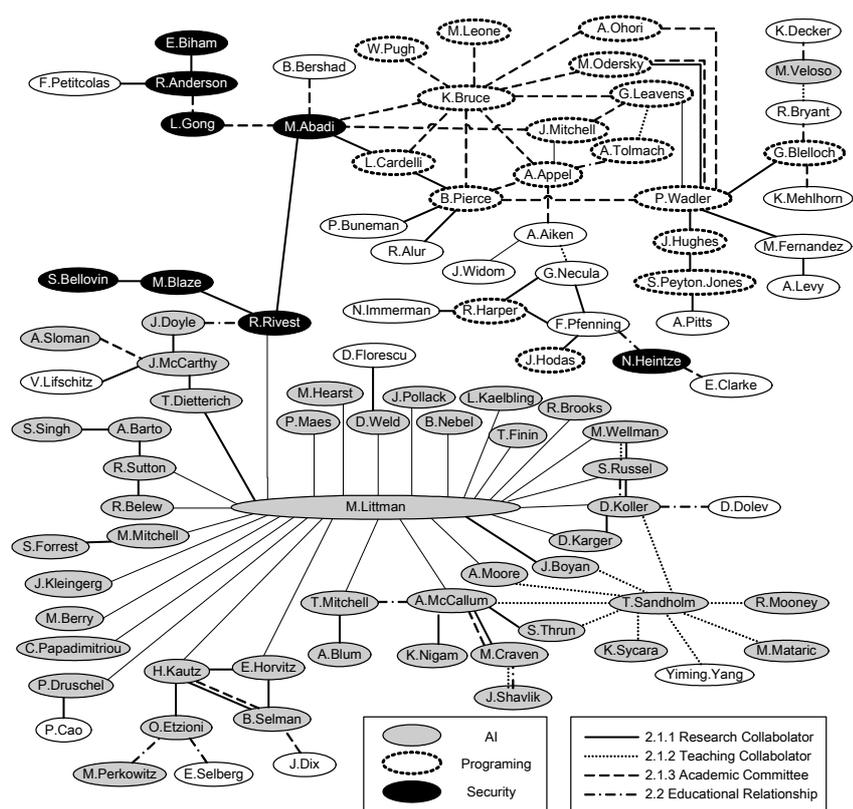


図 1 社会的相互認知を表すリンクを枝とするネットワーク

機械翻訳システムに対する利用者適応の分析（坂本知子）

本研究の目的は、機械翻訳 (Machine Translation: MT) システムに対する利用者の適応について統制実験を通じて分析し、報告することである。

異文化コラボレーション実験参加者の行動から、MTシステムを介した電子掲示板上で、繰り返し原文を書き換える自己主導型翻訳リペアが観察された。利用者はMTシステム使用過程で、原文作成に有効なルールを獲得し、それに基づいた適応モデルを形成する。このモデルの分析により、利用者のMTシステム利用形態をより明らかにできる。MTシステムの利用機会は増加、その目的も多様化が予想されている。しかし現在のMT研究開発の目的は、翻訳精度向上が主流であり、利用者適応を観察した例はない。そこで本研究では、MTシステムデザイナーが利用者に対し提供している原文作成の規則やガイドラインをもとに利用者適応モデルを定義し、続いて、適応に影響を与え得る要因として以下の2点に着目し、統制実験を通じて利用者適応の分析を行った。

1. 利用者の原言語の知識がMTシステムへの適応に与える影響
2. 利用者へのルール教示がMTシステムへの適応に与える影響

実験では、67名の学生被験者に、総計20のルールが組み込まれた例文10題の日英日折り返し翻訳リペア作業を行ってもらった。翻訳ログから被験者のルール獲得を数値化しデータ分析した結果、以下が明らかとなった。

1. 原言語の知識が豊富な利用者ほど、多くのルールを獲得し、MTシステムに対してより円滑な適応が可能であることが分かった。
2. ルール教示効果が有意に認められ、さらに、最も効果が高いのは原言語知識レベル中位の利用者であり、続いて下位、上位の利用者であることが分かった。

このように、原言語知識が豊富な利用者ほど、またルールを教示された利用者ほど、容易に適応可能であることが明らかになった。しかし、MTシステムデザイナーが想定するこれらのルールは、一様に獲得が容易なルールばかりではなく、獲得が困難なルールなど多様であることも分かった。また、一般利用者とMTシステムデザイナーの適応モデルを比較した結果、一般利用者のどのグループも、明らかにMTシステムデザイナーの適応レベルには達していないことが分かった。これは、一般利用者にとって、MTシステムを使いこなすことがいかに困難な作業であることを示している。

さらに、MTシステムに対する印象の分析を行った結果からは、印象を左右する第1因子としてシステムのユーザビリティ、第2因子としてシステムの翻訳精度が抽出され、また、適応モデル形成に影響を与える2つの要因も、MTシステムに対する印象にも影響を与える傾向にあることが明らかになった。

これらの結果は、MTシステムデザイナーが利用者の立場から設計を試みる際に、そして一般利用者が異言語間コミュニケーションにおいてMTシステムを使用する際に、有用な知見になると予想される。利用者適応モデルは、折り返し翻訳の結果生成された目的言語の理解のし易さと直接相関するものである。従って、本来の目的であるMTシステムを介した異言語間コミュニケーション促進のため、利用者適応のより詳細な分析・支援方法の確立が重要となってくる。

仮想空間における社会的インタラクションの信頼感の分析(志水信哉)

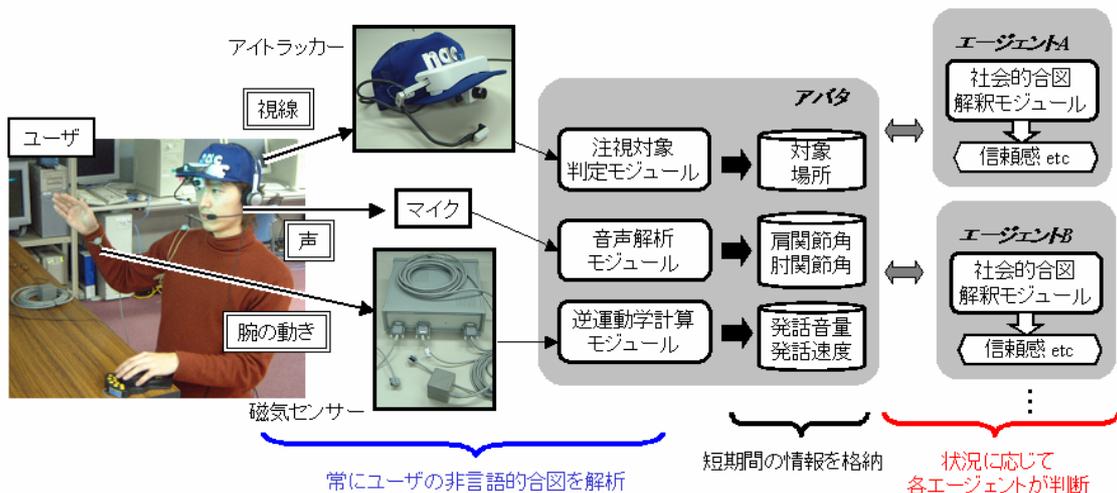
人間同士のインタラクションにとって信頼感是非常に重要である。例えば緊急事態、演説、勧誘、カウンセリングなどの場においては相手を説得するために、相手が自分に対して信頼感を感じるよう行動することが求められている。

最近盛んに研究開発が行われている人間行動のシミュレーションと三次元仮想環境を組み合わせた環境では、エージェントとのインタラクションを通じて、相手に信頼感を与えるために必要な振る舞いを体験学習することができる。

しかし、訓練パートナーとして従来の対話エージェントを用いた場合、信頼感を与える振る舞いを訓練するには次の様な問題が生じる。

- 1) エージェントが信頼感などの暗示的な社会的合図を判断して行動できない
- 2) ユーザの振る舞いから信頼感を判断するための基準が存在しない

本研究では、仮想誘導訓練を具体例として、誘導者としてのユーザに対する信頼感を人間と同様に判断する避難者エージェントを次のアプローチで構築した。まず、社会心理学の文献等から、声量、発話速度、ジェスチャー、凝視から信頼感を判断する定性的なモデルを考えた。次に、ユーザとエージェントの役割を入れ替え、エージェントが行う誘導を人間が判断する実験を行った結果、誘導者の信頼感には声量、発話速度、凝視が独立して影響していることを明らかにし、誘導者としてのユーザの信頼感を定量的な判断ができるようにした。そして、複数のトラッキング装置を組み合わせたマルチモーダルインタフェースによる知覚機構を実装した。



本研究の成果は以下の通りである。

1. ユーザに対する信頼感に応じて行動する社会的エージェントの実現

このエージェントは、従来の研究では考慮されていなかったが現実世界で重要な信頼感に基づいたインタラクションを人間と行う。そして、インタラクションによる振る舞いの訓練という、新たなエージェントの利用法を開拓するものである。

2. インタラクションの相手の信頼感を定量的に判断するモデルの構築

相手に知覚される信頼感に声量、発話速度、凝視、ジェスチャーが及ぼす影響を分析し、相手の信頼感を判断するモデルを構築した。これによって、インタラクションにおける信頼感を定量的に評価することが可能となる。

Design of a Social Agent for Japan-China Intercultural Communication

(Lei Chen)

To improve the communication between people speaking different languages, first we observed the actions, contributions of the participants and the actions of the translators in the Intercultural Collaboration Experiment(ICE) held by Japan and China. The ICE proves that the mode of “Machinery Translation(MT) + translator” can effectively support the communication between people speaking different language and the translator’s support is indispensable.

But the reality is that the translator is a kind of rare resource. On the other hand, the helper Agent is the Agent who can provide new topic when the communication comes to pause. So one possible solution is to replace the translator with Agent, as Helper agent does. However, at present, it is very difficult. In order to make it possible that fewer translators can support more Japanese-Chinese communication, we propose the mode of “MT+ translator + Agent” and come up with the Agent who can solve simple problems and refer the difficult ones to translator.

There are mainly two subjects in this research:

1. Both Japanese and Chinese are installed in the Agent. Also, the agent can provide many simple support functions as following:
 - Agent can help the user to make sure whether his partner understands his message
 - Agent can provide background knowledge.
 - Agent can provide the syntax suitable to the machinery translation

Besides, when user asks for help because of getting wrong translation, agent will recommend reasonable help methods according to the extent the user can understand the translation.

2. Design the dialog mode to talk with users

To make the Agent to communicate with the user we make the communication mode in which the Agent can ask the user, provide multiple options, and the user can choose according to his demands. We think the Agent should use fewer options to delegate all the possible problems.

We make an Agent system on TransBBS and FreeWalk, and install the knowledge of the Forbidden City and Nijo City into the Agents. There is an Agent for every pair of talkers and only one Translator for the whole system. When the user communicates on TransBBS, he can also refer to the Agent for help on FreeWalk.

We use this system to conduct a communication experiment and comment on this system. Through the experiment, we know that “MT+ Translator+ Agent” mode can help the people speaking different languages to communicate efficiently. Besides, in the experiment, the participants can make sure whether the partner can understand his message with the help of the Agent. Through the inquiry of the background knowledge, the participants can grasp what his partner says. So we think that these two measures are all effective to help the people from different countries to communicate.

Model Analysis of Digital Copyright Piracy on P2P Networks (板倉陽一郎)

P2P アーキテクチャの実用化、ビジネス化が徐々に進められる一方で、負荷分散を旨とした筈の P2P ファイル共有においては、大規模な著作権侵害が問題になってきた。P2P ネットワーク上で交換される音楽・映像・画像・文章・ソフトウェアといったファイルの流通は現実のコンテンツ業界に多大な影響を与え、減収をして P2P は悪だと断ずる著作権保有者の怒りは収まらない。米国では痺れを切らした著作権管理団体により大規模な訴訟が起こされ、数百人規模の損害賠償訴訟が進行中である。

斯かる状況に鑑み、第 156 回国会では著作権法の改正がなされ、権利者が訴訟を起こす場合において、侵害行為及び損害額の権利者側立証責任を軽減するべく、損害額の推定規定が置かれ、特に代表的な事例となるインターネット上の無断送信については「違法ネット配信された海賊版のダウンロード数量（『受信複製物』の数量）」との取り決めが成った。

しかしながら、従来のクライアントサーバー型のネットワークなら別段、主なターゲットである P2P ネットワーク上でのダウンロード数量のカウントは難しい。概数として出されている先行研究も一般性を維持しているとはいえず、ダウンロード数量の正確な把握は大きな課題であり続ける。更に、もっと重要な課題は、『受信複製物』の数量が損害であるという法的擬制の下で、如何なる著作権保護政策を採れば創作のインセンティブが失われる（＝創出される作品数が減少する）ことを防げるのかという、政策の導出にある。

そこで、本論文では、『受信複製物』の数量の実務的な運用方法を検討し、P2P 上の音楽著作権「市場」を確定した上で、実際に P2P ネットワークにおける音楽ファイルを調査した。その際、CD へのコピーコントロールの導入に着目し、音楽ファイルの複製数との関係を得た。最後に、著作権についての Lands and Posner モデルに P2P 上の音楽著作権市場を当てはめた上で政策的示唆を得た。具体的には、以下の研究を行った。

まず、『受信複製物』の数量についてネットワーク形態毎に考察を行い、特に以後で対象とする Hybrid/P2P ネットワークにおける算定式を得た。次に、音楽著作権「市場」を画定する方法として、経済学上の市場確定手法を検討し、交差弾力性を用いるアプローチを採った。その上で、如何なる検索方法が現実の市場の反映として適しているかを検定し、日本の P2P ネットワーク上の音楽著作権「市場」を画定するにあたっては純粋に日本語による検索のみを行うことが望ましいとの結論を得た。

実際の P2P ネットワークの調査にあたっては、WinMX ネットワーク上の共有状況と元になった CD の売上枚数との関係を対象とした。コピーコントロールの導入が WinMX ネットワーク上の共有数に如何なる影響を与えているかをみたところ、寧ろ P2P ネットワーク上では共有を増加させ、著作権侵害を助長するものであることが確かめられた。又、推計を行う際のタイムラグに着目し、ストックデータについても配慮すべきことが得られた。

ここで得た結論を Lands and Posner モデルに実際に当てはめることによって、少なくとも P2P ネットワーク上の音楽著作権については、コピーコントロールを保護する政策を続ける限り、著作権の保護範囲を狭めるべきことが示され、現実の政策課題に対する示唆としては、①技術的保護手段の自主的放棄、②技術的保護手段回避への法的保護緩和、③元になる音楽著作権の範囲拡大停止、が選択しうることを述べた。このうち、技術的保護手段の自主的放棄や法的保護緩和は世界的な潮流からも難しく、元となる音楽著作権の過度な範囲拡大を防ぐことが妥当であろうと考えられる。最後に、音楽著作権以外への拡張について検討し、今後の研究の方向としては現実のデータセットを用いて Lands and Posner のモデルそのものを推計することを提案した。

ツリー構造による署名方式とその安全性証明（西垣秀哉）

本論文では、コンピュータネットワーク上での認証の機能を実現する方式の1つである電子署名を取り上げる。電子署名は、公開鍵暗号の仕組みを応用して構成されている。暗号は、今後のコンピュータネットワーク社会において意思伝達を行う際に欠くことのできない”秘匿”と”認証”の2つの重要な機能を提供する。この、「情報を正しい相手に正しい内容で伝える」というコンピュータネットワーク上の意思疎通の成立なくして、今後の社会の発展はありえないと考えられる。しかし、現在までに様々な電子署名方式が提案されている中、妥当な仮定の下でその安全性が証明された実用的署名方式は少ない。多くの署名方式は、現実的にはありえないような強い仮定において安全性が証明されている。この現状をとらえ、本論文では、より妥当な仮定の下で安全性証明を持つ実用的署名方式の提案を目指した。また、現在の公開鍵暗号の主流となっている方式のほとんどは、素因数分解問題や離散対数問題などの数論の問題に安全性の根拠をおいた方式である。しかしこれらの数論の問題は、量子コンピュータでは多項式時間で解くことが可能であることが証明された。これはつまり、量子コンピュータが実現した場合には、現在の暗号方式は崩壊することを意味する。そこで、量子コンピュータが実現した場合においても安全であると考えられるような方式を検討する。

以上をまとめて、本論文では、研究課題として以下の3つを設定する。

- 妥当な仮定の下で安全性証明を持つ署名方式の提案。
- 量子コンピュータが実現した場合の安全性の確保。
- 上の2つを満たした上で、なおかつ現実的に使用可能な方式。

そこで本論文では、ある一定回数の使用については安全であると考えられる署名方式に対してツリー構造を導入することで任意の使用回数に対して安全性を保証できる一般的方式 TSS(Tree-Signature Scheme)を示し、その安全性証明と評価を行う。以下にその方式を図で簡単に示す。ツリーの1つのノードには、ある1つの署名方式が対応している。メッセージ M に対して1つの葉ノードを定め、ルートノードからその葉ノードにいたる経路において、親ノードの秘密鍵で子ノードの公開鍵の署名付けを行うことで認証を繰り返す。

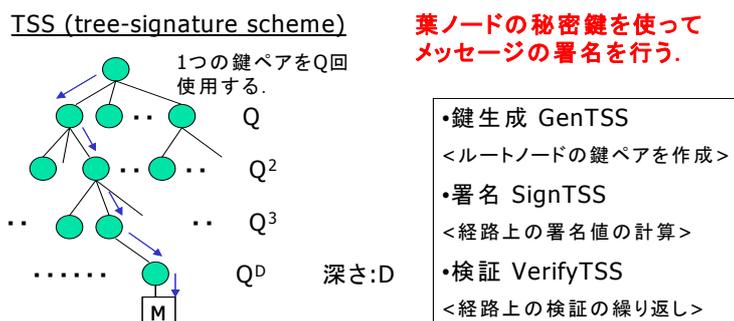


図1：TSS(Tree-Signature Scheme)の概要

この方式を用いることにより、今回設定した研究課題に対して以下の結果を得た。

- ツリー構造を用いた署名方式 TSS を提案し、従来の仮定よりも弱い仮定の上で安全性証明を示した。
- ノードの署名方式に NTRUSign を用いることにより、量子コンピュータが実現した場合にも安全だと考えられる電子署名方式 TSS-NTRUSign の提案を行った。
- TSS-NTRUSign の処理速度は、現在の主流である RSA に劣らないことを示した。

アドホック環境のためのマルチエージェントプラットフォーム

Pervagent の開発（新留憲介）

近年、ユビキタス環境あるいはパーベイシブコンピューティングなどに代表されるように、街中など公共の空間において人々が情報システムからのサービスをうけられる環境が整いつつある。そのような環境で、利用者の移動や活動目標の変化などに応じ、利用可能な情報・サービス・デバイスを適切に選択し、利用者の行動支援を行えるような枠組の実現により、街での行動をより豊かにするような環境が望まれている。

本研究では特に、利用者の携帯端末の上で動作し、利用者の周囲の環境に関する情報をもとに、その時その場所に応じた行動のプランを利用者に対して提示することによって、時々刻々と変化する状況に応じた行動支援を提供できるエージェントシステムの開発をめざす。ここでは、時・場所・状況等によって周囲から得られる情報に基づいて利用者支援系が適切に行動選択を行う必要がある環境を、アドホック環境と呼ぶ。アドホック環境において適切に情報を選択、プランを生成し、その時点で利用者にとってもっとも有益なプランの提示を行うための方式について考察を行った。

本稿での実装システム Pervagent の概要を図 1 に示す。エージェントは、自らが保持する利用者に関する行動目標や制約に関する情報と、周囲からうけとった諸々の情報をもとに利用者がとるべき行動プランを生成するプラナをもつ。これをもとに利用者に対する行動プラン提示を行うが、単純にプランを提示すればよいものではなく、生成されたプランをわかりやすく提示することが必要であり、また利用者の意図と異なる提示が行われた場合には、利用者からの直接入力やあるいは利用者行動の観察に基づいて、適宜プラナの動作を制御し、新たな提案を行っていく必要がある。

本稿ではそれらの考察にもとづいて、アドホック環境において利用者をサポートするエージェントのアーキテクチャに関する提案を行った。続いて、そのアーキテクチャに基づいて構成したエージェントプラットフォーム Pervagent に関し、特にエージェントがアドホック環境において周囲から受けとるべき記述と、それをういたプランニングに関して述べる。最後に、Pervagent 上に構成した避難誘導デモについて説明し、本研究で提案するアーキテクチャによって、アドホック環境における利用者支援が行われるかを示した。

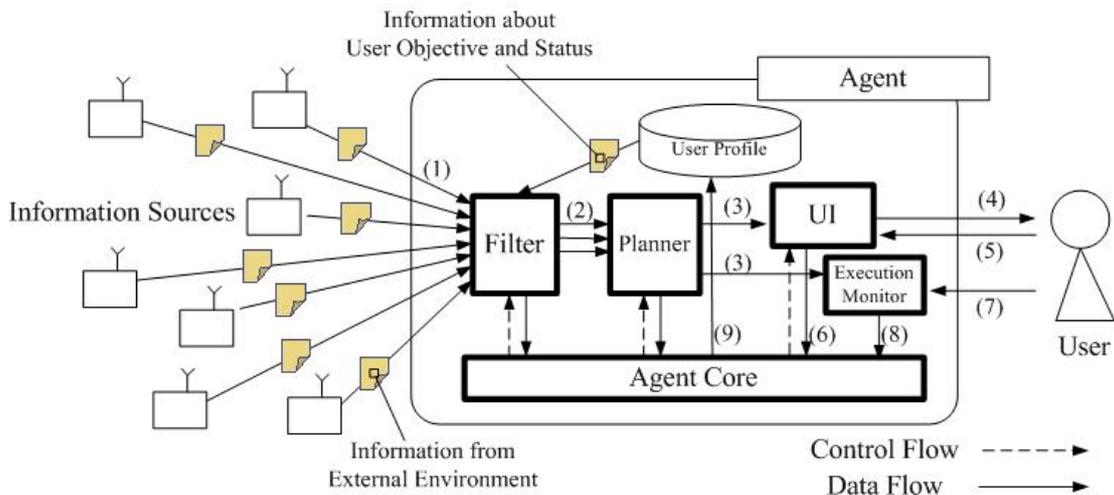


図 1 : Pervagent architecture

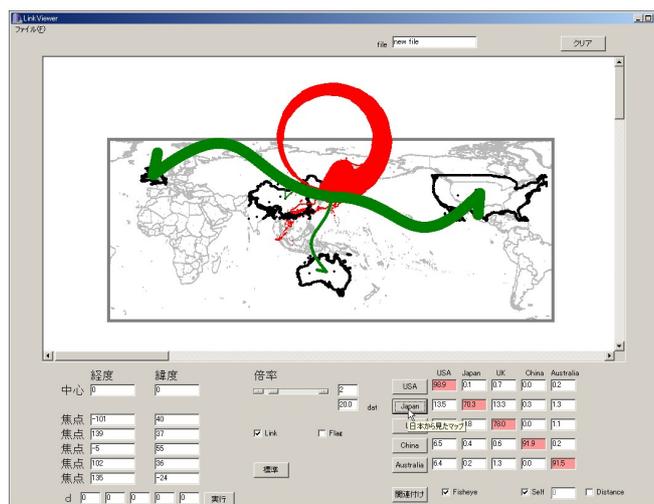
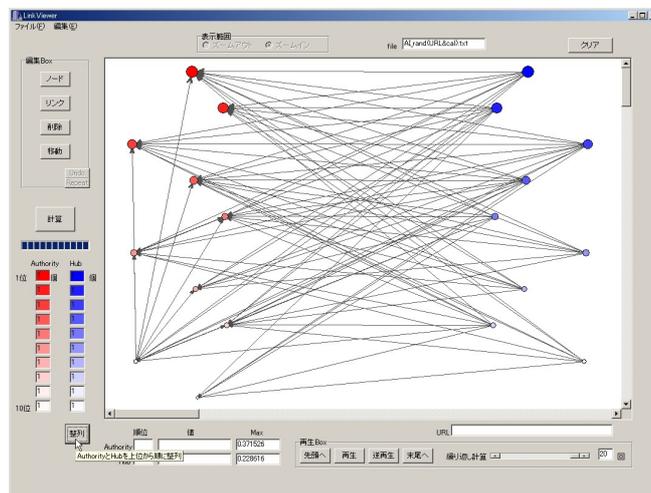
Web のハイパーリンク構造の可視化

－LinkViewer によるリンク解析－(早水哲雄)

現在、Web は拡大の一途をたどり、その構造はますますわかりにくくなっている。このような状況で、Web の構造を理解し正しい情報を得るためには、Web ページ間のリンク構造を解析することが有効であると言える。しかし、実際に Web のリンクは不可視なのでその多様な構造を把握することは困難を極める。

本研究では、こうした複雑な Web に対して、可視化によって Web のリンク解析を行い、社会的インタラクションを明らかにすることを考える。そこで、ウェブにおけるページ間のリンク関係を誰もが直感的に理解できるような形で可視化するツール(LinkViewer)を構築した。LinkViewer を次の 2 つのウェブ構造解析に対して適用し、その可視化を行った。

- (i) Web コミュニティ解析の可視化
- (ii) 多国間 Web リンク解析の可視化



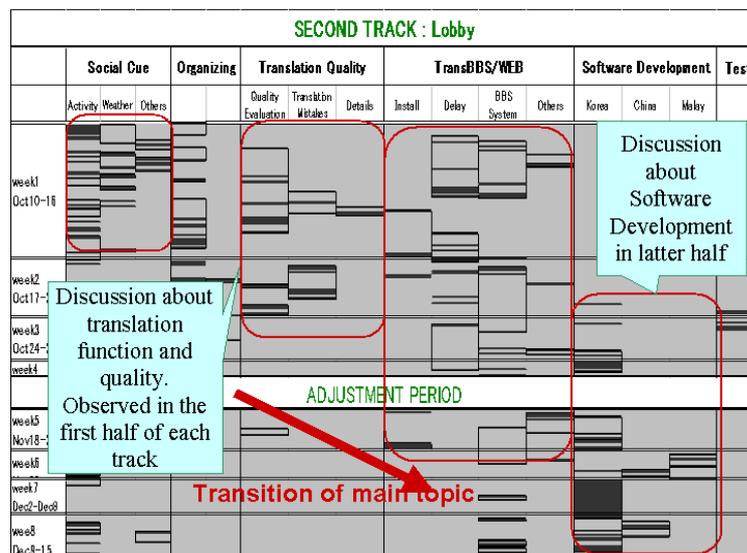
Analysis of Multilingual Collaboration Process via Machine Translation (Mika Yasuoka)

This research aims at figuring out the influence of machine translation used in intercultural collaboration process and estimating possibilities whether machine translation can be an effective technology for collaborative work through analyzing conversation data taken from Intercultural Collaboration Experiment 2002 (ICE2002). ICE2002 conversation were carried out on the media which was asynchronous and non-face-to-face and incorporated with machine translation.

As there was no conventional analytical method to apply to such data, we proposes a new method, Semantic Flow Analysis, which covers indispensable factors for intercultural collaboration process which often use asynchronous and non-face-to-face media.

This research aims at figuring out the influence of machine translation used in intercultural collaboration process and estimating possibilities whether machine translation can be an effective technology for collaborative work through analyzing conversation data taken from Intercultural Collaboration Experiment 2002 (ICE2002). ICE2002 conversation were carried out on the media which was asynchronous and non-face-to-face and incorporated with machine translation.

As there was no conventional analytical method to apply to such data, we proposes a new method, Semantic Flow Analysis, which covers indispensable factors for intercultural collaboration process which often use asynchronous and non-face-to-face media. Through analyzing with this method, interesting phenomena to decrease collaboration errors ,such as translation repairs and topic transition, were observed. Semantic Flow Analysis could describe semantic conversation flow, so that it succeeded in analyzing collaboration process which conventional methods does not support and could extract useful insights for future works, such as the way to decrease communication error and needs of visualization of communication. They are expected to bring forth as effective support technologies in today's increasing multilingual environment.



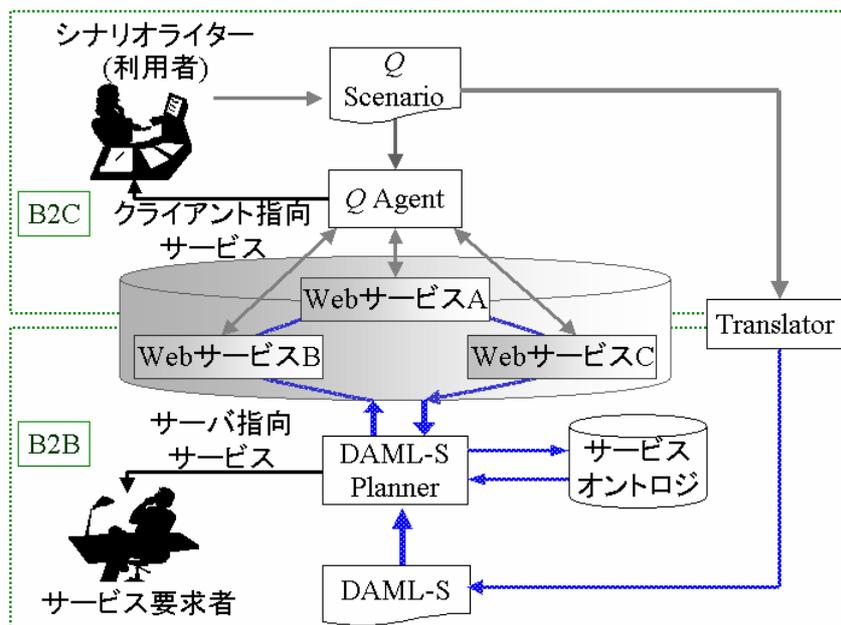
Web サービスのシナリオ記述からプロセスセマンティクス記述の生成

(村上陽平)

近年、Web 上に遍在するサービスをコンポーネントとして利用することが可能になり、それらを連携することで新たな複合サービスを低コストで構築できるようになってきた。しかし、現状のサービスの連携技術では、複合サービスが静的に結合されており柔軟性に欠けるため、利用者の状況によってはその複合サービスを利用できないという問題が生じている。

このような問題に対し本研究では、「利用者が自らの状況に合う形でサービスシナリオを記述する」クライアント側での対処法（クライアント指向サービス）と、「記述論理表現に基づいたプロセスセマンティクスを用いてサービスの提供時に動的にサービスの連携を行う」サーバ側での対処法（サーバ指向サービス）を検討した。さらに、クライアント側で構築したサービスを、サーバ側で提供するサービスに反映させる枠組みとして、サービスシナリオをプロセスセマンティクス記述に変換するトランスレータを構築することで「利用者とサービス提供者間の連携」を実現した。

具体的には、クライアント指向サービス用のサービスシナリオの記述には Q 言語を用い、サーバ側でのプロセスセマンティクスの記述には DAML-S を用いた。また Q シナリオを DAML-S のプロセス記述に変換するために、シナリオにおいて状態遷移表現を可能にするガード付コマンドを、ワークフロー言語の提供する、逐次実行、並行実行、終了条件付き繰り返し、ならびに選択実行といった 4 つの制御構造を用いて、そのセマンティクスを定義した。



クライアント指向サービスとサーバ指向サービスの協調アーキテクチャ

仮想都市における空間的・行動的手がかりに反応する

対話エージェント(山中信敏)

仮想都市環境は、新しいコミュニケーションのメディアとして注目され、そこで生じるインタラクションを扱う研究もはじめられている。このような仮想都市環境において人間同士や人間とエージェントとのコミュニケーションを支える共通基盤の形成のためには、話者間のコンテキストではなく、周囲の人や物体といった外部環境のコンテキストを用いる対話が重要となる。しかし、環境のコンテキストを利用する対話は、これまでの対話エージェントが対象としてきたタスク指向型対話の枠組みでは実現できない。

本研究では、人間がアバターとなって仮想都市環境に入りエージェントとインタラクションするという状況において、環境のコンテキストを用いる対話を扱う対話エージェントの設計・構築を行った。

本研究の成果は、以下の通りである。

1) 仮想都市における環境のコンテキストを用いる対話の実現

仮想都市における場所、言語的行動、非言語的動作、他者との関係といった要素から構成される空間的・行動的手がかりを定義し、それらを用いて仮想都市環境における周囲の人や物体といった環境のコンテキストを用いる対話を実現した。

2) 環境のコンテキストを用いる対話の制御方法の提案

空間的・行動的手がかりを条件部に持つ対話ルールに基づいて環境のコンテキストを用いる対話の制御方法を提案した。また、ルールのテンプレートを利用して実際のインタラクションを観察しながらエージェントを構築していく構築手法提案と構築環境の開発を行った。

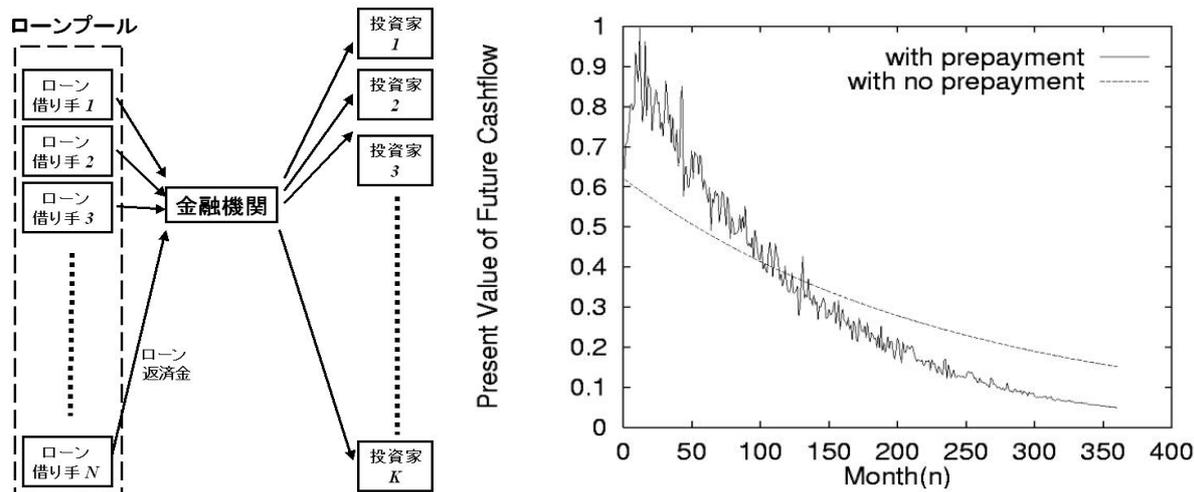


図: 仮想都市環境FreeWalkでのアバターとエージェントとの対話風景

A 3-factor Valuation Model for Mortgage-Backed Securities (牛山史朗)

高度に発展・グローバル化している世界の金融市場において金融工学の技術が広く用いられており、金融市場、金融工学の発展は高度な情報技術に支えられている。金融市場をより効率化するために、さらなる情報技術の発展、それに裏打ちされた金融技術の発展が望まれている。金融技術は、多様なリスク移転機能を持つ様々な新しい金融商品を市場に送り出し続けており、そのような金融商品の例としてモーゲージ証券(MBS)がある。

モーゲージ証券(MBS)は、いくつかの住宅ローン債権を1つにまとめて作ったローンプールを証券化したもので、その仕組みは、プール中のローンの借り手からの返済金から手数料を引いたものがモーゲージ証券を保有する投資家に流れるというものである。モーゲージ証券は1970年にアメリカで生まれた証券化商品であるが、その市場は現在では米国債に匹敵する取引量を持つまでに成長している。アメリカにおいてはモーゲージ証券について盛んに研究が行われており多くの価値評価モデルが提案されてきた。価値評価の際には、ローン返済金のキャッシュフローを分析する必要があり、つまりはキャッシュフローの主な変動要因である住宅ローンの期限前返済をモデル化することが必要となる。



本論文では先行研究を拡張し、短期金利、ローン金利、家の価格の3つを確率過程として定式化し、期限前返済の起こる原因として次の2つを考える。

1. 金利の低下による借り換え
2. 家の価格の上昇による家の売却

さらに、ローンプールの非均質性を各ローンの借り手のもつ金利変化、資産価値変化への許容度のばらつきで表し、各借り手のもつ許容度は2次元正規分布に従うと仮定する。我々のモデルは、この仮定のもとで各期の期限前返済行動をモーゲージ証券のキャッシュフローのパターンと結びつけ、離散時間の無裁定価格理論を用いて価値評価を行う。また、LTV条件、つまり担保価値に占めるローン残高の割合が一定以下でなければ借り換えができないという条件を考慮したモデルを用いると、借り換えによる期限前返済が減少してモーゲージ証券の価値が大きくなることを示した。

我々のモデルでは、モンテカルロシミュレーションを用いることでモーゲージ証券の理論価格を算出する。本論文はその具体的方法を述べ、様々な条件下でのモンテカルロシミュレーションを行いその結果を示した。そして比較静学分析によりモデルの構造、合理性と実務への適用可能性を明らかにした。

Peer-to-Peer シミュレータ SimPeer の開発と検証 (鳥居大祐)

P2P システムでは、インターネットで結ばれた多数のノードが集まって大規模なネットワークを形成している場合が多い。また、このネットワークでは、各ノードが各自の都合により、参加、離脱するために、各ノードへのアクセスが常に保障されない非決定性の性質を持っている。多くの P2P システムに関する研究は、このような性質を持つネットワーク上で、各ノードが要望するリソースを効率良く得られるような方法論 (動作アルゴリズム) を確立することを目指している。P2P システムの評価のために、実際に多数の被験者を集めての実験を幾度も行うのは困難であり、その検証に必要となる P2P シミュレータの開発が不可欠である。

シミュレータに必要な P2P システムの特徴は次の 4 点である。

- TCP/IP ルーティングの他にアプリケーションレベルでのルーティングを行うこと。
- 各ノードが P2P ネットワークへの参加、離脱を随意に行うこと。
- 各ノードは個人所有のマシンで構成される場合が多いので、そのネットワークやマシンの環境が不安定である可能性が高いこと。
- P2P ネットワークへの参加数が多いこと。

また、次の設計目標を達成した。

- アプリケーションレベルのルーティングのみを扱うことにより、少なくとも 1 万ノード以上シミュレーションできる。
- システムの動作部分の記述に便利な API 群、P2P システムの特徴を配慮したパラメータの提供を行うことで、P2P の特徴の表現を助け、ユーザができるだけ容易に P2P シミュレーションを行うことができる。
- システムの動作記述部とパラメータ部の分離により、それらを独立に検証できる。
- 役割の違うノードを複数種類、設定できる。

最後に、SimPeer のシミュレータとしての有効性、その性能評価、P2P シミュレータとしての汎用性の追究のため、SimPeer を用いてのシミュレーションを 3 種類 (Mackerel-Java, Mackerel¹, Napster) 試みた。その結果、SimPeer 上ですべてのシミュレーションのモデルが表現され、3 種類のシステムの相違点を勘案すると、その汎用性を十分確認することができた。

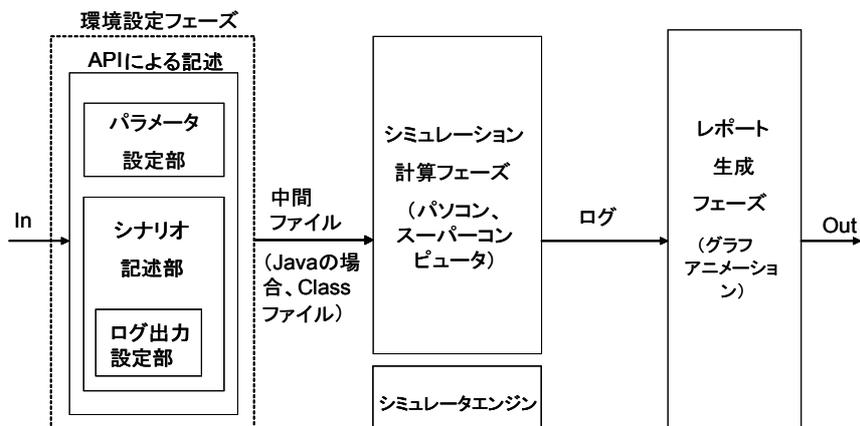


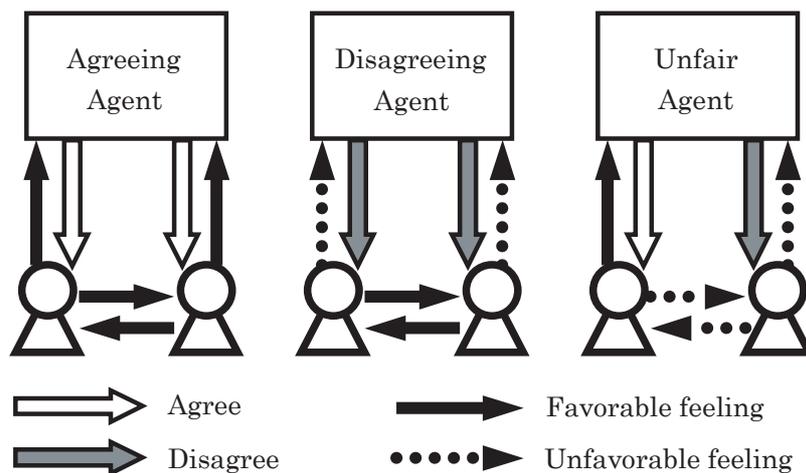
図 SimPeer の構成図

¹ Mackerel-Java, Mackerel: P2P 型掲示板システム

Analysis of Social Agents Based on Balance Theory (中澤諭)

仮想世界の中で人間とコミュニケーションを行う社会的エージェントが現れてきている。社会的エージェントはオンラインコミュニティの形成に大きな役割を果たす仮想世界に必要な住人となってきている。本研究では、社会的エージェントがバランス理論に従って人間関係に影響を与えることができるかを調べた。

バランス理論によれば、2人の人間関係はそれぞれがある対象に同じ心情を抱いていると感じるかどうかに影響される。もし、ある対象に相手と同じ心情を抱いていると感じれば、相手への心情は良くなり、そうでなければ、相手への心情は悪くなる。そこで、社会的エージェントが人間関係の鍵となるこの対象の役割を果たせるのかを調べた。まず、社会的エージェントが被験者に同意や反意を表明することで、被験者がエージェントに好意や敵意を抱くかを確かめた。次に、2人の被験者に同意の態度をとる同意エージェント、反意の態度をとる反意エージェント、1人に同意、もう1人に反意する不公平エージェントの性格の異なる3種類のエージェントを用いて、人間エージェント間の関係と人間関係の間にバランス理論が働くかを実験した。



実験の結果、エージェントが人間関係に影響を与えていることが分かった。特に人間同士で会話しない状況では、エージェントが人間関係に十分に影響を与えることができた。さらに、エージェントと人間との会話内容をもう1人の人間が知ることができない状況では、より強固に影響を与えることができた。

しかし、人間同士で会話をすると、エージェントは人間関係にほとんど影響を与えられなくなった。会話分析の結果から、人間同士の会話による同調の作用が、エージェントが人間関係に与える影響を打ち消していることがわかった。

この実験結果は、エージェントが人間関係に与える能力と限界を示唆している。人間同士に十分なコミュニケーションがあれば、エージェントをコミュニティ内で安全に利用できることを示すと共に、人間同士に十分なコミュニケーションがなければ、エージェントは危険な存在になりうることを示している。また、エージェントの会話能力が今日の技術よりも飛躍的に高まった時点において、再度実験を行う必要があることを示している。

Caching Policy for Content Delivery Networks Based on User Preferences

(中塚康介)

本研究では、市場計算機構による計算手法を利用したコンテンツ配信手法を提案する。

現在のコンテンツ配信では、ユーザの利用に先立って配信サーバとユーザの間にコンテンツを能動的にコピーし、トラフィックや、配信サーバの負荷を減少させるコンテンツ・デリバリ・ネットワークが用いられている。

コンテンツ・デリバリ・ネットワークにおいてコピーされるコンテンツは、ネットワーク事業者と契約したコンテンツ配信事業者によって決定されるため、

- ・ 個人が情報を発信する場合などでコンテンツ・デリバリ・ネットワークが利用できず、サーバの負荷により配信が困難になる
- ・ コンテンツ・デリバリ・ネットワーク事業者が適切なコンテンツを選択しないためにキャッシュの利用がなされない

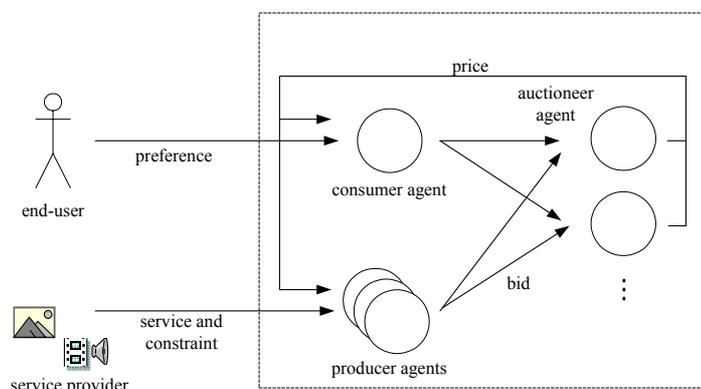
といった問題が発生する。この問題は、キャッシュコンテンツの決定をコンテンツ配信者が行っており、コンテンツを利用するユーザの需要が反映されていないためにおこる。

本研究では、この問題に対して、ミクロ経済学の一般均衡理論を応用した計算アルゴリズムであり、フロー制御やネットワーク QoS 制御等に応用されてきた、市場計算機構による計算手法の適用を提案する。本手法は、

- ・ ユーザの選好を効用関数、サービスの提供を生産関数として記述。
- ・ ネットワークやキャッシュ容量等、キャッシュの制約を考慮しながら、ユーザのコンテンツに対する選好を集約し、コピーすべきコンテンツを与える。
- ・ 得られた解は、パレート最適性を満たし、無駄のない資源利用が可能である。
- ・ ユーザの個人情報保護や大規模ネットワーク上の運用を考え、分散で計算を行う。

といった特徴を持ち、コンテンツ・デリバリ・ネットワークへの応用に適していると考えられる。本研究では、このような市場機構の特徴に着目し、図に示すようなモデルを構築して、以下の点を示した。

1. ユーザ選好を反映できないコンテンツ・デリバリ・ネットワークにおいて、この問題を解決できる市場機構によるコンテンツ決定手法を提案した。
2. 従来の市場モデルで用いられてきたモデルに加え、頻繁にユーザ環境が変化する場合にも対応できるモデルを提案した。
3. 市場モデルが実際にユーザの効用を改善させることをシミュレーションにより示した。



モバイル環境における揮発性情報の共有（林田尚子）



実験端末と実験実施風景

モバイル端末が私たちの身近に浸透しつつある今、モバイル環境を用いた日常生活の支援は欠くことの出来ない課題であると考えられる。本研究では特に、街中からの情報提供の促進に視点を据え、モバイル環境における情報提供行動に影響をおよぼす要因を明らかにすべく、フィールド実験を行った。

本実験では、情報提供を行っても人にみてもらえないのではないか、自分の情報はつまらない情報なのではないか、という情報保持者の不安が情報提供にマイナスの影響を与えているものと考え、これらの影響をリスク要因と呼び、モバイル環境における情報提供行動に対するリスク要因の影響を検証した。リスク要因を軽減する為の手法として、情報提供前・情報提供行動後、それぞれに以下のサポートを与えた。一つは、被験者に他の人間がこのような情報を欲しがっている、というユーザ・ニーズを与えるサポート、もう一つは、自分の提供した情報が他の人からどのぐらい見られているかという参照状況を与えるサポートである。これらのサポートによって、情報提供行動に与えるリスク要因の影響が軽減されるかどうかを検証した。

実験は、2001年に83名の被験者により実施した。上記のサポートの有無の組み合わせにより、被験者を4グループに分割した。被験者は、GPS受信機を接続したポケットPC端末にデジタルカメラカードを接続したものを持ち、京都の東山周辺の指定地域を歩いた。被験者が行うことができた情報提供は、文章を入力すること、写真を撮影することである。4つの被験者グループそれぞれに与えるサポートによって、異なるインターフェースを与え、情報提供行動の差異を検証した。

本実験により、以下の結果を得た。

- どのサポートを行った場合も、何のサポートも行わないグループに比べると情報提供が活発に行われた。リスク要因を減じることは情報提供行動を促進する。
- しかし、両方のサポートを行ったグループにおいて情報提供が一番活発に行われるわけではなかった。単独では有効なサポートでも組み合わせた時には、複合作用がおこり、むしろ、単独のサポートよりも情報提供を促進する効果が低かった。

以上のように、モバイル環境における情報提供行動は、現行のWebなどのインターネットサービスにおける知見をそのまま適用出来るものではなく、異なる特性を持つことがわかった。

A Scheme for Persistent Services in Peer-to-Peer Network (松原啓明)

本論文はPeer-to-Peer (P2P)技術を用いて持続的サービスを提供する枠組みを提案する。持続的サービスとは、一定期間提供が継続し、提供終了までの間サービスインスタンスに関する情報を保持し一貫性を保ちつつ更新する必要があるサービスのことである。たとえばオークションにおいては現在価格を保持し更新する必要があるため、オークションサービスは持続的サービスである。ファイル共有サービスは非持続的サービスである。ファイルは局所的に保持され更新を必要としないからである。

クライアント・サーバ・アーキテクチャには、スケーラビリティの欠如、利用の匿名性が保たれないこと、運営者によるサービスの停止のリスク、サービスの安定性がサーバの安定性に依存することという欠点が存在する。P2P技術はこれらの欠点を解決するため提案され、ファイル共有サービスにおいて成功を収めた。

しかし、以下の理由によりP2P技術は持続的サービスに直接適用できない。持続的サービスにおいては、サービスインスタンスに関する情報がP2Pネットワークに保持され一貫性を保ちつつ更新される。P2Pネットワーク中の特定の計算機にこれらの情報を保持した場合、サービスの安定性がその計算機の安定性に依存してしまう。他面P2Pネットワーク全体にこれらの情報を分散して保持するとスケーラビリティが失われてしまう。

提案する枠組みの主な特徴は以下のとおりである。

1. サービスインスタンスを検索するため用いられるP2Pネットワークのほか、それぞれのサービスインスタンスごとにP2Pネットワーク (IAN と呼ぶ) を動的に構成する。
2. サービスインスタンスに関する動的情報をIANにおいて保持する。
3. 通信障害等によりIANが分断された場合、非一貫性を回避するため特別な手続きが用いられる。

提案手法においてIANの構成ノードについて、所与のサービス安定性を確保するために必要なノード数を求める問題及び、サービスの検索可能性を高めるためのノードの配置を求める問題を検討し、前者については高い安定性を求める場合でも構成ノードの必要数はそれほど増えないとの、後者については整数線形計画問題を解くことにより最適配置が求められるとの結果を得た。

提案手法をオークションに応用するため実装・評価した。これにより提案手法が実用可能であることが示された。その他、セキュアオークションプロトコルの提案手法への実装について検討を行い、結果を得た。

本研究の主な成果は以下の点である。

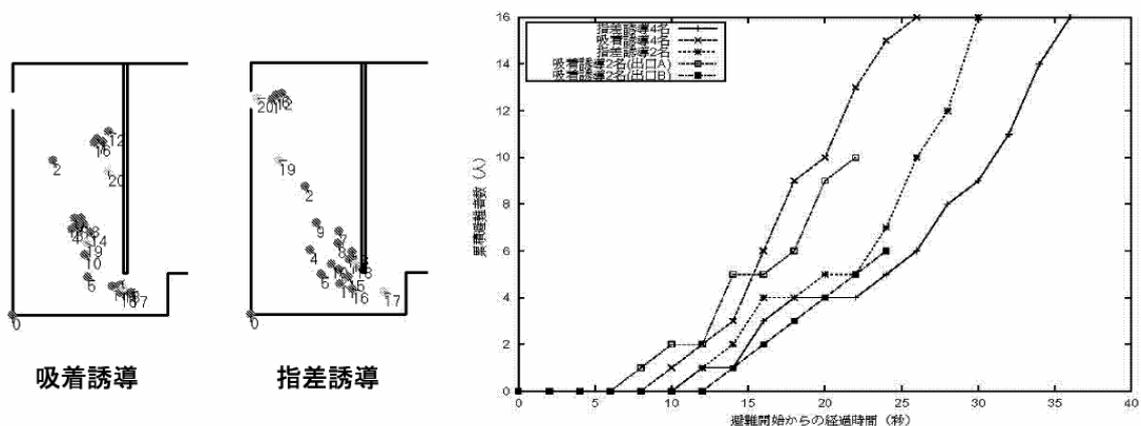
- P2Pによる持続的サービスの提供方式の提案。
 - インスタンス管理ネットワーク安定問題の解決。
 - インスタンス管理ネットワーク構成ノード配置問題の解決。
- オークション応用のための本方式の実装・評価、セキュアオークションプロトコルの実装手法に関する検討。

マルチエージェントシステムによる避難シミュレーション（南一久）

従来の避難行動の分析で用いられているシミュレータは、外界で観察できる人の座標位置などの情報により、数値的な解析によって行われていた。そのため、避難行動で重要となる社会的インタラクションが考慮できていない。そこで、避難シミュレータに社会的インタラクションを導入し、仮想空間での避難行動を現実のものに近いものとなるよう試みている。また、避難行動中に行われるインタラクションを解明しようとしている。

本研究では、インタラクション記述言語 Q により、避難行動の際に行う行動の記述を行った。そして、Q 言語を実装したマルチエージェントシミュレータ上で避難誘導実験のシミュレーションを行った。今回記述したモデルは、既に実空間で行われた避難誘導実験に基づいている。この実験では、以下に示す 2 つの誘導法の有効性を比較したものである。一つは、大声を出しつつ出口を指示するという指差誘導法である。もう一つは、近くの 1、2 人の避難者だけに出口に案内することを伝えて、出口まで誘導するという吸着誘導法である。この実験から、吸着誘導法は非常に効果的であることが分かった。

その結果に基づいて、避難行動のインタラクションのモデル化を行った。しかし、シミュレーション結果は、実空間で行われた実験結果とは異なり、指差誘導と吸着誘導の間に、大きな差異は見られなかった。実験のビデオを解析することにより、その原因が同調行動のモデルがインタラクション記述に反映されていなかったことがわかった。そこで、同調行動のモデル化を行い、シミュレーションを試みた。シミュレーションした結果、先行研究で得られた実空間での実験結果と、インタラクションを導入したシミュレーション結果を一致させることに成功した。



各誘導法における杉万実験追試シミュレーション結果

本研究の成果は以下に挙げた点である。

- インタラクションを取り入れた避難シミュレーションのモデルとして、杉万実験の追試シミュレーションを行った
- 杉万実験と同じ現象を生成する過程で、人が避難行動を行う際のモデル化を行った
- 今回用いた事例により、少なくとも現実と同じ現象を自然なモデルで生成可能であることを示した

Web ディレクトリを用いた専門検索エンジンの自動構築（吉住貴幸）

WWW において goo のような汎用検索エンジンは非常に有用であるが、使いこなすにはある程度のノウハウが必要であり、多くの初心者にとっては使いにくいものであると言える。このような問題の解決策の一つとして、ユーザの入力するクエリにドメイン特有のブール式（検索隠し味）を結合して汎用検索エンジンの入力とする検索隠し味によるドメイン指向の検索エンジンが提案されている。この検索隠し味を用いた専門検索エンジンは、レシピのドメインにおいて適合率、再現率ともに 90%前後の非常に高いパフォーマンスを発揮することが示されている。しかし、レシピ以外のドメインでの効果の検証はされておらず、検索隠し味のパフォーマンスの一般性は確認されていなかった。また、検索隠し味の計算に不可欠な訓練集合を得るためには、膨大な数の Web ページを正例と負例に人手で分類することが必要であり、そこに膨大な労力がかかるという問題点があった。

そこで本研究では、検索隠し味の一般性を確認すると共に、Yahoo に代表されるディレクトリ型検索エンジン等で、すでにドメインごとに分類済である Web ディレクトリを用いて、訓練集合を効率的に生成する手法を提案する。これにより専門検索エンジンをより簡単に構築することができるようになると考えられる。

Web ディレクトリを利用して訓練集合を自動生成する際に問題になる主な点としては、WWW の一部からのサンプリングとなってしまうこと、目標となるドメイン以外のページが数多く含まれてしまうこと、などが挙げられる。本研究ではこれらの問題を、キーワードフィルタを利用したノイズの削減、相互情報量を用いたサイト依存性キーワードの除去、Web ページのドメイン依存度を利用した正例の純度の向上で解決した。

また従来の検索隠し味抽出アルゴリズムを検討した結果、ルール単純化の際の枝がり手法に改善の余地があることが判明した。そこで、ルール単純化の際に、正規化した再現率を用いる手法を提案し、従来手法より性能の高い検索隠し味を抽出することを可能にした。

本研究の成果は以下のようにまとめられる。

1. 検索隠し味抽出アルゴリズムの改良

従来の検索隠し味抽出アルゴリズムにおけるルールの単純化手法に関して、再現率を正規化する手法を提案し、より性能の高い検索隠し味を抽出することを可能にした。

2. Web ディレクトリを利用した、専門検索エンジンの自動構築法の提案

検索隠し味による専門検索エンジン構築の際の大きな問題点である訓練集合の収集に関し、既存の Web ディレクトリを利用することにより、構築の労力を大きく減らす手法を提案した。具体的には以下のような手法を提案した。

1. 相互情報量を用いたサイト依存性キーワードの除去

Web ディレクトリを利用した場合、Web の一部からの偏ったサンプリングになってしまい、サイトに大きく依存するようなキーワードの影響が出てしまう。そこで情報理論における相互情報量を利用し、その影響を抑える手法を提案した。

2. キーワードフィルタリングによるノイズの削減

訓練集合を自動収集しようとする、ノイズの混入は避けられない。そこでユーザが入力すると思われる単語でフィルタリングすることにより、ノイズを削減する手法を提案した。

3. Web ページのドメイン依存度を利用したノイズの削減

ドメインによっては、自動収集した訓練集合の質が悪すぎて、キーワードフィルタリングによる訓練集合の純度の向上では不十分な場合がある。そこで Web ページのドメイン依存度を導入し、訓練集合の質を大きく向上させる手法を提案した。

特別研究報告書概要
(2001年度～2003年度)

2003年度特別研究報告書

印象オントロジーによる情報検索支援（田仲正弘）

印象を表現する語（印象語）の出現頻度に基づいて特徴抽出を行ったあと、クラスタリングアルゴリズムを適用することでオントロジーの半自動的な生成を試みた。このように生成されたオントロジーは印象の概念構造を表現しており、ユーザの利用に適合するように一部を編集することで、各ユーザに合わせた印象に基づく検索が行える。またオントロジーの構造を考慮した近傍検索など、さまざまな検索が可能になる。一般にオントロジーの作成には莫大なコストが必要であるが、自動的な意見情報の収集やクラスタリングアルゴリズムを用いるため、オントロジー作成のコストを削減できる。

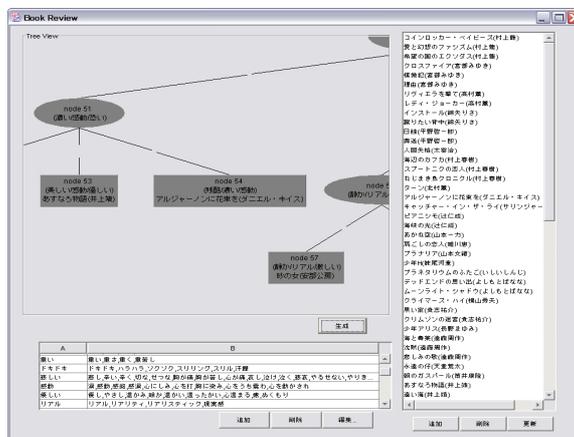
意見情報の収集は、検索エンジンでページを収集した後、収集された HTML 文書の構造を解析することで行った。これはインターネット上で意見情報を記述したページはある程度決まった構造を持っている場合が多いことを利用している。次に、あらかじめ設定しておいた印象語の意見情報中の出現頻度に基づいて特徴抽出を行い、クラスタリングアルゴリズムを適用する。ここでクラスタリングアルゴリズムに COBWEB や階層的クラスタリングを用いると、設定した印象語の集合によって表現される印象のオントロジーを得られる。クラスタリング結果の階層構造のノードが、印象を表現するクラスとなる。さらに各ユーザが上記の方法で生成されたオントロジーを使って印象による検索を行うためには、ユーザに合わせた印象語の選択や、自動生成されたオントロジーの編集を行える必要がある。そこで書籍を対象としてオントロジーの生成までの処理を統合的に行い、生成したオントロジーを用いて検索を行えるツールを開発した。このツールの開発によって、以下のようなことが実現可能になる。

□ Web の意見情報を用いた半自動的な索引付け

印象語の出現頻度に基づくクラスタリングにより、印象に基づく索引付けの手間を削減できる。また多くの Web ページから対象に関する意見情報を収集して利用するため、一般的な印象が得られることが期待できる。クラスタリングにより得られるオントロジーはそのままではそれぞれのユーザの利用に適するとは限らないが、ツールに生成したオントロジーの編集機能を加えておくことで、各々に適するオントロジーを作成できる。

□ 印象オントロジーを利用した視覚的な検索

生成されたオントロジーを簡単な操作でブラウズできれば、オントロジーの階層をたどりながら、求める印象を持つ書籍を簡単に確認できる。またリストから書籍を選択するとその部分がフォーカスされるようにしておけば、近傍のクラスを探すことで似た印象を持つ書籍を視覚的に探すことができる。



開発したツールのスクリーンショット

不要な証明書・ポリシーを開示しない Automated Trust Negotiation (藤井雅雄)

1. はじめに

オープンな環境において、未知の相手と安全に取引するには、十分な信用が相互に確立されている必要がある。そこで、所有者の特徴を記述した電子証明書や、証明書の開示条件を記述したポリシーを交換することで、信用を確立する手法として Automated Trust Negotiation が提案されている。

証明書・ポリシーは、氏名や所属集団といった機密情報を含む。このため、証明書・ポリシーの開示はできる限り少なくする必要がある。そこで、本稿では、Automated Trust Negotiation を、証明書・ポリシーに対するコストが付与された特殊な AND/OR グラフである交渉グラフ上で最小コストの解グラフを求める探索と定義し、探索に動的計画法による探索手法を適用する。

2. Automated Trust Negotiation と交渉グラフ

Automated Trust Negotiation では、2 エージェントが証明書・ポリシーの開示を交互に行うことで互いに信用を確立する。本稿では、証明書・ポリシーの関係を、以下のような特徴を持った交渉グラフに対応させる。

- ・ コネクタと終端節点にコストが付与されている。
- ・ グラフに循環及び再合流がない。

交渉において証明書・ポリシーの開示をできる限り少なくするには、交渉グラフを探索し、最小コストの解グラフを求める必要がある。また、証明書・ポリシーは 2 エージェントに分散しており、一方が持つ証明書・ポリシーだけでは、交渉グラフの全体を構成できない。部分的なグラフから最小コストの解グラフを求めるのは困難であるため、探索を進めるにはエージェントは証明書・ポリシーを開示することで、交渉グラフの全体を構築していく必要がある。ただし、グラフ構築の際にも、必要以上に証明書・ポリシーを開示しない必要がある。

4. 動的計画法による交渉グラフの探索

本稿では、交渉グラフの探索に動的計画法による探索手法を適用することで、最小コストの解グラフを求める。交渉グラフ上で最小コストの解グラフを求める問題では、動的計画法の中心概念である最適性の原理が成立する。このため、任意の節点 v を根節点とする最小グラフのコストを $h(v)$ とすると、以下のような定理を導出できる。

【定理 1】

任意の終端節点 t の h は、 $h(t) = c(t)$ となる。ただし、 $c(t)$ は t のコストである。

【定理 2】

任意の非終端節点を v とし、 v を親節点とするコネクタを $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m$ 、 θ_i の子節点を $v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iN_i}$ とする。このとき、 v の h は、 $h(v) = \min_{1 \leq i \leq m} \{c(\theta_i) + \sum_{k=1}^{N_i} h(v_{ik})\}$ となる。

動的計画法による探索では、各エージェントは定理 1, 2 に従い h の計算と開示を繰り返す。交渉グラフの全節点について h を計算すると、根節点から、計算した h に従いコストが最小になるようにグラフをたどることで、最小コストの解グラフを求めることができる。このとき、探索途中で開示される h に含まれる情報は、ポリシーの一部だけである。

4. おわりに

本稿では、Automated Trust Negotiation を、交渉グラフにおいて最小コストの解グラフを求める探索と定義し、探索に動的計画法による探索手法を適用した。これにより、必要以上にポリシーを開示することなく最小コストの解グラフを求められるようになり、証明書・ポリシーの開示をできる限り少なくすることが可能となった。

機械翻訳を用いた多言語ディスカッション支援（柳沢裕二）

多言語間でコミュニケーションを得ることは非常に難しく、特に、意見を交わしあい、一定の期間内で一定の同意事項を形成しなければならないディスカッションにおいてはさらに困難なものになる。そこでその多言語間の意見交換を支援するものとして機械翻訳があげられるのだが、現状の機械翻訳はまだ十分な精度が得られておらず、支援ツールとして十分な役割を果たせていないだけでなく、時には多言語間のコミュニケーションを阻害する要因のひとつになりかねない。そこで、機械翻訳を持つシステムにどのような機能を持たせれば、より活発な多言語間でのディスカッションが行えるようになるかを明らかにする必要がある。

機械翻訳を有する非同期型多言語コラボレーションツール（TransBBS）の環境下で、日中間で、与えられたテーマに即してディスカッションを行うコラボレーション実験を行い、そのディスカッションの過程を分析した。そうすることで、機械翻訳の不備を補完するために必要なツールや構造の有用性、多言語間のコミュニケーションを促進する構造や逆に阻害する構造はどういったものなのかを検証する。

TransBBS で得られたログデータを以下のように調べた。まず、ログデータのツリー構造が週ごとにどのように変化していくかを調べ、週を追うごとに議論の活発さ、活発な議論が行われるツリー構造、議論の停滞してしまったツリー構造の共通点も明らかにしようとした。また、具体的な議論の内容を分析し、視覚化することで実際の議題の流れをつかみやすくし、議論が活発に行われて参加者間で合意が得られた議論はどのように推移したのか、逆に齟齬が起きたのはどのような推移からなのかを分析した。さらに、本実験で多言語コミュニケーションをサポートするために導入した、一部の重要な投稿を人手で再翻訳するバイリンガル・ヒーローや、投稿する前に機械翻訳の結果を見ながら自らの手で手直しをした後で投稿する自己翻訳精練などが、議論を活発にすることにどの程度役に立っていたのか、どのように使われていたのかを調べることで、これらの有用性を調べた。加えて、実験後のアンケートもログデータとあわせて分析に用いた。これらの手法により、主に、異なる言語間でのコミュニケーションを促進させるのはどのような状況の時か、逆に阻害するのはどのような状況の時かを中心に研究した。

その結果、以下のようなツールがあると多言語間でのディスカッションをより活発にすることができることが分かった。まず、議論の論点を正確に読み取り議論のサマリーを作るようなシステム。これは、議論の出発点を作ったり、議論が拡散するのを防いだり、議論に取り残されていた参加者が議論に参加しやすい環境を作ることができるためである。次に、似たような発言の繰り返しを見つけるツールも必要である。これは、同じような議論のやり取りの繰り返しを減らすことで、議論を進めるとともに、両者の間にある齟齬をはっきりさせることに役立つ。さらに、著しい翻訳の誤りや、まったく意味の通らない翻訳は、議論の誤解や停滞を作り出す大きな要因となるため、翻訳誤りを見つけ、そこをより正確に訳すことのできるようなシステムも必要であるといえる。これらの要素は本実験ではファシリテーターやバイリンガル・ヒーローが果たしていた役割であり、彼らの活躍によって議論が活発になっていたことが明らかになったために言えたことである。ゆえに機械翻訳を用いた多言語ディスカッションには彼らの果たしていた役割と同じようなことのできる上記のような支援ツールが必要であることが明らかになった。

2002年度特別研究報告書

Webサービス連携シナリオの記述と実行（杉本悠樹）

従来インターネット上のサービスは、Webアプリケーションと呼ばれる、利用者が直接操作する Web ブラウザを介して提供されるものであった。しかし、公開されるサービスの爆発的増加に伴い、利用者の直接操作の限界が露呈してきた。そこで、近年注目されているのが Web サービスである。Web サービスとは、計算機可読な形で表現されたサービス情報に基づき、ソフトウェアエージェントがサービスを自動的に連携し、更に、再利用可能なアプリケーションコンポーネントとして提供することを可能にする枠組みのことである。人間の介入を必要としないため、大規模な Web サービスの自動連携が可能である。

本研究では、既存の Web サービス連携言語が持つサービス連携における柔軟性の欠如、人間に対する可読性の欠如という問題を解決するため、マルチエージェントの動作記述を行えるシナリオ記述によって Web サービスを連携する。シナリオには、エージェントへの動作の依頼を記述する。動作以来はインタプリタを通じてエージェントに送信され、エージェントは依頼内容によって振る舞いを決定する。シナリオレベルでの動作依頼の記述と実装レベルでの依頼を受けたときの動作は切り離されており、依頼を受けたエージェントが動作をどのように実行するかは、エージェントの実装に任されている。またこのことにより、動作の実装はシナリオからは隠されているため、実装の細部が現れない、抽象度の高い動作記述をすることが可能である(図 1)。

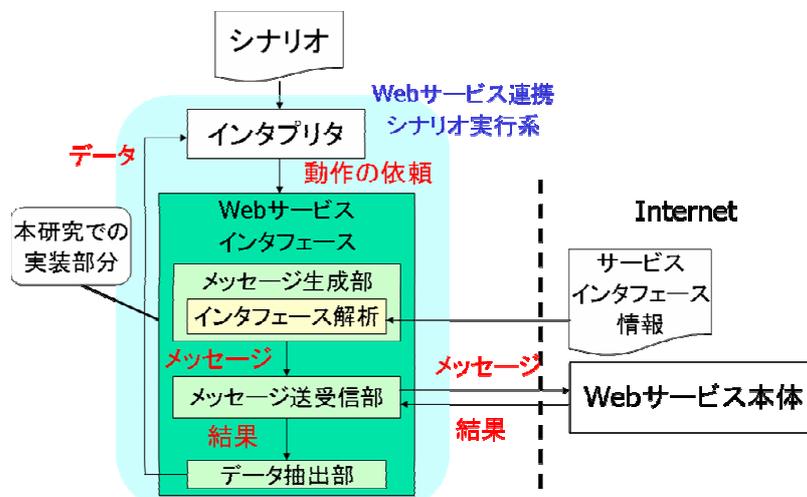


図 1：シナリオ実行系のシステム構成

更にシナリオ記述補助のため、Web サービス連携用 IPC(Interaction Pattern Card)を作成した。IPC とは、Excel で描かれたカードの空欄を埋め、専用コンバータにかけることでシナリオを生成するシステムである。本研究では、Web サービス連携で必要となるエージェントの行動パターンを分類し、それに応じたカードフォーマットとこれらをシナリオに変換するコンバータを作成した。

本システム構築を通じて、Web サービス連携における複数のエージェントの動作表現、柔軟性の実現に対してシナリオ記述が有用であること、また、実装を通じて可読性の高さを確認した。

仮想都市における群集ナビゲーション支援（板倉豊和）

自律的なエージェントだけでなく利用者の操作するアバターを含む仮想都市空間では、アバターと他の歩行者が集団として共に歩行することを考慮した歩行者モデルが必要になる。本研究では3次元仮想都市空間で他の歩行者と何らかの集団的な歩行が行えるような歩行者モデルを提案し、このモデルに基づいてアバターをナビゲートし利用者のアバター制御を支援する。

以下は既存の仮想都市環境で用いられる歩行者モデルのアバター制御における問題点である。

1) 群集の中で周囲の歩行者との距離を調節する歩行者モデルでは、利用者の思い通りにアバターを集団に加入または集団から離脱させることはできない。

2) 個人間の衝突回避や方向調節などの機能をもつ歩行者モデルでは、集団が隊形を保っている場合、利用者はその隊形を維持するためにアバターを細かく制御しなくてはならず、非常に煩雑である。

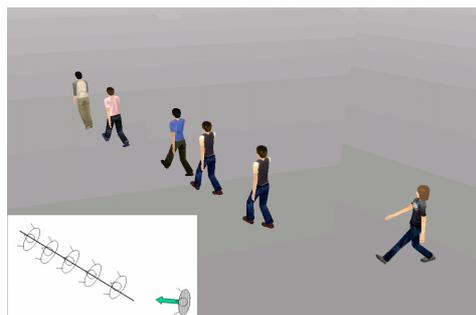
これらの問題を解決するため本研究ではアバターの参加を想定した歩行者モデル（Formation Model）を考案した。モデルの計算には歩行者の座標・向き・進行方向などを用いる。歩行者は別の歩行者に一定距離内に近づくと周囲の歩行者とグループを形成するが、他歩行者の歩行パラメータ条件（他歩行者との体の向きの差など）が隊形に適さないものであればグループとして歩行しない。いくつかの隊形の候補の中から最もグループが持つ隊形に近いものが選ばれ、その隊形の中での適切な位置へ向かって歩行パラメータの自動補正（ナビゲート）が行われる。歩行パラメータの補正は、その隊形において現実空間で歩行者が見せる自然な歩行行動を反映したものになっているため、アバターは自然にナビゲートされる。

本研究では、仮想空間環境FreeWalk上にFormation Modelを実装した。歩行者集団がとる特徴的な隊形の例として、歩行時の隊形の代表として直線隊形を、コミュニケーション時の隊形として円陣を組んでの会話を想定した。このモデルが与える影響の考察は以下の通りである。

1) 利用者の意図の反映：従来の歩行者モデルではエージェントの集団行動が前提となっており、その環境ではアバターの自由な行動は不可能だったが、今回考案した Formation Model ではアバターが集団に近づいた場合、加わるべき隊形が認識された場合のみ集団に加わる。そのため、集団への加入・集団からの離脱などの際に利用者の意図どおりにスムーズに操作できる。

2) アバターの操作性の向上：隊形をもつ集団の中で、現実空間でその隊形に属する人間がみせる自然な歩行が自動化される。このため、仮想空間でこれらの自然な歩行行動が意識されることが少なくなり、このことがその集団の一員として行動している利用者の感じる現実感を増すことにつながる。

これにより仮想空間に対する利用者の現実感を増加させる効果があり、Formation Model はアバターの参加する仮想環境において隊形を持つ集団を扱うのに適した歩行者モデルであると考えられる。

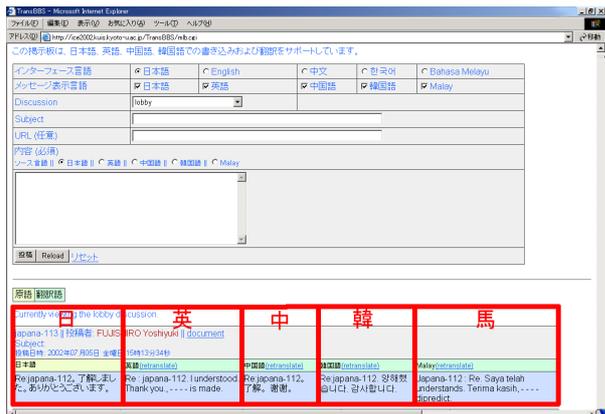


機械翻訳を用いた多言語協調作業環境の試作（藤代祥之）

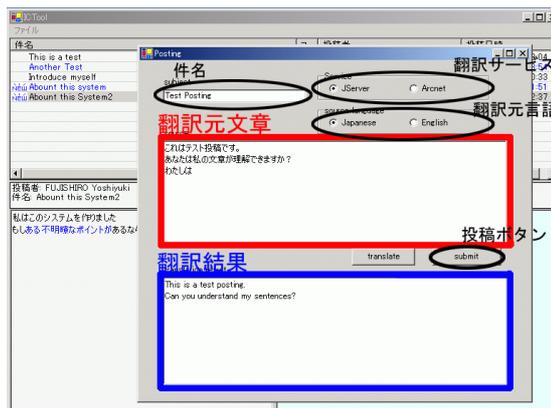
近年、異国間での言語の壁を越えたコラボレーションニーズが増大している。しかし、複数の言語を用いた協調作業を支援するためのツールや研究はあまり存在していない。そこで、本研究では機械翻訳を用いて多言語間の協調作業を支援するような環境を実現する事を目指し、そのようなツールの問題点の検証、プロトタイプ実装による解決方法の提示、そのような環境に必要なアーキテクチャ、機能の考察を行う。

我々は、日韓中馬の4カ国の学生が参加する協調作業実験を行った。この実験では、日韓中馬英の5ヶ国語の機械翻訳機能を持ったBBSであるTransBBSを使用することにより、各々の母国語のみで意思疎通を図った。TransBBSでは、ある言語で入力した文章が他の4ヶ国語へと機械翻訳され、その結果を投稿することができる。

実験の結果、投稿者はより良い翻訳結果を求めて翻訳元文章の修正を行うが、それには何度も試行錯誤をしなければならないという問題が観察された。また、翻訳結果の文章を閲覧者が理解できない場合には閲覧者が投稿者へ文章の意味を確認するなどして意思の疎通を成立させる例が観察された。機械翻訳を使用した協調作業の際には、このようなインタラクションが意思疎通に有効である。しかし、翻訳精度が極度に低い場合にはこのようなインタラクションも正常に機能しない問題が確認された。



TransBBS



プロトタイプ(リアルタイム翻訳)

これらの問題の解決策として、以下のような機能を持つプロトタイプを作成した。

- 文章を1文単位でリアルタイムに翻訳する。翻訳元文章中に句点記号が表れると自動的に翻訳を行い、翻訳結果欄に結果を瞬時に表示する。投稿者は、文章入力・翻訳待ち・翻訳結果の確認という独立した作業を、1つのまとまった作業として行えるようになる。その結果、翻訳元文章の修正作業が容易になり、よりよい翻訳結果が得られる。
- 閲覧者が翻訳結果の特定部分を理解できなかった場合に、他の利用者に対し文章を用いずにそのことを通知できるような仕組みを提供する。これにより閲覧者からのフィードバックに機械翻訳が介在しないため、インタラクション過程において翻訳精度の影響を受けにくくなる。

機械翻訳を用いた多言語間の協調作業においては、よりよい翻訳結果そして意思疎通を得るために、機械翻訳されやすい文章作成を支援する機能の付加が重要であるといえる。また、多数の国で開発・利用を促進するためにも、オープンなアーキテクチャを基に協調作業環境を作成することが有用である。

三次元仮想空間における詳細レベルを用いた群集歩行アニメーションの描画

(松本賢治)

三次元仮想空間における災害避難シミュレーションにおいて、人混みの中で人がとる行動を心理的に解析するためにも群集の歩行アニメーションを実現することは極めて重要である。しかしながら、歩行動作を計算によって生成する場合その計算コストが高く、群集の歩行を計算機上で再現することは困難である。

本研究では、既存のアニメーションアルゴリズムに改良を加えることなく、そのモデルの表示を行う際に、計算機にかかる負担を軽くさせることにより、三次元仮想空間での群集歩行を再現することが目的である。そこで、視点からの距離に応じてモデルのポリゴン数を減らすLODという技術を用いて描画計算を削減し、人体モデル単位ではなく群集モデル単位で描画計算の削減を行った。

LODを用いた群集歩行アニメーションの生成手法の特徴として以下のものがある。

人体の差し換え：視点からの距離が遠くなると、関節の少ない人体を用い歩行動作を単純化し計算量を減らす。また、さらに遠い人体は、数体をまとめて一枚のテクスチャで表示し、描画の計算を削減する。

ビルボード表示：視点からの距離がある値になると、パーツ毎に分かれたモデルから一枚の板にテクスチャを貼り付けた人体に差し換え、その板が常に画面方向に向くように表示するビルボード表示を使用する。

テクスチャの差し換え：視点からの距離がある程度の値になると、テクスチャのサイズを小さいものに差し換え、レンダリングの計算を削減する。

テクスチャの同じ人体：視点からの距離が遠い人体に対し、同じテクスチャを使用し、向きも4方向のみの人体を用いることで、テクスチャの保存にかかるメモリを削減する。

この手法により、従来の倍以上の人数の歩行アニメーションを描画することが可能となった。



群集歩行アニメーション

2001年度特別研究報告書

マルチエージェントシステムによる避難シミュレータの試作（河添智幸）

従来、建築などの分野においては、災害などの緊急時に内部の人間がどのような避難を行うかについて、シミュレーションを行うことによって調査を行い、建築物の避難特性を調べるといったことが行われていた。このようなシミュレーションによって、建築物の設計の段階で避難時の行動を考慮することが可能になり、災害対策の面で大きな役割を担っている。しかし、このようなシミュレーションでは、物理的な人の動きのみを考慮するという特徴があるため、人間同士に物理的以外の相互作用が存在する場合を再現することが困難である。実際の避難行動では、避難誘導を行うことによって安全な出口へと誘導を行う必要が生じる場合も考えられる。こういった避難誘導などが存在する場合のシミュレーションというものが一つの課題であった。

そこで本研究では、上記のような人間同士の社会的インタラクション、つまり人間同士がコミュニケーションなどを通じて相互作用を行う場合のシミュレーションを行うためのシミュレータを作成することを第一の目的とし、また三次元仮想空間内で避難誘導を再現する場合に使用されるシナリオを二次元空間上で動作させて確認を行うためのアプリケーションの作成を第二の目的として、シミュレータの製作を行った。このシミュレータを作成する際には、個々のエージェントがそれぞれ判断を行い行動するマルチエージェントの考え方を採用し、インタラクションというミクロな事象を表現可能にした。

本研究で個々のエージェントの動作を記述する言語として *Q* 言語を用いる。この理由は、状態遷移という分かりやすい記述を用いて複雑なエージェントの動作を簡潔に記述できること、またエージェントの内部のメカニズムに関係ないシナリオのために他のアプリケーションでも同じシナリオを使用可能という点である。また、シミュレータを作成するためのプログラミング言語としては、Scheme 言語を用いた。この言語を用いた理由としては、シナリオを記述する言語である *Q* 言語が Scheme 言語を基にしているため、Scheme 言語を使用すると容易にシミュレータを構築することが可能だからである。

このような背景に基づき、*Q* 言語で書かれたシナリオを実行するシミュレータを作成した。シミュレータ上では各エージェントを円で表し、それらの動きを上から見た形で表示することによって、それぞれのエージェントがどの位置にいるのかという点だけでなく、エージェント全体がどのような動きをしているのかを視覚的に確認することもできる。また、各エージェントがそれぞれの位置でどのような状態であるかを見ることも可能である。このシミュレータを用いると、避難者および誘導者の行動をシナリオという形で記述することにより、シミュレータ上で仮想的に避難行動をシミュレーションすることが可能になる。実際にこのシミュレータを用いて、過去に実空間で行われた避難実験を基にしたシナリオを使って再現シミュレーションを行ったところ、実空間上の避難実験と類似した結果を得ることができた。

以上より、本研究の貢献として、仮想空間内において人間同士の社会的インタラクションを考慮したシミュレーションを実行することが可能になったこと、および三次元仮想空間上でのシナリオと同様のシナリオを二次元シミュレータ上で動作させることによるシナリオ開発労力の削減効果があげられる。また、将来高度な機能を研究するための土台として、このシミュレータを利用することが可能であると考えている。

魚眼透視法による広視野ウォークスルーインタフェース（志水信哉）

現実で私たち人間が見ることができる視野は水平方向に180度を超える。仮想空間における視野角の大きさを、現実世界の視野角に近づけるには人間の視野全てを表示装置で覆わなければならない。これを実現するためにはCAVEに代表される没入型ディスプレイを用いる必要があるが、非常に高価で巨大なため容易に使用できない。

そこで本研究では限られた物理視野角に対して擬似的に人間の視野に近い視野角を表示するために、最も一般的な投影法である透視投影法と、広い視野を表示する投影法である魚眼透視法を組合せた周辺魚眼透視法を考えた。

1. 視線方向の中心視部分においては透視投影法を用いる

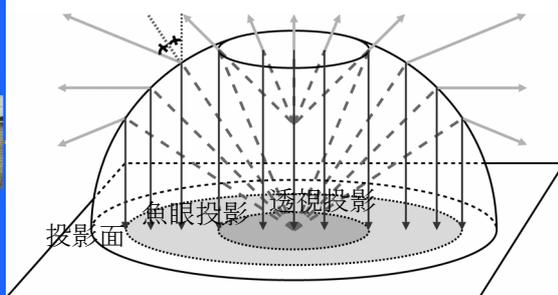
注視空間においては一般的な透視投影を用いることで、現実の感覚に近い遠近感を再現し、形状の崩れが少ない映像を生成する。

2. それ以外の周辺視部分においては魚眼投影法を用いる

注視空間以外において魚眼投影法を用いることで、形状を保存できないが広い視野角を狭い領域に描画する。

この方法により、中心部分で正確で密度の高い情報が得られ、周辺部では存在感などの大まかな情報が得られるという人間の視覚に近い視野を得ることができるようになる。

本研究では、普通の透視投影法のみがサポートされた、典型的なハードウェアの上で動作する、魚眼透視投影法のレンダリング手法を実装した。処理がハードウェアで高速化されていないため、1枚の滑らかな画像を生成するのに十数秒の時間を必要とする。しかし、将来的にハードウェアで高速化されることで、現在の透視投影法と同程度の速度で描画できるようになると考える。



周辺魚眼透視投影法のウォークスルーインタフェースとしての有用性について考察するために、透視投影法や魚眼透視法と比較を行った。更にはウォークスルーインタフェースとしてひろく知られている三人称視点による表示とも比較を行った。比較する際に着目した点は、画像における歪度、仮想空間への没入感、そして仮想空間内での操作性である。

その結果、周辺魚眼透視投影法では、次のような効果が得られた。

- 広い画角の透視投影法と比べて現実の知覚に近い表示が得られる
- 魚眼透視法と比べて歪みの少ない表示が得られる
- 三人称視点と比べて仮想空間への高い没入感が得られる
- 広い視野が得られることにより、仮想空間内での操作性が向上する

2000年度特別研究報告書

LIVIEWER モバイル環境における情報発信行動の可視化（横井隆宏）

本研究では、モバイル環境における情報発信行動を可視化し、分析するためのツール、モバイル環境の可視化ツール LIVIEWER を開発した。LIVIEWER とは、モバイル環境利用者の情報発信時の行動とその周りの状況を視覚的に再現するためのツールである。

本研究の最終目標は、モバイル環境における情報提供を促進する事である。そのためには、まずモバイル環境において情報提供者がどのような状況で情報を提供するのかを知る必要がある。LIVIEWER はこれを調査する実験から得るデータを分析する。この実験から得たデータは、GPS、音声、写真、発信情報の内容である。

これらのデータから、モバイル環境において情報提供者が、どのような状況で情報を提供するのかを分析しなければならない。つまり、ユーザのコンテキストと、情報発信行動の関係を同時に分析できることが必要である。

LIVIEWER では、地理的な情報、時間的な流れの情報、発信に至った要因（トリガ）と発信された情報の意味（カテゴリ）の要素を三つのインタフェースを相互に連動して見せることにより、情報提供行動を再現している。

また、分析した結果を編集するため、情報要求、発信行動の発生要因（トリガ）と提供された情報の種類（カテゴリ）の項目を設定し、各提供情報についてその二つを編集し、それが視覚的にわかるようにする事、さらにグラフ化する機能を実装した。

本研究の目標は、LIVIEWER によってモバイル環境におけるユーザのコンテキストと情報提供行動を可視化するという事である。そこで実際に LIVIEWER を実装し、Windows 上で動作した。実際に実験で得たデータを LIVIEWER に適用したところ、地理情報、時間の流れの情報、提供行動発生の要因（トリガ）と提供情報の意味（カテゴリ）が連動し、モバイル環境における情報提供行動の視覚化が行えた事を確認した。

本研究の主な成果は以下の点である。

- モバイル情報の視覚化ツール：LIVIEWER の実装
実験で得たデータ（GPS、音声、提供情報）を用いた、地理情報、時間の流れの情報、提供行動発生の要因（トリガ）と提供情報の意味（カテゴリ）の 3 点を軸とした、モバイル環境における情報提供行動の視覚化



図 1 : LIVIEWER 動作の様子（スクリーンショット）

博士論文・修士論文・特別研究報告書
題目一覧

博士論文

1. Market-Based Control for Quality of Services in Network Applications. Hirofumi Yamaki. (September, 1999).
2. Real-Time Search with Nonstandard Heuristics. Masashi Shimbo. (March, 2000).
3. 動画データへの多重アクセス制御とデータ保護. 藤井寛. (September, 2000).
4. 画像の表層的特徴を利用した検索と閲覧に関する研究. 串間和彦 (March, 2001).
5. 人物像の歩行動作生成に関する研究. 筒口けん (March, 2001).
6. 人工知能システムの疎結合型並列コンピュータによる高速化の研究. 湯川高志 (March, 2001).
7. エージェント技術のコミュニケーションへの応用に関する研究. 服部文夫 (March, 2001).
8. ゲノム情報のための検索アルゴリズム. 三浦輝久 (March, 2001).
9. Design and Analysis of Social Interaction in Virtual Meeting Space. Hideyuki Nakanishi (March, 2001).
10. Localization of Sensors and Objects in Distributed Omnidirectional Vision. Takushi Sogo (September, 2001).
11. Query Refinement for Domain-Specific Web Search. Satoshi Oyama (March, 2002).
12. 地理的関連性を用いた Web 検索技術の研究. 平松 薫 (September, 2002).
13. A Constructive Approach for Communication Robots, Takayuki Kanda (March, 2003).
14. Design and Applications of Learning Conversational Agents. Masayuki Okamoto (March, 2003).
15. Analyses of Academic Communities Using Information on the Web. Saeko Nomura (January, 2004).

修士論文

平成7年度

1. Robot oriented state space construction (佐藤律子)
2. 一対多赤外線通信プロトコルの開発 (顧程)

平成8年度

1. Object Recognition Based on Appearance Changes (河原功志)
2. Mobile Robot Navigation by a Distributed Vision System (田中吾一)
3. A Market-Based Approach to Allocating Quality-of-Service for Multimedia Applications (八槇博史)
4. ゲームプログラミング技術のビデオ会議システムへの応用 (吉田力)

平成9年度

1. 広域ネットワークにおけるトラフィックルールの獲得 (高野真一)
2. Implementation and Evaluation of a Virtual Meeting Space (中西英之)
3. 大規模な分散視覚システムの設計および評価 (浜田伸一郎)
4. ゲノム解析のための配列歩行システムの実装 (三浦輝久)
5. N人ゲームにおける最良優先探索の研究 (和田洋征)

平成10年度

1. Acquisition of Qualitative Spatial Representation by Multiple Vision Sensors (十河卓司)
2. 注視制御によるロボットの状態空間生成 (上原子正利)
3. 協調仮想空間のための両耳現象に基づく音像定位 (花野真也)

平成11年度

1. Supporting Cross-Cultural Communication with a Large-Screen System (岡本昌之)
2. 社会的ロボットの開発と評価 (神田崇行)
3. Applying an Information Sharing Platform to International Workshops (武馬慎)
4. QoS Market: A Market-Based Network QoS Control System (田中慎司)
5. New ways of producing and sharing impressions and thoughts (Martin David)
6. 楕円曲線暗号の高速計算法 (竹内健治) (連携講座 情報セキュリティ)
7. コミュニティマネージシステムの機能分析と適用モデル開発 (野村早恵子) (連携講座 市場・組織情報論)
8. Innovations in Open-Source Software Development: Electronic Media Stifle and Foster Innovations (山内裕) (連携講座 市場・組織情報論)

平成12年度

1. デジタルシティのための三次元仮想空間プラットフォームの設計 (羽河利英)
2. Keyword Spices: A New Method for Building Domain-Specific Web Search Engines (小久保卓)
3. Applying Wizard of Oz Method to Learning Interface Agents (梁連秀)

平成 13 年度

1. Peer-to-Peer アーキテクチャのメッセージ共有への応用 (田中裕一郎) (連携講座 市場・組織情報論)
2. インターフェースエージェントを用いた商品発注システム的设计 (涂成良)
3. Analysis of Social Agents Based on Balance Theory (中澤諭)
4. Caching Policy for Content Delivery Networks Based on User Preferences (中塚康介)
5. モバイル環境における揮発性情報の共有 (林田尚子)
6. A Scheme for Persistent Services in Peer-to-Peer Network (松原啓明)
7. マルチエージェントシステムによる避難シミュレーション (南一久)
8. Web ディレクトリを用いた専門検索エンジンの自動構築 (吉住貴幸)

平成 14 年度

1. アドホック環境のためのマルチエージェントプラットフォーム Pervagent の開発 (新留憲介)
2. Web のハイパーリンク構造の可視化 - LinkViewer によるリンク解析 - (早水哲雄)
3. Web サービスのシナリオ記述からプロセスセマンティクス記述の生成 (村上陽平)
4. Analysis of Multilingual Collaboration Process via Machine-Translation (安岡美佳)
5. 仮想都市における空間的・行動的手がかりに反応する対話エージェント (山中信敏)
6. Peer-to-Peer シミュレータ SimPeer の開発と検証 (鳥居大祐) (連携講座 市場・組織情報論)
7. A 3-factor Valuation Model for Mortgage-Backed Securities (牛山史朗) (金融工学)

平成 15 年度

1. 仮想避難訓練のためのエージェントの行動ルール構築 (河添智幸)
2. 機械翻訳システムに対する利用者適応の分析 (坂本知子)
3. 仮想空間における社会的インタラクションの信頼感の分析 (志水信哉)
4. Design of Social Agent for Japan-China Intercultural Communication (陳磊)
5. モバイルエージェントによる証明書認証の効率化 (福本理人)
6. セマンティックアノテーションを用いた Web リンク解析 (三木武)
7. Model Analysis of Digital Copyright Piracy on P2P Networks (板倉陽一郎) (連携講座 市場・組織情報論)
8. ツリー構造による署名方式とその安全性証明 (西垣秀哉) (連携講座 情報セキュリティ)

特別研究報告書

平成 5 年度

1. マルチエージェントプラットフォームの試作（前山浩二）
2. 実時間探索の学習特性の評価（水野智文）
3. 契約ネットプロトコルの解析（顧程）

平成 6 年度

1. 注視行動モデルの獲得とロボットの誘導（草地良規）
2. 見え方変化に基づく物体認識（佐藤克彦）
3. 「哲学者の食事問題」への強化学習の適用（杉本崇行）
4. 状態空間の写像を用いた実時間探索の効率化（武田純）
5. 人物顔画像認識と会合支援システムへの応用（田中吾一）
6. 無予約型スケジューリングに基づく会合支援システムの開発（八槇博史）

平成 7 年度

1. 協調プロトコル記述言語 **AgentTalk** のスクリプト記述機能の検討（浅山和典）
2. 赤外線通信を用いた映像情報アクセスシステム（梶原史雄）
3. 分散視覚における複数物体の対応問題（川西隆仁）
4. 強化学習アルゴリズムによるプロトコル獲得の研究（高野真一）
5. 3次元仮想空間を用いた多人数会合システム **FreeWalk**（中西英之）
6. 線形記憶量探索における確率的状態記憶方式（三浦輝久）
7. 多人数会合に適した柔軟な会合スケジューリング（Cheng soon Giap）

平成 8 年度

1. コミュニティ支援システムの国際会議における評価実験（伊藤暢康）
2. ロボット誘導のための人間 - ロボット協調システム（岡田慧）
3. 行動と報酬に基づく動的な状態空間の構成（上原子正利）
4. 分散視覚システムにおける注意制御（北村宣之）
5. **Community Viewer**: 携帯端末上でのコミュニティ活動の視覚化（古村隆明）
6. 視覚エージェントの定性的位置関係の復元（十河卓司）
7. ネットワークサロン: 現実の談話室と会合支援システム **FreeWalk** の融合（中野博樹）

平成 9 年度

1. **ScreenTalk**: 大型グラフィックススクリーンを用いた対面会話の支援（岡本昌之）
2. アクティブメールを用いたネットワーク討論の支援（金子善博）
3. 状況依存ソフトウェアモジュールを用いた移動ロボットの制御（神田崇行）
4. 複数の全方位視覚センサを用いた人間の行動認識（佐川立昌）
5. 配列歩行問題への文字列照合アルゴリズムの適用（高瀬俊郎）
6. 合意形成支援システムにおけるコーディネータエージェントの設計（武馬慎）
7. 市場モデルによるデスクトップ会議システムの **QoS** 制御（山内裕）

平成 10 年度

1. J A V Aを用いた遺伝子配列歩行インターフェースの構築 (川村武志)
2. M o b i c a l: モバイルコンピューティングを用いた教育支援環境 (久貝智洋)
3. 大型スクリーンを用いた遠隔地間におけるインタラクション支援 (小久保卓)
4. パーソナルコンピュータ上での 3 次元会合システムの開発 (中田稔)
5. 放射形状を用いたインターネットの可視化 (羽河利英)
6. アプリケーション QoS を選好基準とするネットワーク資源割当て (林幸一)
7. A n n o t a t i o n L i n k : 他者によるWWWコンテンツの再構成 (深田浩嗣)
8. 移動エージェントによる市場計算の効率化 (村上直)
9. リンク情報を利用したWEBサーチエンジン (恵亮)

平成 11 年度

1. 情報共有プラットフォームにおけるエージェントの記述 (東康平)
2. 会話モニタリングを用いた話題提供エージェント (中澤諭)
3. 市場指向分散資源割当てにおける非模索過程の適用 (中塚康介)
4. 補完財の連続オークションにおけるエージェント戦略 (松原啓明)
5. 分散全方位視覚システムによる環境視覚情報の提供 (南一久)
6. A*における節点生成制御方式 (吉住貴幸)

平成 12 年度

1. 混合検索方式の遺伝子整列問題への適用 (牛山史朗)
2. マルチエージェントシミュレータのコミュニケーション機能の開発 (新留憲介)
3. 人間と機械の協調によるタスク指向対話モデルの構築 (菅山光城)
4. リンク構造の可視化によるHITSアルゴリズムの分析 (早水哲雄)
5. インタラクション設計言語 Q の開発 (福本理人)
6. 国際会議支援システムにおけるマルチエージェントプロトコルの記述 (村上陽平)
7. An R-tree Based Voice Communication Method for 3-D Virtual Spaces (Teh Siew Ling)

平成 13 年度

1. マルチエージェントシステムによる避難シミュレータの試作 (河添智幸)
2. 魚眼透視法による広視野ウォークスルーインターフェース (志水信哉)
3. 3 次元仮想空間における詳細レベルを用いた群集歩行アニメーションの描画 (松本賢治)
4. Web 共引用解析による研究者コミュニティの抽出 (三木武)
5. L I V i e w e r モバイル環境における情報発信行動の可視化 (横井隆宏)

平成 14 年度

1. 仮想都市における群集ナビゲーション支援 (板倉豊和)
2. Web サービス連携シナリオの記述と実行 (杉本悠樹)
3. 仮想人間エージェントの非言語コミュニケーションの制御 (杉山香織)
4. マルチエージェントプラットフォーム Pervagent における端末間連携機構の実装 (田

辺克弘)

5. 機械翻訳を用いた多言語協調作業環境の試作 (藤代祥之)
6. アドホック環境において利用者のプラン生成を支援するエージェントの実装 (渡辺亮)

平成 15 年度

1. 多言語コラボレーションのための電子掲示板の設計 (河合拓也)
2. 印象オントロジーによる情報検索支援 (田仲正弘)
3. 不要な証明書・ポリシーを開示しない Automated Trust Negotiation (藤井雅雄)
4. 仮想都市における大規模エージェント群の制御 (森本智史)
5. 機械翻訳を用いた多言語ディスカッション支援 (柳沢裕二)

活動記録
(2001年4月以降)

2001 年度

4月6日：花見 2001.

4月18日：4回生配属

4月18日：石田研研究会

4月18日：新歓コンパ

4月23日：特別講義

Jean-Pierre Briot, "Towards adaptive programming for social informatics"

5月7日：Briot先生を囲んでワインパーティ

5月22日～25日：第15回人工知能学会全国大会（島根県民会館）

石田・八槿・早水・福本・吉住（表彰式）

6月15日：京都大学情報学研究科・社会情報学専攻シンポジウム（学術総合センター）

石田 デジタルシティへの道

6月22日：京都大学情報学研究科・社会情報学専攻シンポジウム（京都キャンパスプラザ）

石田 デジタルシティへの道

6月27日：石田研 M2 発表

中澤，南，林田，松原，中塚，吉住，Tu

6月29日：科学技術振興事業団デジタルシティプロジェクト 平成13年度シンポジウム

石田，中西 社会的エージェントの研究

7月2日～13日：研究室内オープンハウス

7月2日 岡本 対話エージェント

7月4日 中西 FreeWalkV4, 社会心理学実験

7月6日 石田 デジタルシティ, Q

7月9日 小山 サーチエンジン

7月11日 野村 社会ネットワーク

7月13日 八槿 経済学モデル, モバイル

7月12日：Digital City Colloquium（JST Digital City Research Center）

7月25日：石田研第3回研究会

田中祐一郎，Tu，新留，菅山，山中，村上，早水，安岡，鳥居，松本賢治，河添，志水，三木，横井隆宏，渡辺亮

7月25日：打ち上げ

7月31日：NRI アフタヌーンティーパーティ

8月22日：博士公聴会

十河

8月22日：博士中間報告会

平松，野村

8月1日～3日：夏合宿（乗鞍・西穂高岳・飛騨高山）

8月6日～：Bruce Schatz 先生滞在

8月27日～：Bruce Schatz 先生滞在

8月17日：Frederic Peschanski, Talk on Q (Nijo lab)

8月26日～29日：PRIMA01

～9月1日：新留，早水，中国滞在

9月5日～12日：岡本出張

CIA-2001 ワークショップ (University of Modena)

9月6日～7日:第1回知的都市基盤研究グループ(ICII)/第6回高度交通システム研究会(ITS)/
第18回モバイルコンピューティングとワイヤレス通信研究会(函館)

林田

10月12日:特別講義

池田信夫先生

10月26日(金):石田研後期第1回研究会

林田, 南, 松原, 吉住, 中塚, 中澤, Tu, 牛山

10月27日:二条, 長尾総長のプロジェクト視察

10月18日～20日:第2回デジタルシティ京都会議国際シンポジウム(京都リサーチパーク)

石田 デジタルシティのユニバーサルデザイン

11月1日～: Briot

11月15日(木)～16日(金):情報処理学会「マルチメディア通信と分散処理研究会」(IEICE)・
日本ソフトウェア科学会「マルチエージェントと協調計算研究会」(MACC)(金沢大学)

石田, 八槿, 中西, 正木, Gao, Wang, 岡本, 中塚

11月12日(月)～14日(水):人工知能学会 基礎論研究会, 知識ベースシステム研究会 合同研究会

小山

11月28日: Schatz 先生講演

11月30日:後期第3回研究会

安岡, 山中, 村上

12月5日～7日:DBWeb2001

中西

12月7日:特別講義

Jean-Pierre Briot, "Reflective architectures for software adaptation"

12月11日:M2研究会

松原, 吉住, 南, 菱山, 中澤, 林田, 中塚, Tu, 田中

12月11日:忘年会

12月26日:二条ラボ忘年会

1月5日～13日:Americas School on Agents and Multiagent Systems

小山, 岡本

1月18日:後期第5回研究会

野村, 菅山, 神田, 岡本

1月27日:知的都市基盤研究シンポジウム

中西

1月29日:Briot 先生送別会

2月1日:後期第6回研究会

三木, 横井, 河添, 志水, 岡本

2月8日:後期第7回研究会

林田, 中澤, 吉住, 中塚, 南, 松原

2月12日:修士論文公聴会

林田, 中澤, 吉住, 中塚, 南, 松原, 田中
2月12日~19日: 野村 海外出張
International Sunbelt Social Network Conference XXII
2月15日: 試問会
河添, 志水, 三木, 横井
3月5日: 模様替え. 掃除
3月6日~7日: インタラクシオン 2002
志水
3月11日~15日: スキー
岡本, 新留, 山中, 志水, 村上
3月11日~16日: スタンフォード出張
中西, 伊藤
3月25日: 学位授与式
3月27日, 28日: けいはんな新産業エキシビジョン
伊藤, 福本, 中澤, 戸田, 志水, 河添

2002 年度

4月2日: 花見
4月15日: 4回生配属, 新歓コンパ
4月22日: 前期第1回研究会
5月6日~(10週間): Intercultural Collaboration Experiment 2002
5月13日: 温故知新
GeoLink, 分散制約充足, FreeWalk, ネットワーク探索
5月27日: 前期第3回研究会
中西, 岡本, 伊藤, 山中 (FreeWalk, Q)
5月27日: wang 送別会
5月29日~31日: 第16回人工知能学会全国大会 (学術総合センター)
伊藤, 村上
5月31日: Paul Luff 先生特別講義 (総合校舎2階213)
6月3日: 温故知新
モバイルコンピューティングによる国際会議支援・ヘルパーエージェント
・市場モデルによる資源割り当て・自律エージェントのための実時間探索
6月10日: 第5回研究会
異文化コミュニケーション, モバイルコンピューティング
6月14日: Bruce Schatz 先生特別講義 (総合校舎213)
6月17日: 第6回研究会
FreeWalk, Q(中西, 岡本, 伊藤, 山中)
6月20日~12月18日 University of Maryland ad College Park 出張
村上
7月1日: 温故知新
デジタルシティ京都, 検索隠し味, メール解析, 問題解決組織の自律再編
7月3日~5日: DICOMO2002 (西伊豆)

八槇, 中西, 伊藤, 林田, 板倉(SFC)

7月8日: 第8回研究会
西垣, 坂本, 三木, 河添, 志水, 陳, 福本, 板倉(陽一郎)(SFC), 杉山, 板倉(豊和), 藤代, 杉本, 渡辺 亮, 田辺, Gao, Codognet 先生

7月8日: 前期打ち上げ

7月10日~12日: IEEE International Workshop on Knowledge Media Networking (KMN-02)
石田, 岡本

7月15日~19日: AAMAS 2002
石田, 中西

7月22日~8月2日, 8月12日~9月2日: 石田, Maryland 出張

8月5日: 博士中間報告・公聴会
平松(公聴会)

8月20日~22日: 夏合宿(大山)

9月17日: Gao さん送別会

10月8日: Prof. Gerhard Fischer 来訪

10月11日: 後期第1回研究会
新留, 菅山, 早水, 安岡, 山中, 牛山, 渡辺 亮, 板倉, 杉本, 杉山, 田辺, 藤代

10月23日: James Handler 先生特別講義(情報第一講義室)

10月25日: 後期第2回研究会サーベイ
岡本, 山中, 杉山, 福本, 新留, 河添, 坂本, 早水, 藤代, 安岡

11月1日: 後期第3回研究会
岡本, 野村, 伊藤, 中塚, 林田

11月8日: Prof. cavazza 講演

11月11日: 後期第4回研究会 JAWS 発表練習
野村, 中塚, 岡本, 伊藤, 林田

11月13日~15日: JAWS 2002
石田, 八槇, 中西, 久保田, 野村, 岡本, 伊藤, 中塚, 林田

11月22日: 後期第5回研究会サーベイ
野村, 三木, 志水, 中塚, 田辺, 渡辺 亮, 板倉 豊和, 陳, Cho, 杉本, 林田

11月22日: Katherine Isbister 先生講演(情報第一講義室)

11月29日: 後期第6回研究会サーベイ
新留, 安岡, 山中, 鳥居, 伊藤, 菅山, 田辺, Cho

12月5日: Katherine 送別会

12月6日: 後期第7回研究会
渡辺, 板倉(豊和), 杉本, 杉山, 田辺, 藤代

12月19日: SI2002 発表
石田, 中西, 小泉

11月29日: 石黒先生阪大教授就任パーティ

12月10日: 第5回情報学シンポジウム
京都市国際交流会館

12月12日: Yi-Tzue Chien 先生講演(情報第一講義室)

12月20日: 後期第8回研究会

- 早水, 村上, 安岡, 田辺
- 12月20日: 忘年会
- 1月1日: COE 荒井先生着任
- 1月10日: 後期第9回研究会
河添, 坂本, 志水, 陳, 福本, 三木, 田辺, 菅山, 西垣
- 1月15日: 橋本大也氏特別講義 (情報第2講義室)
- 1月17日: 後期第10回研究会
新留, 早水, 村上, 安岡, 山中, 鳥居, 菅山, 渡辺 亮, 板倉 豊和, 杉本, 杉山, 田辺, 藤代
- 1月31日: 後期第11回研究会ワークショップ
- 2月3日-5日: 博士中間報告・公聴会
神田(公聴会), 岡本(公聴会), 伊藤(中間報告)
- 2月5日: M1 中間報告会
西垣, 陳, 志水, 福本, 板倉(SFC), 三木, 坂本, 河添
- 2月7日: 後期第12回研究会卒修論発表練習
新留, 早水, 村上, 山中, 安岡, 牛山, 渡辺 亮, 板倉 豊和, 杉本, 杉山, 田辺, 藤代
- 2月10日: 卒論試問会
- 2月12日: 修士公聴会
- 2月15日: CREST 中間報告
石田, 中西
- 2月27日~28日: インタラクシオン 2003
志水
- 2月21日~23日: 杉万実験
- 2月23日~3月2日: 岡本出張 (AT&T Labs, Rutgers University, IT Media Lab.)
- 3月10日~11日: The 6th SANKEN (ISIR) International Symposium (大阪大学)
荒井, 村上, 杉本
- 3月14日: Semantic Web 講演会 (情報第3講義室)
Stefan Decker, Bijan Parsia
- 3月18日: 模様替え, 追い出しコンパ
- 3月19日~20日: グループウェア研究会
山中, 新留
- 3月22日~23日: 石田研ドクターコース OB の集まり
- 3月25日~27日: 情報処理学会全国大会
中西

2003 年度

- 4月2日: CREST プロジェクト総会
石田, 中西
- 4月14日: 前期第1回研究会
石田, 八槇, 中西, 荒井, 野村
三木, 坂本, 河添, 福本, 志水, 板倉 陽一郎, 西垣

4月14日：B4 配属
田仲，河合，森本，鐘本，藤井，柳沢

4月18日：坪田知己氏講演（情報第一講義室）

4月21日：前期第2回研究会
坂本，藤代，三木（コミュニティグループ）

4月21日：新歓コンパ

5月2日：マルチエージェントピープルの集い

5月12日：前期第3回研究会サーベイ
三木，坂本，伊藤，志水，中塚，福本，村上，Cho
Lejun 研究報告

5月16日：Nicola Muscettola 博士特別講義（総合校舎 213）

5月26日：前期第4回研究会
伊藤，志水，板倉 豊和，鳥居，河添，陳（インタラクショングループ）

5月29日～：けいはんな Web Semantics 研究会

5月30日：喜多千草氏特別講義（総合校舎 213）

6月2日：前期第5回研究会サーベイ
林田，藤代，杉山，鳥居，陳，鐘本，村上，杉本

6月9日：前期第6回研究会
林田，中塚，福本，河添（エージェント）

6月18日：Stephane 歓迎会・Lejun 送別会

6月23日：第7回研究会サーベイ
Stephane 講演
藤井，河合，柳沢，河添，板倉，森本，田仲，渡辺

6月23日～27日：第17回人工知能学会全国大会・朱鷺メッセ
杉本

6月26日～27日：丹波ささやまに蛍を見に行くツアー
石田，八槇，久保田，中塚，林田

6月30日：第8回研究会
Bruce Schatz 先生講演，村上，林田

7月4日：嶋本正氏特別講義（総合校舎 213）

7月7日：第9回研究会
藤代，杉山，板倉，Cho，杉本，井筒
渡辺 亮，長尾 若，田仲，河合，森本，鐘本，藤井

7月7日：前期打ち上げ

7月14日～18日：AAMAS2003
中西，村上

7月31日～8月1日：電子情報通信学会，人工知能と知識処理研究会
石田

8月5日：博士中間諮問会
赤埴

8月20日～：パターン認識と学習 勉強会

9月：石田・パリ第6大学出張

- 9月18日～19日：Digital Cities III
中西，小泉，神田
- 9月25日：けいはんな Web セマンティクス研究会
荒井，村上
- 10月3日：後期第1回研究会
石田，伊藤，三木，坂本，福本，陳，河添，志水
- 10月14日：後期第2回研究会輪講1（An Introduction to MultiAgent Systems）
藤井，中塚，森本，三木，田仲，村上
- 10月15日：Vincent Corruble 博士特別講義（地下セミナ室）
- 10月31日：後期第3回研究会
荒井，菱山，杉山，板倉 豊和，Cho，杉本，井筒，長尾
- 10月6日～7日：JAWS2003（淡路島）
石田，荒井，八槇，中西，正木，中塚，村上，河添，菱山
- 11月19日：堀雅洋先生講義（2号館101）
- 11月19日：博士公聴会
野村
- 11月19日：親睦会
- 12月1日：情報学シンポジウム・世界のセンターオブエクセレンスをめざして（8号館大会議室）
- 12月12日：後期第7回研究会輪講（Interaction Design）
河添，河合，坂本，伊藤，志水
- 12月19日：後期第8回研究会
野村，村上，杉山，板倉，杉本，井筒，渡辺 亮，長尾 若
- 12月19日：忘年会
- 1月6日：Igor Pandzic 講演
- 1月9日：後期第9回研究会輪講
Cho，陳，林田，板倉，河合
- 1月14日：堀雅洋教授特別講義（10号館2講）
- 1月16日：後期第10回研究会
赤埴，鳥居，B4
- 1月20日：後期第11回研究会
神田(JST)，M2
- 1月23日：村上輝康氏特別講義（総合校舎213）
ユビキタスネットワーク化の現段階と今後の展望
- 2月4日：博士中間報告会
菱山
- 2月5日：社会情報修士1回発表
Cho，杉山，渡辺，杉本，板倉，井筒，長尾
- 2月27日：追い出しコンパ
- 3月3日～5日：インタラクシオン2004
中西，志水（発表），伊藤（デモ）
- 3月9日：マルチエージェントピープルの集い

3月18日～19日：Asia Broadband Workshop and Symposium on Digital City Collaboration（北京）

石田，八槇，中西，久保田，陳，杉山，林田

2004年度

4月2日：花見

4月19日：研究会

FreeWalk チュートリアル

4月24日～4月29日：CHI2004

中西

4月26日：親睦会

5月21日：Juliette Rouchier 特別講義（総合校舎 213）

5月24日：Liu さんお別れ会

5月31日～6月4日：人工知能学会全国大会

中西，鳥居，林田

6月7～9日：MSRAS2004

中西

7月1日：西田先生講演

7月8日：Bruce Schatz 先生特別講義（10号館1講）

7月16日：前期打ち上げ

8月20日～22日：夏合宿

9月8日～10日：バーチャルリアリティ学会

中西

研究成果一覽

1993 年

Book

1. 石田 亨(編), “マルチエージェントと協調計算 II”, 近代科学社, 1993.

Journal Paper

1. 西部善康, 桑原和宏, 石田亨, 横尾 真, “分散制約充足の高速化と通信網回線設定への適用,” 電子情報通信学会論文誌, Vol. J-76 D-II, No. 10, pp. 2204-2214, 1993.
2. 石田 亨, “移動目標探索アルゴリズムとその性能改善,” 人工知能学会誌, Vol. 8, No. 6, pp. 760-769, 1993.

Conference Paper

1. Yoshiyasu Nishibe, Kazuhiro Kuwabara, Tatsuya Suda and Toru Ishida, “Distributed Channel Allocation in ATM Networks,” *IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM'93)*, pp. 417-423, 1993.
2. Yutaka Sasaki, Keiko Nakata, Toru Ishida and Yoshimi Fukuhara, “Advantages of Meta-level Control Architectures in Maintaining Rule-Based Systems,” *IEEE Conference on Tools with Artificial Intelligence (TAI-93)*, pp. 495-496, 1993.
3. Toru Ishida, “Towards Organizational Problem Solving,” *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 839-845, 1993.

1994 年

Book

1. Toru Ishida, “Parallel”, *Distributed and Multiagent Production Systems*, Lecture Notes in Artificial Intelligence 878, Springer-Verlag, 1994.

Journal Paper

1. Yoshiyasu Nishibe, Kazuhiro Kuwabara, Toru Ishida and Makoto Yokoo, “Speed-Up and Application of Distributed Constraint Satisfaction to Communication Network Path Assignments,” *Systems and Computers in Japan*, Vol. 25, No. 12, pp. 54-67, 1994.
2. Toru Ishida, “An Optimization Algorithm for Production Systems,” *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, Vol. 6, No. 4, pp. 549 - 558, 1994.
3. 石田 亨, “実時間両方向探索の経験,” 認知科学の発展, Vol. 7, pp. 5-33, 1994.

Conference Paper

1. Shigeo Matsubara and Toru Ishida, “Real-Time Planning by Interleaving Real-Time Search with Subgoalting,” *International Conference on Artificial Intelligence Planning Systems (AIPS-94)*, pp.122-127, 1994.

Workshop Paper

1. Toru Ishida, “Bridging Humans via Agent Networks,” *13th International Workshop on*

Distributed Artificial Intelligence (DAIWS-94), pp. 419-429, 1994.

2. Kazuhiro Kuwabara and Toru Ishida, "Equilibratory Approach to Distributed Resource Allocation: Toward Coordinated Balancing," In Cristiano Castelfranchi and Eric Werner Eds., *Artificial Sociality; MAAMAW'92*, Lecture Notes in Artificial Intelligence 830, Springer-Verlag, pp. 133-146, 1994.
3. 石黒 浩, "アクティブビジョンのロボットへの応用," 日本機械学会講演会-アクティブビジョン-, pp. 33-38, 1994.
4. 顧 程, 石田 亨, "待ち行列モデルを用いた契約ネットプロトコルの定量的評価," 人工知能学会全国大会, pp.299-302, 1994.
5. 石田 亨, "実時間探索と強化学習: LRTA*から Q-Learning への系譜," けいはんな自律エージェント研究会報告書, pp. 17-28, 1994.

Area Paper

1. 石田 亨, "自律エージェントのコミュニケーション," 日本ロボット学会誌, Vol. 12, No. 6, pp. 802-807, 1994.

1995 年

Journal Paper

1. Toru Ishida and Richard E. Korf, "Moving-Target Search: A Real-Time Search for Changing Goals," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 17, No. 6, pp. 609-619, 1995.
2. Toru Ishida, Yutaka Sasaki, Keiko Nakata and Yoshimi Fukuhara, "A Meta-Level Control Architecture for Production Systems," *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, Vol. 7, No.1, pp. 44-52, 1995.
3. Hiroshi Ishiguro, Takeshi Maeda, Takahiro Miyashita and Saburo Tsuji, "Building Environmental Models of Man-Made Environments by Panoramic Sensing," *Advanced Robotics*, Vol. 9, No. 4, pp. 399-416, Apr. 1995.
4. 水野智文, 石田 亨, "実時間探索の学習特性の評価," 人工知能学会誌, Vol. 10, No. 2, pp. 306-313, 1995.
5. 石黒 浩, "注視に基づくロボットの視覚," 人工知能学会誌, Vol. 10, No. 4, pp. 500-505, 1995.

Conference Paper

1. Kazuhiro Kuwabara, Toru Ishida and Nobuyasu Osato, "AgenTalk: Describing Multiagent Coordination Protocols with Inheritance," *IEEE Conference on Tools with Artificial Intelligence (TAI-95)*, pp.460-465, 1995.
2. Toru Ishida, "Two is not Always Better than One: Experiences in Real-Time Bidirectional Search," *International Conference on Multi-Agent Systems (ICMAS-95)*, pp. 185-192, 1995.
3. Toru Ishida, "Parallel, Distributed and Multi-Agent Production Systems: A Research Foundation for Distributed Artificial Intelligence," *International Conference on Multi-Agent Systems (ICMAS-95)*, pp. 416-422, 1995.

4. Hiroshi Ishiguro, Takahiro Miyashita, Saburo Tsuji, "T-Net for Navigating a Vision-Guided Robot in a Real World," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1068-1073, 1995.

Workshop Paper

1. Cheng Gu and Toru Ishida, "A Quantitative Analysis of the Contract Net Protocol," *International Conference on Multi-Agent Systems (ICMAS-95)*, p. 449, 1995.
2. Kazuhiro Kuwabara, Toru Ishida and Nobuyasu Osato, "AgenTalk: Coordination Protocol Description for Multiagent Systems," *International Conference on Multi-Agent Systems (ICMAS-95)*, p. 455, 1995.
3. H. Yamaki, M. Kajihara, T. Nishimura, T. Ishida, "Socia -- An Agent Based Meeting Support System," 人工知能学会研究会資料 SIG-FAI-9502-4, 1995.
4. 桑原和宏, 篠原 拓嗣, 大里 延康, 石田 亨, "協調プロトコル記述言語 AgenTalk の実現," 電子情報通信学会, 信学技報, AI-95-18, 1995.
5. 桑原和宏, 石田 亨, 大里延康, "AgenTalk: マルチエージェントシステムにおける協調プロトコル記述," 電子情報通信学会, 信学技報, AI-94-56, pp. 1-8, 1995.
6. 八槇博史, 石田 亨, "エージェントネットワーク Socia による電子会合支援," 情報処理学会全国大会, 4P-1, 1995.
7. 田中吾一, 石黒 浩, 石田 亨, "エージェントネットワーク Socia の能動的視覚機能," 情報処理学会全国大会, 4P-2, 1995.
8. 梶原史雄, 桑原和宏, 石田 亨, "エージェントネットワーク Socia の AgenTalk による実装," 情報処理学会全国大会, 4P-3, 1995.
9. 佐藤克彦, 石黒 浩, 石田 亨, "見え方変化に基づく物体認識," ロボットシンポジウム 予稿集, pp. 1-6, 1995.
10. 石黒 浩, "ロボティクスにおける能動視覚研究," 電子情報通信学会技術報告, AI94-59, pp. 25-32, 1995.
11. 石黒 浩, 前田武志, 辻 三郎, "全方位画像記憶に基づくロボットの誘導," ロボットシンポジウム予稿集, pp. 1339-1344, 1995.
12. 石黒 浩, "CVCV-WG 特別報告: コンピュータビジョンにおける技術評論と将来展望 (III)-能動視覚(Active Vision)-," 情報処理学会研究報告, 95-CV-94, pp. 45-52, 1995.
13. 石黒 浩, "キーノート講演: ロボットビジョン," ロボティクス・メカトロニクス講演会 予稿集, pp. 1474-1479, 1995.
14. 石黒浩, "分散視覚認知 -視覚エージェントネットワークによる群知覚-, " 電子情報通信学会パターン認識・理解研究会技術研究報告, PRU 95-153, pp.27-32, 1995.
15. 石黒 浩, 石田 亨, "分散視覚認知 -分散視覚システムによる環境認識-, " 第5回マルチ・エージェントと協調計算ワークショップ (MACC '95), 1995.

Area Papers

1. 石田 亨, "マルチエージェントシステムの過去未来," *コンピュータソフトウェア*, Vol. 12, No.3, pp. 70-74, 1995.
2. 石田 亨, "エージェントを考える" 人工知能学会誌, Vol. 10, No. 5, pp. 663-667, 1995.
3. 桑原 和宏, 石田 亨, "分散人工知能 (13編5章2)," 新版 情報処理ハンドブック情報処

理学会編, オーム社, 1995.

1996年

Book

1. 石田 亨, 片桐 恭弘, 桑原和宏, “分散人工知能,” コロナ社, 1996.
2. 石田 亨, “プロダクションシステムの発展,” 朝倉書店, 1996.

Chapter in Book

1. Kazuhiro Kuwabara, Toru Ishida, Yoshiyasu Nishibe and Tatsuya Suda, “An Equilibratory Market-Based Approach for Distributed Resource Allocation and Its Applications to Communication Network Control,” Scott H. Clearwater Ed., *Market-Based Control: A Paradigm for Distributed Resource Allocation*, World Scientific Publishing, 1996.
2. 石田 亨, “社会に学ぶ人工知能,” 社会情報システム学・序説, 富士通ブックス, pp. 91 - 106, 1996.

Journal Paper

1. Toru Ishida, “Real-Time Bidirectional Search: Coordinated Problem Solving in Uncertain Situations,” *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, pp. 617-628, 1996.
2. 顧 程, 常 兵, 石田 亨, “契約ネットプロトコルの定量的評価,” 電子情報通信学会論文誌 D-II, pp. 1374-1381, 1996.
3. 石田 亨, 新保 仁, “実時間探索による経路学習,” 人工知能学会誌 10周年記念論文賞, Vol. 11, No. 2, pp. 411-419, 1996.
4. 桑原 和宏, 石田 亨, 大里 延康, “AgenTalk: マルチエージェントシステムにおける協調プロトコル記述,” 電子情報通信学会論文誌 B-I, Vol. 79, No. 5, pp. 346-354, 1996.
5. 石黒浩, “環境を認識し行動するためのロボットの視覚 -Active, Omnidirectional and Distributed Vision Systems-,” 計測と制御, Vol. 35, No. 4, pp. 278-281, 1996.
6. 加藤浩仁, 石黒浩, 辻三郎, “統計的解析による複雑な環境における環境モデルの獲得,” 日本ロボット学会誌, Vol. 14, No. 5, pp. 48-55, 1996.
7. 宮下敬宏, 石黒浩, 辻三郎, “T-Net: 実環境における正確なロボットの誘導と環境構造の復元,” 日本ロボット学会誌, Vol. 14, No. 7, pp. 1-8, 1996.

Conference Papers

1. Hirofumi Yamaki, Michael P. Wellman and Toru Ishida, “A Market-Based Approach to Allocating QoS for Multimedia Applications,” *International Conference on Multi-Agent Systems (ICMAS-96)*, 1996 pp. 385-392, 1996.
2. Hideyuki Nakanishi, Chikara Yoshida, Toshikazu Nishimura, Toru Ishida, “FreeWalk: Supporting Casual Meetings in a Network,” *International Conference on Computer Supported Cooperative Work (CSCW-96)*, pp. 308-314, 1996.
3. Toru Ishida and Masashi Shimbo, “Improving the Learning Efficiencies of Realtime Search,” *National Conference on Artificial Intelligence (AAAI-96)*, pp. 305-310, 1996.

4. Hirofumi Yamaki, Masao Kajihara, Goichi Tanaka, Toshikazu Nishimura, Hiroshi Ishiguro and Toru Ishida, "Socia: Non-Committed Meeting Scheduling with Desktop Vision Agents," *International Conference on the Practical Application of Intelligent Agents and Multi-Agent Technology (PAAM-96)*, pp. 727-742, 1996.
5. Hiroshi Ishiguro, Ritsuko Sato and Toru Ishida, "Robot Oriented State Space Construction," *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS-96)*, pp. 1496-1501, 1996.
6. Hiroshi Ishiguro, Saburo Tsuji, "Image-Based Memory of Environment," *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS-96)*, 1996.

Workshop Paper

1. Hideyuki Nakanishi, Chikara Yoshida, Toshikazu Nishimura, Toru Ishida, "FreeWalk: Supporting Casual Meetings in a Network," *Visual Proceedings of SIGGRAPH 96*, pp. 120, 1996.
2. Toru Ishida, Hirofumi Yamaki, Hideyuki Nakanishi and Toshikazu Nishimura, "Casual Meetings in a Network," *International Symposium on Cooperative Database Systems for Advanced Applications*, 1996.
3. Yasuhiko Kitamura, Hideyuki Nakanishi, Tetsuya Nozaki, Teruhisa Miura, and Toru Ishida, "MetaViewer and MetaCommander: Applying WWW Tools to Genome Informatics," In T. Akutsu, K. Asai, M. Hagiya, S. Kuhara, S. Miyano, and K. Nakai Eds. , *Genome Informatics 1996*, Proceedings of the Seventh Workshop on Genome Informatics, Universal Academy Press, pp.137 - 146, 1996.
4. Hiroshi Ishiguro, Goichi Tanaka and Toru Ishida, "Distributed Vision System for Real World Agents," *Proc. ICMAS'96 Workshop on Learning, Interaction and Organizations in Multiagent Environments*, 1996.
5. Cheng Gu and Toru Ishida, "Analyzing the Social Behavior of Contract Net Protocol," In Walter Van de Velde and John W. Perram Eds. , *Agents Breaking Away; MAAMAW'96*, Lecture Notes in Artificial Intelligence 1038, Springer-Verlag, pp.116 - 127, 1996.
6. 中西英之, 吉田力, 西村俊和, 石田亨, "3次元仮想空間を用いた出会いの支援," 人工知能学会全国大会, pp. 633-636, 1996.
7. 中西英之, 吉田力, 西村俊和, 石田亨, "FreeWalk: 情報ネットワークの散歩道," データ工学ワークショップ, 1996.
8. 新保 仁, 石田 亨, "重み付き実時間探索," 電子情報通信学会技術研究報告 AI95-43, 1996.
9. 浅山和典, 篠原拓嗣, 桑原和宏, 大坪基秀, 西村俊和, 石田亨, "協調プロトコル記述言語 AgentTalk の拡張機能の検討," 第 52 回情報処理学会全国大会, 3B-1, 1996.
10. 梶原史雄, 八槇博史, 顧程, 西村俊和, 石田亨, "1 対多赤外線通信プロトコルとその情報ベースアクセスへの応用," 第 52 回情報処理学会全国大会, 3B-7, 1996.
11. 中西英之, 吉田力, 西村俊和, 石田亨, "不特定多数のための電子会合支援システム FreeWalk," 第 52 回情報処理学会全国大会, 3X-4, 1996.
12. 佐藤律子, 石黒浩, 石田亨, "センサデータの解析に基づくロボットに適した状態空間の構成," 第 8 回自律分散シンポジウム予稿集, pp. 111-116, 1996.

13. 石黒浩, 石田亨, “分散視覚システム -実世界で行動する自律移動ロボットへの知覚支援-,” 第1回重点領域研究「知能ロボット」シンポジウム予稿集, pp. 89-92, 1996.
14. 石黒浩, 石田亨, “分散視覚システムによる人間の組織化支援,” 第一回 JSME ロボメカ・シンポジウム講演論文集, pp. 143-145, 1996.
15. 田中吾一, 石黒浩, 石田亨, “分散視覚エージェントによる移動ロボットの誘導,” 日本ロボット学会学術講演会, 1996.

1997年

Book

1. Toru Ishida, *Real-Time Search for Learning Autonomous Agents*, Kluwer Academic Publishers, 1997.

Journal Paper

1. 松原 繁夫, 石田 亨, “実時間探索に副目標生成機能を組み込んだ実時間プランニング,” 人工知能学会誌, Vol. 12, No. 1, pp. 90-99, 1997.
2. 三浦輝久, 石田亨, “記憶制約下における探索のための確率的節点記憶方式,” 電子情報通信学会論文誌, Vol. J80-D-II, No. 9, pp. 2438-2445, 1997.

Conference Paper

1. Goichi Tanaka, Hiroshi Ishiguro and Toru Ishida, “Mobile Robot Navigation by Distributed Vision Agents,” *International Conference on Computational Intelligence and Multimedia Applications (ICCIMA'97)* 1997.
2. Hiroshi Ishiguro, “Distributed Vision System: A Perceptual Information Infrastructure for Robot Navigation,” *International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-97)*, pp. 36-41, 1997
3. Hiroshi Ishiguro and Katsumi Kimoto, “Town Robot - Toward Social Interaction Technologies of Robot System -,” *International Conference on Field and Service Robotics (FSR'97)*, pp. 115-120, 1997.

Workshop Paper

1. Hiroshi Ishiguro, “Robots Integrated with Environments - A Perceptual Information Infrastructure for Robot Navigation -,” *International Symposium on Robotics Research (ISRR'97)*, 1997.
2. Toshikazu Nishimura, Hirofumi Yamaki, Takaaki Komura, Nobuyasu Itoh, Tadahiro Gotoh and Toru Ishida, “Community Viewer: Visualizing Community Formation on Personal Digital Assistants,” *IJCAI-97 Workshop on Social Interaction and Communityware*, 1997.
3. 花野真也, 武馬慎, 金子善博, 石黒浩, 石田亨, “WWW と電子メールを用いた合意形成支援システム,” 第55回情報処理学会全国大会, 4Y-1, pp. 133-134, 1997.
4. 十河卓司, 石黒浩, 石田亨, “分散視覚システムにおける定性的空間モデルの獲得,” 第55回情報処理学会全国大会, 5AB-9, 1997.
5. 三浦輝久, 石田亨, “確率的節点記憶方式のゲノム整列問題への適用,” 1997年度人工知

能学会全国大会(第 11 回), 01-05, 1997.

6. 八槇博史, Michael P. Wellman, 石田亨, “市場モデルを用いたアプリケーション QoS の制御,” 1997 年度人工知能学会全国大会(第 11 回), 16-01, pp. 324-327, 1997.
7. 八槇博史, Michael P. Wellman, 石田亨, “市場モデルによるアプリケーション QoS の制御,” 情報処理学会 DiCoMo ワークショップ, pp. 401-406, 1997.
8. 八槇博史, Michael P. Wellman, 石田亨, “市場モデルに基づくアプリケーション QoS の制御,” 電子情報通信学会「ソフトウェアエージェントとその応用」シンポジウム, pp. 35-42, 1997.
9. 中西英之, 吉田力, 西村俊和, 石田亨, “インターネット上での会合支援システムの使用評価,” 情報処理学会, マルチメディア・分散・協調とモバイル(DiCoMo)ワークショップ論文集, pp. 305-310, 1997.
10. 中西英之, 吉田力, 西村俊和, 石田亨, “FreeWalk: ネットワーク上でのカジュアルな出会い,” 電子情報通信学会 信学技報, IN97-33, pp. 35-42, 1997.
11. 古村隆明, 八槇博史, 西村俊和, 石田亨, “携帯端末を用いたコミュニティ形成過程の表示: Community Viewer,” 第 54 回情報処理学会全国大会, 1W-07, 1997.
12. 伊藤暢康, 後藤忠広, 八槇博史, 和氣弘明, 西村俊和, 石田亨, “携帯端末を用いた出会いの支援: Social Matchmaking,” 第 54 回情報処理学会全国大会, 1W-06, 1997.
13. 西部喜康, 武石英二, 森原一郎, 服部文夫, 石田亨, 西田豊明, “携帯端末による国際会議支援 -- ICMAS96 Mobile Assistant Project --,” 第 54 回情報処理学会全国大会, 1W-04, 1997.
14. 中西英之, 吉田力, 西村俊和, 石田亨, “会合支援システム FreeWalk の使用経験と機能拡張,” 第 54 回情報処理学会全国大会, 7R-6, 1997.
15. 三浦輝久, 石田亨, “記憶制約下における探索のための確率的節点記憶方式,” 電子情報通信学会, 信学技報, AI96-35, 1997.
16. 吉田力, 中西英之, 西村俊和, 石田亨, “ビデオゲーム技術のデスクトップ会議システムへの応用,” 情報処理学会研究報告 97-HI-70-4 pp.25-32, 1997.
17. 岡田慧, 石黒浩, 石田亨, “ロボット誘導のための人間ロボット協調システム,” ロボティクスシンポジウム, pp. 133-138, 1997.
18. 木元克己, 石黒浩, 神田崇行, 石田亨, “人との相互作用によりタスクを創発するロボットシステム - 街ロボットの実現に向けて -,” 日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 147- 148, 1997.
19. 石黒浩, 佐川立昌, 十河卓司, 石田亨, “複数の全方位視覚による人間の長時間行動認識,” 日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 553-554, 1997.

Area Paper

1. 森原一郎, 石田 亨, “モバイルアプリケーション開発環境,” 電子情報通信学会, Vol. 80, No. 4, pp. 350-356, 1997.
2. 石田 亨, 西村俊和, “広域情報ネットワークによるコミュニティ支援,” 情報処理学会誌, Vol. 38, No. 1, pp. 48-53, 1997.
3. 石黒浩, 石田亨, “実世界エージェントのための知覚情報基盤 - 分散視覚システムによるロボットの誘導を例として,” システム/制御/情報, Vol. 41, No. 8, pp. 297-302, 1997.

Patent

1. Hiroshi Ishiguro and Osamu Nishihara, "Omni Directional Vision Photograph Device," *United States Department of Commerce, Patent and Trademark Office*, Application No. 9-362709, July 24th, 1998.
2. 石黒浩, "全方位撮影装置," 日本国特許庁, 申請番号 9-564, 12月13日, 1997.

Article, News Paper etc.

1. "市場モデルに基づく通信サービス品質の制御," *Telecom FRONTIER, SCAT Technical Journal*, No. 17, pp. 9-16, 1997.
2. "インターネット活用. 電子会議システム開発. (京大)多人数が顔見ながら," *日経産業新聞* 1997年1月16日(木曜日).
3. "知能ロボット. 的確に方向誘導. 京大グループがシステム," *日経産業新聞* 1997年9月3日.

1998年

Books

1. Toru Ishida Ed., *Community Computing and Support Systems*, Lecture Notes in Computer Science 1519, Springer-Verlag, 1998.
2. Toru Ishida Ed., *Community Computing: Collaboration over Global Information Networks*, John Wiley and Sons, 1998.

Chapters in Book

1. Masayuki Okamoto, Hideyuki Nakanishi, Toshikazu Nishimura and Toru Ishida, "Silhouettell: Awareness Support for Real-World Encounter," In Toru Ishida Ed., *Community Computing and Support Systems*, Lecture Notes in Computer Science 1519, Springer-Verlag, pp. 316-329, 1998.
2. Toru Ishida, "Computation over Communities," In Toru Ishida Ed., *Community Computing and Support Systems*, Lecture Notes in Computer Science 1519, Springer-Verlag, pp. 1-10, 1998.
3. Toru Ishida, Toyooki Nishida and Fumio Hattori, "Overview of Community Computing," In Toru Ishida Ed., *Community Computing: Collaboration over Global Information Networks*, John Wiley and Sons, pp. 1-11, 1998.
4. Kazuhiro Kuwabara, Hirofumi Yamaki, Hiroshi Ishiguro and Toru Ishida, "Agent Networks for Connecting People Together," In Toru Ishida Ed., "Community Computing: Collaboration over Global Information Networks, John Wiley and Sons, pp. 13-53, 1998.
5. Hideyuki Nakanishi, Chikara Yoshida, Toshikazu Nishimura and Toru Ishida, "FreeWalk: A Three-Dimensional Meeting-Place for Communities," In Toru Ishida Ed., *Community Computing: Collaboration over Global Information Networks*, John Wiley and Sons, pp. 55-89, 1998.
6. Hirofumi Yamaki, Michael P. Wellman and Toru Ishida, "Market-Based QoS Control for Incorporating Community Preferences," In Toru Ishida Ed., *Community Computing: Collaboration over Global Information Networks*, John Wiley and Sons, pp. 91-125, 1998.

7. Yoshiyasu Nishibe, Ichiro Morihara, Fumio Hattori, Toshikazu Nishimura, Hirofumi Yamaki, Toru Ishida, Harumi Maeda and Toyooki Nishida, "Mobile Digital Assistants for International Conferences," In Toru Ishida Ed., *Community Computing: Collaboration over Global Information Networks*, John Wiley and Sons, pp. 245-284, 1998.
8. Hiroshi Ishiguro, "Active Vision and the Applications," In Takashi Matsuyama, Yoshinori Kuno and Jyun Imiya Ed., *Computer Vision: Technology Review and Future Directions*, New Technology Communications, pp. 219-229, 1998.

Journal Paper

1. Toru Ishida, "Real-Time Search for Autonomous Agents and Multi-Agent Systems," *Journal of Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, Kluwer Academic Publishers, Vol. 1, No. 2, pp.139-167, 1998.
2. Toru Ishida, "Towards Communityware," *New Generation Computing*, Vol. 16, No. 1, pp. 5-21, 1998 (also appeared in International Conference and Exhibition on the Practical Application of Intelligent Agents and Multi-Agent Technology (PAAM-97), pp. 7-21, 1997).
3. Makoto Yokoo, Edmund H. Durfee, Toru Ishida, and Kazuhiro Kuwabara, "The Distributed Constraint Satisfaction Problem: Formalization and Algorithms," *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, Vol. 10, No. 5, pp. 673-685, 1998.
4. Yoshiyasu Nishibe, Hiroaki Waki, Ichiro Morihara, Fumio Hattori, Toru Ishida, Toshikazu Nishimura, Hirofumi Yamaki, Takaaki Komura, Nobuyasu Itoh, Tadahiro Gotoh, Toyooki Nishida, Hideaki Takeda, Atsushi Sawada, Harumi Maeda, Masao Kajihara, Hidekazu Adachi, "Mobile Digital Assistants for Community Support," *AI Magazine*, Vol. 19, No. 2, pp. 31-49, 1998.
5. Toshikazu Nishimura, Hirofumi Yamaki, Takaaki Komura and Toru Ishida, "Community Viewer: Visualizing Community Formation on Personal Digital Assistants," *ACM SIGAPP Applied Computing Review*, Vol. 6, No. 1 (Spring), pp. 13-18, 1998 (also appeared in ACM SAC'98 (Symposium on Applied Computing) Mobile Computing Track, pp. 433-438, 1998).
6. 八槿 博史, マイケル P. ウェルマン, 石田 亨, "市場モデルに基づくアプリケーション QoS の制御," *電子情報通信学会論文誌*, Vol. J81-D-I, No.5, pp. 540-547, 1998.
7. 石田 亨, 西村 俊和, 八槿 博史, 後藤 忠広, 西部 喜康, 和氣 弘明, 森原 一郎, 服部 文夫, 西田 豊明, 武田 英明, 沢田 篤史, 前田 晴美, "モバイルコンピューティングによる国際会議支援," *情報処理学会論文誌*, Vol. 39, No. 10, pp. 2855-2865, 1998.
8. 西村 俊和, 古村 隆明, 八槿 博史, 石田 亨, "Community Viewer: 携帯端末を用いたコミュニティ活動の可視化," *情報処理学会論文誌*, Vol. 39, No. 10, pp. 1463-1471, 1998.
9. 中西英之, 吉田力, 西村俊和, 石田 亨, "FreeWalk: 3次元仮想空間を用いた非形式的なコミュニケーションの支援," *情報処理学会論文誌*, Vol. 39, No. 5, pp. 1356-1364, 1998.
10. 中西 英之, 西村 俊和, 石田 亨, "デスクトップ会議における 3次元仮想空間の効果," *情報処理学会論文誌*, Vol. 39, No. 10, pp. 2770-2777, 1998.
11. 新保 仁, 石田 亨, "実時間探索の収束性について," *人工知能学会誌*, Vol. 13, No. 4, pp. 631-638, 1998.
12. 十河卓司, 石黒浩, 石田 亨, "空間的制約の伝搬に基づく定性的空間構造の同定," *電子情報通信学会論文誌*, Vol. J81-D-II, No. 10, pp. 2311-2320, 1998.

- 岡田 慧, 石黒浩, 石田亨, “分散視覚を用いた人間ロボット協調ナビゲーション,” 日本ロボット学会誌, Vol. 16, No. 7, pp. 985-992, 1998.

Conference Paper

- Hirofumi Yamaki, Yutaka Yamauchi and Toru Ishida, “Implementation Issues on Market-Based QoS Control,” *International Conference on Multi-Agent Systems (ICMAS-98)*, pp. 357-364, 1998.
- Teruhisa Miura and Toru Ishida, “Stochastic Node Caching for Memory-Bounded Search,” *National Conference on Artificial Intelligence (AAAI-98)*, pp. 450-456, 1998.
- Masatoshi Kamiharako, Hiroshi Ishiguro and Toru Ishida, “Attention Control for State Space Construction,” *5th International Conference on Intelligent Autonomous Systems (IAS-5)*, pp. 258-265, 1998.
- Hiroshi Ishiguro, “Development of Low-Cost Compact Omnidirectional Vision Sensors and Their Applications,” *International Conference on Information Systems, Analysis and Synthesis*, pp. 433-439, 1998.

Workshop Paper

- Masayuki Okamoto, Hideyuki Nakanishi, Toshikazu Nishimura and Toru Ishida, “Silhouettell: Awareness Support for Real-World Encounter,” In Toru Ishida Ed., *Community Computing and Support Systems*, Lecture Notes in Computer Science 1519, Springer-Verlag, pp. 316-329, 1998.
- Toru Ishida, “Computation over Communities,” In Toru Ishida Ed., *Community Computing and Support Systems*, Lecture Notes in Computer Science 1519, Springer-Verlag, pp. 1-10, 1998.
- Toshikazu Nishimura, Hideyuki Nakhinishi, Chikara Yoshida and Toru Ishida, “Applying Videogame Technologies to Video Conferencing Systems,” *ACM SAC'98 (Symposium on Applied Computing) Multimedia Systems Track*, pp. 471-476, 1998.
- Ryusuke Sagawa, Hiroshi Ishiguro and Toru Ishida, “Real Time Tracking of Human Behavior with Multiple Omni-directional Vision Sensors,” *4th Symposium on Sensing via Image Information (SII'98)*, pp. 179-184, 1998.
- 野村早恵子, 植田達郎, 岡本昌之, 金子善博, 田中克典, 中西英之, 西村俊和, 横澤 誠, “インターネットに表現されるアイデンティティ — 日米欧亜大学ホームページ調査,” 1998年度日本社会情報学会全国大会(第13回), pp. 19-24, 1998.
- 八槇 博史, 山内 裕, 石田 亨, “市場モデルに基づくアプリケーション QoS 制御の実装,” 1998年度人工知能学会全国大会(第12回), pp. 583-586, 1998.
- 十河卓司, 石黒浩, 石田亨, “観測による定性的空間構造の同定,” 1998年度人工知能学会全国大会(第12回), pp. 86-89, 1998.
- 中西英之, 西村俊和, 石田亨, “3次元会議空間でのコミュニケーションの分析,” 情報処理学会研究報告, グループウェア, 98-GW-28-1, pp. 67-72, 1998.
- 中西英之, “ビデオゲームデザインのためのモデル,” 情報処理学会研究報告, 数理モデル化と問題解決, Vol. 18, No. 9, pp. 49-54, 1998.
- 武馬慎, 金子善博, 花野真也, 西村俊和, 石田亨, “合意形成支援のためのコーディネータエージェントの設計,” 人工知能学会研究会資料, 人工知能基礎論研究会,

SIG-FAI-9801-12, 1998.

11. 岡本昌之, 中西英之, 西村俊和, 石田亨, “Silhouettell: 実空間での出会いにおけるウェアネス支援,” マルチメディア, 分散, 協調とモバイルシンポジウム (DiCoMo'98), pp. 701-708, 1998.
12. 新保 仁, 石田 亨, “Moving-Target Search の完全性: 評価関数が非適格な場合,” 電子情報通信学会技術報告 人工知能と知識処理研究会, AI97-84/KBSE97-43, 1998.
13. 三浦輝久, 石田亨, “探索問題としてのゲノム配列歩行問題,” 電子情報通信学会技術報告 人工知能と知識処理研究会, AI98-39, pp. 47-45, 1998.

Area Paper

1. 石田 亨, “分散人工知能と社会情報システム,” 人工知能学会誌, Vol. 13, No. 1, pp. 19-20, 1998.
2. 石田 亨 他, “人工知能,” 電子情報通信学会編, 電子情報通信ハンドブック, オーム社, pp. 85-96, 1998.
3. 石黒 浩, “能動視覚とその応用,” 松山隆司, 久野義徳, 井宮淳編, コンピュータビジョン: 技術評論と将来展望, 新技術コミュニケーションズ, pp. 219-229, 1998.
4. 石黒 浩, “小型全方位視覚センサとその応用,” M&E, 工業調査会, Vol. 25, No. 3, pp. 130-140, 1998.
5. 石黒浩, “分散視覚システム,” 日本ロボット学会誌, Vol. 16, No. 6, pp. 44-47, 1998.

Article, Newspaper, etc.

1. “座談会: 情報科学研究の推進,” 学術月報, Vol. 51, No. 10, pp. 1030-1046, 1998.
2. “NTT 社外研究者とチーム. まず京大教授と組む,” 日経新聞 1998 年 10 月 50 日(月曜日)1 面.
3. “共通の話題を持つ人つなぐ. 京大, システム開発. パーティに用途,” 日経産業新聞 1998 年 10 月 20 日(火曜日)1 面.

1999 年

Book

1. Toru Ishida Ed., Multiagent Platforms, *Proceedings of the First Pacific-Rim International Workshop on Multi-Agents*, Lecture Notes in Artificial Intelligence 1599, Springer-Verlag, 1999.

Chapter in Book

1. Makoto Yokoo and Toru Ishida, “Search Algorithms for Agents,” In Gerhard Weiss Ed., *Multiagent Systems: A Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence*, MIT Press, pp. 165-199, 1999.
2. 石田 亨, “バーチャルコミュニティの形成支援,” マルチメディア情報学, Vol. 12, 相互の理解, 岩波書店, pp. 119-156, 1999.

Ph.D. Thesis

1. Hirofumi Yamaki, "Market-Based Control for Quality of Services in Network Applications," Kyoto University, 1999.

Journal Paper

1. Hideyuki Nakanishi, Chikara Yoshida, Toshikazu Nishimura and Toru Ishida, "FreeWalk: A 3D Virtual Space for Casual Meetings," *IEEE Multimedia*, Vol.6, No.2, pp.20-28, 1999.1.
2. 新保 仁, 石田 亨, "Moving-Target Search の完全性: 評価関数が一貫性を欠く場合," 人工知能学会誌, Vol. 14, No. 2, pp. 342-348, 1999.
3. 八槇 博史, 山内 裕, 石田 亨, "市場モデルによる QoS 制御の実装," 情報処理学会論文誌, Vol. 40, No.1, pp.142-149, 1999.
4. 十河 卓司, 木元 克美, 石黒 浩, 石田 亨, "分散視覚システムによる移動ロボットの誘導," 日本ロボット学会誌, Vol. 17, No. 7, pp. 1009-1016, 1999.

Conference Paper

1. Shinji Tanaka, Hirofumi Yamaki and Toru Ishida, "Mobile-Agents for Distributed Market Computing," *International Conference on Parallel Processing (ICPP'99)*, pp. 472-479, 1999.
2. Masayuki Okamoto, Katherine Isbister, Hideyuki Nakanishi and Toru Ishida, "Supporting Cross-Cultural Communication in Real-World Encounters," *International Conference on Human-Computer Interaction (HCI-99)*, Vol.2, pp.442-446, 1999.
3. Hiroshi Ishiguro, Masatoshi Kamiharako and Toru Ishida, "State Space Construction by Attention Control," *International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-99)*, pp. 1131-1137, 1999.
4. Takushi Sogo, Hiroshi Ishiguro and Toru Ishida, "Acquisition of Qualitative Spatial Representation by Visual Observation," *International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-99)*, pp. 1054-1060, 1999.
5. Hiroshi Ishiguro, Takayuki Kanda, Katsumi Kimoto, Toru Ishida, "A Robot Architecture Based on Situated Modules," *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1617-1623, 1999.
6. Koji Kato, Hiroshi Ishiguro, Matthew Barth, "Identifying and Localizing Robots in A Multi-robot System," *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 966-972, 1999.
7. Hiroshi Ishiguro and Mohan Trivedi, "Integrating A Perceptual Information Infrastructure with Robotic Avatars: A Framework for Tele-Existence," *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1032-1038, 1999.

Workshop Paper

1. Toru Ishida, Jun-ichi Akahani, Kaoru Hiramatsu, Katherine Isbister, Stefan Lisowski, Hideyuki Nakanishi, Masayuki Okamoto, Yasuhiko Miyazaki, and Ken Tsutsuguchi, "Digital City Kyoto: Towards A Social Information Infrastructure," *International Workshop on Cooperative Information Agents (CIA-99)*, M. Klusch, O. Shehory, G. Weiss Eds., *Cooperative Information Agents III*, Lecture Notes in Artificial Intelligence, Vol. 1652, pp. 23-35, Springer-Verlag,

Invited talk, 1999.

2. Takushi Sogo, Hiroshi Ishiguro and Toru Ishida, "Mobile Robot Navigation by Distributed Vision Agents," In Nakashima, H. and Zhang, C. Eds. , *Approaches to Intelligent Agents*, Lecture Notes in Artificial Intelligence, Vol. 1733, Springer-Verlag, Berlin, pp. 96-110, 1999.
3. Kim C. Ng, Hiroshi Ishiguro, Mohan Trivedi and Takushi Sogo, "Monitoring Dynamically Changing Environments by Ubiquitous Vision System," *Second IEEE Workshop on Visual Surveillance (VS'99)*, pp. 67-73, 1999.
4. 平松 薫, 赤埴 淳一, 石田 亨, "WWW・実時間センサ情報の統合によるデジタルシティ 京都の構築," 1999 年度人工知能学会全国大会(第 13 回), pp.200-203, 1999.
5. 深田浩嗣, 中西英之, 石田亨, "AnnotationLink: Web ページを利用したネットワーク上でのコミュニティ形成支援," マルチメディア, 分散, 協調とモバイルシンポジウム (DiCoMo'99), pp. 333-338, 1999.

Area Paper

1. 浅田稔, 石黒浩, 國吉康夫, "認知ロボティクスの目指すもの," 日本ロボット学会誌, Vol. 17, No. 1, pp. 2-6, 1999.
2. Katherine Isbister, 石田 亨(監訳), "サイバー空間での社会的インタラクションのための設計," 情報処理学会誌, Vol. 40, No. 6, pp.569-574, 1999.
3. 石黒浩, 西原修, 金谷典武, 新田宏基, 西村拓一, "全方位視覚センサー," O plus E, 新技術コミュニケーションズ, Vol. 21, No. 11, pp.1399-1405, 1999.
4. 中島秀之, 石田亨, 西田豊明, 久野巧, "サイバー・シティ計画," コンピュータソフトウェア Vol. 16, No. 5, 1999.

Article, Newspaper, etc.

1. 「京都・四条通再現 デジタルシティー —都市の情報をネットで提供—」, 日本経済新聞(13 版 15 面), 1999 年 5 月 12 日(水).
2. 「京都四条通り 3 次元仮想空間に再現」, 日刊工業新聞(8 面), 1999 年 5 月 12 日(水).
3. 「四条通をネットで再現 —商店もリアルに 50 店アクセス, 情報提供—」, 京都新聞 (23 面), 1999 年 5 月 12 日(水).
4. 「四条河原町を再現, 日本初デジタルシティー」, 毎日新聞, 1999 年 6 月 3 日(木).
5. 「デジタルシティー, 可能性を探る—京で研究者ら発表会」, 京都新聞(24 面), 1999 年 7 月 15 日(木) 朝刊.
6. 「21 世紀へサイエンスフロンティア, センサーの情報もとに自律走行」, 京都新聞, 1999 年 9 月 10 日(金).
7. 「デジタルシティーで商機, 京都市でシンポ開く」, 日本経済新聞 近畿経済・京滋面(33 面), 1999 年 9 月 17 日(金) 朝刊.
8. 「デジタルシティー京都, 仮想空間で四条通再現, あすから公開実験」, 日本経済新聞 近畿経済・京滋面(33 面), 1999 年 10 月 19 日(火) 朝刊.
9. 「ネットで京の街再現, きょうから開始, 3D 映像で店選びも」, 京都新聞(11 面), 1999 年 10 月 20 日(水) 朝刊.
10. 「デジタルシティー京都, 京都の街を再現, きょう 3 次元ページ公開」, 日経産業新聞(2 面), 1999 年 10 月 20 日(水) 朝刊.

11. 「観光・産業, 市民生活, 芸術情報, 京都丸ごとHPで紹介, 実験フォーラム」, 毎日新聞 京都面(22面), 1999年10月28日(木) 朝刊.

2000年

Book

1. Toru Ishida and Katherine Isbister (Eds.), Digital Cities: Experiences, Technologies and Future Perspectives, *Lecture Notes in Computer Science, 1765*, Springer-Verlag, 2000.
2. 溝口理一郎, 石田亨 共編, 人工知能, オーム社 新世代工学シリーズ, 2000.

Chapter in Book

1. Hideyuki Nakanishi, Chikara Yoshida, Toshikazu Nishimura, and Toru Ishida, "FreeWalk: Shared Virtual Space for Casual Meetings," Borko Furht Ed., *Handbook of Internet Computing*, CRC Press, pp. 227-247, 2000.

Ph.D. Thesis

1. Masashi Shimbo, "Real-Time Search with Nonstandard Heuristics," *Kyoto University*, 2000.

Journal Paper

1. Takushi Sogo, Hiroshi Ishiguro and Toru Ishida, "Spatial constraint propagation for identifying qualitative spatial structure," *Systems and Computers in Japan*, Vol. 31, No. 2, John Wiley and Sons, pp. 62-71, 2000.
2. 平松 薫, 石田 亨, "地域情報サービスのための拡張 Web 空間," *情報処理学会論文誌 : データベース*, Vol.41, No.SIG6 (TOD7), pp.81-90, Oct. 2000.
3. 十河 卓司, 石黒 浩, モーハン M. トリベディ, "複数の全方位視覚センサによる実時間人間追跡システム," *電子情報通信学会*, Vol. J83-D-II, No. 12, pp. 2567--2577, 2000.

Conference Paper

1. Katherine Isbister, Hideyuki Nakanishi, Toru Ishida and Cliff Nass, "Helper Agent: Designing an Assistant for Human-Human Interaction in a Virtual Meeting Space," *International Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI-2000)*, pp. 57-64, 2000.
2. Jun-ichi Akahani, Katherine Isbister and Toru Ishida, "Digital City Project: NTT Open Laboratory," *International Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI-2000)*, pp.227-228, 2000.
3. Masashi Shimbo, Toru Ishida, "Towards Real-Time Search with Inadmissible Heuristics," *European Conference on Artificial Intelligence (ECAI-2000)*, IOS Press/Ohmsha, pp. 609-613, 2000.
4. Takayuki Yoshizumi, Teruhisa Miura and Toru Ishida, "A* with Partial Expansion for Large Branching Factor Problems," *National Conference on Artificial Intelligence (AAAI-00)*, pp.923-929, 2000 .
5. Kaoru Hiramatsu, Kenji Kobayashi, Ben Benjamin, Toru Ishida, and Jun-ichi Akahani, "Map-based User Interface for Digital City Kyoto," *The Internet Global Summit (INET2000)*,

http://www.isoc.org/inet2000/cdproceedings/4c/4c_1.htm, 2000.

6. Yutaka Yamauchi, Makoto Yokozawa, Takeshi Shinohara and Toru Ishida, "Collaboration with Lean Media: How Open-Source Software Succeeds," *International Conference on Computer Supported Cooperative Work (CSCW-00)*, pp329-338, 2000.

Workshop Paper

1. Toru Ishida, "Understanding Digital Cities," Toru Ishida and Katherine Isbister Eds. , *Digital Cities: Experiences, Technologies and Future Perspectives*, Lecture Notes in Computer Science, 1765, Springer-Verlag, pp. 7-17, 2000.
2. Ding Peng, Mao Wei Liang, Rao Ruo Nan, Sheng Huan Ye, Ma Fan Yuan and Toru Ishida, "Digital City Shanghai: Towards Integrated Information & Service Environment," Toru Ishida and Katherine Isbister Eds., *Digital Cities: Experiences, Technologies and Future Perspectives*, Lecture Notes in Computer Science, 1765, Springer-Verlag, pp. 125-139, 2000.
3. Takushi Sogo, Hiroshi Ishiguro and Mohan M. Trivedi, "Real-Time Target Localization and Tracking by N-Ocular Stereo," *IEEE Workshop on Omnidirectional Vision (OMNIVIS'00)*, pp. 153-160, 2000.
4. Kosuke Nakatsuka, Hirofumi Yamaki, and Toru Ishida, "Market-Based Network Resource Allocation with Non-tatonnement process," *Pacific Rim International Workshop on Multi-Agents (PRIMA 2000)*, pp.143-155, 2000.
5. Yeonsoo Yang, Masayuki Okamoto, Toru Ishida, "Applying Wizard of Oz Method to Prototyping Learning Interface Agent," *IEICE Workshop on Software Agent and its Applications (SAA2000) and Special Issue on Software Agent and its Applications Transactions of IEICE*, pp. 223-230, 2000.
6. Yahiko Kambayashi, Toru Ishida, Hiroyuki Tarumi and Ken Morishita, "Database with Space and Time Constraints for Digital Cities," International Workshop on Emerging Technologies for Geo-Based Applications, pp. 297-309, 2000.
7. 中塚 康介, 八槇 博史, 石田 亨, "市場指向分散資源割当て : 非模索過程によるアプローチ," 2000 年度人工知能学会全国大会(第 14 回), pp. 577-580, 2000.
8. 松原 啓明, 八槇 博史, 石田 亨, "補完財の連続オークションにおけるエージェント戦略," 2000 年度人工知能学会全国大会 (第 14 回) , pp. 549-552, 2000.
9. 吉住 貴幸, 三浦 輝久, 石田 亨, "ゲノム整列問題への段階的節点展開方式の適用," 2000 年度人工知能学会全国大会 (第 14 回) , pp. 89-92, 2000. 優秀論文賞.
10. 中澤 諭, 中西 英之, 石田 亨, "会話を発展させるインタフェースエージェント," 2000 年度人工知能学会全国大会 (第 14 回) , pp. 595-596, 2000.
11. 中澤 諭, 中西 英之, 石田 亨, "会話を発展させる仮想空間エージェント," マルチメディア, 分散, 協調とモバイルシンポジウム (DiCoMo2000), pp. 19-24, 2000.
12. 八槇 博史, 中塚 康介, 石田 亨, "非模索課程にもとづく市場指向資源割当て," 電子情報通信学会「ソフトウェアエージェントとその応用」特集ワークショップ(SAA2000), pp.141-148, 2000.
13. 小山 聡, 石田 亨, "情報ナビゲーションへの連想ルールの適用," 電子情報通信学会「ソフトウェアエージェントとその応用」特集ワークショップ(SAA2000), pp. 165-173, 2000.
14. 八槇 博史, 林田 尚子, "Live Web : デジタルシティにおけるモバイル情報流通プラ

ットフォーム,” 第9回マルチ・エージェントと協調計算ワークショップ (MACC2000), 2000.

15. 小山 聡, 武馬 慎, 石田 亨, “コミュニティ情報流通プラットフォームの構築,” 第9回マルチ・エージェントと協調計算ワークショップ (MACC2000), 2000.
16. 野村 早恵子, 早水 哲雄, 石田 亨, “ハイパーリンク構造解析からウェブコミュニティは抽出できるか,” 日本社会情報学会関西支部研究会(第4回), pp.25-32, 2000.
17. 中西 英之, Katherine Isbister, 石田 亨, Clifford Nass, “仮想空間でのコミュニケーションを補助するヘルパーエージェントの設計,” 情報処理学会 インタラクシオン 2000, pp. 107-114, 2000. 研究奨励賞.

Area Paper

1. 石田 亨, “デジタルシティの現状,” 情報処理, Vol. 41, No. 2, pp. 163-168, 2000.

Article, Newspaper, etc.

1. 石田 亨, “巻頭言：エージェント三原則,” 人工知能学会誌, Vol. 15, No. 6, pp. 939, 2000.
2. キャサリンイズビスタ, 中西英之, “ヘルパーエージェント：仮想空間における人間同士のインタラクシオンのアシスタント,” NTT R&D, Vol. 49, No. 2, pp.96-101, 2000.
3. Katherine Isbister and Hideyuki Nakanishi, “Helper Agent: A Chat Assistant for Cross-cultural Conversations,” NTT REVIEW, Vol.12, No.2, pp. 55-59, 2000.
4. 吉田和男, 石田 亨, “経済学者と計算機科学者の対話,” コンピュータソフトウェア, Vol. 17, No. 5, pp. 2-10, 2000.
5. 「拓く京都賞 2000 (上)」, 京都新聞 (3面), 2000年11月16日(木) 朝刊.

2001年

Chapter in Book

1. Takushi Sogo, Hiroshi Ishiguro and Mohan M. Trivedi, “N-Ocular Stereo for Real-Time Human Tracking,” In Ryad Benosman and Sing Bing Kang (Eds.), *Panoramic Vision: Sensors, Theory and Applications*, Springer-Verlag pp. 359-375, 2001.
2. 石田亨, 野村早恵子 (編), “特集： デジタルシティ,” bit, Vol. 33, No. 4, pp. 2-35, 共立出版, April 2001.

Ph.D. Thesis

1. Hideyuki Nakanishi, “Design and Analysis of Social Interaction in Virtual Meeting Space,” *Kyoto University*, 2001.
2. Takushi Sogo, “Localization of sensors and objects in distributed omnidirectional vision,” *Kyoto University*, 2001.

Journal Paper

1. Toru Ishida, “Digital City Kyoto: Social Information Infrastructure for Everyday Life,” *Communications of the ACM (CACM)*, 2001.
2. Satoshi Oyama, Kaoru Hiramatsu and Toru Ishida, “Cooperative Information Agents for Digital

- Cities,” *International Journal of Cooperative Information Systems*, Vol. 10, No. 1&2, pp.197-215, 2001.
3. Takushi Sogo, Hiroshi Ishiguro and Toru Ishida, “Acquisition and propagation of spatial constraints based on qualitative information,” *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (PAMI)*, Vol. 23, No. 3, pp. 268-278, 2001.
 4. Takushi Sogo, Hiroshi Ishiguro and Toru Ishida, “Mobile robot navigation by a distributed vision system,” *New Generation Computing, Springer-Verlag*, Vol. 19, No. 2, pp. 121-137, 2001.
 5. 三浦 輝久, 高瀬 俊郎, 石田 亨, “ゲノム解析のための配列歩行システム,” 電子情報通信学会論文誌, Vol.J84-D-I, No.1, pp.108-115, Jan. 2001.
 6. 野村 早恵子, 石田 亨, 正木 幸子, 横澤 誠, 篠原 健, “インターネットにおけるアイデンティティの国際比較,” 電子情報通信学会論文誌, D-I, Vol.J84, No.2, pp.222-231, 2001.
 7. 小山 聡, 石田 亨, “情報ナビゲーションへの連想ルールの適用,” 電子情報通信学会論文誌, Vol.J84-D-I, No.8, pp.1266-1274, 2001.
 8. 神田 崇行, 石黒 浩, 石田 亨, “人間-ロボット間相互作用に関わる心理学的評価,” 日本ロボット学会誌, Vol.19, No.3, pp.78-87, 2001.
 9. 中西 英之, キャサリン イズビスタ, 石田 亨, クリフォード ナス, “仮想空間内でのコミュニケーションを補助する社会的エージェントの設計,” 情報処理学会論文誌, Vol. 42, No. 6, pp. 1368--1376, 2001.

Conference Paper

1. Kaoru Hiramatsu and Toru Ishida, “An Augmented Web Space for Digital Cities,” *IEEE/IPSJ Symposium on Applications and the Internet (SAINT-01)*, pp.105-112, 2001.
2. Satoshi Oyama, Takashi Kokubo, Teruhiro Yamada, Yasuhiko Kitamura and Toru Ishida, “Keyword Spices: A New Method for Building Domain-Specific Web Search Engines,” *International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-01)*, pp.1457-1463, 2001.
3. Saeko Nomura, Toru Ishida, Sachiko Masaki, Makoto Yokozawa, and Takeshi Shinohara, “International Comparative Study of Identity Presented on the Internet,” *4th International Conference on Computational Intelligence and Multimedia Applications (ICCIMA)*, Yokosuka Japan, 2001.
4. Takayuki Kanda, Hiroshi Ishiguro, and Toru Ishida, “Psychological analysis on human-robot interaction,” *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2001)*, 2001.

Workshop Paper

1. Masayuki Okamoto, Yeonsoo Yang and Toru Ishida, “Wizard of Oz Method for Learning Dialog Agents,” *International Workshop on Cooperative Information Agents (CIA-2001)*, M. Klusch and F. Zambonelli (Eds.), Cooperative Information Agents V, Lecture Notes in Artificial Intelligence 2182, 2001.
2. Yasuhiko Kitamura, Teruhiro Yamada, Takashi Kokubo, Yasuhiro Mawarimichi, Taizo Yamamoto and Toru Ishida, “Interactive Integration of Information Agents on the Web,” *International Workshop on Cooperative Information Agents (CIA-2001)*, M. Klusch and F.

Zambonelli (Eds.), Cooperative Information Agents V, Lecture Notes in Artificial Intelligence 2182, 2001.

3. 小山 聡, 小久保 卓, 石田 亨, “ドメイン指向 Web 検索のためのドメイン判別ブール式の抽出,” 第 15 回人工知能学会全国大会, 2001 .
4. 早水 哲雄, 野村早恵子, 小山 聡, 石田 亨, “リンク構造の可視化による HITS アルゴリズムの分析,” 第 15 回人工知能学会全国大会, 2001.
5. 石田 亨, “インタラクション言語 Q の提案,” 第 15 回人工知能学会全国大会, 2001.
6. 福本 理人, 山本 太三, 中塚 康介, 八槇 博史, 石田 亨, “インタラクション設計言語 Q の実装,” 第 15 回人工知能学会全国大会, 2001
7. 神田崇行, 石黒浩, 小野哲雄, 今井倫太, 中津良平, “日常活動型ロボット Robovie の開発,” 第 19 回ロボット学会学術講演会予稿集, 2001.

Area Paper

1. 藤山英樹, 八槇博史, 石田 亨, “情報財と情報市場戦略,” 情報処理, Vol. 42, No. 4, pp. 1-5, 2001.

Article, Newspaper, etc.

1. 「デジタルシティー:情報を活用し都市活性化」, 京都新聞(3 面), 2001 年 1 月 18 日(木) 朝刊.
2. 「ネットで楽しむ 京の街」, 朝日新聞 (13 版) , 2001 年 2 月 20 日 (火) 朝刊.
3. 小山 聡, 平松 薫, 山田幸一, “デジタルシティー京都——市民のための公共情報空間の構築をめざして,” bit, Vol.33, No.4, pp.8-12, 2001.
4. 石田 亨, “インターネットの科学,” 岩波書店, 科学, 826 号, pp798-799.

2002 年

Book

1. Makoto Tanabe, Peter van den Besselaar and Toru Ishida Eds. *Digital Cities II: Computational and Sociological Approaches*. Lecture Notes in Computer Science, State-of-the-Art Survey, 2362, Springer-Verlag, 2002.

Ph.D. Thesis

1. Satoshi Oyama. Query Refinement for Domain-Specific Web Search. *Kyoto University*, 2002.
2. 平松 薫. 地理的関連性を用いた Web 検索技術の研究. 京都大学, 2002.

Journal Paper

1. Toru Ishida. Q: A Scenario Description Language for Interactive Agents. *IEEE Computer*, Vol.35, No. 11, pp. 42-47, 2002.
2. Toru Ishida. Digital City Kyoto: Social Information Infrastructure for Everyday Life. *Communications of the ACM (CACM)*, Vol. 45, No. 7, pp. 76-81, 2002.
3. Masayuki Okamoto, Katherine Isbister, Hideyuki Nakanishi and Toru Ishida. Supporting Cross-Cultural Communication with a Large-Screen System. *New Generation Computing*, Vol.

- 20, No. 2, pp. 165-185, 2002.
4. 神田崇行, 石黒 浩, 小野哲雄, 今井倫太, 前田武志, 中津良平. 研究用プラットフォームとしての日常活動型ロボット Robovie の開発. 電子情報通信学会論文誌 D-I, Vol. J85-D-I, No.4, pp.380-389, 2002.
 5. 神田崇行, 石黒 浩, 小野哲雄, 今井倫太, 中津良平. 人間と相互作用する自律型ロボット Robovie の評価. 日本ロボット学会誌, Vol.20, No.3, pp.315-323, 2002.
 6. 岡本昌之, 山中信敏. Wizard of Oz 法を用いた対話型 Web エージェントの構築. 人工知能学会論文誌, Vol. 17, No. 3, pp. 293-300, 2002.
 7. 中澤 諭, 中西英之, 石田 亨, 高梨克也. バランス理論を用いた社会的エージェントの分析. 情報処理学会論文誌, Vol. 43, No. 12, pp. 3607-3616, 2002.
 8. 山下直美, 石田 亨, 野村早恵子, 早水哲雄. 電子メールを用いた組織形成過程の分析. 情報処理学会論文誌, Vol. 43, No. 11, pp. 3355-3363, 2002.
 9. 篠原拓嗣, 石田 亨. N 人ゲームにおける最良優先探索の研究. 情報処理学会論文誌, Vol. 43, No. 10, pp. 2981-2989, 2002.
 10. 野村早恵子, 小山 聡, 早水哲雄, 石田 亨. WEB コミュニティ発見のための HITS アルゴリズムの分析と改善. 電子情報通信学会論文誌, Vol. J85, D-I, No. 8, pp. 741-750, 2002.
 11. 石田 亨, 福本理人. インタラクション設計言語 Q の提案. 人工知能学会論文誌, Vol. 17, No. 2, pp. 166-169, 2002.
 12. 神田崇行, 石黒浩, 小野哲雄, 今井倫太, 中津良平. 人-ロボットの対話におけるロボット同士の対話観察の効果. 電子情報通信学会論文誌 D-I, Vol. J85-D-I, No. 7, pp. 691-700, 2002.
 13. 小久保卓, 小山 聡, 山田晃弘, 北村泰彦, 石田 亨. 検索隠し味を用いた専門検索エンジンの構築. 情報処理学会論文誌, Vol. 43, No. 6, pp. 1804-1813, 2002.

Conference Paper

1. Saeko Nomura, Satoshi Oyama, Tetsuo Hayamizu and Toru Ishida. Analysis and Improvement of HITS Algorithm for Detecting Web Communities. *IEEE/IPSJ Symposium on Applications and the Internet (SAINT-2002)*, pp. 132-140, 2002.
2. Takayuki Kanda, Hiroshi Ishiguro, Michita Imai, Tetsuo Ono and Kenji Mase. A Constructive Approach for Developing Interactive Humanoid Robots. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2002)*, pp. 1265-1270, 2002.
3. Takayuki Kanda, Hiroshi Ishiguro, Tetsuo Ono, Michita Imai and Ryohei Nakatsu. Development and Evaluation of an Interactive Humanoid Robot Robovie. *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2002)*, pp.1848-1855, 2002.

Workshop Paper

1. Toru Ishida, Hiroshi Ishiguro and Hideyuki Nakanishi. Connecting Digital and Physical Cities. Makoto Tanabe, Peter van den Besselaar and Toru Ishida Eds. *Digital Cities II*. Lecture Notes in Computer Science, 2362, pp. 246-256, Springer-Verlag, 2002.
2. Zhiqiang Gao, Tomoyuki Kawasoe, Akishige Yamamoto and Toru Ishida. Meta-Level Architecture for Executing Multi-agent Scenarios, *Pacific Rim International Workshop on Multi-Agents (PRIMA 2002)*, Lecture Notes in Artificial Intelligence, 2413, Springer-Verlag, pp.

- 163-177, 2002. (PRIMA Runner Up Paper Prize)
3. Yohei Murakami, Kazuhisa Minami, Tomoyuki Kawasoe and Toru Ishida. Multi-Agent Simulation for Crisis Management. *IEEE International Workshop on Knowledge Media Networking (KMN-02)*, pp. 135-139, 2002.
 4. Masayuki Okamoto. Incremental PDFFA Learning for Conversational Agents. *IEEE International Workshop on Knowledge Media Networking (KMN-02)*, pp.161-166, 2002.
 5. Hideyuki Nakanishi, Satoshi Nakazawa, Toru Ishida and Katsuya Takanashi. Using Balance Theory to Understand Social Agents. *AAMAS-02 Workshop on Embodied Agents: Let's Specify and Compare Them!* 2002.
 6. Hideyuki Nakanishi, Satoshi Nakazawa, Toru Ishida and Katsuya Takanashi. Analyzing How Social Agents Influence Interpersonal Communication, SICE Annual Conference (*SICE2002*), 計測自動制御学会, TEA12-1 SICE02-0341, pp. 2029-2034,2002.
 7. Saeko Nomura, Takeru Miki, and Toru Ishida, "Co-citation Analysis on Scholarly Networks on the WWW," *International SUNBELT Social Network Conference XXI, (SUNBELT2002)*, 2002.
 8. Takayuki Kanda, Hiroshi Ishiguro, Tetsuo Ono, Michita Imai, and Kenji Mase. Multi-Robot Cooperation for Human-Robot Communication. *IEEE International Workshop on Robot and Human Communication (ROMAN2002)*, pp.271-276, 2002.
 9. 中西英之, 石田 亨, 伊藤英明, 福本理人. 仮想都市空間シミュレータ FreeWalk/Q. SICE システムインテグレーション部門講演会 (*SI2002*), 2002.
 10. 石田 亨, 中西英之, 村上陽平, 河添智幸, 菱山玲子. 都市における危機管理のためのマルチエージェントシミュレーション. SICE システムインテグレーション部門講演会 (*SI2002*), 2002.
 11. 伊藤英明, 福本理人, 中西英之, 石田 亨. FreeWalk V4: 社会的エージェントのためのインタラクティブプラットフォーム. 第 16 回人工知能学会全国大会, 2B1-02, 2002.
 12. 南 一久, 村上陽平, 河添智幸, 石田 亨. マルチエージェントシステムによる避難シミュレーション. 第 16 回人工知能学会全国大会, 2B1-04, 2002. (人工知能学会全国大会優秀賞)
 13. 中澤 諭, 中西英之, 石田 亨, 高梨克也. 社会的エージェントのバランス理論. 情報処理学会 インタラクティブ 2002, pp. 109-116, 2002.
 14. 中西英之, 石田 亨. 仮想環境における危機管理シミュレーション. 第 1 回知的都市基盤シンポジウム, 2002.
 15. 野村早恵子, 石田 亨, 山下直美, 安岡美佳, 船越 要. 翻訳エージェントの可能性: 異文化コラボレーション実験 ICE2002 報告. エージェント合同シンポジウム (*JAWS2002*), pp. 433-440, 2002.
 16. 岡本昌之. 漸次的 PDFFA 学習とその対話型エージェントへの適用. エージェント合同シンポジウム (*JAWS2002*), pp.160-167, 2002.
 17. 伊藤英明, テー シューリン, 中西英之, 羽河利英. デジタルシティの三次元インタフェースの設計と実装. エージェント合同シンポジウム (*JAWS2002*), pp.331-338, 2002.
 18. 林田尚子, 八槇博史, 喜田弘司, 山口智治. エージェントによる情報流通支援: 支援内容による情報提供行動への影響に関する実験. エージェント合同シンポジウム (*JAWS2002*), pp.394-401, 2002.
 19. 中塚康介, 八槇博史. マルチエージェントによる開放環境下での資源運用ポリシー. エ

- ーエージェント合同シンポジウム (JAWS2002), 2002.
20. 林田尚子, 八槇博史, 喜田弘司, 山口智治. モバイル環境における情報提供活動の支援: 支援内容による提供行動への影響に関する実験. マルチメディア・分散・協調とモバイルシンポジウム (DICOMO2002), pp.531-534, 2002.
 21. 伊藤英明, 中西英之, 石田亨. 仮想都市空間シミュレータ FreeWalk/Q. マルチメディア・分散・協調とモバイルシンポジウム (DICOMO2002), 2002. (優秀デモンストレーション賞)
 22. 岡本昌之, 山中信敏. Wizard of Oz 法を用いた学習対話型エージェント. 人工知能学会 MYCOM2002, pp. 1-8, 2002.

Area Paper

1. 石田亨, 中西英之, 高田司郎. デジタルシティにおける危機管理シミュレーション. システム制御情報学会誌 Vol.46, No.9, pp.524-531,2002.

Article, Newspaper, etc.

1. 「デジタルシティ京都に学ぶ」, 未来予兆, Vol. 2, pp. 23-30, 博報堂, 2002.
2. 「PC 翻訳使い共同研究」, 朝日新聞京都版 2002 年 8 月 6 日.
3. KBS 京都新聞きらり夕刊 (ニュース番組) 2002 年 6 月 12 日 14 時 30 分～
KBS ニュースきっちゃん (ニュース番組) 2002 年 6 月 12 日 21 時 30 分～
4. 「母国語でソフト開発」, 毎日新聞京都版 2002 年 6 月 15 日.
5. 「京都大学など 4ヶ国大学 各国言語一つのソフトに ネットと機械翻訳で」, 日刊工業新聞 2002 年 6 月 4 日.
6. 「母国語でやりとり 日中 4ヶ国がネット実験」, 日経産業新聞 2002 年 6 月 4 日.
7. 「機械翻訳とネット使いソフトの開発を実験 NTT、京大などアジアの大学が参加」, 日本工業新聞 2002 年 6 月 4 日.

2003 年

Chapters in Books

1. Saeko Nomura and Toru Ishida. Computerized Tools for Promoting Community Online. *Encyclopedia of Community*. Sage Reference, 2003.
2. Toru Ishida and Hideyuki Nakanishi. Designing Scenarios for Social Agents. Ning Zhong, Jiming Liu and Yiyu Yao Eds. *Web Intelligence*, pp. 59-76, Springer-Verlag, 2003.

Ph.D. Thesis

1. Masayuki Okamoto. Design and Applications of Learning Conversational Agents. *Kyoto University*, 2003.

Journal Paper

1. Masashi Shimbo and Toru Ishida. Controlling the Learning Process of Real-time Heuristic Search. *Artificial Intelligence*. 2003.
2. 伊藤 英明, 中西 英之, 石田 亨, スコット ブレイブ, クリフォード ナス. 社会心理学

実験のための仮想空間環境の実装. 情報処理学会論文誌, Vol. 44, No. 2, pp.256-265, 2003.

3. 野村早恵子, 石田亨, 船越要, 安岡美佳, 山下直美. アジアにおける異文化コラボレーション実験 2002: 機械翻訳を介したソフトウェア開発. 情報処理, 44 巻, 5 号, 2003.
4. 岡本昌之, キャッシュを用いた漸次的 PDF/A 学習とその対話型エージェントへの適用, 電子情報通信学会論文誌 D-I, Vol.J86-D-I, No.8, pp.524-531, 2003.
5. 伊藤 英明, テー シューリン, 中西英之, 羽河利英. デジタルシティの三次元インタフェースの設計と実装, 電子情報通信学会論文誌 D-I, Vol.J86-D-I, No.8, pp.592-599, 2003.
6. 林田尚子, 八槇博史, 喜田弘司, 山口智治. エージェントによる情報流通支援: 支援内容による情報提供行動への影響に関する実験. 電子情報通信学会論文誌 D-I, Vol.J86-D-I, No.8, pp.575-582, 2003.
7. Tomoko Koda, "User Reactions to Anthropomorphized Interfaces", *IEICE Transactions on Information and Systems*, Vol.E86-D, No.8, pp1369-1377, 2003.
8. 村上陽平, 石田亨, 河添智幸, 菱山玲子. インタラクション設計に基づくマルチエージェントシミュレーション. 人工知能学会論文誌, Vol.18, No.5, pp.278-285, 2003.

Conference Paper

1. Hideyuki Nakanishi, Satoshi Nakazawa, Toru Ishida, Katsuya Takanashi and Katherine Isbister. Can Software Agents Influence Human Relations? Balance Theory in Agent-mediated Communities. *International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS-03)*, pp. 717-724, 2003. (Finalists of the Best Paper Award)
2. Yohei Murakami, Toru Ishida, Tomoyuki Kawasoe and Reiko Hishiyama. Scenario Description for Multi-Agent Simulation. *International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS-03)*, pp. 369-376, 2003.
3. Saeko Nomura, Toru Ishida, Naomi Yamashita, Mika Yasuoka and Kaname Funakoshi. Open Source Software Development with Your Mother Language: Intercultural Collaboration Experiment 2002. *International Conference on Human-Computer Interaction (HCI-03)*, Vol. 4, pp. 1163-1167, 2003.
4. Kaname Funakoshi, Akishige Yamamoto, Saeko Nomura and Toru Ishida. Supporting Intercultural Collaboration for Global Virtual Teams. *International Conference on Human-Computer Interaction (HCI-03)*, Vol.4, pp. 1098-1102, 2003.

Symposiums and Workshops

1. Sachiyo Arai, Yohei Murakami, Yuki Sugimoto, Toru Ishida. Semantic Web Service Architecture using Multi-agent Scenario Description. *Pacific Rim International Workshop on Multi-Agents (PRIMA 2003)*, Lecture Notes in Artificial Intelligence, 2891, Springer-Verlag, pp.98-109, 2003.

Workshop Paper

1. 野村早恵子, 船越要, 山下直美, 安岡美佳, 石田亨. 機械翻訳を介したオープンソースソフトウェア開発: Intercultural Collaboration Experiment 2002. 情報処理学会第 65 回全国大会, 2T6-3, 2003.

2. 小倉健太郎, 林良彦, 野村早恵子, 石田亨. 目的指向の異言語間コミュニケーションにおける機械翻訳の有効性の分析-異文化コラボレーションICE2002実証実験から-. 情報処理学会第 65 回全国大会, 2T6-4, 2003.
3. 船越要, 山本晃成, 藤代祥之, 野村早恵子, 石田亨. 異文化コラボレーション支援システムの設計. 情報処理学会第 65 回全国大会, 4A-5, 2003.
4. 鳥居大祐, 山本晃成, 石田 亨. 分散環境上でのマルチエージェントシナリオの実行. エージェント合同シンポジウム(JAWS2003), pp. 121-128, 2003.
5. 中西英之, 石田 亨. マルチユーザマルチエージェント仮想都市空間 FreeWalk. エージェント合同シンポジウム(JAWS2003), pp. 381-388, 2003.
6. 菱山玲子, 石田 亨. 共適応マッチメイキングによる電子調達システムの提案. エージェント合同シンポジウム(JAWS2003), pp. 237-244, 2003.
7. 河添 智幸, 中西 英之, 菱山 玲子. 仮想空間を用いた避難学習における体験と観察の相乗効果. JAWS2003, pp. 395-402, 2003.
8. 石田 亨, 林田尚子, 野村早恵子. 異文化コラボレーションに向けて-機械翻訳システムの相互作用性-. 電子情報通信学会技術研究報告, AI, 2003.
9. 小泉 智史, 中西 英之, 石黒 浩, 石田 亨. 視覚センサネットワークを用いた避難シミュレータとその実験構想. 第 17 回人工知能学会全国大会 , 1B5-05, 2003.
10. 杉本悠樹, 村上陽平, 荒井幸代, 石田 亨. セマンティクス導入によるユーザ指向 Web サービス連携支援. 第 17 回人工知能学会全国大会, 1D4-01, 2003.
11. 荒井幸代, 村上陽平, 杉本悠樹, 石田 亨. Multi-Agent Scenarios Introducing Semantics for Web Services. The 6th SANKEN (ISIR) International Symposium, 2003.
12. 安岡美佳, 中小路久美代, 大平雅雄, 石田 亨, 野村早恵子. 異文化協調作業における共有理解構築の機会としてのコミュニケーションエラー現象の利用, 情報処理学会研究報告ヒューマンインタフェース, 2003.
13. 山中信敏, 岡本昌之, 中西英之, 石田 亨. 非言語的合図に基づいて仮想都市を案内する対話エージェント. 情報処理学会研究報告グループウェアとネットワークサービス, GN-47-16, pp. 89-94, 2003.
14. 中西英之, 石田 亨. FreeWalk/Q: デジタルシティのためのマルチユーザ・マルチエージェント仮想都市空間シミュレータ. 情報処理学会 インタラクション 2003, デモセッション, pp. 217-218, 2003.
15. 志水 信哉, 中西 英之, 石田 亨. デスクトップ仮想環境のための視野の設計. インタラクション 2003, pp. 107-114, 2003.
16. 中西英之, 板倉豊和, 杉山香織, 岡本昌之, 山中信敏, 石田 亨. 仮想都市環境におけるバーチャル・ヒューマンの開発. 第 65 回情報処理学会全国大会, 4T7B-2, 2003.

Area Papers in Journals

1. 中西英之, 小泉智史, 石黒 浩, 石田 亨. 市民参加による避難シミュレーションに向けて. 人工知能学会誌, Vol. 18, No. 6, pp. 643-648, 2003.
2. 野村早恵子, 石田 亨, 船越 要, 安岡美佳, 山下直美. アジアにおける異文化コラボレーション実験 2002: 機械翻訳を介したソフトウェア開発. 情報処理, Vol. 44, No. 5, pp. 503-511, 2003.

Articles

1. 岡本昌之, 小山聡. Americas School on Agents and Multiagent Systems 参加報告. コンピュータソフトウェア, Vol. 20, No. 1, pp. 92-97, 2003.
2. 野村早恵子, 船越 要, 山下直美, 安岡美佳, 石田 亨. 日中韓馬異文化コラボレーション実験 ICE2002. AAMT, No. 34, pp. 3-9, 2003.
3. 石田 亨, デジタルシティと異文化コミュニケーション ---社会情報学に向けて---, アキユーム. Vol. 12, pp. 16-23, 2003.

Newspapers and TV

1. 「情報の壁なくそう: 京大でシンポ, 言語や通信, 研究報告」, 京都新聞 (25 面), 2003 年 12 月 2 日(火)朝刊.
2. 「自動翻訳, 日中で光通信網」, 毎日新聞東京版 2003 年 11 月 6 日.
3. 「自動翻訳付き光通信網」, 毎日新聞関西版 2003 年 11 月 6 日.
4. 並列性の追及からコミュニティの探求へ. 学生フォーラム, 第 16 回, 石田 亨氏インタビュー, 人工知能学会誌, Vol. 18, No. 5, pp. 613-616, 2003.

2004 年

Chapters in Books

1. Matthias Klusch, T. Rist, E. Andre, Toru Ishida and Hideyuki Nakanishi. Interactive Information Agents and Interfaces. RW Proctor, K-P L Vu Eds, *The Handbook of Human Factors in Web Design*, Lawrence Erlbaum Associates, 2004.
2. Hideyuki Nakanishi, Toru Ishida, Katherine Isbister and Clifford Nass. Designing a Social Agent for Virtual Meeting Space. Sabine Payr and Robert Trappl Ed., *Agent Culture: Human-Agent Interaction in a Multicultural World*, Lawrence Erlbaum Associates, pp. 245-266, 2004.

Journals

1. Satoshi Oyama, Takashi Kokubo and Toru Ishida. Domain Specific Search with Keyword Spices. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, Vol. 16, No. 1, pp.17-27, 2004.
2. Hideyuki Nakanishi. FreeWalk: A Social Interaction Platform for Group Behavior in a Virtual Space. *International Journal of Human Computer Studies*, Vol. 60, No. 4, pp. 421-454, 2004.
3. Masayuki Okamoto, Gradual Probabilistic DFA Learning with Caching for Conversational Agents. *Systems and Computers in Japan*, Vol. 35, No. 7, pp. 24-32, 2004.

Journals in Japan

1. 菱山玲子, 石田 亨. 電子調達のための共適応マッチメイキング. 情報処理学会論文誌, Vol. 45, No. 7, pp. 1790-1798, 2004.
2. 菱山玲子, 石田 亨. e-調達基盤のための生産仕様のセマンティクスとその調整メカニズムの考察. 日本社会情報学会学会誌, Vol. 16, No. 1, pp. 59-75, 2004.

3. 野村早恵子, 三木 武, 石田 亨. コミュニティマイニングにおける Web 引用解析と文献引用解析の比較. 電子情報通信学会論文誌, Vol. J87-D1, No. 3, pp. 382-389, 2004.
4. 船越 要, 藤代祥之, 野村早恵子, 石田 亨. 機械翻訳を用いた協調作業支援ツールへの要求条件 - 日中韓馬異文化コラボレーション実験からの知見. 情報処理学会論文誌, Vol. 45, No. 1, pp. 112-120, 2004.

Conferences

1. Hideyuki Nakanishi and Toru Ishida. FreeWalk/Q: Social Interaction Platform in Virtual Space. *ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology (VRST-04)*, pp. 97-104, 2004.
2. Sachiyo Arai and Toru Ishida. Learning for Human-Agent Collaboration on the Semantic Web. *International Conference on Informatics Research for Development of Knowledge Society Infrastructure (ICKS-04)*, IEEE Computer Society, pp. 132-139, 2004.
3. Toru Ishida, Hideyuki Nakanishi and Saeko Nomura. Real Scale Experiments on Communityware. *International Conference on Informatics Research for Development of Knowledge Society Infrastructure (ICKS-04)*, IEEE Computer Society, pp. 116-123, 2004.
4. Kentaro Ogura, Yoshihiko Hayashi, Saeko Nomura and Toru Ishida. User Adaptation in MT-mediated Communication. *The First International Joint Conference on Natural Language Processing (IJCINLP-04)*, pp.596-601, 2004.
5. Hideyuki Nakanishi, Satoshi Koizumi, Toru Ishida and Hideaki Ito. Transcendent Communication: Location-Based Guidance for Large-Scale Public Spaces. *International Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI-04)*, pp. 655-662, 2004.
6. Tomoko Koda. Interpretation of Expressive Characters in an Intercultural Communication, *8th International Conference on Knowledge-Based Intelligent Information & Engineering Systems (KES2004)*, Lecture Notes in Artificial Intelligence, 3214, PartII, pp.862-868, 2004.

Symposiums and Workshops

1. Toru Ishida. Society-Centered Design for Socially Embedded Multiagent Systems. *International Workshop on Cooperative Information Agents (CIA-04)*, Lecture Notes in Computer Science, pp. 16-29, 2004.
2. Reiko Hishiyama and Toru Ishida. Modeling e-Procurement as Co-adaptive Matchmaking with Mutual Relevance Feedback. *Pacific Rim International Workshop on Multi-Agents (PRIMA 2004)*, Lecture Notes in Artificial Intelligence, Springer-Verlag, 2004. (PRIMA Runner Up Paper Prize)
3. Daisuke Torii and Toru Ishida, Stéphane Bonneaud and Alexis Drogoul. Layering Social Interaction Scenarios on Environmental Simulation. *Workshop on Multiagent and Multiagent-based Simulation (MAMABS)*, *International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS-04)*, pp. 61-70, 2004.
4. Toru Ishida. Activities and Technologies in Digital City Kyoto. Peter van den Besselaar and Satoshi Koizumi Eds. *Digital Cities III, Information Technologies for Social Capital: a Cross-Cultural Perspective*, Lecture Notes in Computer Science, State-of-the-Art Survey, 3081, pp. 168-189, 2004.

5. Hideyuki Nakanishi, Toru Ishida and Satoshi Koizumi. Virtual Cities for Real-world Crisis Management. Peter van den Besselaar and Satoshi Koizumi Eds. *Digital Cities III, Information Technologies for Social Capital: a Cross-Cultural Perspective*, Lecture Notes in Computer Science, State-of-the-Art Survey, 3081, pp. 190-202, 2004.
6. Tomoko Koda, Satoshi Nakawaza and Toru Ishida. Talking Digital Cities: Connecting Heterogeneous Digital Cities via the Universal Mobile Interface. Peter van den Besselaar and Satoshi Koizumi Eds. *Digital Cities III, Information Technologies for Social Capital: a Cross-Cultural Perspective*, Lecture Notes in Computer Science, State-of-the-Art Survey, 3081, pp.219-233, 2004.
7. Toru Ishida, Alessandro Aurigi and Mika Yasuoka. World Digital Cities: Beyond heterogeneity. Peter van den Besselaar and Satoshi Koizumi Eds. *Digital Cities III, Information Technologies for Social Capital: a Cross-Cultural Perspective*, Lecture Notes in Computer Science, State-of-the-Art Survey, 3081, pp. 413-428, 2004.
8. Hideyuki Nakanishi. Virtual City Simulator for Education, Training, and Guidance. *International Workshop on Monitoring, Security, and Rescue Techniques in Multiagent Systems (MSRAS2004)*, Lecture Notes in Computer Science, 2004.
9. Pat Langley, Sachiyo Arai, and Daniel Shapiro. Model-Based Learning with Hierarchical Relational Skills, *International Conference on Machine Learning Workshop on Relational Reinforcement Learning*, 2004.
10. Toru Ishida, Hideyuki Nakanishi and Saeko Nomura. Real Scale Experiments on Communityware. *International conference on Informatics Research for Development of Knowledge Society Infrastructure (ICKS2004)*, pp. 116-123, 2004.
11. Tomoko Koda. Reports of the Effects of an Emotionally Expressive Interface for Intercultural Communication. *Asia Broadband Workshop on Digital City Collaboration*. Beijing, 2004.

Symposiums and Workshops in Japan

1. 中西英之, 小泉智史, 石田 亨, 伊藤英明. 超越型誘導のための仮想都市シミュレータ. 第 18 回人工知能学会全国大会, 2G2-01, 2004. (人工知能学会全国大会優秀賞)
2. 林田尚子, 石田 亨. 機械翻訳を介した多言語コミュニケーションにおけるインタラクティブティ向上支援. 第 18 回人工知能学会全国大会, 2E1-06, 2004.
3. 鳥居大祐, 石田 亨. Q と CORMAS の結合 : 多層マルチエージェントシミュレーションへの挑戦. 第 18 回人工知能学会全国大会, 2H1-01, 2004. (人工知能学会全国大会優秀賞)
4. 鳥居 大祐, 石田 亨. 参加型モデリングとマルチエージェントシミュレーション, 電子情報通信学会技術報告, 人工知能と知識処理研究会 (AI) 第一回研究会, pp. 7-12, 2004.
5. 三木 武, 野村早恵子, 石田 亨. セマンティックアノテーションを用いた Web リンク解析. 電子情報通信学会技術研究報告, AI, 2004.
6. 坂本知子, 野村早恵子, 石田 亨, 井佐原均, 小倉健太郎, 林良彦, 石川 開, 小谷克則, 島津美和子, 介弘達哉, 畠中伸敏, 富士 秀, 船越 要. 機械翻訳システムに対する利用者適応の分析 -異文化コラボレーションを目指して-. 電子情報通信学会技術研究報告, AI2003-97, 2004.

7. 菱山玲子, 石田 亨. 電子調達のためのエージェントベース共適応系の設計. 計測自動制御学会第 16 回自律分散システム・シンポジウム, pp.153-158, 2004.
8. 伊藤英明, 中西英之, 小泉智史, 石田亨. 鳥瞰コミュニケーション環境を用いたナビゲーションシステム. 情報処理学会 インタラクシオン 2004, デモセッション, pp. 55-56, 2004.
9. Tomoko Koda and Satoshi Nakazawa. Talking Digital Cities: Connecting Heterogeneous Digital Cities via an Universal Mobile Interface. 2004 年情報学シンポジウム, 2004.
10. 志水 信哉, 中西 英之. Sensitive Agent: シミュレーションのための人間エージェント間インタラクシオンの設計. インタラクシオン 2004, pp. 11-18, 2004.
11. 中島悠, 椎名宏徳, 山根昇平, 山本晃成, 石田亨. 大規模マルチエージェントシミュレーションのためのプラットフォーム構築. 合同エージェントワークショップ&シンポジウム (JAWS2004), pp. 59-65, 2004.
12. 村上 陽平, 石田 亨. マルチエージェントシミュレーションによるプロトコル設計. 合同エージェントワークショップ&シンポジウム(JAWS2004), pp. 66-73, 2004.
13. 林田尚子, 石田 亨. 翻訳エージェントによる自己主導型リペア支援. 合同エージェントワークショップ&シンポジウム(JAWS2004), pp.275-282, 2004.
14. 中西 英之, 石田 亨. インタラクシオンプラットフォームを用いた協調型誘導法の設計. 合同エージェントワークショップ&シンポジウム(JAWS2004), pp. 323-330, 2004.
15. 神田智子. 異文化コラボレーションにおける感情サポートキャラクターの効用. 合同エージェントワークショップ&シンポジウム (JAWS2004) 特別セッション「HAI(Human Agent Interaction)」, pp.331-338, 2004.
16. 鳥居大祐, 石田 亨. 参加型モデリングにおける機械学習を用いた意志決定ルールの獲得. 合同エージェントワークショップ&シンポジウム(JAWS2004), pp.363-370, 2004.

Patent

1. 3次元仮想空間シミュレータ, 3次元仮想空間シミュレーションプログラム, およびこれを記録したコンピュータ読み取り可能な記録媒体. 科学技術振興事業団, 中西 英之, 石田 亨. 特願 2003-323612 平成 15 年 (2003) 9 月 16 日, 特許第 3625212 号 平成 16 年 (2004) 12 月 10 日.

Article, Newspaper, etc.

1. 石田 亨, 中西 英之. 仮想空間におけるコミュニケーションの社会的エージェントによる支援. *SCAT TECHNICAL JOURNAL TELECOM FRONTIER*, No. 42, pp. 4-12. 2004.
2. 中西 英之. CHI2004 参加報告. ヒューマンインタフェース学会誌. Vol. 6, No. 3, pp. 187-188, 2004
3. Group dynamics play out in VR. *Technology Research News*, May 19/26, 2004.
4. 避難誘導システム開発. 「仮想都市」で災害再現. 京都新聞 2004 年 11 月 23 日(火).

受賞

1996年

- ・ 石田 亨, 新保 仁, 実時間探索による経路学習, 人工知能学会誌, Vol. 11, No. 2, pp. 411-419, 1996. (10周年記念論文賞)

1997年

- ・ 八槇博史, Michael P. Wellman, 石田亨. 市場モデルを用いたアプリケーション QoS の制御. 第 11 回人工知能学会全国大会, 16-01, 1997. (優秀論文賞)

1999年

- ・ 十河卓司, 木元克美, 石黒浩, 石田亨. 分散視覚システムによる移動ロボットの誘導. 日本ロボット学会誌, Vol. 17, No. 7, pp. 1009-1016, 1999. (日本ロボット学会論文賞)

2000年

- ・ 吉住 貴幸, 三浦 輝久, 石田 亨, ゲノム整列問題への段階的節点展開方式の適用, 第 14 回人工知能学会全国大会, pp. 89-92, 2000. (優秀論文賞)
- ・ 中西 英之, Katherine Isbister, 石田 亨, Clifford Nass, 仮想空間でのコミュニケーションを補助するヘルパーエージェントの設計, 情報処理学会 インタラクシオン 2000, pp. 107-114, 2000. (研究奨励賞)

2001年

- ・ 三浦輝久. 遺伝子配列解析問題のための探索アルゴリズム, 2001. (第 2 回 AI 若手の集い MYCOM2001 ベストプレゼンテーション賞)

2002年

- ・ IEEE Fellow. For contributions to Autonomous Agents and Multiagent Systems, Toru Ishida
- ・ 南 一久, 村上陽平, 河添智幸, 石田 亨. マルチエージェントシステムによる避難シミュレーション. 第 16 回人工知能学会全国大会, 2B1-04, 2002. (優秀賞)
- ・ Zhiqiang Gao, Tomoyuki Kawasoe, Akishige Yamamoto and Toru Ishida. Meta-Level Architecture for Executing Multi-agent Scenarios, *Pacific Rim International Workshop on Multi-Agents (PRIMA 2002)*, Lecture Notes in Artificial Intelligence, 2413, Springer-Verlag, pp. 163-177, 2002. (Runner Up Paper Prize)
- ・ 石田亨, 中西英之, 村上陽平, 河添智幸, 菱山玲子, 高田司郎. 都市における危機管理のためのマルチエージェントシミュレーション. SICE システムインテグレーション部門講演会(SI2002), 1P21-04, 2002. (ベストセッション賞)
- ・ 伊藤英明, 中西英之, 石田亨. 仮想都市空間シミュレータ FreeWalk/Q, 情報処理学会, マルチメディア, 分散, 協調とモバイルシンポジウム(DICOMO2002), DEMO11, 2002. (優秀デモンストレーション賞)

2003年

- ・ 情報処理学会坂井記念特別賞, 仮想空間における人間エージェント間の社会的インタラクシオンに関する研究, 中西英之

- Hideyuki Nakanishi, Satoshi Nakazawa, Toru Ishida, Katsuya Takanashi and Katherine Isbister. Can Software Agents Influence Human Relations? -Balance Theory in Agent-mediated Communities-. *International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS-03)*, 2003. (Finalists of the Best Paper Award)

2004 年

- Reiko Hishiyama and Toru Ishida. Modeling e-Procurement as Co-adaptive Matchmaking with Mutual Relevance Feedback. *Pacific Rim International Workshop on Multi-Agents (PRIMA 2004)*, Lecture Notes in Artificial Intelligence, Springer-Verlag, 2004. (Runner Up Paper Prize)
- 中西英之, 小泉智史, 石田 亨, 伊藤英明. 超越型誘導のための仮想都市シミュレータ. 第 18 回人工知能学会全国大会, 2G2-01, 2004. (優秀賞)
- 鳥居大祐, 石田 亨. Q と CORMAS の結合 : 多層マルチエージェントシミュレーションへの挑戦. 第 18 回人工知能学会全国大会, 2H1-01, 2004. (優秀賞)

実時間探索による経路学習

Path Learning by Realtime Search

石田 亨* 新保 仁*
Toru Ishida Masashi Shimbo

* 京都大学大学院工学研究科情報工学専攻
Dept. of Information Science, Kyoto University, Kyoto 606-01, Japan.

1995年9月19日 受理

Keywords: realtime search, learning, heuristic evaluation function, problem solving.

Summary

The capability of learning is one of the salient features of realtime search algorithms such as LRTA*. These algorithms repeatedly perform problem solving trials so that the heuristic values will eventually converge to exact values along every optimal path to the goal. The major impediment is, however, the instability of the solution quality (the length of the solution path) during convergence. This instability is due to two properties of the search algorithms: ① they try to find all optimal solutions even after obtaining fairly good solutions, and ② they tend to move towards unexplored areas thus failing to balance exploration and exploitation.

In this paper, we propose and analyze two new realtime search algorithms to stabilize the convergence process.

- ϵ -search (*weighted realtime search*) relaxes the condition of searching for optimal solutions to allow suboptimal solutions with ϵ error. As a result, ϵ -search significantly reduces the total amount of learning performed.
- ϵ -search (*realtime search with upper bounds*) utilizes the upper bounds of estimated costs, which become available after the problem is solved once. Guided by the upper bounds, δ -search can better control the tradeoff between exploration and exploitation.

The ϵ - and δ -search algorithms can be combined easily. The effectiveness of these algorithms is demonstrated by solving randomly generated mazes.

1. ま え が き

現在までに提案された探索アルゴリズムは、A*[Hart 68]に代表されるオフライン探索と、Real-Time-A*やLearning Real-Time-A* (LRTA*) [Korf 90]に代表される実時間探索に分類できる。オフライン探索が目標に至る経路をあらかじめ完全に探索するのに対し、実時間探索は定数時間の探索結果をもとに判断を下し、移動しながら探索を続ける。実時間探索は最適解を保証できないが、プランニングと動作を交互にあるいは並行に実行することができる。この特性を利用して、さまざまな機能を持つ実時間探索アルゴリズムが研究されている [Chimura 94, Hamidzadeh 95,

Ishida 95, Ishida 96, Knight 93, Pemberton 92, Russel 91].

LRTA*をはじめとする実時間探索アルゴリズムのもう一つの特徴は、問題解決を繰り返すと最適解に収束するという学習機能にある。しかしながら、これまでの実時間探索に関する研究は、初回の問題解決に関する性能の議論に終始しており、収束に関する研究は現在までほとんど報告されていない。本論文で議論するのは、実時間探索の初回の問題解決性能ではなく、2回目以降の学習性能、収束性能である。実際、代表的な実時間探索アルゴリズムであるLRTA*を繰り返し実行すると以下の現象が生じる。

- すべての最適解を追求し続ける。

準最適解が得られた後でも、アルゴリズムは最

適解を求め続ける。推定コストの下界値(lower bound)の記録しかないため、アルゴリズムは得られた経路が最適であるか否かを判断できない。したがって、最適解が複数ある場合には、最適解が一つ得られた後でも、すべての最適解を求め続ける。実時間処理が要求される環境では、最適解を得ることはそれほど重要ではない(ましてやすべての最適解を得ることはまったく重要ではない)にもかかわらず、アルゴリズムは最適解を求め続ける。

- 学習による漸次的な効率改善が保証されない。推定コストは適格(admissible)*¹な推定評価関数(heuristic evaluation function)で与えられる下界値から出発し、真のコストに向けて更新されていく。このため、既探索領域に比べ未探索領域の推定コストが小さくなる傾向がある。問題解決器は推定コストの下界値が小さい状態に向けて移動するため、学習により既探索領域の下界値が上昇すると、LRTA*は未探索領域の探検(exploration)に向かい始める。その結果、それまでに得られた解よりも、はるかにコストの高い経路を辿ることになる。学習機能が保証するのは、最終的に収束することであって、収束に至る途中段階での性能ではない。

本論文では、上記の問題を解決するため、2種の実時間探索アルゴリズムを提案する。 ϵ -探索(重みつき実時間探索)は準最適解を許容するためのものである。 δ -探索(上界値を用いた実時間探索)は探索が過剰とならないよう制御を行うことを意図している。 δ -探索で用いる上界値は、初回の問題解決結果から得られ、下界値と同様に2回目以降の問題解決過程での真の値に近づいていく。 ϵ -探索と δ -探索の有効性は、ランダムに生成された迷路の例題を用いて実証される。

2. 研究の背景

2.1 オフライン探索との関係

初期のプランニングアルゴリズムは、オフライン探索が主流であった。しかし、1980年代の中頃から、自律移動ロボットや実時間システムのためのプランニングに興味が集まるにつれて、定数時間の探索結果をもとに判断を下し、行動しながら探索を続ける実時間探索が

研究されるようになった。

オフライン探索では、計画が完全に求まるまで問題空間の展開を続ける。問題空間は実世界の完全なモデルであるという仮定をおくため、長時間を探索に費やしても、得られた計画は有効である。これに対して実時間探索では、定数時間の探索を行い、その結果得られた判断を、物理的世界にコミット(すなわち実行)する。この枠組みは、以下の新たな応用の可能性を開くものである。

- 自律移動ロボットのように、移動によってセンシング領域が広がる場合にも、探索アルゴリズムを適用することが可能となる。すなわち、アルゴリズム開始時には問題空間の一部しか観測できないが、行動とともにその領域が広がるような状況を対象とできる。また、移動ロボットを追跡するように、目標が時間とともに刻々変化するような場合にも適用可能である。
- 人間は、例えば15パズルを解くときに、オフライン探索を行い、完全に手を読み切ることはいらない。解に至る所要時間を、プランニング時間をも含めて最小化すると、先読みはたかだか2手程度がよいことが知られている。実時間探索は、計算時間や記憶容量に制約のある実世界での問題解決に適しており、オフライン探索に比べて人間に近い問題解決のモデルを与えるものである。

このように実時間探索は、実世界のモデル化が可能であるという古典的探索の枠組みのなかにとどまりながらも、未知あるいは刻々変化する実世界での問題解決に向けて、一步を踏み出したものといえる。

2.2 強化学習との関係

近年、強化学習(reinforcement learning)アルゴリズムの進捗が著しい。強化学習の特徴は、①明確な教師が存在しないため、試行錯誤的な探索を通じて、状況から動作への写影(方策)を学習する、②動作は、それにより直接得られる報酬に影響するだけではなく、次の状況に作用し、後続する動作の報酬に影響することである。これらが強調されるのは、誤差逆伝搬法などの教師つき学習アルゴリズムとの差異を主張したためである。しかし、プランナとしての強化学習の特徴は、むしろ実世界の正確なモデルが存在しない場合にも、動作系列の学習が行えることにある。例えばQ-Learning[Jaakkola 90, Watkins 89, Watkins 92]は、状態遷移確率が未知の場合に*²、状態遷移確率の推定を行わず、直接、動作系列を学習する。この性質はプランナとしては新鮮で、強化学習に興味が集まる理

*¹ 推定評価関数が適格とは、その値が実際のコストを上回らないことをいう[Pearl 84]。

*² 実時間探索は、状態遷移が決定的(deterministic)な場合を対象として研究されてきた。しかし、これはアルゴリズムに由来する制約ではなく、確率的な状態遷移を導入することは(それが既知であれば)困難ではない。

由はここにある。

LRTA* と Q-learning との関係は[Barto 93]に詳しい。両者はともに、問題解決器の移動を契機に状態の評価値を再計算し、学習する。ともに、動的計画法の計算過程を注意深く制御し、問題解決器の位置する状態での近傍計算を積み重ねて解を求める。両者は無限回の試行によって、各状態の評価値を最適経路上で正確な評価値に収束させる。古典的探索の流れをくむ実時間探索と、その対極ともいえる強化学習が、アルゴリズムのレベルで接点を持つことは興味深い。本論文は実時間探索の側から、これまで注目されてこなかった学習機能に焦点を絞り、その改善を意図したものである。

3. 実時間探索

3・1 LRTA*

最も基本的な実時間探索アルゴリズムである LRTA* (Learning Real-Time-A*) [Korf 90]の概略を述べる。LRTA* は定数時間内に次の動作を決定し、その動作をただちに実行する。各状態から目標状態への推定コストの初期値は、推定評価関数によって与えられる。LRTA* はこの推定コストを、目標状態までの正確なコストに近づけるよう繰り返し更新する。

LRTA* は目標状態に到達するまで、以下のステップを繰り返す。なお、以下では問題解決器の位置する状態を x とする。

1. 先読み: $f(x') = k(x, x') + h(x')$ を x に隣接するすべての状態 x' に対して計算する。ここで、 $h(x')$ は x' から目標状態に至る推定コストの下界値、 $k(x, x')$ は x から x' に至る実際のコストである。
2. 一貫性維持: 以下のように状態 x での下界値を更新する。

$$h(x) \leftarrow \min_{x'} f(x')$$
3. 動作選択: $f(x')$ の最小値を与える x' に移動する。もし最小値を与える状態が複数個であれば、そのなかでランダムに選択する(タイブ레이크 (tie break) と呼ばれる)。

LRTA* は完全である^{*3}。すなわち、有限問題空間で、動作コストが正、推定評価関数が適格、初期推定コストが有限、目標状態がすべての状態から到達可能であれば、LRTA* は最終的に目標状態に到達する。

さらに LRTA* は、繰り返し問題を解くと推定コストが正確な値に収束するという性質を有する。これは

* 3 完全性 (completeness) は解となる経路が存在すれば、必ず目標状態に到達することを意味する。

LRTA* の学習機能を示すものである。すなわち、有限問題空間で、動作コストが正、推定評価関数が適格、初期推定コストが有限、目標状態がすべての状態から到達可能であれば、LRTA* を繰り返し実行すると、最短経路上の各状態の推定コストは正確な値に収束する。

3・2 LRTA* の学習性能

LRTA* の学習性能を定量的に評価するために、実験を行った。問題空間は 100×100 (10 000 状態) の 2 次元格子とし、格子点上にランダムに障害物を配置する。図 1 に 35% の格子点を障害物に置き換えた迷路を示す。推定評価関数はマンハッタン距離 (Manhattan distance) を用いている。問題解決器の初期状態と目標状態は、問題空間上のマンハッタン距離で 100 ユニット離れた位置に設定されている。図では、初期状態を s で、目標状態を t で表している。なお、この実験での s から t までの最短経路長は 122 ユニットである。

この実験では迷路を用いるが、LRTA* は本来どのような問題空間にも適用可能なアルゴリズムである。例題に迷路を用いるのは、迷路が典型的な探索の問題であり、また問題空間の表示が容易なため直観的な理解が得やすいと考えたからである。

図 2 (a) に、図 1 の迷路を LRTA* で繰り返し解いた結果を示す。また図 2 (b) に、本論文で提案する ϵ -探索と δ -探索を組み合わせた $\epsilon\delta$ -探索 ($\epsilon=0.2$, $\delta=2$ の場合) を用いた結果を併せて示す。図の縦軸は解に到達するまでの移動コスト (格子状の迷路の場合には動作回数と一致する) を、横軸は問題解決の繰返し回数を表している。図 2 (a) から LRTA* の学習性能に関し

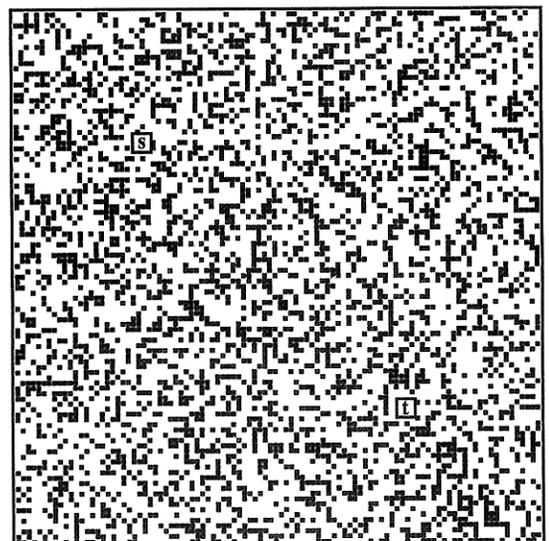


図 1 迷路の例 (障害物の割合が 35% の場合)

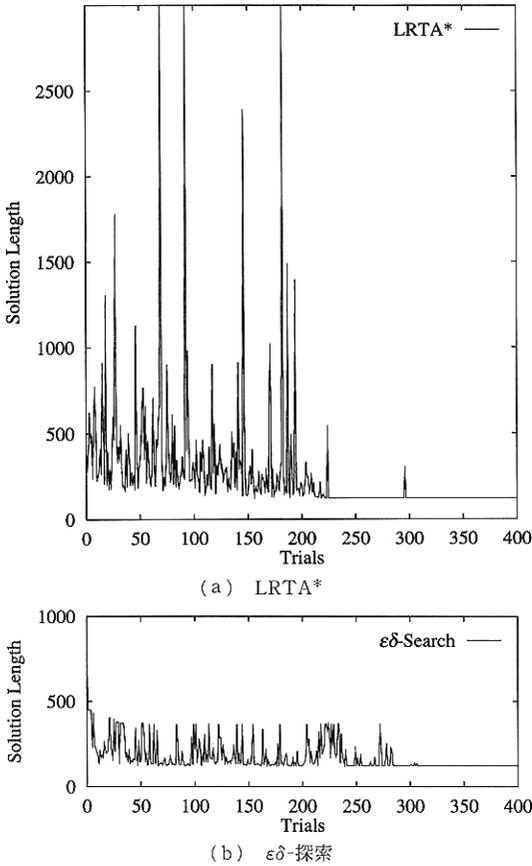


図2 LRTA* とεδ-探索の学習性能

て以下のことがわかる。

- 問題解決を繰り返すと、解の品質が悪くなることがある。図2(a)は問題解決に要する移動回数が毎回大きく変化することを示している。
- 準最適な解が得られても、別解を求めて探索が続けられる。図2(a)では、ほぼ最適な解が得られた後も探索が続けられ、解の品質が再び著しく劣化する現象が頻繁に観察される。

LRTA* と本論文で提案する εδ-探索との比較は、次章以降で述べる2種のアプローチがいかに有効であるかを示している。

4. ε-下界値と上界値の導入

以下では、本論文で用いる3種の推定コストとその

*4 推定コストが単調であるとは、あらゆる x に対して、 $h(x) \leq k(x, x') + h(x')$ が満足される場合をいう。初期値を与える推定評価関数が単調性を満たせば、式(2)は単調性を維持するので、問題解決過程で単調性が損なわれることはない。

*5 これは、 ϵ が大きい場合には $h_\epsilon(x, x')$ が無視でき、かつ、一般に $h_\epsilon(x) \leq h_\epsilon(x')$ が成立しないことから明らかである。

局所一貫性(既探索領域での推定コストの一貫性)を維持する手法を述べる。ただし、3種の推定コストがε-探索、δ-探索のすべてに必要なわけではない。これらは必要に応じて使用されるが、共通する事項について本章であらかじめ説明する。

まず、状態 x における推定コストの下界値を $h(x)$ 、正確なコストを $h^*(x)$ で表す。また、ε-探索で用いるε-下界値を $h_\epsilon(x)$ 、δ-探索で用いる上界値を $h_u(x)$ で表す。2章に示したように、LRTA* では下界値の初期値に、適格な推定評価関数(例えばマンハッタン距離)を用いている。ε-下界値の初期値としては、適格な推定評価関数の値を $(1 + \epsilon)$ 倍したものをを用いる。また、上界値の初期値としては無限大を用いる。すなわち、目標状態 t を除くすべての状態 x について $h_u(x) = \infty$ とし、また目標状態 t では $h_u(t) = 0$ とする。

任意の状態 x の正確なコスト $h^*(x)$ と、隣接する状態 x' を経由した場合の正確なコストとの間には以下の関係がある。

$$\begin{aligned} h^*(x) &= \min_{x'} f^*(x') \\ &= \min_{x'} \{k(x, x') + h^*(x')\} \end{aligned} \quad (1)$$

これより以下の漸化式を得る。

$$\begin{aligned} h(x) &\leftarrow \min_{x'} f(x') \\ &= \min_{x'} \{k(x, x') + h(x')\} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} h_\epsilon(x) &\leftarrow \max \left\{ \begin{array}{l} \min_{x'} f_\epsilon(x') \\ h_\epsilon(x) \end{array} \right\} \\ &= \max \left\{ \begin{array}{l} \min_{x'} \{k(x, x') + h_\epsilon(x')\} \\ h_\epsilon(x) \end{array} \right\} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} h_u(x) &\leftarrow \min \left\{ \begin{array}{l} \min_{x'} f_u(x') \\ h_u(x) \end{array} \right\} \\ &= \min \left\{ \begin{array}{l} \min_{x'} \{k(x, x') + h_u(x')\} \\ h_u(x) \end{array} \right\} \end{aligned} \quad (4)$$

推定コストの下界値に関しては、推定評価関数により与えられる初期推定コストの単調性(monotonicity)*4を仮定すると、式(2)の実行で $h(x)$ が減少することはないことがわかる。したがって、すべての隣接状態が生成されていれば、 $\min_{x'} f(x')$ の値を用いて更新してよい。

しかしε-下界値は、たとえ推定評価関数によって与えられる初期推定コストが単調性を満たしたとしても、問題解決過程で単調性を維持できない。すなわち、一般には $h_\epsilon(x) \leq k(x, x') + h_\epsilon(x')$ が保証されない*5。したがって、ε-下界値の単調増加を保証するためには、更新値とその時点のε-下界値を比較し、ε-下界値

が増加する場合にのみ更新を行う必要がある。

推定コストの上界値においては、明らかに単調性は成り立たない。上界値は無敵大から出発し、式(4)によって単調減少する。したがって、上界値の更新は、すべての隣接状態が生成されていなくても、その時点で生成されている隣接状態だけを対象に式(4)を計算して実行できる。

ϵ -下界値と上界値を導入すると、LRTA* アルゴリズムの先読みステップと一貫性維持ステップは以下のように修正される。

1. 先読み：すべての隣接状態 x' に対して、 $f(x') = k(x, x') + h(x')$ 、 $f_e(x') = k(x, x') + h_e(x')$ 、 $f_u(x') = k(x, x') + h_u(x')$ を計算する。ここで、 $h(x')$ 、 $h_e(x')$ 、 $h_u(x')$ は、その時点の推定コストの下界値、 ϵ -下界値、上界値である。また、 $k(x, x')$ は x から x' に至る実際のコストである。
2. 一貫性維持： $h_u(x)$ 、 $h(x)$ 、 $h_e(x)$ を式(2)~(4)を用いて更新する。

5. 重みづけ実時間探索 (ϵ -探索)：準最適解の許容

5.1 アルゴリズム

本論文で提案する ϵ -探索は、LRTA* の動作選択ステップを以下のように変更したものである。

3. 動作選択： $f_e(x')$ の最小値を与える x' に移動する。もし最小値を与える動作が複数個あれば、そのなかでランダムに選択する。

つまり、LRTA* が下界値を用いるのに対し、 ϵ -探索は ϵ -下界値を用いる。 $\epsilon=0$ の場合には ϵ -探索は LRTA* と一致する。オフライン探索では、準最適解を許容する探索として、重みづけオフライン探索^{*6} (weighted search) が知られている [Pohl 70]。本論文の ϵ -探索は、この実時間版である。ただし、 ϵ -探索で収束するまで問題を解いても、その探索範囲は重みづけオフライン探索と等しくならない。また、 ϵ -探索ではたとえ局所一貫性を満足させながら探索を進めても、無限空間での完全性は保証されない。したがって、重みづけオフライン探索と ϵ -探索は、準最適解を許容するという点では共通するが、その振舞いはまったく異なることに注意を要する。

以下では、 ϵ -探索を繰り返し実行することによ

6 重みづけオフライン探索では、推定評価関数として $f(x) = g(x) + w \cdot h(x)$ を用いる。この式で $w=(1+\epsilon)$ とすることによって、誤差 $\epsilon \cdot h^(s)$ で最適解が求められ、かつ展開状態数が削減されることが知られている。

て、初期節点から誤差 $\epsilon \cdot h^*(s)$ を許した準最適解が最終的に得られることを示す。まず、 ϵ -適格な状態と ϵ -正当な状態を定義する。

【定義1】 状態 x は以下の条件が満たされるとき、 ϵ -適格 (ϵ -admissible) であるという。

$$h_e(x) \leq (1+\epsilon)h^*(x) \quad (5)$$

【補題1】 状態 x が ϵ -適格であれば、式(3)の実行によっても ϵ -適格であり続ける。

《証明》 $h_e(x)$ の初期値は適格な推定評価関数値の $(1+\epsilon)$ 倍であるから、初期値において式(5)が満足されている。したがって、初期値において $h_e(x)$ は ϵ -適格である。

式(3)によって $h_e(x)$ の値が更新されたとする。隣接状態が式(5)を満足していれば、つまり $h_e(x') \leq (1+\epsilon)h^*(x')$ であれば、更新後の値は、 $h_e(x) = \min_{x'} \{k(x, x') + h_e(x')\} \leq \min_{x'} \{k(x, x') + (1+\epsilon)h^*(x')\} \leq (1+\epsilon) \min_{x'} \{k(x, x') + h^*(x')\}$ 。この結果と式(1)から、 $h_e(x) \leq (1+\epsilon)h^*(x)$ 。このことから、式(3)により更新が行われても $h_e(x)$ は ϵ -適格であり続けることがわかる。□

【定義2】 状態 x が ϵ -正当 (ϵ -correct) であるとは、以下の式が満たされることである。

$$h'(x) \leq h_e(x) \leq (1+\epsilon)h^*(x)$$

【補題2】 問題解決器が状態 x から ϵ -正当な状態 x' に移動したとする。この移動に伴って行われる式(3)の計算により、状態 x も ϵ -正当となる。

《証明》 状態 x' が ϵ -正当であるので、 $h_e(x') \geq h^*(x')$ 。したがって、 $k(x, x') + h_e(x') \geq k(x, x') + h^*(x')$ 。ところで、式(1)より、 $k(x, x') + h^*(x') \geq h^*(x)$ 。また、状態 x から x' への移動により式(3)が計算されるので、 $h_e(x) \geq k(x, x') + h_e(x')$ 。これらの結果から $h_e(x) \geq h^*(x)$ 。この結果と補題1より、 $h^*(x) \leq h_e(x) \leq (1+\epsilon)h^*(x)$ 。したがって、状態 x は ϵ -正当となる。□

次に、 ϵ -最適経路を定義し、 ϵ -探索が最終的に ϵ -最適解に収束することを示す。

【定義3】 状態 x から目標状態 t までの経路 $P(x = x_0, x_1, \dots, x_{n-1}, x_n = t)$ が ϵ -最適 (ϵ -optimal) であるとは、以下の式が満たされることである。

$$\sum_{i=0}^{n-1} k(x_i, x_{i+1}) \leq (1+\epsilon)h^*(x)$$

【定理1】 有限の状態空間で、適格な推定評価関数を用いて初期推定コストを計算し、 ϵ -探索を無限回繰り返し実行すると、初期状態から目標状態に向けて ϵ -下界値の最小値を辿る経路は ϵ -最適となる。

《証明》 4章で述べたように、 x の ϵ -下界値は単調に増加する。また、補題1より x の ϵ -下界値は(1

$(1+\epsilon)h^*(x)$ を超えない。したがって、いったん ϵ -正当となった状態は ϵ -正当であり続ける。

有限の状態空間で無限回の問題解決を行うと、 ϵ -正当の状態は単調に増加し、その数はやがて収束する。また、補題 2 より、無限回訪問された経路上の状態は ϵ -正当になる。したがって、無限回の問題解決によって、初期状態から ϵ -下界値の最小値を辿る経路上の状態はすべて ϵ -正当となる。この経路が ϵ -最適であることを帰納法を用いて示す。

初期状態 s から目標状態 t に向けて ϵ -下界値の最小値を辿る経路を $P(s=x_0, x_1, \dots, x_j, x_{j+1}, \dots, x_{n-1}, x_n=t)$ とする。まず、 x_n から x_n への経路が ϵ -最適であることは明らかである。次に、 x_{j+1} 以降の経路が ϵ -最適であることを、すなわち以下の式が成立することを仮定する。

$$\sum_{i=j+1}^{n-1} k(x_i, x_{i+1}) \leq h_\epsilon(x_{j+1}) \leq (1+\epsilon)h^*(x_{j+1})$$

ここで、 x_j の隣接状態を x'_j で表す。 x_j から x_{j+1} へ移動の事実から、 $k(x_j, x_{j+1}) + h_\epsilon(x_{j+1}) = \min_{x'_j} \{k(x_j, x'_j) + h_\epsilon(x'_j)\}$ 。式(3)が計算されることにより、 $\min_{x'_j} \{k(x_j, x'_j) + h_\epsilon(x'_j)\} \leq h_\epsilon(x_j)$ 。 x_j は ϵ -正当であるから、 $h_\epsilon(x_j) \leq (1+\epsilon)h^*(x_j)$ 。以上を総合すると、

$$\sum_{i=j}^{n-1} k(x_i, x_{i+1}) \leq h_\epsilon(x_j) \leq (1+\epsilon)h^*(x_j)$$

上記を繰り返し適用することにより、初期状態から ϵ -下界値の最小値を辿る経路 P は ϵ -最適となることがわかる。□

5・2 評価

図 1 に示した迷路に対して、 ϵ -探索を繰り返し実行した場合の性能測定結果を図 3～図 5 に示す。図 3 は目標状態に至るまでの移動コスト(すなわち実行効率)を、図 4 は展開状態数(すなわちメモリ効率)を、図 5 は学習量(すなわち推定コストの総更新量)を表している。

実時間探索では動作選択に乱数が用いられるため、その振舞いは非決定的となる。そこで図 3～図 5 では、収束に至る過程を 50 回記録し、そのグラフを重ね合わせて平均をとった。50 回の平均をとったのは、グラフを滑らかにし、全体的な傾向を把握しやすくするためである。その結果、図 2 に比べて各回の問題解決に要するコストは平準化されている。本章以降のグラフはすべてこの手法により作成している。

いずれの図も、 $\epsilon=0, 0.2, 0.5$ の場合の結果を示している。前述のとおり、 $\epsilon=0$ の場合は従来の LRTA* と一致する。これらの図から以下の点を読み取れる。

- ・図 4 から ϵ が増大するにつれて展開状態数が減

少することがわかる。また、図 5 から収束に至る過程での学習量が減少することがわかる。すなわち、 ϵ -下界値の導入によって収束に至るまでの計算量は大幅に軽減される。

- ・一方、 ϵ の増大に伴って、最適解を得ることができなくなる。収束した時点での解のコストは最適解の $(1+\epsilon)$ 倍に劣化し得る。図 3 で、例えば $\epsilon=0.5$ の場合には、明らかに最適解に収束していない。
- ・図 3 から、 ϵ が増大すると、解に至る動作回数が著しく減少することがわかる。しかし、例えば $\epsilon=$

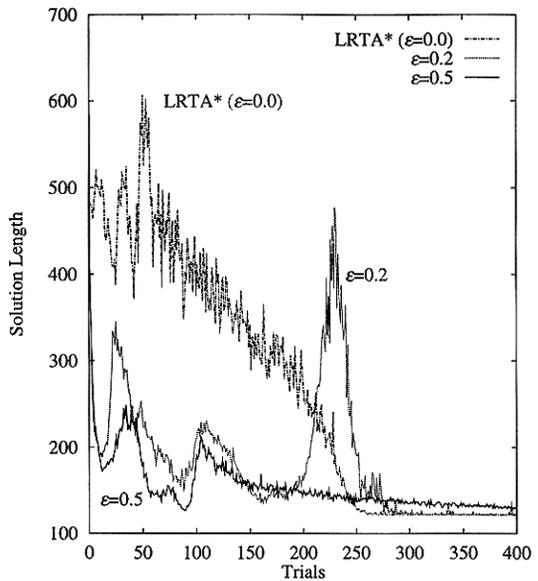


図 3 ϵ -探索の移動コスト

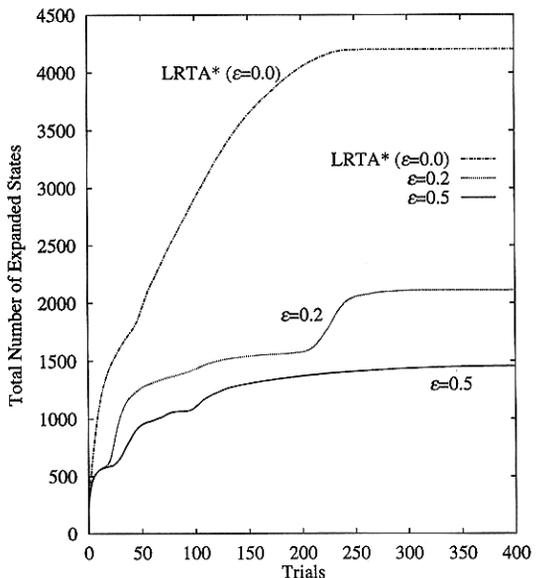


図 4 ϵ -探索の展開状態数

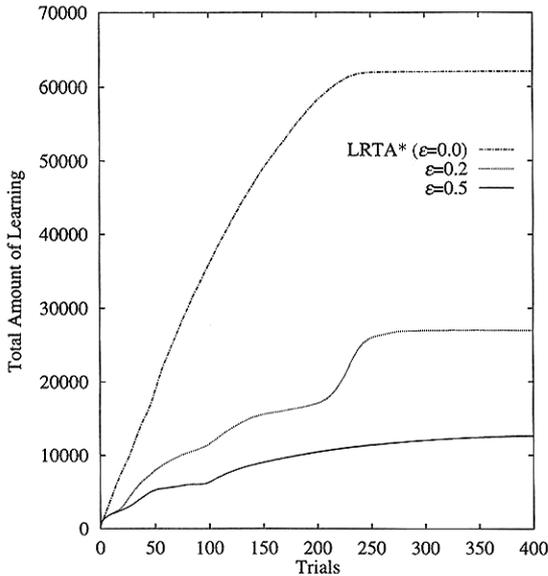


図5 ϵ -探索の学習量

0.2の場合には、収束の過程で動作回数が急激に増加する事態が観察される。これは、この時点で別解の探索に向かったことを表している。

上記の結果から、迷路の例題において、準最適解の許容が性能の向上に寄与することがわかる。しかし、 ϵ -探索においても、収束過程での解の安定性は保証されない。

6. 上界値を用いた実時間探索(δ -探索) : 解品質の保証

6.1 アルゴリズム

推定コストの上界値は、問題解決器が行う探検(exploration)の度合いを調節するのに役立つ。上界値を利用して、最悪の場合の到達コストを保証できるからである。 δ -探索は、初期状態 s から目標状態 t に到達するコストを、現時点で保証し得るコスト(すなわち、試行開始時点での初期状態の上界値)の $(1+\delta)$ 倍以下に抑えながら探索を行うアルゴリズムである。

δ -探索の動作選択ステップは以下のとおりである。なお以下では、今回の δ -探索の試行で、初期状態からこれまでに行った j 回の移動に要したコストを $c(j)$ で表す。すなわち、問題解決器が移動した経路を $(s=x_0, x_1, \dots, x_j=x)$ とすると、

*7 初回の試行では h_0 の値は無窮大であるのでこの式は意味を持たない。しかし、2回目以降では、後述するように上界値を目標状態から逆伝搬し、 h_0 を更新することによって、この式に意味を持たせることができる。

$$c(j) = \sum_{i=0}^{j-1} k(x_i, x_{i+1}).$$

また h_0 は、今回の試行の開始時点での初期状態 s の上界値を表すものとする。

3. 動作選択: すべての隣接状態 x' に対して以下の計算を実行する。

$$h_u(x') \leftarrow \min \left\{ \begin{array}{l} k(x', x) + h_u(x) \\ h_u(x') \end{array} \right\} \quad (6)$$

次に、以下の式*7を満足する隣接状態のなかから、 $f(x')$ の最小値を与える x' に移動する。

$$c(j) + f_u(x') \leq (1+\delta)h_0 \quad (7)$$

もし最小値を与える状態が複数個あれば、そのなかでランダムに選択する。

式(6)の実行は、隣接状態 x' に対して式(4)を部分的に実行するものである。これは、一貫性維持のステップだけでは、隣接状態との上界値の単調性が維持されないために必要となる処理である。式(6)の計算によって、上界値が十分更新されていない領域の探索が可能となる。

$\delta = \infty$ の場合には、式(7)が無条件に成り立つため、 δ -探索は LRTA* と一致する。 $\delta \neq \infty$ の場合には、 δ -探索は、初期状態の上界値の $(1+\delta)$ 倍以下のコストで、目標状態に到達することを保証する。このことは、以下の定理によって示すことができる。

[定理2] $\delta \geq 0$ として δ -探索を実行すると、 $(1+\delta)h_0$ 以下のコストで初期状態から目標状態に到達する。ここで、 h_0 は、今回の試行の開始時点での初期状態 s の上界値を表す。

《証明》 問題解決器の位置する状態を x 、これまで δ -探索により辿った経路を $(s=x_0, x_1, \dots, x_j=x)$ 、 x から δ -探索により目標状態に至る経路を $(x=x_j, x_{j+1}, \dots, x_{n-1}, x_n=t)$ とする。

状態 $x=x_j$ に移動した事実から、 $c(j) + h_u(x_j) \leq (1+\delta)h_0$ が成立している。すなわち、

$$\sum_{i=0}^{j-1} k(x_i, x_{i+1}) + h_u(x_j) \leq (1+\delta)h_0.$$

ところで、上界値は式(4)によってのみ更新されるので(式(6)は式(4)に包含される)、目標状態を除いて $h_u(x_j) \geq k(x_j, x_{j+1}) + h_u(x_{j+1})$ を満たす隣接状態 x_{j+1} が少なくとも1個は存在する。すなわち、問題解決器は

$$\sum_{i=0}^j k(x_i, x_{i+1}) + h_u(x_{j+1}) \leq (1+\delta)h_0$$

を満足する状態 x_{j+1} に移動できる。これは、つねに式(7)を満たす状態に移動できることを示している。

上記を繰り返すことにより、 $c(n) + h_u(x_n) \leq (1+\delta)h_0$ を満たす状態に到達する。ここで、 $h_u(x_n) = 0$ であるから、試行開始時点における初期状態 s の上界値 h_0 の $(1+\delta)$ 倍以下のコストで、目標状態に到達することがわかる。□

6・2 評価

δ -探索は、各回の問題解決に要するコストの上限の保証しようとするものである。しかし、このためには初期状態での上界値に前回の探索結果を反映させる必要がある。そこで以下の実験では、問題解決が終了するたびに、目標状態から初期状態まで得られた経路をさかのぼって、式(4)を計算し上界値を伝搬させた*8。

図1に示した迷路に対して、 δ -探索を繰り返し実行した場合の性能測定結果を図6～図8に示す。図6は目標状態に至るまでの移動コスト(すなわち実行効率)を、図7は展開状態数(すなわちメモリ効率)を、図8は学習量(すなわち推定コストの総更新量)を表している。いずれの図も、 $\delta=0, 1.0, 2.0, \infty$ の場合の結果を示している。 $\delta=\infty$ の場合の振舞いは、先述のとおりLRTA*と一致する。また、 $\delta \geq 2$ の場合には、最適解へ収束する。これらの図から以下のことがわかる。

- 図7から δ が減少するにつれて展開状態数が減少することがわかる。また、図8から収束に至る過程での学習量が減少していることがわかる。これらは、 δ の減少によって探索範囲が制限されたために生じた現象である。しかし、展開状態数の減少は必ずしも収束を速めることを意味しない。例えば、図6の $\delta=2$ と $\delta=\infty$ を比較すると、 $\delta=2$ のほうが収束が遅れている。これも、各回の探索

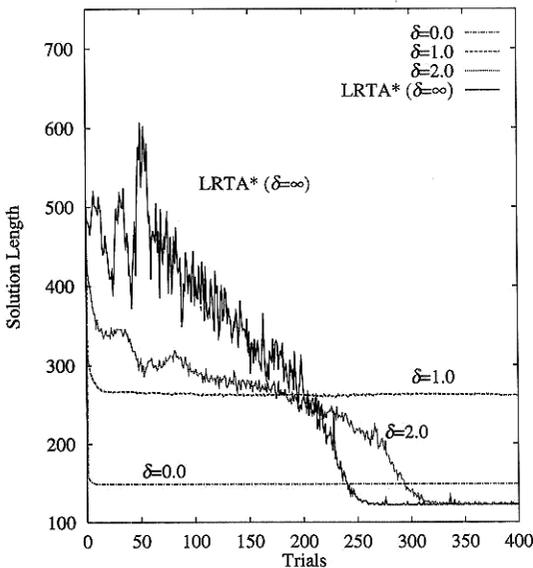


図6 δ -探索の移動コスト

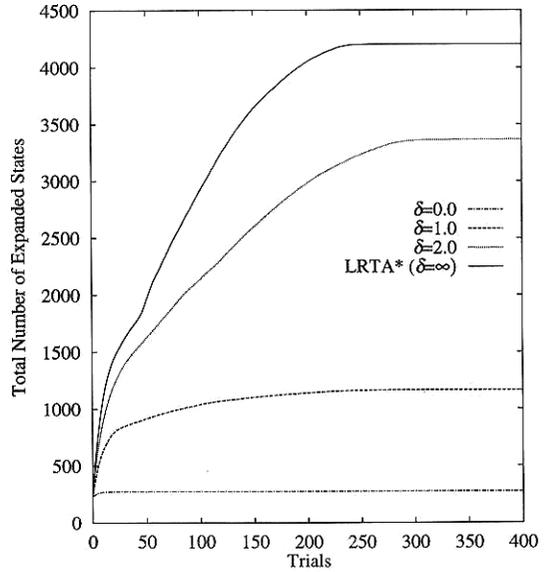


図7 δ -探索の展開状態数

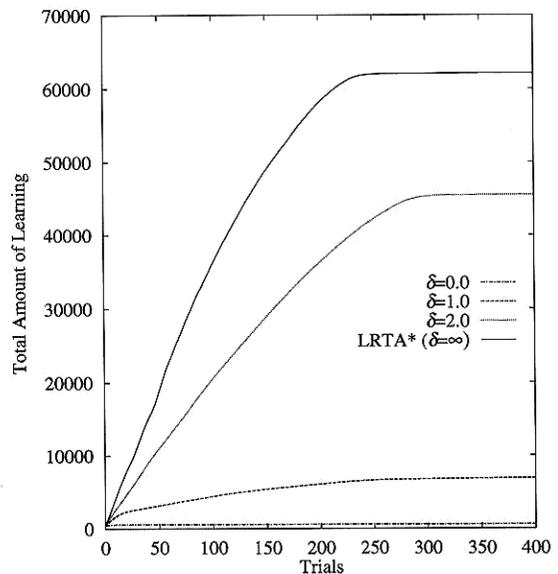


図8 δ -探索の学習量

範囲を制限したことによる影響である。

- 図6から、 δ の減少により、解に至る移動コストが著しく安定することがわかる。一方、 δ の減少に伴って、最適解を得ることはできなくなる。例えば、 $\delta=1.0$ の場合には、明らかに最適解に収束していない。
- 図6から、 $\delta < 2$ の場合には、 δ を増大させても良い解へ収束するとは限らないことがわかる。例えば、 $\delta=1.0$ の場合には、 $\delta=0$ の場合より解の品質が悪い。これは、 δ が増大することにより探索範囲

*8 4章で述べた上界値の局所一貫性維持方式を用いるだけでは、上界値が目標状態 t から初期状態 s に伝搬するまでに、何度も問題解決を繰り返す必要がある。

が広がるものの、 δ が十分大きくないため、良い解を発見するには至らないからである。すでに得られた経路をしのぐ経路を得るためには、新たに得ようとする経路を往復するコストを覚悟する必要がある。

なお、 δ -探索で、下界値の最小値を辿るのではなく、 ϵ -下界値の最小値を辿る探索を $\epsilon\delta$ -探索と呼ぶ。 $\epsilon\delta$ -探索は、 ϵ -探索により展開状態数を抑制し、 δ -探索により解の安定化を図るものである。その効果は図 2 (b) ($\epsilon=0.2$, $\delta=2$ の場合) に示したとおりである。

7. む す び

本論文では ϵ -下界値と上界値を用いることにより、実時間探索の 2 回目以降の問題解決で、効率の良い安定した性能が保証できることを示した。 ϵ -探索は、わ

ずかな性能の改善のために多くの投資をすることを避ける働きをする。 δ -探索は、将来への投資と現在の問題解決の効率とのバランスを調整する働きをする。また、 ϵ -探索と δ -探索は容易に組み合わせることができる。

実時間探索は、これまで初回の問題解決が注目される反面、その学習機能に注意が払われてこなかった。わずかに、学習機能の計測結果が報告されているにすぎない[水野 95]。本論文は、初めて実時間探索の学習性能の問題点を明らかにし改善策を示したものである。今後の課題として、実時間探索の学習機能と強化学習との関連を明らかにし、両分野で提案された技術の融合を図ることがあげられる。最後に、有益な助言をいただいた東京大学石塚 満氏、討論いただいた方々に感謝する。

◇ 参 考 文 献 ◇

- [Barto 93] Barto, A. G., Bradtke, S. J. and Singh, S. P.: Learning to Act: Using Real-Time Dynamic Programming, University of Massachusetts (1993).
- [Chimura 94] Chimura, F. and Tokoro, M.: The Trailblazer Search: A New Method for Searching and Capturing Moving Targets, *AAAI-94*, pp. 1347-1352 (1994).
- [Hamidzadeh 95] Hamidzadeh B. and Shekhar, S.: Deadline Compliance, Predictability, and Online Optimization in Real-Time Problem Solving, *IJCAI-95*, pp. 220-226 (1995).
- [Hart 68] Hart, P. E. Nilsson N. J. and Raphael, B.: A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths, *IEEE Trans. on Systems Science and Cybernetics*, Vol. SSC-4, No. 2, pp. 100-107 (1968).
- [Ishida 95] Ishida, T. and Korf, R. E.: A Moving Target Search: A Real-Time Search for Changing Goals, *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 17, No. 6, pp. 609-619 (1995).
- [Ishida 96] Ishida, T.: Real-Time Bidirectional Search: Coordinated Problem Solving in Uncertain Situations, *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence* (1996) (to appear).
- [Jaakkola 90] Jaakkola, T., Jordan, M. I. and Singh, S. P.: On the Convergence of Stochastic Iterative Dynamic Programming Algorithms, MIT Computational Cognitive Science TR 9307, Submitted to Neural Computation.
- [Knight 93] Knight, K.: Are Many Reactive Agents Better Than a Few Deliberative Ones?, *IJCAI-93*, pp. 432-437 (1993).
- [Korf 90] Korf, R. E.: Real-Time Heuristic Search, *Artif. Intell.*, Vol. 42, Nos. 2-3, pp. 189-211 (1990).
- [水野 95] 水野智文, 石田 亨: 実時間探索の学習特性の評価, 人工知能学会誌, Vol. 10, No. 2, pp. 306-313 (1995).
- [Pearl 84] Pearl, J.: *Heuristics: Intelligent Search Strategies for Computer Problem Solving*, Addison-Wesley, Reading, Mass. (1984).
- [Pemberton 92] Pemberton, J. and Korf, R. E.: Making Locally Optimal Decisions on Graphs with Cycles, Technical Report, Computer Science Department, University of California at Los Angeles (1992).
- [Pohl 70] Pohl, I.: First Results on the Effect of Error in Heuristic Search, *Machine Intelligence*, Vol. 5, pp. 219-236, Edinburgh University Press (1970).
- [Russell 91] Russell, S. and Wefald, E.: *Do the Right Thing*, The MIT Press (1991).
- [Watkins 89] Watkins, C. J. C. H.: Learning from Delayed Rewards, PhD thesis, Cambridge University (1989).
- [Watkins 92] Watkins, C. J. C. H. and Dayan, P.: Technical Note: Q-Learning, *Machine Learning*, Vol. 8, pp. 279-292 (1992).

市場モデルによるアプリケーション QoS の制御

八槇 博史 †

Michael P. Wellman ††

石田 亨 †

yamaki@kuis.kyoto-u.ac.jp

wellman@umich.edu

ishida@kuis.kyoto-u.ac.jp

† 京都大学大学院工学研究科情報工学専攻

†† University of Michigan

アプリケーション QoS の割当てを動的な市場機構によって行う分散化アプローチについて論ずる。各エージェントは自己の局所知識および利益にもとづいて行動を決定し、各資源の価格および割当ては市場での需給の均衡点として動的に決定される。本研究では、実際のネットワーク会合システム FreeWalk について実験を行い、その結果動的な状況変化に対して、市場割当て機構が適切に動作することを示した。

1 はじめに

現在のマルチメディアアプリケーションでは、帯域幅をより多く割当てることによって、遅延、忠実度、解像度、信頼性その他の性能を高めることができる。ネットワーク資源を投入することによって、各アプリケーションにおいて利用者に対して提供されるサービス品質 (Quality of Service: QoS) をここではアプリケーション QoS と呼ぶ。分散環境におけるサービス品質の割当て問題はマルチメディアシステムおよびネットワークの最近の研究の中でも主要な領域となっている。

アプリケーション QoS は利用者が直接に享受するサービスの品質であるため、利用者ごととアプリケーションごとに異なる評価規準が存在する。したがって、単純にスループットや遅延など純技術的な要素のみにもとづく割当てではなく、利用者の選好を反映し、かつ一定の性能を保証できるものである必要がある。さらに関連情報 (ネットワーク負荷、アプリケーションの性質、利用者の好み、時間的な変化など) や計算機資源の分散、割当て決定の非集権化などが考慮されるのが望ましい。

この非集権化アプローチとして、市場機構を通じて資源割当てを行うものがある。そこでは、参加する意思決定主体あるいはエージェントが、市場価格

にもとづいて資源のやりとりをおこなう。さらにある一定の条件 (完全競争など) のもとで、市場価格はシステム全体での価値を反映し、エージェントはそれによって適切な量の資源を生産ないし消費することが知られている。

本研究では、市場指向プログラミング環境 WALRAS [5] による分散資源割当て機構を、ネットワークマルチメディア会合システムである FreeWalk [4] における帯域幅割当てについて適用し、シミュレーションおよび実装系による評価を行った。

2 市場モデル

我々の提案する適応的なサービス品質制御機構は、市場モデルにもとづくものである。このモデルでは、アプリケーションの各プロセスは市場システム内のエージェントであり、自らの要求および目的にもとづいてネットワーク資源に対する入札を行う。ここでの目的は、各利用者の選好を最も良く反映した形でネットワーク資源を割当てするための、利用環境の動的変化に対応した機構を提供することである。このモデルは計算機上で経済モデルを構築し実行するための市場指向プログラミング環境 WALRAS [5] の上で実装された。

2.1 基本的な考え方

市場モデルを構築するための二つの基本的な考え方を以下に述べる。

Market-Based Control of Application QoS, Hirofumi YAMAKI, Michael P. WELLMAN, Toru ISHIDA, Dept. of Information Science, Kyoto University, University of Michigan.

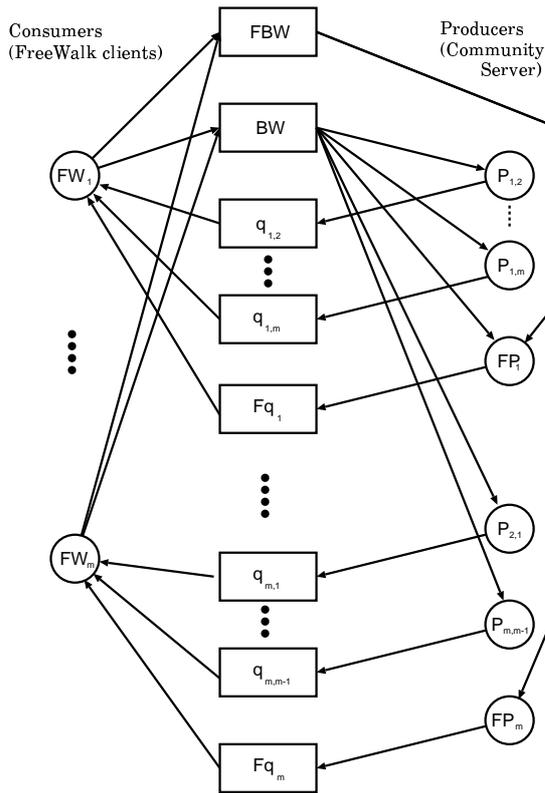


図 1: 市場モデル

1. 利用者はネットワーク資源の生の性能 (帯域幅など) ではなく、サービス品質の方をより評価する。

アプリケーション QoS は用いた資源の量によってある程度知ることができるが、ここでは QoS を独立なパラメータとして設定する。帯域幅などはあくまでも生のネットワーク資源を測るためのものであり、利用者にとって真に重要なのは、これを用いて実現されたサービスがどれだけ目的とするタスクにとって良いものであるかである。

2. ネットワークに「現在」と「未来」との区別を設けることで、比較的活動的でない利用者が、ネットワーク資源を活動的な利用者群に対して譲渡する動機付けを行う。

各利用者が現在の状況のみを対象として行動決定を行った場合、単に割当てられる帯域幅をより大きくしようと、その結果ネットワーク資源のやりとりは行われず、単なる資源の取り合いとなってしまう。同一の価格システムの中で現在と未来について財を定義することによって、利用者が効率的に時間方向での財のやりと

りが行えるようにする。

図 1 にアプリケーション QoS 割当てのための市場モデルを示す。通信モデルとして、利用者どうしがマルチメディア情報を交換する、デスクトップ会合システムなどを想定している。中央の四角形は市場中でやりとりされる財 (good) を表す。財には帯域幅 (bandwidth) とサービス品質 (QoS) とがあり、これらの財はさらに時間軸方向で現在 (current) と未来 (future) の二つに分けられる。図中の円はエージェントを表し、これには各アプリケーションにおける利用者の効用を代表する消費者エージェントと、使用するネットワーク資源からアプリケーション QoS へのハードウェアおよびソフトウェアによる変換操作を代表する生産者エージェントとがある。矢印はモデル中での財の流れを表している。図 1 において、 BW と FBW はそれぞれ現在および未来の帯域幅である。利用者 i から利用者 j へ向かう通信の、現在のサービス品質は q_{ij} で表わされる。 Fq_i はクライアント i の利用者が受ける未来のサービス品質である。

2.2 消費者 - 生産者モデル

本市場モデルにおける消費者エージェントはアプリケーションの利用者と一対一に対応する。利用者 i の帯域幅およびサービス品質に対する選好は効用関数として表現される。ここでは仮に CES (constant elasticity of substitution) 関数を効用関数として採用する。利用者 j から利用者 i への通信のサービス品質を q_{ij} 、利用者 i にわりあてられる未来の帯域幅、未来のサービス品質、および現在の帯域幅をそれぞれ x_i^{fbw} 、 x_i^{fqos} 、および x_i^{cbw} とすると、利用者 i の CES 効用関数は次式で与えられる。

$$\begin{aligned}
 u_i(x_i^{fbw}, x_i^{fqos}, x_i^{cbw}, q_{i1}, \dots, q_{im}) \\
 = & \left(\alpha_i^{fbw} x_i^{fbw \frac{\sigma-1}{\sigma}} \alpha_i^{fqos} x_i^{fqos \frac{\sigma-1}{\sigma}} \right. \\
 & \left. + \alpha_i^{cbw} x_i^{cbw \frac{\sigma-1}{\sigma}} + \sum_{j=1}^m \alpha_{ij} q_{ij} \frac{\sigma-1}{\sigma} \right)^{\frac{\sigma}{\sigma-1}} \quad (1)
 \end{aligned}$$

係数 α は、対応する財が消費者にとって他の財との比較においてどの程度の価値があるかを示す。また、大域的代替パラメータ σ は、ある一つの財の消費が α によって示された比率において他の財の消費をどの程度代替するかを示すものである。

消費者が自分の効用関数をどの程度まで高めることができるかは、そのエージェントが持つ各財の初期保有量 (endowment) に依存する。一般的に、

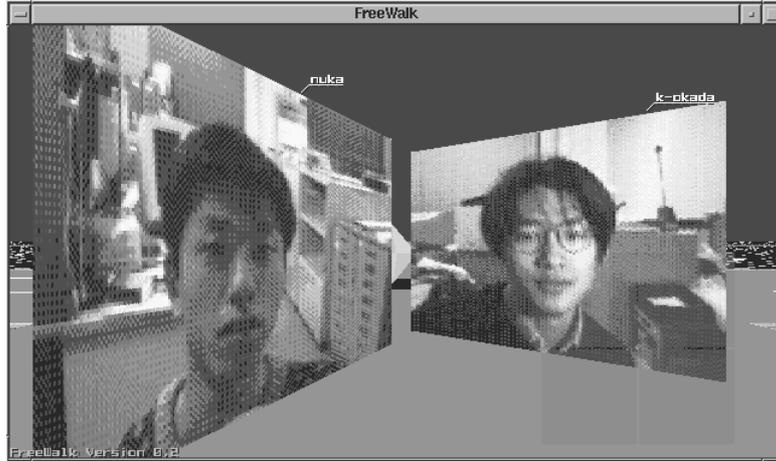


図 2: マルチメディア会合システム FreeWalk

K 種の財に対して消費者の初期保有量がベクトル $\mathbf{e} = (e_1, \dots, e_K)$, 各財の価格がベクトル $\mathbf{p} = (p_1, \dots, p_K)$ でそれぞれ表わされる場合, 消費者の選ぶ消費レベル $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_K)$ は次の最適化問題の解として求めることができる.

$$\max_{\mathbf{x}} u(\mathbf{x}) \quad \text{subject to} \quad \mathbf{p} \cdot \mathbf{x} \leq \mathbf{p} \cdot \mathbf{e}.$$

このモデルにおいては, 消費者の初期保有にはサービス品質は含まれず, すべてのサービス品質は, 図 1 の右列に示されたサービス品質生産者によって生産されなければならない. 生産者は入力として帯域幅をとり, サービス品質を出力する. このサービス品質生産者の役割は, ネットワーク資源とそれを用いて得られるサービス品質との関係を表現することである.

帯域幅とサービス品質との関係には様々な定義のしかたがあるが, 今回採用したモデルでは, 現在のサービス品質 q_{ij} は次式に示す生産関数の出力として得られる.

$$f_{ij}(x) = Q_i - \frac{Q_i}{1 + \gamma_{ij}x}, \quad (2)$$

ここで, Q_i は利用者 i に対応するアプリケーションプロセスによって達成可能なサービス品質の最大値である. また, γ_{ij} は帯域の投入によってどの程度サービス品質が向上するかを決定するパラメータである. 未来のサービス品質の生産関数 f は式 (2) と同じ形で, パラメータ γ を 1 に固定したものと仮定する. この関数の形式自体は, 入力の単位増加に対する上昇分が入力レベルの向上とともに減少するという条件を満たすかぎり重要ではない.

生産者は次式で示されるように, 利潤の最大化をめざして生産レベルを選択する.

$$\max \mathbf{p} \cdot \mathbf{y} \quad \text{subject to} \quad \mathbf{y} \in Y,$$

ここで, Y は生産者のテクノロジーないし実行可能は生産計画の集合を表す. 現在のサービス品質の生産者については Y はサービス品質 q_{ij} とそれを生産するのに必要な帯域幅 x_i^{cbw} との組 $(-x_i^{cbw}, q_{ij})$ の集合として表される.

2.3 現在 - 未来モデル

現在と未来という二つの時間の間の関係を定義するためには, 時間の経過とともに未来の資源をどのように現在の資源へと変換するかを指定する必要がある.

このモデルでは, 時間を一定間隔に分割し, 現時点からの 1 単位時間を現在, それ以降一定の時間 ($T-1$ 単位時間とする) を未来と定義する. ネットワーク全体での帯域幅を β とすると, 現在の帯域幅の初期保有量の総計は β , 未来の帯域幅については $(T-1)\beta$ となる. これに対して, 効用関数および生産関数の各係数を与える.

これらの値を与えた後, WALRAS による割当てプロセスを一度実行し, 得られた現在の帯域およびサービス品質をネットワーク資源の割当て分として使用する. 次に時刻を一単位時間進めて同じプロセスを繰り返す. この時, 消費者 i の初期保有以下のように決定する. まず, 未来の帯域幅の割当て x_i^{fbw} と, 未来のサービス品質の割当て量をそれを生産するの

にかかる帯域幅に変換したものとを合計し、 r_i とする。割りあて r_i は次式で与えられる。

$$r_i = x_i^{fbw} + f^{-1}(x_i^{fos}).$$

このままでは、全体 T 単位時間に対して $T - 1$ 単位時間分の初期保有しか与えられないので、 m 個の消費者エージェント各々に対して均等に β/m の帯域幅を与え、消費者 i に対する割当ては $r_i + \beta/m$ となる。各消費者についてこれを $1 : (T - 1)$ に分けて、次の現在のおよび未来の帯域の初期保有量とする。

$$e_i^{cbw} = \frac{1}{T} \left(r_i + \frac{\beta}{m} \right),$$

$$e_i^{fbw} = \frac{T-1}{T} \left(r_i + \frac{\beta}{m} \right).$$

エージェントの選好が対称でかつ時間経過に対して変化がないのであれば、この動的モデルは割当てが1回だけ行われるようなモデルと同じ結果を導く。

3 アプリケーション QoS 制御への適用

3.1 会合システム FreeWalk

本研究では上記の QoS 市場モデルの適用対象として、仮想 3 次元共有空間を用いたマルチメディア会合システムである FreeWalk [4] を用いる (図 2)。FreeWalk では、利用者はクライアントを用いてサーバに接続することにより、仮想共有空間に入る。その中では、各参加者は 3 次元ポリゴンによって構成された四角錐で表現され、その四角形の面に動画像がマップされる。それぞれの視点はこの面の中心に置かれ、そこから見た共有空間の様子が画面上に表示される。したがって、速くの参加者は小さく、近くの参加者は大きく表示され、また一定以上離れた場合には通信や表示は行われない。同様に、音声の大きさも送信側と受信側との距離に比例して変化する。参加者は空間内の平面上を、マウスを操作して動きまわることができる。

FreeWalk においてはクライアント間の相対的位置関係が変化しつづけるため、同じ画像や音声を他のクライアント全部に対して送信するのは効率的でない。そこで、各 FreeWalk クライアントはマップ情報から自分を見ることのできる他のクライアントを特定し、それらに対してのみ画像の送信を行い、さらに、受信側で表示される形に合わせて各画像の大きさを調整し、データを送っている。また、データの送信は受信側の描画速度に合わせて行われる。

FreeWalk では各利用者にとっての他の利用者の動画像の価値が、空間内での位置関係によって動的に変化する。たとえば、互いに近くにいるクライアント間の通信により多くの帯域を与え、他のいずれとも遠くにいて通信要求の少ないクライアントの割当てを抑制する、あるいは利用者が重要と思う通信に帯域をわりあてるなどにより、限られた帯域の中で有効に通信ができるようになると考えられる。本研究では、FreeWalk クライアント間での動画像通信に対して QoS 市場モデルを適用し、位置関係とそれに対応する利用者の選好に応じた割当てを行う。

3.2 シミュレーション評価

WALRAS 上にシミュレータを構築し、割当て機構の挙動をみた。実験に用いたシナリオを図 3 に示す。2 つの FreeWalk クライアントが空間内に固定され、遠方から移動クライアントが接近してくることを想定する。

このシナリオにもとづくシミュレーションのため、これを含む FreeWalk 上での様々な状況を扱うことのできるシミュレータを実装した。シミュレータでは、FreeWalk クライアントの空間内での位置と向きを時刻 t の関数として与える。シミュレータはこれを用いて期間毎の各クライアントの位置を計算し、効用関数および生産関数のパラメータを決定した後に、WALRAS 上の FreeWalk 市場モデルに対して計算を行うことで割当て量を決定する。

各クライアントにおける現在のサービス品質の最大値 Q_i は簡単のためにすべて 1 とし、計算対象となる時間の幅 T は 10、ネットワーク内の帯域幅の総量 β は 30 単位帯域幅とした。CES 効用関数の各係数はそれぞれ以下のように設定された。

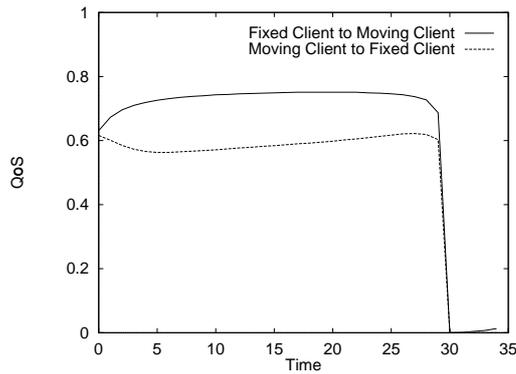
$$\alpha_i^{cbw} = \frac{1}{10},$$

$$\alpha_i^{fbw} = \alpha_i^{fos} = \frac{\alpha_i^{cbw}}{T},$$

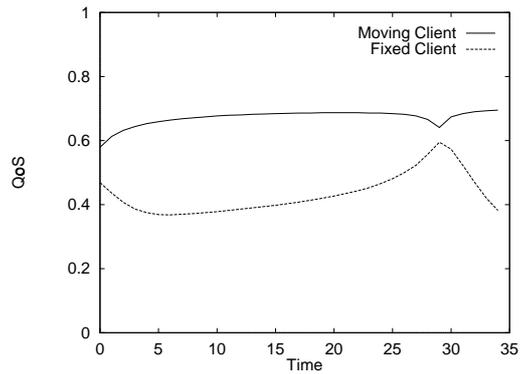
$$\alpha_{ij} = \begin{cases} (s_{ij}s_{i0}) \times 100 & j \text{ が } i \text{ の視界に入っている場合,} \\ 0 & \text{それ以外のとき.} \end{cases}$$

ここで、 s_{ij} はクライアント j の動画像面の、クライアント i のウィンドウ上における大きさ、 s_{i0} はクライアント i のウィンドウ自体の大きさである。

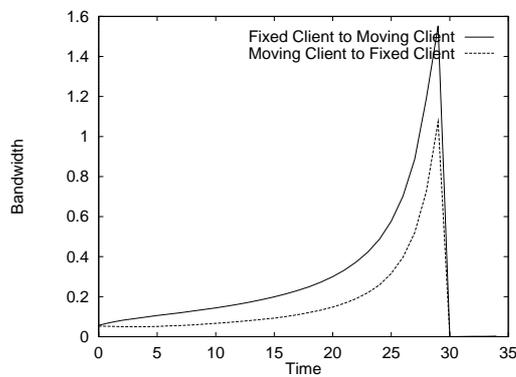
各サービス品質生産者は現在ないし未来のサービス品質を、式 (2) で定義されるテクノロジーを用いて



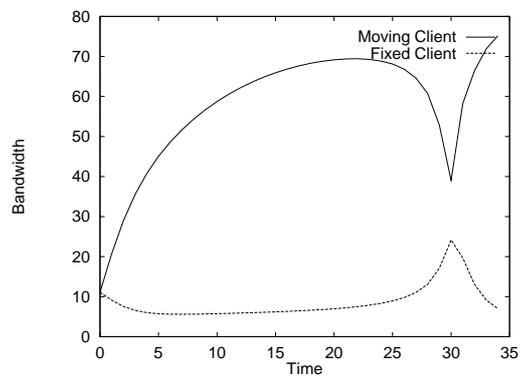
(a) 現在のサービス品質



(b) 未来のサービス品質



(c) 消費された帯域幅



(d) 未来の帯域幅の初期保有量

図 3: シミュレーションの結果

表 1: シミュレータ内でのクライアントの位置

	初期位置	移動速度	方向
固定クライアント 1	$(-1, 0)$	$(0, 0)$	$\pi/4$
固定クライアント 2	$(1, 0)$	$(0, 0)$	$3\pi/4$
移動クライアント	$(0, 30)$	$(0, -1)$	$-\pi/2$

生産する。ここで γ_{ij} はクライアント ij 間の距離とした。シミュレータ内での各クライアントの位置指定を表 1 に示す。

図 3 にシミュレーションの結果を示す。各グラフの横軸はシミュレータ内での経過時間である。図 3(a) および 3(b) はそれぞれ各時間における現在および未来のサービス品質の割当て量、図 3(c) は現在のサービス品質を生産するのに使用された帯域幅、図 3(d) は各期における未来の帯域幅の初期保有量の変化をそれぞれ示している。

これらの図において、実線と点線はそれぞれ移動

距離の単位は動画像面の共有空間内での横幅の半分とした。

クライアントと固定クライアントをあらわす。固定クライアントの位置は対称であり、したがって挙動は全く同じとなるため、一つの線で表されている。

これらの結果は以下のように予測とほぼ一致している。

- 市場における割当はネットワークの負荷およびクライアントの位置の動的変化に正しく反応している。

シミュレーションの結果から、移動クライアントが固定クライアントに接近しながら未来の帯域幅を売って現在の帯域幅を買っているのがわかる。(図 3(a) および 3(c))。効用関数における係数 α_{ij} が表示される大きさに比例しているため、クライアントの接近にともなって現在のサービス品質に対する選好が大きくなる。結果として帯域幅を売ってサービス品質を買い、未来を売って現在を買うという傾向が高まるが、これは FreeWalk の文脈に照らして適切なものであると考えられる。

- 現在と未来を分けたことにより、時間方向での資源のやりとりが可能となっている。

移動クライアントが他のクライアントに接近する際、未来の帯域幅の初期保有量が移動クライアントから固定クライアントに移動している(図 3(b) および 3(d))。このような単なる 2 分割はかなり粗いものではあるが、それでも静的なモデルと比較して、全クライアントの効用を高めるようになっている。

なお、パラメータを変えて行った他の実験でも、質的に同様な結果が得られた。

3.3 実装評価

FreeWalk 本体に対して QoS 市場モデルにもとづく制御機構を実装し、上記と同様の実験を行った。この実装系はシミュレーションとの比較を行うための簡易版であり、効用は利用者からの入力とは関係なく FreeWalk クライアントの側で一意に計算するものとして実装した。この実験の結果を図 4 に示す。この結果から、以下に 2 つが見てとれる。

1. 割当ての傾向は図 3(a) と同様の挙動を示している。
 2. 一方で通信開始時点における挙動は大きく異なっている。
2. の原因は、実装系では空間内で遠距離にいた場合には通信を全く行わないのをシミュレーションで考慮していないためと考えられる。

さらにこの実装経験から、割当てに決定に要する時間がシステムの動作上無視できない程度に大きいことがわかった。これは割当てを全システムで毎回同期的に決定する方式に主な原因があり、部分的な解を動的に決定していくような、より柔軟な方式の必要性が考えられる。

4 おわりに

本稿ではネットワークを用いたマルチメディアアプリケーションにおいて、各利用者の選好を反映した上で無駄のない割当てを行うための市場モデルに基づく方式について述べ、さらに実際に会合システム FreeWalk に対してモデルを適用して、シミュレーションと簡単な実装系における実験とその結果について報告した。

ここで扱われているモデルは LAN 環境での会合システムにおける割当てを想定したものであった。今後は、

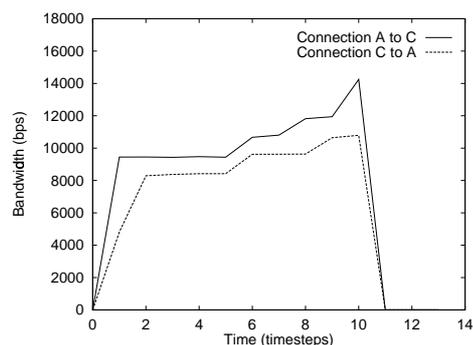


図 4: FreeWalk 実装系での帯域割当て量

- 利用者入力インタフェースの実装を含む本格的な実装による評価実験
- より広域のネットワークに適用した場合についての実験および考察

などを行っていく予定である。

参考文献

- [1] J. Q. Cheng and M. P. Wellman, "The WAL-RAS Algorithm: A Distributed Implementation of General Equilibrium Outcomes," Submitted for publication, 1996.
- [2] S. H. Clearwater (ed.), *Market-Based Control: A Paradigm for Distributed Resource Allocation*, World Scientific, 1996.
- [3] K. Nahrstedt and J. M. Smith, "The QoS Broker," *IEEE MultiMedia*, Vol. 2, No. 1, pp. 53-67, 1995.
- [4] H. Nakanishi, C. Yoshida, T. Nishimura, and T. Ishida, "FreeWalk: Supporting Casual Meeting in a Network," *Proc. of CSCW'96*, 1996.
- [5] M. P. Wellman, "A Market-Oriented Programming Environment and Its Application to Distributed Multicommodity Flow Problems," *Journal of Artificial Intelligence Research*, Vol. 1, pp. 1-22, 1993.
- [6] H. Yamaki, M. Kajihara, G. Tanaka, T. Nishimura, H. Ishiguro and T. Ishida, "Socia: Non-Committed Meeting Scheduling with Desktop Vision Agents," *International Conference on the Practical Application of Intelligent Agents and Multi-Agent Technology (PAAM-96)*, pp. 727-742, 1996.

分散視覚システムによる移動ロボットの誘導

十河 卓司* 木元 克美* 石黒 浩* 石田 亨*

Mobile Robot Navigation by a Distributed Vision System

Takushi Sogo*, Katsumi Kimoto*, Hiroshi Ishiguro* and Toru Ishida*

This paper proposes a general infrastructure for robot navigation in an outdoor environment. The infrastructure, called a *Distributed Vision System*, consists of vision agents connected with a computer network, monitors the environment, maintains the environment models, and provides various information for robots by organizing communication between the vision agents. As the first step of our research, we have developed a prototype of the distributed vision system for navigating mobile robots. The experimental results show that the system has an ability to navigate the robots in a complex environment.

Key Words: Distributed Vision System, Vision Agent, Mobile Robot Navigation

1. はじめに

これまで、視覚情報に基づいて実世界で自律的に移動するロボットに関して数多くの研究がなされており、研究室や工場など、屋内の限られた環境のもとで行動するロボットはいくつか開発されている。しかし、環境の変化が激しい屋外などで自律的に移動するロボットを実現するのは依然として困難である。

能動視覚の研究 [1] で議論されているように、視覚情報に基づいて行動するロボットの問題は注意制御にある。移動可能な領域や障害物の発見など、様々な視覚タスクを複雑な環境下で同時に遂行するために、ロボットは様々な事象に対して適切に注意を切り替え情報を収集する注意制御の機構を持たなければならない。単一の視覚しか持たない自律移動ロボットが複数の視覚タスクを並列に実行するには、実行するタスクを時間的に切り替える必要がある(時間的注意制御)。また、自律移動ロボットが実行する必要がある様々な視覚タスクを遂行するためには、視覚タスクに応じた情報を得るために最も適した視点を選択する必要がある(空間的注意制御)。

しかし、このような注意制御を実現するのは、現在のロボットでは困難である。その原因としては、次のものが挙げられる。

- 従来のロボットは視覚センサが台車に固定されており、適切な視点からの視覚情報を得るのが難しい。
- 単体のロボットでは、広範囲に渡る動的な環境の首尾一貫したモデルを維持するのが難しい。

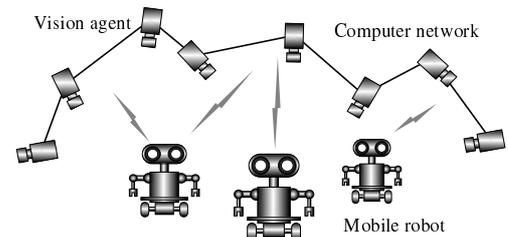


Fig. 1 Distributed Vision System

本論文では、これらの問題を解決し、屋外のように複雑で動的な実環境における移動ロボットの誘導を可能にする分散視覚システム(DVS: Distributed Vision System)を提案する。DVSは、ネットワークによって接続された、実環境に埋め込まれた多数の視覚エージェント(VA: Vision Agent)によって構成される(Fig.1)。各VAはその周囲の環境を観測し、ネットワークを通じて相互に情報を交換することで、ロボットが移動するのに必要な情報を提供する。

本論文で提案するDVSは、

- 注意制御の問題を多数のVAの選択という形で解決し、屋外などの複雑な環境下で視覚情報に基づいたロボットの誘導を可能にする
- 冗長な数の視覚エージェントによって構成される、ロバストかつ柔軟な分散システム
- 実世界で行動するロボットや人間を支援するための新しい情報基盤となる可能性を持つ

という特徴を持つ。DVSを開発する上では、

原稿受付 1998年X月XX日

*京都大学大学院情報学研究科社会情報学専攻

*Department of Social Informatics, Kyoto University

- (1) 各 VA によるロボットの誘導方法
- (2) VA 間のコミュニケーション
- (3) VA のネットワーク上での環境モデルの管理

等が重要となる点となるが、ここでは特に (1) を中心にシステムの試作について議論する。以下では、分散視覚の概念、試作した DVS のアーキテクチャ、ロボットの誘導手法、および屋内に構築した街のモデルを用いて行ったロボットの誘導実験について述べる。

2. 分散視覚システム

2.1 分散視覚の概念

視覚情報に基づいて移動するロボットは、前述のように移動可能な領域や障害物の発見など様々な視覚タスクを同時に遂行するために注意制御の機構を持たなければならないが、現在のロボットでこれを実現するのは困難である。

この問題を解決する一つの方法は、ネットワークで結ばれた多数の VA を環境の随所に配置し、それら多数の VA によって環境の様々な側面を同時に観測することである。各 VA はそれぞれが独立に周囲の環境を観測し、ネットワークを介して互いに通信し、ロボットに情報を提供する。例えば DVS がロボットをある目的地へ誘導する場合、VA はそれぞれの視点からロボットの周囲の環境（ロボット自身、道路や障害物など）を観測し、互いに通信を行うことによってロボットの誘導経路の計画などを行い、適切な情報が得られる VA を次々と切り替えながらロボットを誘導する。多数の人、車やロボットなどが行き交う交差点などではロボットを誘導するためには多くの視覚情報が必要となるが、必要な数の VA を必要な場所に設置することにより、ロボットはタスクを達成するのに十分な視覚情報を得ることができる。また、VA は環境に固定されているため、静止した視点から動的に変化する環境を安定に観測することができ、各 VA がその周囲の状況を観測することで、環境の首尾一貫したモデルを維持、管理することができる。このように、DVS は VA の選択という形で注意制御の問題を解決し、屋外などの複雑で動的な実環境における移動ロボットの誘導を可能にする。このような多数の視覚を用いた視覚システムを、分散視覚と呼ぶ。分散視覚に関しては [2] において詳細に議論されている。

2.2 関連研究

近年、ロボットの分野で多数のセンサを用いた研究が行われている。例えば、Robotic Room [3] は部屋にセンサやロボットを設置しておき、人間の活動を支援するものである。この研究では、決められたタスクを実行するための機構やセンサシステムを開発することを目的としている。一方、本研究では、様々なセンサを用い、人やロボットに情報を提供する情報基盤としての柔軟なセンサシステムを提案することである。

多数のカメラを用いた研究は、特にマルチメディアの分野でなされている。Immersive Video [4] は、正確な位置が計測された複数のカメラを用いて屋外環境における人などの正確な幾何モデルを復元するシステムである。また、TV 番組の放送において、スタジオに取りつけられた様々なカメラによって場面を認識し、適切な視点のカメラを選択して放送するシステムの研究 [5] もある。これらの研究の問題点は、正確な位置が計測されたカメラや

幾何的なモデルを用いているため、システムのロバスト性や柔軟性を欠くことである。この問題を解決するため、本研究では後述のように動的かつ局所的にカメラパラメータを推定し、ロボットのタスクを直接表現する手法をとる。

また、分散人工知能の分野では、複数のセンサを用いたシステムに関する基礎的な研究が行われている。Distributed Vehicle Monitoring Testbet (DVMT) [6] では、分散センサネットワークによる乗り物の監視システムが分散問題解決の例として扱われている。Partial Global Planning [7] では、複数のエージェントから得られる信号を大局的に分析するためのプランニング手法が提案されている。DVS はこのような分散センシングシステムの一つとみなすことができるが、これらのシステムがプランニングアルゴリズムの問題を扱っているのに対し、DVS ではノイズの多い視覚センサ情報をもとに、いかに VA が協調してロボットを誘導するかという、センサ利用の問題を扱っているところが異なる。

2.3 設計方針

DVS は、

ロボットのタスクは局所的な環境と密接に関わるという考え方に基づいて設計される。例えば、ロボットがある目標地点に近接するというタスクを実行する際、そのタスクは目標付近の局所的な環境に密接に関係している。DVS においては、複雑な環境内でロボットが行動するために必要な情報は環境に埋め込まれた VA が環境を観測することによって提供されるが、個々の VA は固定されているため、例えば複雑な背景からの物体の切り出しや、日照変化による物体の色の変化に対する処理など、その局所的な環境に特化した処理を行うことによって、観測対象を容易に、かつロバストに認識することができる。

Immersive Video [4] など複数のカメラを用いる研究のほとんどは、非常に正確に測定されたカメラの位置を基に情報処理を行っている。一方 DVS では、VA の正確な位置はあらかじめ計測せず、個々の VA が環境を繰り返し観測することによって、各 VA に局所的な座標系における位置を推定する。このように VA の正確な位置をあらかじめ計測しないのは、システムに柔軟性を持たせるためである。例えば、DVS では VA の配置は重要な問題の 1 つであるが、あらかじめ必要十分な配置を行うことは困難であり、必要に応じて VA を配置しなおすことのできる柔軟性が求められる。しかし、カメラの正確な位置が既知であるという前提を設けることは、DVS においてはシステムの柔軟性を大きく欠くことになる。従って、DVS では VA の位置はあらかじめ計測されていないという前提でシステムを設計する。

ロボットを誘導するためにシステムに地図を与えておくという手法は一般的である。しかし、このような幾何モデルに基づく手法は、一般に画像情報と結び付けることが難しく、例えば屋外環境のように複雑な環境では道路を認識することも難しい。そこで、DVS では地図を与えるのではなく、ロボットの行動をタスクとして直接教示し、それに基づいてロボットを誘導する。すなわち、DVS によるロボットの誘導はタスクの教示とロボットの誘導の 2 段階で行われる。タスクの教示においては、人間がロボットを動かして見せたり、システムが環境中を移動する物体を観測することにより、環境中の様々な場所に設置された VA はロ

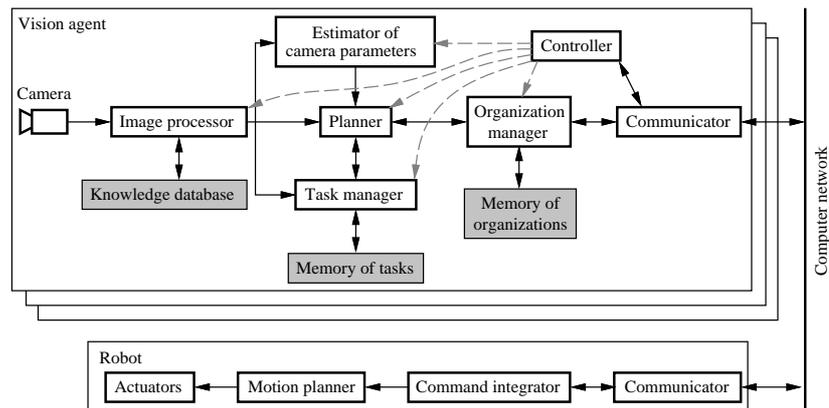


Fig. 2 The architecture of the DVS

ロボットを誘導するためのタスクとしてその運動を記憶する。このとき VA の正確な位置は計測されていないため、各 VA は画像上の移動軌跡を記憶する。ロボットの誘導の段階では、VA は画像上の軌跡として記憶されたタスクをもとに互いに通信することによってロボットの誘導計画を生成する。

DVSでは VA が環境を繰り返し観測することによってその位置を推定するが、視覚センサの観測誤差のために正確な位置を推定することは難しく、ロボットの誘導にも影響を与えかねない。この誤差の問題は、上記のような簡単なモデルをロボットの誘導に用い、多くの VA の中から適切な視点でロボットを観測している VA のみを（複数）選択して用いることで解決される。

また、多数の VA による観測や誘導を行う際には VA 間の同期をとる必要がある。このため、例えば各 VA が正確に同期した時計を持つと仮定することが考えられるが、これはシステムの柔軟性を損うことになる。DVSではこのような仮定をせず、VA 同士の、ネットワークを介したメッセージ交換によって同期をとるものとする。

2.4 アーキテクチャ

ロボットを誘導するための DVS 全体のアーキテクチャを Fig.2 に示す。システムは複数の VA (Vision agent) とロボット (Robot)、それらを接続するコンピュータネットワーク (Computer network) によって構成される。

Image processor はロボットやその他の物体を検出する。このとき、Knowledge database に記憶された背景画像、道路領域やロボットの色などの知識を用いると同時に、これらを適宜更新する。Estimator of camera parameters は、観測されるロボットの動きをもとにカメラパラメータを推定する。Task manager は、ロボットなどの移動軌跡を教示されたタスクとして Memory of tasks に記憶する。また、ロボットから提示されたタスクを達成するために、記憶されたタスクの中から適切なものを選択する。Planner は、記憶されたタスク、観測されたロボットの運動やカメラパラメータをもとに、ロボットが提示したタスクを達成するための誘導計画を生成する。Organization manager は他の VA と通信し、教示段階や誘導計画の生成においてその VA を用いるのが適切かどうかを判断し、他の VA とともに組織を構成する。また、その組織を Memory of organizations に記憶す

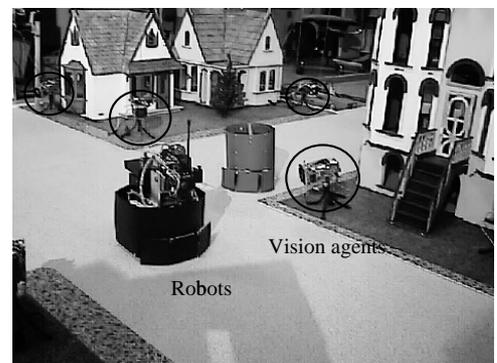


Fig. 3 A prototype of the DVS

る。Communicator は VA と他の VA、あるいは VA とロボットの間の通信を担う。Controller はシステムの状態（教示、誘導）やロボットの誘導要求に応じて、各モジュールを適切に制御する。

ロボット側では、ロボットがシステムにタスクを提示することで各 VA によって生成された複数の誘導計画が Communicator を介して受信され、さらに Command integrator によって適切に取捨選択、統合される。その結果をもとに Motion planner がアクチュエータコマンドを生成し、Actuator を制御する。

3. システムの試作

前述のアーキテクチャに基づいて、室内に分散視覚システムを試作した (Fig.3)。システムは 16 台の VA によって構成され、2 台のロボットを同時に誘導することができる。このシステムについて、教示、誘導の各段階ごとにその詳細を述べる。

3.1 ロボットのタスクと教示

ロボットの誘導においては、

- (1) 移動可能な道路領域上を移動する。
- (2) 他のロボットや移動物体との衝突を回避する。
- (3) 目的地に向かう。

という機能が必要となる。分散視覚システムではこれらすべてを、環境に設置された複数の VA からの情報を選択的に利用する

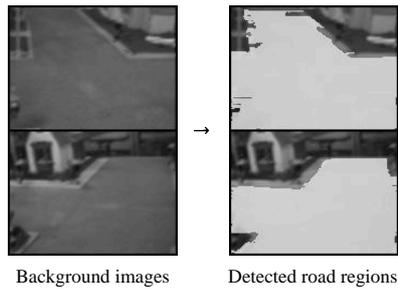


Fig. 4 Detecting road regions

ことによって実現する。(1)については、ロボットが移動可能な道路領域をVAが認識し、ロボットがその情報を利用することで、ロボットは例えば道路からはみ出さないように移動することができる。この道路領域の知識は、VAが環境を観測することによって得ることができる。すなわち、移動物体が通るところが道路であると仮定し、環境中の様々な移動物体を長時間観測すれば、その通過した領域を道路であるとみなすことができる。試作したシステムでは、後述のタスクの教示の際にロボットが通過した部分と同じ色の領域を道路領域として認識している (Fig.4)。

(2)については、ロボットや他の障害物同士の衝突の可能性をVAが判断し、衝突しそうな場合には回避するように誘導する。今回の実験では、VAによって検出されたロボットの進行方向などをもとにロボット同士が衝突するかどうかチェックし、その可能性がある場合には後述 (3.2節) のように誘導目標を一時的に修正することによって衝突を回避する。しかし、ロボット同士が非常に接近した場合などには、適切な視覚情報が得られない可能性があるため、ロボット自身が持つ接触センサなども用いて衝突を回避する。(3)については、誘導に必要な経路の知識をオペレータがシステムに教示し、その知識を利用してロボットを誘導する。以下では、この目的地に向かうというタスクの教示について述べる。

オペレータの指示によってシステムは教示段階に移り、タスクを記憶する。各VAはオペレータが操作するロボットを追跡し、画像上の軌跡を教示されたタスクとして記憶する。このときVAは、ロボットを誘導するために、教示されたタスクの意味付けを行う必要がある。この意味付けは、オペレータが明示的に与える場合と、システムがタスクの構造を解析して獲得する場合がある。例えば、家の前、ポストなどという、特定の場所の名前に関する知識等はオペレータが明示的に与える必要がある。ロボットがそのような地点を通過するとき、オペレータがロボットを観測しているVAに明示的に通知する。一方、システムがタスクの構造を解析して得られる知識は、誘導に直接かかわる知識、すなわち、経路の構造等である。今回の実験では、交差点に関する情報がそれに相当する。教示段階においてVAがある地点でロボットが複数の方向に誘導されていることを観測したとき、VAはそこに交差点があると判断する。システムはこの情報を基に、ロボットのタスクを交差点間の移動というサブタスクに分解し、それらサブタスクを組み合わせることによって (経路計画)、ロボットを自由に誘導することができる。もっとも、今回の実験で対象と

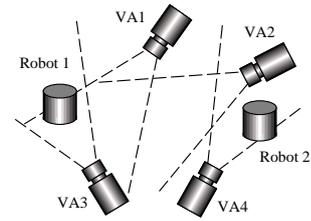


Fig. 5 Overlaps of visual fields of VAs

した環境には、2つの交差点しか存在しない、またロボットを連続的に誘導し、システムのロバスト性を検証するという目的から、ロボットの全体タスクを、それらの交差点をランダムに選択して、交差点間の移動を繰り返すというものに設定している。また、タスクの教示においても、交差点間の移動を教示することによって上記のサブタスクを直接与えている。2地点間の移動を交差点間の移動というサブタスクに分解し、それらを組み合わせて経路計画を行うという部分に関しては、今後より広い環境においてその機能を検証する予定である。

次に、タスクの教示の具体的な処理について述べる。まず各VAは視覚センサ画像からロボットを検出する。VAは固定されているので、物体が存在しないときの画像を記憶しておき、その画像と現在の入力画像との差分を取ることで環境中を移動する物体を容易に検出できる。そして、検出した物体がどのロボットなのか、あるいはロボット以外の物体なのかを認識する。今回試作したシステムでは色によってロボットの認識を行っている。但し、ロボットの色は個々の視覚センサの特性や照明条件などによって微妙に異なる色となって観測されるため、各VAの周囲の環境に合わせて調整する必要がある。今回の実験では、2台のロボットの誘導を行うため、あらかじめ2台のロボットをVAに見せ、VAごとに閾値などのパラメータを決定する (基本的には誘導するロボットの台数に制限はない)。

このとき、各VAの視野の重なりを求めておけば、VAがロボットでない物体を誤ってロボットと認識した場合などに、それを除去することができる。ここで言う視野の重なりとは、厳密に測定したカメラの配置などに基づくものではない。例えば Fig.5の場合、VA1とVA4、およびVA3とVA4は視野が重なっていないが、もし全てのVAで同じ特徴のロボットが観測された場合は、VA4の観測したロボットが他とは異なるものである可能性が高いと判断できる。試作したシステムでは、タスクの教示の際に環境中にロボットは1台のみ存在すると仮定してVAの視野の重なりを求め、誘導の際にそれを用いて誤認識したと思われるロボットを除去している。さらに、環境の知識を導入することによって、よりロバストにロボットを認識することができる。例えば、Fig.4のようなVAの視覚センサ画像における道路領域の知識を用いれば、ロボットは道路上にのみ存在するという仮定に基づいて、検出された物体の下端が道路領域にあるもの以外はロボットとして認識しないようにすることができる。

以上のようにしてロボットが検出されると、各VAはそのロボットを追跡し、画像上の軌跡 (実際は点列) を教示されたタス

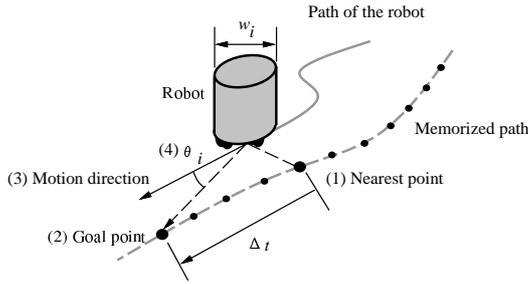


Fig. 6 Generating a navigation plan

クとして記憶する。特定の地点をロボットが通過する時には、オペレータがそれをシステムに通知することで、場所の意味付けを行う。また、システムは教示された経路を交差点間の移動というサブタスクに分解する。但し今回の実験では、前述のようにサブタスクを直接教示している。

3.2 誘導

タスクの教示を行った後、DVSは次の手順を繰り返すことによりロボットを誘導する。

- (1) ロボットがシステムにタスク（ここでは目的地）を提示する。
- (2) 各VAは画像上のロボットの位置をもとに誘導目標を設定する。さらに誘導計画を生成し、それをロボットに通知する。
- (3) ロボットは複数のVAから受け取った誘導計画を選択、統合し、移動する。

処理の詳細を以下に述べる。

システムがタスクを提示したロボットの誘導計画を立てるためには、まずそのロボットが画像上のどのロボットであるかを同定しなければならない。ここでは、先に述べた教示段階と同様にロボットの同定を行う。

次に各VAは誘導計画を生成する。提示された目的地にロボットを誘導するために、まずシステムは教示によって得られた経路（サブタスク）のうち適切なものを選択し、組み合わせる。次に、現在のロボットの位置から最も近い、選択された経路上の位置を推定する。ここでは、教示された経路は点列として記憶されており、それらのうちロボットに最も近い点を推定する（Fig.6 (1)）。次に、その地点からある一定の時間 Δt だけ先の地点を誘導目標に設定し（Fig.6 (2)）、その目標地点と現在のロボットの進行方向（Fig.6 (3)）との間の見かけの角度 θ_i （Fig.6 (4)）を求め、さらに次式によってロボットの移動平面における角度 θ_i^* を計算する。

$$\theta_i^* = \frac{\theta_i}{\sin \alpha_i} \quad (1)$$

ここで、 α_i はVA i の視覚センサの俯角（視線と水平面とのなす角）である。VAはこの θ_i^* 、すなわち現在の移動方向と目標地点のずれ角を誘導計画としてロボットに送る。

ロボットの目標地点を設定するとき、その進路にあたる道路領域上に障害物が検出された場合には、それを回避するように目標地点を修正する。ここでは誘導を行うロボット以外のロボットも障害物とみなすことで、障害物と同様にして衝突を回避する。

次にロボットは複数のVAがそれぞれ生成した誘導計画、すなわち現在の移動方向と目標地点のずれ角 θ_i^* を統合し、行動する。このとき θ_i^* の誤差を推定し、これを考慮して θ_i^* を統合することで、適切な位置からロボットを観測しているVAの生成した誘導計画のみを選択することができる。 θ_i^* の誤差には、ロボットの移動方向の観測誤差と視覚センサの俯角 α_i の誤差が含まれるが、ロボットの移動方向の観測誤差はロボットの見かけの大きさ w_i に反比例すると仮定し、 α_i の誤差による θ_i^* の誤差 $\Delta\theta_i^*$ は、 α_i の推定誤差 $\Delta\alpha_i$ （3.3.2節）と式（1）をもとに次式により求める。

$$\Delta\theta_i^* = \frac{\theta_i}{\sin(\alpha_i + \Delta\alpha_i)} - \frac{\theta_i}{\sin \alpha_i} \quad (2)$$

ロボットは、まずVAが生成した誘導計画のうち誤差を多く含むと思われるものを除外する。ここでは、VA i によって観測されたロボットの見かけの大きさ w_i がそれらの最大値の2/3未満である場合に、そのVA i の生成した誘導計画 θ_i^* は他のものと比べて誤差が相対的に大きいとみなし、除外する。さらに、残った誘導計画のうち $\Delta\theta_i^*$ がそれらの最小値の2倍以上であるVA i の生成した誘導計画も除外する。

次に、残った誘導計画を統合する。複数のVAが生成した誘導計画は、ロボットの移動方向を基準とした共通の座標系で表現されているため、その平均を求めることで統合することができる。ここでは、誘導計画 θ_i^* の誤差の大きさに応じた重みつき平均 θ^* を求め、統合された誘導計画とする。具体的には、次式のようにロボットの見かけの大きさ w_i と、 α_i の推定誤差 $\Delta\alpha_i$ による θ_i^* の誤差 $\Delta\theta_i^*$ を用いて求める。

$$\theta^* = \frac{\sum_i k_i \theta_i^*}{\sum_i k_i}, \quad k_i = \frac{w_i}{|\Delta\theta_i^*|} \quad (3)$$

この θ^* をもとにして、ロボットのアクチュエータコマンドを生成する。

3.3 観測によるカメラパラメータの推定

一般に、視覚センサの位置は回転および平行移動の計6つのパラメータで表現される。細田らはこれらのパラメータを視覚フィードバックによって求める手法[8]を提案しているが、本研究でも同様に環境中を移動するロボットを観測することで視覚センサのパラメータを推定する。しかしDVSでは、画像上のロボットの下端をロボットの位置とみなしており、その計測は非常に不安定であるため、6つのパラメータ全てを推定することは難しい。そこで、平行射影を仮定した時に必要となるパラメータのみ（Fig.7の α_i 、 β_i 、 γ_i ）をオンラインで推定する。これらのパラメータを用いることで、前述のようにVAの視覚センサの画像平面における表現（ θ_i ）をロボットの移動平面において表現された誘導計画（ θ_i^* ）に変換することができる。

3.3.1 推定手法

Fig.7のように、 x 、 y をある瞬間のロボットの進行方向を x とした直交座標系、 α_i をVA i の視覚センサの俯角、 β_i を視覚センサと y 軸との間の角度、 γ_i を視覚センサの視軸周りの回転角度とする。平行射影を仮定すれば、ロボットの速度ベクトル \mathbf{V} は、次のようにVA i の画像上のベクトル $\mathbf{V}_i = (u_i, v_i)^T$ に投影される。

$$\mathbf{V}_i = \mathbf{S}_i \mathbf{T}_i \mathbf{R}_i \mathbf{V} \quad (4)$$

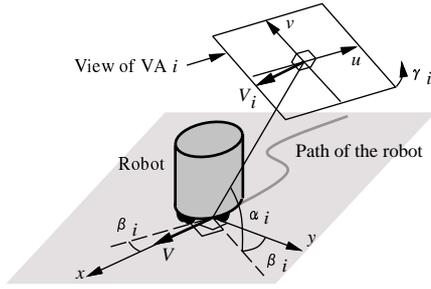


Fig. 7 Estimating camera parameters

ここで, \mathbf{R}_i , \mathbf{S}_i はそれぞれ角度 β_i , $-\gamma_i$ の回転, \mathbf{T}_i は平行射影を表す行列であり, 次のように表される.

$$\mathbf{R}_i = \begin{pmatrix} \cos \beta_i & -\sin \beta_i \\ \sin \beta_i & \cos \beta_i \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$\mathbf{S}_i = \begin{pmatrix} \cos \gamma_i & \sin \gamma_i \\ -\sin \gamma_i & \cos \gamma_i \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$\mathbf{T}_i = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \sin \alpha_i \end{pmatrix} \quad (7)$$

これらから速度ベクトル \mathbf{V} は $\mathbf{V}_i = (u_i, v_i)^T$ を用いて次のように表される.

$$\mathbf{V} = \begin{pmatrix} u'_i \cos \beta_i + \frac{v'_i}{\sin \alpha_i} \sin \beta_i \\ -u'_i \sin \beta_i + \frac{v'_i}{\sin \alpha_i} \cos \beta_i \end{pmatrix} \quad (8)$$

但し,

$$u'_i = u_i \cos \gamma_i - v_i \sin \gamma_i \quad (9)$$

$$v'_i = u_i \sin \gamma_i + v_i \cos \gamma_i \quad (10)$$

とする. これらから,

$$\mathbf{V}^2 = u_i'^2 + \left(\frac{v'_i}{\sin \alpha_i} \right)^2 \quad (11)$$

となる. オペレータがロボットを一定速度で操作する場合は $|\mathbf{V}|$ が既知であるから, 上式より

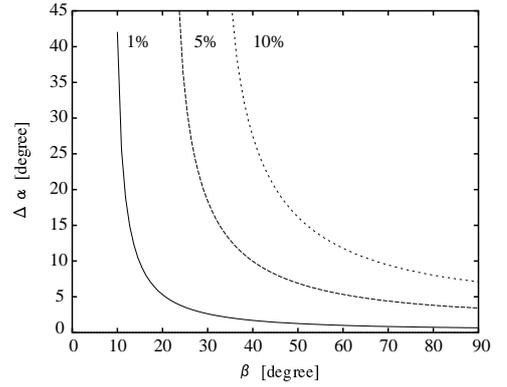
$$\sin \alpha_i = \sqrt{\frac{v_i'^2}{\mathbf{V}^2 - u_i'^2}} \quad (v'_i \neq 0) \quad (12)$$

となる. さらに, 座標軸の取り方から \mathbf{V} の y 成分は常に 0 であるから, 式 (8) より

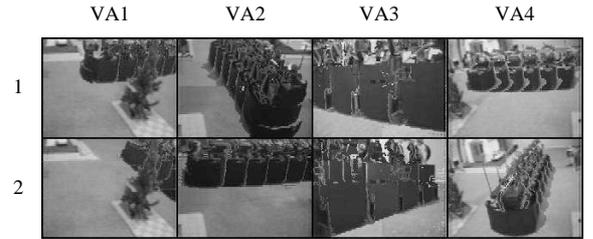
$$u'_i \sin \beta_i - \frac{v'_i}{\sin \alpha_i} \cos \beta_i = 0 \quad (13)$$

となる. 式 (9), (10), (12), (13) から, ロボットの速度を 2 回観測する (2 つの異なる \mathbf{V}_i を観測する) ことによって, α_i , (2 つの異なる) β_i , γ_i を求めることができる. 但し, 今回の実験では簡単のため $\gamma_i = 0$, すなわちカメラは地面と平行であると仮定している. これにより, 1 回の観測によって式 (12) から α_i を, 式 (13) から β_i を求めることができる.

なお, ロボットの見かけの速度 \mathbf{V}_i として, 実際には観測された速度をそのまま用いるのではなく, 画像上のロボットの見かけの大きさ w_i で正規化したものを用いる.

Fig. 8 Error range of α_i Table 1 α_i of vision sensors acquired by observation

VA	VA1	VA2	VA3	VA4
Actual	30	31	9	28
Observation 1	21.7*	35.8	30.4*	6.49*
Observation 2	24.9	8.08*	16.9*	34.4

Fig. 9 Images used for estimating α_i

3.3.2 観測誤差

ロボットの速度の観測誤差 Δu_i , Δv_i とカメラの俯角の誤差 $\Delta \alpha_i$ の関係は, 式 (12) と仮定 $\gamma_i = 0$ より次のようになる.

$$\Delta \alpha_i = \sin^{-1} \left\{ \sqrt{\frac{(v_i + \Delta v_i)^2}{\mathbf{V}^2 - (u_i + \Delta u_i)^2}} \right\} - \alpha_i \quad (14)$$

$\alpha_i = 30^\circ$ とし, Δu_i , Δv_i を $|\mathbf{V}|$ の 1%, 5%, 10% としたときの誤差 $\Delta \alpha_i$ を示したのが Fig. 8 である. u_i , v_i は式 (11) で決まるため, グラフの横軸は β_i で示している. このように β_i が 0 に近いほど, すなわちロボットの移動方向が視覚センサの画像上で水平に近いほど, 誤差が大きくなることが分かる. なお, この $\Delta \alpha_i$ は, 式 (2), (3) に示した, 複数の VA によって生成されたロボットの誘導計画の統合において用いる.

表 1 は, 以上の手法を用いて Fig. 9 の 2 通りのロボットの運動を観測して求めた視覚センサの俯角 α [deg] である. 上記のようにロボットの移動軌跡が水平に近いほど, 実際の値 (表の Actual) と比較して誤差が大きくなっている (表に * で示した値) のがわかる. それ以外の場合でもある程度の誤差があるが, 式 (1) で示されるように VA が生成する誘導計画はある時点のロボットの移動方向と目標地点のずれ角で表現されており, α_i の誤差が大きい場合でも誘導すべき方向 (左右) に影響はなく, ロボットは多少



Fig. 10 Robots navigated by the DVS

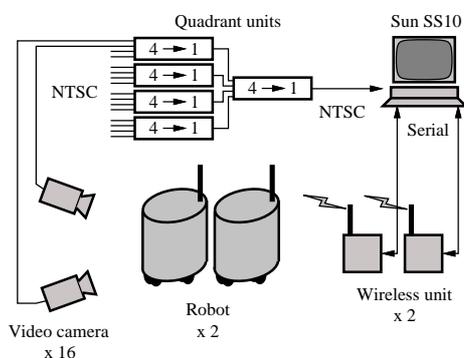


Fig. 11 Hardware system

蛇行するものの、そのような場合でも誘導は可能である。また、複数のVAが生成した誘導計画を統合し同時に用いることで、誤差の影響を少なくすることができる。

4. 誘導実験

実際に屋外にDVSを構築しロボットの誘導を行うにはさまざまな障害があるため、ここではまずDVSのプロトタイプとして屋内の模型上にシステムを構築し、ロボットの誘導実験を行った (Fig.10)。この模型は Fig.3、Fig.10に見られるように、複雑な背景や、日向や日陰、影といった照明条件の違いなど、複雑な屋外環境を忠実に再現したものである。この模型の大きさはおよそ4[m]×3[m]であり、ここに16台のカメラを設置してDVSを構築し、2台の小型ロボットの誘導を行った。システムのハードウェア構成を Fig.11に示す。16台のカメラで撮影された画像は5台の4画面ユニット (Quadrant unit) によって1枚の画像にまとめられ、ホストコンピュータ (Sun SS10) に搭載した画像入力ボード (S2200) に入力される。画像入力ボードの解像度は640×480ピクセルであるので、VA1つあたりの解像度は160×120ピクセルとなる。ホストコンピュータでは16個のVAモジュールがそれぞれ対応する入力画像を参照して処理を行い、無線シリアル通信ユニットを介して2台のロボットと通信を行う。VAの画像処理速度は毎秒平均5フレーム程度である。2台のロボットの衝突回避は、3.2節に述べたように基本的にVAに

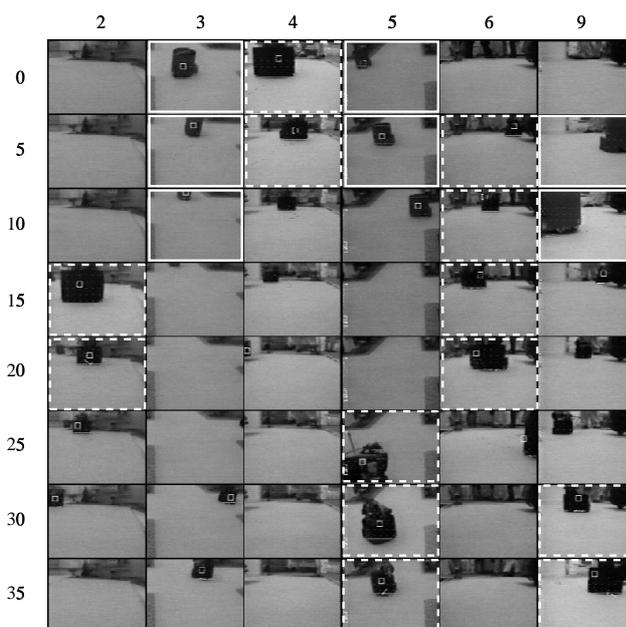


Fig. 12 Images processed by VAs

よって得られた情報に基づいて行うが、最終的にはロボットが持つ接触センサによって衝突を検知し、検知された場合には一定距離だけ後退して方向転換をするようにしている。

この実験ではまず、2台のロボットを区別するためにその色 (赤と黒) をVAに記憶させる。次に、複数の経路の教示を行うが、これら2台のロボットはその大きさや行動能力が似ているため、これらのうち1台のロボットを用いて複数の経路の教示を行う。最後に、2台のロボットを異なる経路に沿って誘導する。Fig.12は誘導段階におけるVAの画像処理の様子で、横軸はVAの番号、縦軸は時間 (単位は秒) を示している。実線の白枠は赤いロボット、破線の白枠は黒いロボットを誘導するために選択されているVAを示している。図のように、誘導タスクに応じて用いられるVAは次々に切り替わり、適切な視点からロボットを観測することによって誘導を行っている。Fig.10はDVSによるロボットの誘導の様子であり、DVSを国際会議IJCAI-97における学術展示として出展した際の模様である。16台のカメラは死角ができないように設置しているが、厳密な位置の測定は行っていない。3日間にわたる展示期間中、問題なくロボットを誘導し続けた。単純な画像処理、柔軟な誘導戦略、冗長な視覚情報といったDVSの持つ特徴が、このような複雑な環境におけるロボットの誘導を実現していると考えられる。

5. おわりに

本論文では分散視覚システム (DVS) を提案した。DVSは環境に埋め込まれた多数の視覚エージェント (VA) によって構成されるシステムである。分散視覚という、これまでの多くの研究ではあまり取り上げられてこなかったアプローチをとることで注意制御の問題を解決し、これまで困難であった、複雑な屋外環境における視覚情報に基づいたロボットの誘導を可能にした。また、複雑な屋外環境を忠実に再現した街の模型を用いて

DVSを構築し、ロボットを誘導する実験を行うことで、実際にDVSが非常にロバストにロボットを誘導できることを確認した。

今後の研究課題として、主にシステムの大規模化に伴う問題がある。実際のシステムでは、多くのロボットやその他の物体を同定しなければならない。この問題は、本稿で提案した手法に加え、ロボットに与える制御命令と運動の様子との関係などから解決できると思われる。また、観測によってVAの定性的な位置関係を求める手法[9]を導入し、得られた位置関係を用いれば、ロボットの誤認識の防止などで有利になるものと思われる。さらに、システムが大規模になった場合の誘導経路の計画や、多数のロボットを限られた数のVAで同時に誘導する際のVAの組織化の問題、人間などロボット以外の移動体に関する処理なども、今後の研究課題として挙げられる。

今日、コンピュータ、ネットワークやマルチメディアなどの技術の急速な発展によって、街には監視カメラをはじめとする多くのセンサが設置され、コンピュータネットワークが張り巡らされている。本論文で述べたDVSは、このように様々な利用目的に応じて常に成長を続けていくインフラ、すなわちネットワークやセンサなどを組み合わせてできる、新しいロボットのためのインフラである。将来的には、これらを統合した新しい情報システムとして、ロボットに限らず人間を含む様々な実世界エージェントに情報を提供する知覚情報基盤[2] (PII: Perceptual Information Infrastructure)へとDVSが発展していくことを期待している。

参考文献

- [1] D. H. Ballard: "Reference frames for animate vision," Proc. IJCAI, pp. 1635-1641, 1989.
- [2] H. Ishiguro: "Distributed vision system: A perceptual information infrastructure for robot navigation," Proc. IJCAI, pp. 36-41, 1997.
- [3] H. Mizoguchi, T. Sato and T. Ishikawa: "Robotic office room to support office work by human behavior understanding function with networked machines," Proc. ICRA, pp. 2968-2975, 1996.
- [4] S. Moezzi: "An emerging Medium: Interactive three-dimensional digital video," Proc. Int. Conf. Multimedia, pp. 358-361, 1996.
- [5] C. S. Pinhanez and A. F. Bobick: "Approximate world models: Incorporating qualitative and linguistic information into vision systems," Proc. AAAI, pp. 1116-1123, 1996.
- [6] V. R. Lesser and D. D. Corkill: "The distributed vehicle monitoring testbed: A tool for investigating distributed problem solving networks," AI Magazine, pp. 15-33, 1983.
- [7] E. H. Durfee and V. R. Lesser: "Partial global planning: A coordination framework for distributed hypothesis formation," IEEE Trans. SMC, Vol. 21, No. 5, pp. 1167-1183, 1991.
- [8] K. Hosoda and M. Asada: "Versatile Visual Servoing without Knowledge of True Jacobian," Proc. IROS, pp. 186-193, 1994.
- [9] 十河, 石黒, 石田: "空間的制約の伝搬に基づく定性的空間構造の同定," 電子情報通信学会論文誌, Vol. J81-D-II, No. 10, pp. 2311-2320, 1998.

1990年豊橋技術科学大学工学部情報工学課程卒業。1995年筑波大学大学院博士課程電子情報工学専攻修了。同年米国カーネギーメロン大学ポストドクトラルフェロー、ロボット研究所にてAutomated Highway Systemの研究に従事。1997年より慶應義塾大学理工学部の有期助手として京都大学情報学研究所にて移動

ロボットの研究に従事。移動ロボット、センサー、ロボットのプログラミング環境に興味を持つ。博士(工学)。(日本ロボット学会正会員)

石黒 浩

1986年山梨大学工学部計算機科学科卒業。1988年同大学院修士課程修了。1991年大阪大学大学院基礎工学研究科物理系専攻修了。同年山梨大学工学部情報工学科助手。1992年大阪大学基礎工学部システム工学科助手。1994年京都大学大学院工学研究科情報工学専攻

助教授。1998年より1年間、カリフォルニア大学サンディエゴ校客員研究員。視覚移動ロボット、能動視覚、パノラマ視覚、分散視覚に興味を持つ。工学博士。人工知能学会、情報処理学会、電子情報通信学会、IEEE、AAAI各会員。(日本ロボット学会正会員)

石田 亨

1976年京都大学工学部情報工学科卒業。1978年同大学院修士課程修了。同年日本電信電話公社電気通信研究所入所。横須賀研究所においてソフトウェア工学、知識処理などの研究開発に従事。現在、京都大学大学院情報学研究所社会情報学専攻教授。問題解決、分散人工知能、コミュニケーション、社会情報システムに興味を持つ。工学博士。人工知能学会、情報処理学会、電子情報通信学会、日本ソフトウェア科学会、IEEE、ACM、AAAI各会員。

十河 卓司

1997年京都大学工学部情報工学科卒業。1998年同大学院修士課程修了。現在、同大学院情報学研究所博士後期課程在学中。視覚情報処理に関する研究に従事。人工知能学会、情報処理学会各会員。(日本ロボット学会学生会員)

木元 克美

ゲノム整列問題への段階的節点展開方式の適用

A* with Partial Expansion for large branching factor problems

吉住 貴幸[†] 三浦 輝久[†] 石田 亨[†]

Takayuki Yoshizumi[†] Teruhisa Miura[†] Toru Ishida[†]

[†] 京都大学大学院情報学研究科社会情報学専攻

[†] Department of Social Informatics, Kyoto University

Abstract: The multiple sequence alignment problem is one of the important problems in Genome Informatics. The notable feature of this problem is that its state-space forms a lattice. Researchers have applied search algorithms such as A* and memory-bounded search algorithms including SNC to this problem. Unfortunately, previous work could align only seven sequences at most. Korf proposed DCBDS, which exploits the features of a grid, and suggested that DCBDS probably solved this problem, effectively. We found, however, that DCBDS was not effective for aligning many sequences. In this paper, we propose a simple and effective search algorithm, A* with Partial Expansion, for state-spaces with large branching factors. The aim of this algorithm is to store only necessary nodes for finding an optimal solution. We apply our algorithm to the multiple sequence alignment problem. It can align seven sequences with only 4.7% of the stored nodes required by A*.

1 はじめに

ゲノム整列問題とは、複数のゲノム配列を同じアミノ酸や性質の似たアミノ酸が縦に並ぶようにハイフンを挿入し、整列させる問題である。整列されたゲノム配列の利用目的は、配列が持つ機能と密接に結び付いた部分の抽出と、ゲノム配列の構造と機能の予測である。ゲノム整列問題は束 (lattice) における最短経路問題に定式化でき、探索アルゴリズムを適用することができる。

高次元のゲノム整列問題を解くために、池田等 [1] はゲノム整列問題に A* を適用した。しかし記憶量の制約のために、7 配列までしか解くことができなかった。一方で状態空間が束を構成するため線形記憶量アルゴリズムである IDA* では、再訪を回避することができず、現実的な時間では 4 配列までしか解くことができない。そこで我々は SNC [2] を提案し効率的に再訪の発生を抑えることに成功した。しかしそれでも 7 配列までしか整列させることができなかった。その後、我々の研究に刺激された Korf は DCBDS [3] を提案した。DCBDS

は両方向探索において CLOSED 集合を記憶する必要をなくした興味深いアルゴリズムである。DCBDS は多項式的な状態空間を持つ探索問題で効果的に記憶量を削減でき、Korf は論文中でゲノム整列問題を応用例として挙げている。我々は実際に実装し実験を試みたが、強力なヒューリスティック関数、状態空間が有向グラフであること等の理由により、DCBDS は全く効果がないことが分かった。

そこで我々は A* の記憶量の無駄を減らすアルゴリズムとして、段階的節点展開方式 [5] を提案する。本方式は A* において、節点の展開の際見込みのある節点のみを記憶し、記憶量の削減をねらったものである。本方式をゲノム整列問題に適用し、その効果を検証する。

2 ゲノム整列問題

与えられた配列が蛋白質配列である場合、事前に与えられるアミノ酸どうしの性質の類似度によって文字どうしの類似度が決められる。これを用いて、同じアミノ酸や性質の似たアミノ酸が縦に並ぶようにハイフンを挿入し、配列を整列させることで複数の配列の類似度が求められる。延長因子 (EF-TU, EF-1 α) の 7 配列を整列させ

吉住 貴幸 京都大学大学院情報学研究科社会情報学専攻石田研究室
606-8501 京都市左京区吉田本町 TEL 075-753-4820 FAX 075-753-4820 e-mail: yosizumi@kuis.kyoto-u.ac.jp

た結果の一部を以下に示す。

```
Hal  VNKMDLVD--YGESEYKQVVEEV-KDLLTQVRFDSENAK
Met  VNKMDTVN--FSEADYNELKKMIGDQLLKMIGFNPEQIN
Tha  INKMDATSPPYSEKRYNEVKADA-EKLLRSIGFK-D-IS
Thc  VNKMDMVN--YDEKKFKAVAEQV-KKLLMMLGYK-N-FP
Sul  INKMDLADTPYDEKRFKEIVDTV-SKFMKSFQFDMNKVK
Ent  VNKMDAIQ--YKQERYEEIKKEI-SAFLKKTGYNPKIP
Pla  VNKMDTVK--YSEDRYEEIKKEV-KDYLLKKGQADKVD
```

ゲノム整列問題は d 次元の束上での最短経路を求める問題として次のように定式化できる [4]。整列させる配列の本数を d 本、それぞれの配列を S_k 、 k 番目の配列の長さ (文字数) を N_k とする。長さ N_k の d 本の配列を、 d 次元空間上の束 $L(S_1, \dots, S_d)$ に対応させる。この束は d 本の配列の直積を作ることで得られる。問題空間は d 次元の束として表すことができる。全ての配列の最初の文字に対応する節点を開始節点、全ての配列の終りの文字に対応する節点を目標節点と呼ぶ。配列 S_1, \dots, S_d の間の経路 $\gamma(S_1, \dots, S_d)$ は開始節点と目標節点を結ぶ束を横切る線で、配列を整列させた結果に対応する。

配列 ACGH, CFG, EAC に対する経路の例を図 1 に示す。図中の太い実線が経路であり、直方体の奥の左上の節点が開始節点、手前の右下の節点が目標節点である。この経路に対応する整列文字列が束の右側にある文字列である。ゲノム整列問題は、整列させる配列 S_1, \dots, S_d によって定義される d 次元の束上の開始節点から目標節点までの最短経路を求める問題であるといえる。

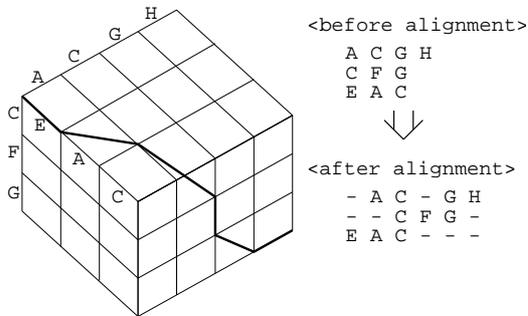


図 1: 状態空間の表現

2.1 問題の特徴

ゲノム整列問題は、これまで AI 研究者たちが取り組んできたスライドパズルや迷路などの典型的な探索問題と大きく異なる特徴を持っている。ゲノム整列問題の特徴は以下のようなものである。

状態空間 状態空間は束を構成する。そのため同一節点への経路が無数に存在する。

分岐因子数 非常に大きい分岐因子を持つ。整列する配列の本数を d とすると分岐因子は $O(2^d)$ となる。

具体的には 7 配列で最大 127、8 配列で最大 255 となる。

枝のコストの分布 高次元の束では枝のコストのとり得る値が非常に多い。

以上により評価関数値がとりうる範囲、状態空間がグラフであることを考えると、IDA* に代表される縦型の探索法では、実行時間の面で現実的に解ける可能性は極めて少ないと考えられる。一方で A* に代表されるような横型の探索法では記憶量が制約となり、解ける問題の範囲が限定されることになる。つまり分岐因子が非常に大きいので、多くの子節点が生成されることになり、探索が深くなるにしたがって OPEN 集合は爆発的に大きくなる。OPEN 集合は将来展開される可能性のある節点の集合であるが、評価値が最適解のコストを超える節点は展開されない。したがってそのような節点を記憶するのは無駄である。A* はそのような無駄な節点も記憶しなければならない、結果としてしばしば探索に失敗することになる。

3 段階的節点展開方式

我々の提案する段階的節点展開方式 (A* with Partial Expansion) [5] は分岐因子の大きな問題で A* における記憶量を効果的に減少させるものである。基本的なアイデアは評価値の良い節点のみを記憶するものである。それにより必要となる記憶量を減らすことを試みる。さらに全ての子節点を記憶していない親節点を OPEN 集合へ戻すことにより、最適性を保証する。

3.1 アルゴリズム

$c(n, n_i)$ を枝のコスト、 $h(n)$ をヒューリスティック関数、 $g(n)$ は開始節点 s から節点 n までのそれまでに見つかった最小コストとする。 $f(n)$ は節点 n の静的評価値であり、 $f(n) = g(n) + h(n)$ と定義される。さらに $F(n)$ は節点 n の動的評価値である。またカットオフコスト C は事前に与えられるものとする。

子節点のうち目標節点に到達する見込みの高い節点のみを記憶することを考える。本方式は事前に与えられたカットオフコスト C により親節点の動的評価値と子節点の静的評価値との差が C 以内の子節点だけを記憶する。差が C を超える子節点は目標節点へ到達する見込みが薄いと見なし記憶しない。A* が節点の静的評価値 $f(n)$ の低いものから展開するのに対し、本方式は $F(n)$ の低い順に展開する。新たに記憶された節点の $F(n)$ の初期値は $f(n)$ である。ただし最適性を保証するために、全ての子節点を記憶していない親節点は再び OPEN 集合へ入れる。そのとき動的評価値 $F(n)$ を記憶しなかった

子節点のうちで、最も良い静的評価値 $f(n_i)$ で書き換える。これにより当初見込みの薄いと考えられていた節点も、ほかの節点がだめだと分かれば親節点が再び展開され記憶されることになる。また差が C 以内の評価値を持つ子節点が全くないときは、子節点は全く記憶されず親節点の $F(n)$ が書き変り、親節点の展開優先度が下がることになる。以下に本方式の疑似コードを示す。ここで T はターゲット節点集合、 $\text{succ}(n)$ は節点 n の子節点の集合を表す。

Algorithm 1 A* with Partial Expansion

```

1   $g(s) := 0$ 
2   $F(s) := g(s) + h(s)$ 
3  OPEN  $\leftarrow \{s\}$ 
4  CLOSED  $\leftarrow \emptyset$ 
5  while OPEN  $\neq \emptyset$  do
6     $n := \arg \min F(n_i), n_i \in \text{OPEN}$ 
7    OPEN  $\leftarrow \text{OPEN} - \{n\}$ 
8    if  $n \in T$  then return
9    SUCC $_{\leq C} \leftarrow \{n_j \mid n_j \in \text{succ}(n), f(n_j) \leq F(n) + C\}$ 
10   SUCC $_{> C} \leftarrow \{n_k \mid n_k \in \text{succ}(n), f(n_k) > F(n) + C\}$ 
11   for each  $n_l \in \text{SUCC}_{\leq C}$  do
12     if  $n_l \notin \text{OPEN} \cup \text{CLOSED}$  then
13        $g(n_l) := g(n) + c(n, n_l)$ 
14        $F(n_l) := g(n_l) + h(n_l)$ 
15       OPEN  $\leftarrow \text{OPEN} \cup \{n_l\}$ 
16     else if  $n_l \in \text{OPEN}$  and
17        $g(n) + c(n, n_l) < g(n_l)$  then
18        $g(n_l) := g(n) + c(n, n_l)$ 
19        $F(n_l) := g(n_l) + h(n_l)$ 
20     else if  $n_l \in \text{CLOSED}$  and
21        $g(n) + c(n, n_l) < g(n_l)$  then
22        $g(n_l) := g(n) + c(n, n_l)$ 
23        $F(n_l) := g(n_l) + h(n_l)$ 
24       CLOSED  $\leftarrow \text{CLOSED} - \{n_l\}$ 
25       OPEN  $\leftarrow \text{OPEN} \cup \{n_l\}$ 
26     end if
27   end for each
28   if SUCC $_{> C} = \emptyset$  then
29     CLOSED  $\leftarrow \text{CLOSED} \cup \{n\}$ 
30   else
31      $F(n) := \min f(n_m), n_m \in \text{SUCC}_{> C}$ 
32     OPEN  $\leftarrow \text{OPEN} \cup \{n\}$ 
33   end if
34 end while

```

選択的な記憶の操作 (アルゴリズム 9,10 行目)、 $F(n)$ の値を管理する操作 (アルゴリズム 14,18,21,29 行目)、節点を再び OPEN に戻す操作 (アルゴリズム 30 行目) が A* のアルゴリズムに加えられている。

特殊な場合として、 $C = \infty$ のときは完全に A* と同一になる。一方、 $C = 0$ のときは最良優先で節点が記憶され、最適解のコストを超える節点は一切記憶しないですむ。つまりこの時は、OPEN 集合なしで A* が実行できることになる。

3.2 動作例

図 2 に $C = 0$ としたときの本方式の動作例を示す。円が節点を表し、その中の数字がその節点の動的評価値 $F(n)$ 、すなわち展開優先度を表す。点線で示されている節点は記憶していない節点を示す。節点の左上の数字は展開順序を示している。

図 2(a) は最初の展開を示しており、親節点の動的評価値 $F(n)$ は初期値として自分の静的評価値 6 となっている。 $C = 0$ であるので親節点と同じ評価値を持つ子節点 B のみが記憶され、記憶されなかった子節点の最も良い評価値 7 が親節点の新たな $F(n)$ となり、親節点 A は再び OPEN 集合へ戻される。図 2(b) は 2 回目の展開を示しており、最も良い $F(n)$ を持つ節点 B が展開される。この時、親節点 B と同じ評価値を持つ子節点はないので記憶は一切行われず、親節点の $F(n)$ を子節点の最も良い評価値 8 に書き換え、親節点 B を再び OPEN 集合へ戻す。図 2(c) は 3 回目の展開を示しており、最も良い $F(n)$ を持つ節点 A が再び展開される。子節点 C を記憶し、親節点の $F(n)$ は 9 に更新され、再び OPEN 集合へ戻される。

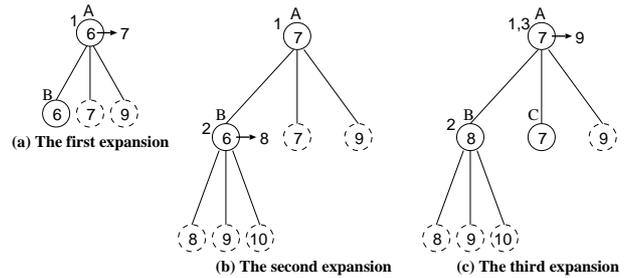


図 2: A* with Partial Expansion の探索の様子 ($C=0$)

4 評価

ランダムに 7 配列、及び 8 配列を選択し、それぞれ合計で 10 のインスタンスに対して行った。メモリーは 200 万節点を記憶できる量 (約 160MB) を使用した。それぞれカットオフコスト C を 0,10,50, ∞ として累積展開数、記憶節点数 (OPEN 集合 + CLOSED 集合) を調べた。 $C = \infty$ のとき本方式は A* と完全に同一になる。累積展開数は同じ節点を複数回展開したときは重複して数えている。したがって累積展開数は計算量に、また記憶節点数は記憶量にそれぞれ比例すると考えられる。本アルゴリズムを 7 配列の遺伝子型整列問題に適用した結果を表 1 に示す。(紙面の都合上、7 配列の実験結果の 3 インスタンスのみを掲載する。詳細な実験結果は [5] を参照のこと。)

今回用いたヒューリスティック関数は単調性があるため、 $A^*(C = \infty)$ での展開節点数は事実上 CLOSED 集合の節点数と同一となる。この値は $C = 0$ のときの記憶

表 1: 7 配列の整列問題の実験結果

インスタンス	cutoff	0	10	50	$\infty(A^*)$
1	累積展開数	344,640	129,986	59,592	48,575
	記憶節点数	48,882	53,948	107,157	839,150
2	累積展開数	30,702	19,249	12,644	11,650
	記憶節点数	11,877	13,031	22,801	451,033
3	累積展開数	463,446	210,544	107,432	85,437
	記憶節点数	86,611	94,853	164,879	1,576,920

節点数とほぼ同じとなることが示されている。これは本方式で $C = 0$ としたとき、OPEN 集合なしで A^* を実行できることを意味している。10 インスタンスを平均すると、同一節点を複数回展開するので A^* と比較して累積展開節点数 (計算量) は約 4.7 倍と大きくなるが、記憶量は約 4.7% と大きく減らせることが示された。またメモリーが足りず A^* では解くことのできなかつた 8 配列のインスタンスを本方式で解くことができた。これにより、遺伝子整列問題における本方式の有効性が明らかになった。

7 配列の 1 番目のインスタンスに関してカットオフコストの値による累積展開節点数と最大記憶節点数の関係を表したグラフを図 3 に示す。

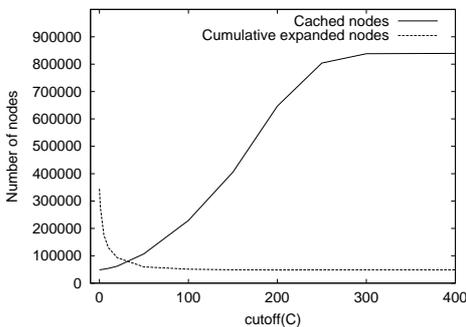


図 3: cutoff に対する記憶節点数、累積展開数の変化

このインスタンスでは親節点と子節点の評価値の差は最大で 396 なので $C \geq 396$ のとき、展開の際に全ての子節点を記憶することになり、事実上 A^* と同一になる。図 3 よりカットオフコスト C を適当な値に設定すると計算量をそれほど犠牲にせず記憶量を効果的に減少させることができることがわかる。例えば $C = 50$ とすると A^* と比較して記憶量は 13% に抑えられ、計算量の増加はわずか 1.2 倍にとどまっている。

記憶量はカットオフコストに比例し、計算量は反比例しているように見える。これは直感的には次のように考えることができる。計算量に関しては、状態空間に存在する全節点に関して、最適解のコストより静的評価値 $f(n_i)$ の低いものは必ず記憶される。カットオフ値が大きければ一度の展開で多くの子節点が記憶されるので、

展開数は減る。逆にカットオフ値が小さければ節点を小刻みに記憶することになるので、それに反比例して展開数は増えるということになる。また記憶量に関しては、カットオフコスト C が大きくなれば、最適解のコストを超える評価値を持つ節点の記憶される数が増える。そのような節点数はカットオフコストに比例すると言うことができる。

5 おわりに

分岐因子が大きい問題において A^* における必要記憶量を大きく減らす方法として、段階的節点展開方式を提案した。この方法は A^* を基本としているため再訪を完全に回避することができ、状態空間がグラフとなる問題にも効果的に適用できる。また、評価関数が適格であれば求まった解は最適性が保証される。大きな分岐因子を持つ問題において、記憶量の制約により A^* では解くことのできなかつた問題を解くことができる。実際にゲノム整列問題に本方式を適用した結果、7 配列のインスタンスにおいて A^* と比較して平均で記憶量を 4.7% に抑えることができた。

参考文献

- [1] T. Ikeda and H. Imai, 1994. "Fast A^* Algorithms for Multiple Sequence Alignment," Proceedings: Genome Informatics Workshop 1994, 横浜, 日本, pp. 90-99, Dec.
- [2] T. Miura and T. Ishida, 1998. Stochastic node caching for memory-bounded search. *AAAI-98*, 450-456.
- [3] R. E. Korf, 1999. "Divide-and-conquer bidirectional search: first results." *Proc IJCAI-99*, 1184-1189.
- [4] H. Carrillo and D. Lipman, 1988. "The multiple sequence alignment problem in biology." *SIAM Journal Applied Mathematics* 48: 1073-1082.
- [5] T. Yoshizumi, T. Miura and T. Ishida, 2000 "A* with Partial Expansion for large branching factor problems," *AAAI-2000 to appear*.

仮想空間でのコミュニケーションを補助する ヘルパーエージェントの設計

中西 英之[†], Katherine Isbister^{††}, 石田 亨[†], Clifford Nass^{†††}

[†]京都大学大学院情報学研究科社会情報学専攻

^{††}NTT コミュニケーション科学基礎研究所オープンラボ

^{†††}スタンフォード大学コミュニケーション学専攻

本稿では仮想環境における人間同士のコミュニケーションを支援するエージェントについて述べる。このエージェントはパーティにおけるホスト役を模擬しており、会話が停滞している参加者に共通の話題を与える。我々はプロトタイプを異文化間コミュニケーションの支援に適用する実験を行った。実験用に、参加者との質疑応答を通して安全な話題を提供するエージェントと、危険な話題を提供するエージェントを設計した。エージェントは会話相手や相手国に対する認識に影響を与えた。実験の結果、刺激的な話題は有用であり、エージェントは各参加者に適応できた方が良く、エージェントの存在が参加者の振る舞いに影響を及ぼすことが分かった。

Designing a Helper Agent for Communication in a Virtual Space

Hideyuki Nakanishi[†], Katherine Isbister^{††}, Toru Ishida[†], and Clifford Nass^{†††}

[†]Department of Social Informatics, Kyoto University

^{††}Open Laboratory, NTT Communication Science Laboratories

^{†††}Communication Department, Stanford University

We discuss a helper agent that is designed to support human-human communication in virtual environments. The prototype mimics a party host, trying to find a common topic for guests whose conversation has lagged. We performed an experimental evaluation of the prototype's ability to assist in cross-cultural conversations. We designed the prototype to introduce safe or unsafe topics to conversation pairs, through a series of questions and suggestions. The agent influenced their perception of each other and of each other's national group. As a result, we found that provocative topics are useful, an agent adaptive to each participant is good, and an agent's presence affects participants' style of behavior.

1 はじめに

コンピュータネットワークはますますコミュニケーションのために用いられるようになっており、人々はコンピュータネットワークを知人とのコミュニケーションのためだけでなく、見知らぬ人々とのコミュニケーションにも用いるようになってきている。

仮想空間は不特定多数の人々が集まり、偶発的で同時多発的なミーティングを行うのに適した環境である。仮想空間を用いたミーティングツールには、Community Place¹⁾、InterSpace²⁾、Diamond Park³⁾、DIVE⁴⁾、Massive⁵⁾、CU-SeeMe VR⁶⁾などがある。これらのツールが提供する仮想空間は、人々が自由に集まり、出会い、会話することを可能にする。だが同時にこのような仮想空間では、コミュニケーションに必要な他人との間の共通基盤を形成するの

が困難である。どこからともなく仮想空間へやってくる人々の文化的背景や所属、その他の社会的アイデンティティを推測するのは困難である。新しい人間関係を築くためには、このよう知識を共有して共通基盤を形成する必要である⁷⁾。

そこで我々は、インタフェースエージェントが人々の共通基盤の形成を助けることができると考え、仮想空間の中でパーティーにおけるホストの役割を務めるエージェントを開発した。そしてこのヘルパーエージェントを異文化間コミュニケーションに適用する実験を行った。

2 インタフェースエージェント

2.1 関連研究

これまでのインタフェースエージェントに関する研究には、タスクの支援を行うエージェントの有

用性を論証してきたものがある。これらのエージェントは、利用者との1対1のインタラクションを通してタスクの遂行を支援する。学習指導エージェントの研究では、エージェントの存在が生徒の学習効果に肯定的影響を与えた⁸⁾。不動産紹介エージェントの研究では、バーバル及びノンバーバルのコミュニケーション能力を備えた具現化されたエージェントの価値について調べられた⁹⁾。これらの他にエージェントにツアーガイドをさせる研究などがある¹⁰⁾。

特定のタスクを行うもの以外に、テキストチャットによる利用者との会話を通して社会的な支援を行うインタフェースエージェントの例がいくつかある。例えば、MUDの仮想世界の中で案内役を務めるエージェント¹¹⁾、パートナーの役割を演じて場の雰囲気を作り出すエージェント¹²⁾、Webサイトの訪問者の質問に友好的に答えるエージェント(<http://www.artificial-life.com>)などがある。これらのエージェントは利用者と一対一で社会的インタラクションを行うが、人間同士のインタラクションを促進するわけではない。

1対1ではなく人間のグループとインタラクションを行うインタフェースエージェント¹³⁾の例もあるが、これまで例として挙げたエージェントと同様、利用者である人間の会話相手になるように設計されている。また、会話相手になるのではなく、発散的思考過程の支援を目的としてグループに情報提供を行うエージェントの例などもある¹⁴⁾。

ヘルパーエージェントは、以上のようなタスクを支援するエージェントや会話相手としてのエージェントとは異なり、人間同士のコミュニケーションを助ける事が目的である。会話に困っている人々が共通の話題を見出せるように、簡単な質疑応答を行うよう設計されている。インタフェースエージェントではなく、その場で相手の社会的アイデンティティに関する情報を入手して共通の話題を検索できる環境を用意するのも良いかもしれない。だがそれでは、共通基盤を形成して共通の話題についての会話を始める過程全体を支援したことはない。

2.2 異文化間コミュニケーション

ヘルパーエージェントのプロトタイプを適用する対象として、異国間における初対面でのミーティングを選んだ。なぜなら、このようなミーティングでは共通基盤の形成が非常に困難であるので、エージェントがコミュニケーションを助ける効果を明確に調べることができると思ったからである。

異国間でのミーティングでは、たとえ全参加者が共通の言語を流暢に話せるとしても、文化が異なるために会話の共通基盤が不足する。文化が異なると、会話を開始して進展させる方法も異なる。ある文化では安全な話題が、他の文化では気まずい話題であることもある。例えば、初対面での会話で家族構成について尋ねることが安全である文化もあれば、そうでない文化もある^{7),15)}。

我々はエージェントを適用する異文化間コミュニケーションの具体例として、日本人学生とアメリカ人学生の会話に注目した。この両国は互いに異なるインタラクション様式と文化的規範を持つことで知られており¹⁵⁾、実験対象として適切であると考えた。

3 ヘルパーエージェントの設計

ヘルパーエージェントはパーティにおける忙しいホスト役のように行動する。人間のホスト役が招待客の会話がかまけていないことを示す手がかりを探すように、エージェントは2人のミーティング参加者の音声から、会話補助を開始する切っ掛けとなる長い沈黙を探す。沈黙は会話の状況を示す強力な合図である⁷⁾。沈黙を発見したエージェントは参加者に近づき、2人の参加者と順に質疑応答を行い、どんな事を話せばよいか推薦して、その場から去る。

3.1 コミュニケーション環境

エージェントが登場するコミュニケーション環境として、我々が開発したFreeWalk^{16),17)}という3次元仮想空間を用いた(図1参照)。FreeWalkの空間内では、利用者は自分のカメラ画像が貼られた3次元の四角錐として表され、位置と向きを持ち、自由に動き回ることができる。空間内を移動している利用者同士の偶然の出会いによって会話が起これることもある。利用者の音声は、音量が互いの距離に反比例して聞こえるので、互いに離れた場所に集まれば、同一空間内に複数のグループを形成できる。利用者の視点は四角錐の長方形の面の中心にあり、四角錐の向きから視線の方向が分かるので、誰が誰を見ているのかを容易に把握することができる。ある利用者の音声はその近くにいる利用者全員に聞こえるので、前もって会話の一部を聞いてその内容を推測し、興味を引く会話に加わることができる。

実験で使用したバージョンのFreeWalkの画面を図2に示す。画面の右下に、上から見た参加者の位置関係を示すレーダスクリーンがあり、会話相手やエージェントの位置が分かる。左下には自分のカ

メラ画像を映す小さなウィンドウがあり、自分が相手にどのように見えているかを確認できる。

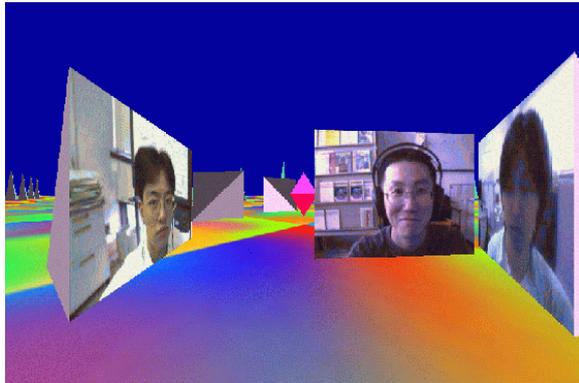


図 1. 3次元仮想空間 FreeWalk.

3.2 ヘルパーエージェントの特徴

3.2.1 ノンバーバルコミュニケーションを行う能力

ヘルパーエージェントは利用者と同様に仮想空間内で具現化される(図2参照)。これによってエージェントは、ノンバーバルなコミュニケーション手段である、空間内での位置や体の向き、アニメーション画像などを用いることができる。

エージェントは沈黙を検知すると参加者に近づいてから質疑応答を開始し、それが終わると参加者から離れ、次に沈黙を検知するまで待機する。これによって参加者は、エージェントが自分たちの会話に参加している状態とそうでない状態を直感的に区別することができる¹⁸⁾。

エージェントは話しかける相手の方向を向くよう設計されている。これによって参加者は、直感的にエージェントが誰に話しかけているのかを知ることが出来る。

エージェントを表す3次元の四角錐には、日本風とアメリカ風の間に当たるようなコミカルな犬のアニメーション画像が貼られる。犬を選んだのは、エージェントが友好的で従順であり、社会性を備えていると思われるようにするためである¹⁹⁾。コミカルな絵を選んだのは、本物らしい絵に比べ違和感が少ないと考えたからである。エージェントは、質問する、参加者の肯定的または否定的な返答に反応する、話題を推薦する、という会話の進行に対応する一連のアニメーションパターンを持っている。これらのアニメーションは、エージェントの発言を補うためにある⁹⁾。

3.2.2 話題を提供するための機構

沈黙の検知: 2人の参加者の音声の音量を合計した値があるしきい値を下回ったときに、エージェントはそれを沈黙と見なす。沈黙がある一定時間以上続

いたときに、エージェントは参加者の会話がつまずいていると判断する。

自分が立つ位置の決定: エージェントは、2人の参加者の位置と向きに基づいて、自分がどの位置に立つべきかを決める。エージェントは両者から良く見える位置に立とうとし、また同時に両者の間に立って視線を遮ぎってしまうのを避けようとする。立つのに適した位置を見つけるのが難しいときは、少なくとも自分が質問している相手から見える位置に立とうとする。エージェントが話しかけている間に参加者が移動した場合は、エージェントは自分の位置と向きをそれに合わせて調節する。

内部状態の遷移: エージェントの内部状態には、待機状態、接近状態、会話状態の3つがある。待機状態のときは、エージェントはミーティング参加者から離れた仮想空間の隅でうろうろしている¹⁸⁾。気まぐれ沈黙を検知すると接近状態になって参加者に近づき始め、近づき終わると会話状態になる。もし、近づき終わる前に参加者が会話を再開した場合は、エージェントは接近を中止して待機状態になる。この行動パターンは、上司ともう1人の偉い人が話しているところへ近づくのを躊躇している部下と同様である。また、参加者同士が遠く離れて立っていたり、互いに向かい合っていない場合は、エージェントは参加者同士が会話していないものと見なし、沈黙を検知しても待機状態を続ける。エージェントが参加者に近づいている間や参加者と会話している間に参加者同士がこのような状態になった場合も、エージェントは待機状態に戻る。

3.2.3 話題に関する知識

我々は日本の大学生とアメリカの大学生に対して Web 上でアンケートを行い、それぞれの国において初対面で用いるのに安全な話題と危険な話題を集めた。そしてこれらの話題の中から、両国に共通の安全な話題と危険な話題を選び出し、エージェントが用いる質疑応答メッセージを作成した。安全な話題として、映画、音楽、天気、スポーツ、昨日何をしていたか、といったものを選んだ。危険な話題として、金銭、政治、宗教といったものを選んだ。安全な質問の具体例は“Is the weather nice where you are right now?”であり、危険な質問の具体例は“So, do you think it is alright for a country to fish for and eat whales”である。

3.3 会話モデルと会話インタフェース

エージェントとコミュニケーションを行うためのユーザインタフェースは、分かりやすく取っ付き易いように設計された。図2にエージェントと参加

者の間の質疑応答における一連のやり取りを示す。

エージェントは音声で話すことはせず、テキストメッセージを頭上の吹き出しの中に表示して参加者に質問する。音声合成を用いないのは、エージェントの不自然な発声が発音に対する参加者の印象に影響を与えたり、参加者がエージェントの発言を聞き逃したりする可能性があると考えたからである。吹き出しの中には質問文の下に 'yes' と 'no' のボタンがあり、参加者はそれをマウスボタンでクリックして質問に答える。エージェントが過大に知的であると思われないように、自然言語入力ではなくこのような単純明快な方式を用いた。エージェントの質問は両方の参加者に見えるが、質問された参加者の方にだけ、'yes' と 'no' のボタンが現れる。参加者の答えは、会話相手の端末上に表示されている自分自身の上に吹き出しの形で表示される。

各話題データは木構造になっており、各節点は参加者との会話における1つのターンである。各節点は、参加者への最初の質問、それに対する答えの候補、各答えに対するエージェントの返答、次の質問相手をもう1人の参加者に切り換えるかどうかを示すフラグの4つの要素から構成されている。各節点は、両方の参加者が順次会話に参加するように並べられている。両者への質問の内容は基本的に同じであり、1つの話題に関して両者の共通点や相違点が

判明するようになっていく。

エージェントがやり取りを開始する際はまず、安全な（もしくは危険な）話題のレパトリーの中の未使用のものの中から、提供するものをランダムに選ぶ。そして、2人の参加者のどちらに最初に質問するかをランダムに選ぶ。この参加者を仮にAとする。Aが質問に答えると、エージェントはAの答えに対して返答する（図2参照）。Aの答えに基づいて、エージェントは次に続く質問を選ぶ。この質問はAかBのどちらかに向けられる。もしBに向けられる場合は、エージェントはBの方向へ向き質問する。Bが答えると、エージェントはこの話題に関してどんなことを話せば良いのかを推薦する。この推薦の内容は、それまでに得た参加者の答えに基づいて選択される。推薦を述べた後、エージェントはその場から去る。もし、エージェントが参加者の答えを一定時間待っても参加者が答えない場合は、しつこくやり取りを続けようとしてせずにその場から去る。

エージェントは参加者に接近する明確な目的を持っており、話題を推薦した後はすぐにその場から離れる。このため、エージェントは仲介者として簡単な会話をするだけであることを、参加者が容易に理解できる。参加者にとっては、エージェントを自分たちの会話に加えなくてもよいことがはっきりしている。そのため、参加者は自分たちの会話に集中することができる。

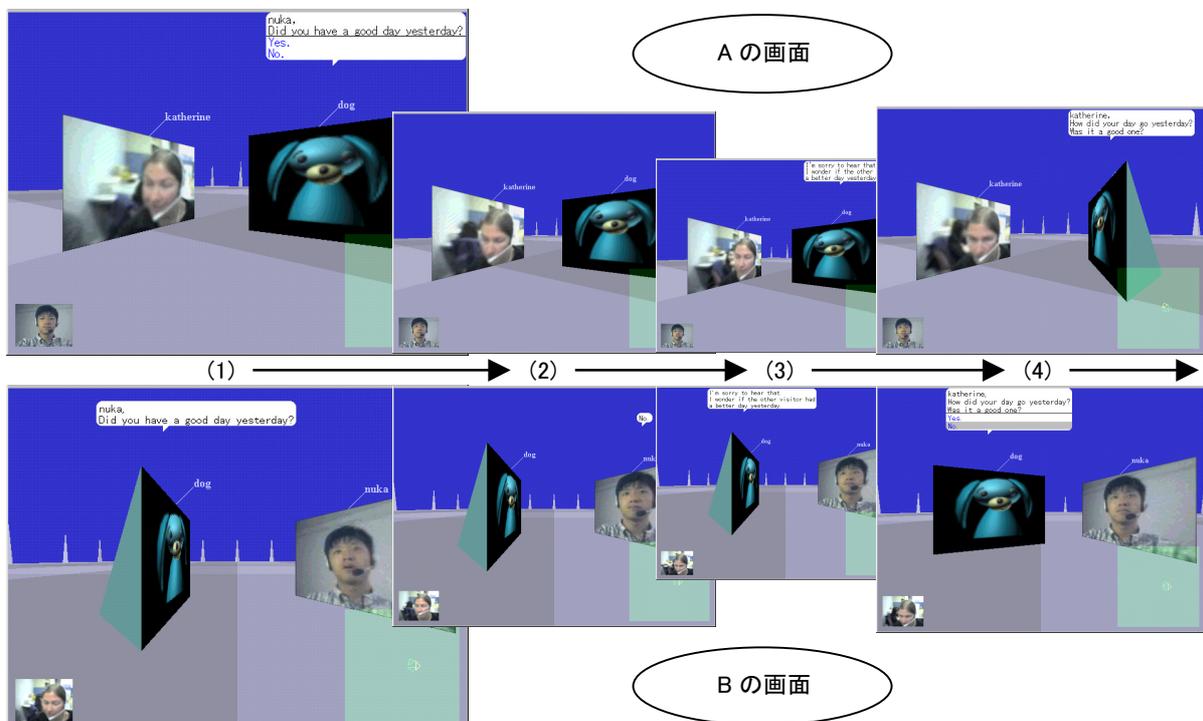


図2. それぞれの参加者から見た会話の進行: (1) 参加者Aが最初に質問される, (2) そして返答する, (3) それに対してエージェントがコメントを述べる, (4) 次に、参加者Bが質問される。

4. ヘルパーエージェントの評価

4.1 評価の目的

評価の目的は、エージェントの有効性を検証することである。我々は、エージェントがコミュニケーションに与える影響と、話題の文化的な傾向の違いとの関係に着目し、次のように予想した。

1. 安全な話題を提供するエージェントがいる環境では、エージェントがいない環境に比べ、参加者はより満足感を覚え、自分が会話相手とより似通っていると感じ、会話や会話相手をより望ましいものと思い、互いの国民性をより良く認識する。
2. 危険な話題を提供するエージェントは人々に不快感を与えるが、安全な話題を提供するエージェントに比べて、参加者の会話をより有意義で興味深いものにする。

実験では、日本人とアメリカ人の学生に会話してもらう環境として、エージェントがいない環境、安全なエージェントがいる環境、危険なエージェントがいる環境、の3つを用意した。

4.2 実験の手順

実験は京都大学とスタンフォード大学の間で行われた。両大学間の通信には、1.5Mbpsの国際専用線を用いた。各大学で使用した機材は1台のPCとCCDカメラ、ヘッドセットである(図3参照)。



図3. 実験の様子(スタンフォード大学側)。

エージェントのいる環境では、ミーティング時間を4分ごとに分割し、5つの間隔それぞれにおいて1分間だけ沈黙を探して話題を提供するようにした。1分間の間に沈黙を発見できなかったときは、その時点で話題を提供するようにした。

スタンフォード大学側の被験者は、実験への参加が単位取得の条件の一つとなっている授業の受講者である学部生から集められた。京都大学側の被験者は京都市内の大学の学部生から集められ、謝金が支払われた。ミーティングでの会話は英語で行われるため、京都大学側ではある程度の英語能力を持つ

学生が参加した。実験の性質上、相手国に長く滞在したことのある者は除外した。合計90名の学生が参加した。各学生は相手国側の学生と同じ性別同士でランダムにペアを組み、3つの環境のいずれかにランダムに割り当てられ、1対1でのミーティングを20分間行った。

ミーティングの開始前に、実験はコミュニケーション環境のテストが目的であると参加者の学生に伝えた。そして、ミーティングの間は相手のことを何か聞いてみるなど、何でも好きなことを話してください、と参加者に説明した。また、システムの使い方を簡単に練習する時間を取った。ミーティングの間は、部屋に学生が1人である状態にした。全てのミーティングにおいて、京都大学側のコンピュータの画面を録画した。

ミーティングの後、参加者にWebページ上に作成したアンケートに答えてもらった。アンケートは日本語で書かれたものと英語で書かれたものの両方を用意した。英語で作成したものを日本語に翻訳し、それを再び英語に翻訳して意味の対応が正確かどうかを確かめた。アンケートは、会話、会話相手、エージェントに関する質問を含んでいる。また、一般的に知られている偏見に関係する形容詞を用いて、自分自身と日米双方における典型的な人物像を評価する質問も含めた。日本人学生からは45、アメリカ人学生からは43のアンケートデータを収集した。

4.3 分析結果

4.3.1 安全なエージェントがいる環境とエージェントがいない環境の比較

アメリカ人学生の反応: 安全なエージェントはアメリカ人学生に肯定的な影響を与えた(表1参照、全ての項目は8段階であり8が最高)。

表1. アメリカ人学生から得たアンケートデータについて、安全なエージェントのいる環境とエージェントのいない環境をt検定で比較した結果(* $p < .05$, ** $p < .05$, *** $p = .01$)。

変数	(安全) 平均値	(無し) 平均値	t 値 (df=24)
会話に自信	6.46	5.54	-2.33**
自分は傲慢	4.00	4.92	2.03*
自分は控えめ	3.61	5.00	2.52**
相手は信頼できる	6.54	5.91	-2.46**
日本人は創造的	5.38	4.54	-2.06*
日本人は友好的	5.92	5.23	-2.08**
日本人は感情表現豊か	3.15	4.23	2.75***

1 会話中の自分に良い印象を持った

安全なエージェントがいる環境では、自分自身に対してより確信が持て、より傲慢ではなく、より

控え目ではなかったと評価した。

- 1 会話相手に良い印象を持った
安全なエージェントがいる環境では、会話相手がより信頼できた。

- 1 日本人への偏見は緩和した
安全なエージェントがいる環境でミーティングをした参加者は、典型的な日本人について、より創造的で友好的な評価をした。しかしながら、より感情表現が豊かでないと評価した。(日本人に対するアメリカ人の偏見は、創造的でなく、友好的でなく、感情表現が豊かでない、というものである。)

日本人学生の反応: 日本人学生はアメリカ人学生と異なり、安全なエージェントのいる環境では会話や会話相手に対してより否定的な印象を持った。しかしながら、自分と会話相手はより似通っていると感じた(表2参照)。

表2. 日本人学生から得たアンケートデータについて、安全なエージェントのいる環境とエージェントのいない環境を t 検定で比較した結果(*p=.05, **p<.05, ***p=.01, ****p<.01, *****p=.001, *****p<.001)。

変数	(安全) 平均値	(無し) 平均値	t 値 (df=26)
会話が危険	3.29	2.24	-2.05*
会話が不快	5.14	2.71	-3.9*****
会話を続けたい	4.86	7.07	3.55*****
会話に満足	4.79	6.14	2.32**
自分はごまかしが多い	5.86	4.71	-2.09**
自分は静か	4.68	3.36	-2.08**
相手はおしゃべり	5.00	4.07	-2.06**
相手は感情むき出し	2.21	1.50	-2.06**
相手は魅力的	6.00	6.78	2.47**
相手はアメリカ人的	5.22	6.14	2.26**
相手は自分に似通っている	5.28	4.21	-2.20**
アメリカ人は競争的	6.57	5.00	-2.40**
アメリカ人は傲慢	6.07	3.36	-4.44*****
アメリカ人はわがまま	6.14	4.93	-2.26**
アメリカ人は感情むき出し	6.79	5.86	-2.21**

- 1 会話に悪い印象を持った
安全なエージェントがいる環境では、会話に対してより危険でより不快であると評価した。また、より会話を続けたく無く、より満足しなかった。

- 1 自分の行動に悪い印象を持った
安全なエージェントがいる環境では、自分自身をよりごまかしが多く、より静かであると評価した。

- 1 会話相手には複雑な印象を持った
安全なエージェントがいる環境では、会話相手のアメリカ人学生に対してよりおしゃべりで、より感情むき出しで、より魅力的でないと評価した。

(アメリカ人に対する日本人の偏見は、おしゃべりで感情むき出しというものである。) 同時に、より典型的なアメリカ人ではなく、自分自身に似通っていると評価した。

- 1 アメリカ人への偏見は悪化した
安全なエージェントがいる環境でミーティングをした参加者は、典型的なアメリカ人について、より競争的で、傲慢で、わがままで、感情むき出しであると評価した。(これらは全て、日本人から見たアメリカ人への偏見である¹⁵⁾。)

安全なエージェントに対する反応が、日本人学生とアメリカ人学生で非常に異なるものとなった。安全なエージェントのいる環境では、日本人学生は会話相手が自分に似通っているとより強く感じたにもかかわらず、会話に対して否定的な印象を持った。この理由の1つとして、エージェントの発言が英語でなされていたことが考えられる。日本人学生にはアメリカ人学生とエージェントが同じグループに思え、会話を1対2で行っているように感じられたのかもしれない。また別の理由として、気まずい沈黙が起こっていない時にエージェントが2人の参加者に接近し、会話を中断してしまうことがしばしばあったことが考えられる。これによって、日本人学生が会話に不満感を抱いてしまったのかもしれない。

4.3.2 安全なエージェントがいる環境と危険なエージェントがいる環境の比較

- 1 危険な話題は気まずいが面白い
ミーティングの様子を録画したビデオを観察して、会話中の沈黙の回数を数えたところ、危険なエージェントがいる環境の方が回数が多かった(平均値 3.09(安全), 4.34(危険), $t(56)=-3.06$, $p<.01$)。しかし沈黙が多いにも関わらず、危険なエージェントのいる会話をアメリカ人学生はより面白いと感じ、日本人学生はより快適で、より続けたいと感じた(表3及び表4参照)。

- 1 会話相手のアメリカ人学生は危険なエージェントがいると悪く見える
危険なエージェントがいる環境では、日本人学生は会話相手に対して、自分により似通っておらず、より他人への思いやりがなく、より傲慢で、より友好的でなく、よりおしゃべりではないと評価した。この結果から、危険なエージェントの方が日本人学生の会話相手に対する印象をより悪くすると言える。

- 1 危険な話題は日本人学生をアメリカ人学生のように振る舞わせる

危険なエージェントのいる環境で会話した日本人学生は、自分自身をより控え目ではなく、よりへり下っておらず、より集団指向ではないと評価した。これらは全てアメリカ人に対する日本人の偏見である。危険なエージェントがいる環境では、アメリカ人学生は会話相手をより自分自身に似通っていると評価した。これは日本人学生の自己評価を裏付けている。

表 3. 日本人学生から得たアンケートデータについて、安全なエージェントのいる環境と危険なエージェントのいる環境を t 検定で比較した結果(*p=.05, **p<.05, ***p=.01, ****p<.01, ^p=.056)。

変数	(安全) 平均値	(危険) 平均値	t 値 (df=26)
会話を続けたい	4.86	6.21	-2.00^
会話が不快	5.14	3.57	2.41**
自分をごまかしが多い	5.86	4.64	2.03*
自分は控えめ	5.43	3.79	2.37**
自分はへりくだる方	5.54	4.07	2.33**
自分は集団指向	4.00	2.64	2.34**
相手は自分に似通っている	5.29	3.64	2.58**
相手は思いやりがある	7.31	5.93	3.02****
相手は傲慢	1.14	2.07	-2.43**
相手は友好的	7.29	6.14	2.31**
相手はおしゃべり	5.00	3.79	2.14**
アメリカ人は傲慢	6.07	5.00	2.26**
エージェントと親しくしたい	3.43	5.29	-2.25**
エージェントは有能	4.29	5.57	-2.04*
エージェントは日本的	4.50	3.43	2.71**
エージェントはおしゃべり	5.61	4.36	2.66***
エージェントは国家主義的	1.43	3.29	-2.87***

1 提供する話題の違いが偏見に及ぼす影響は矛盾した

危険なエージェントのいる環境で日本人学生は、典型的なアメリカ人はより傲慢ではないと評価した。これは日本人学生による会話相手の傲慢さへの評価と食い違っている。アメリカ人学生の典型的な日本人に対する評価も矛盾した。危険なエージェントのいる環境では、アメリカ人学生は典型的な日本人について、より感情表現が豊かであり、より社交的で、よりおしゃべりであると評価し、同時によりごまかしが多く、より静かであるとも評価した。

1 2つのエージェントの違いに対する反応が日本人学生とアメリカ人学生で異なった

アメリカ人学生は危険なエージェントに対して、より適切でなく、より無愛想で、より傲慢で、より控え目でなく、より友好的ではないと評価した。

また、その振る舞いは典型的なアメリカ人により似通っていないと答えた。日本人学生は危険なエージェントに対して、より親しくしたくなり、より有能であると評価した。ところが、その振る舞いは典型的な日本人により似通っておらず、よりおしゃべりでないと答えた。また、危険なエージェントが政治的な話題を提供したためか、より国家主義的であると日本人学生は評価した。

表 4. アメリカ人学生から得たアンケートデータについて、安全なエージェントのいる環境と危険なエージェントのいる環境を t 検定で比較した結果(*p=.05, **p<.05, ***p=.01, ****p=.001)。

変数	(安全) 平均値	(危険) 平均値	t 値 (df=24)
会話が興味深い	5.85	6.77	-2.18**
相手が自分に似通っている	3.31	4.77	-2.55**
日本人は感情表現豊か	3.15	4.15	-2.16**
日本人は社交的	4.08	4.77	-2.04*
日本人はおしゃべり	3.77	4.85	-2.30**
日本人はごまかしが多い	3.85	4.85	-2.39**
日本人は静か	6.00	4.38	2.82***
エージェントは無愛想	4.69	7.36	-3.84****
エージェントは傲慢	3.38	5.25	-2.31**
エージェントは控えめ	3.15	1.92	2.52**
エージェントは友好的	5.46	4.08	2.03*
エージェントはアメリカ人的	6.62	4.92	2.40**

5. 異文化間コミュニケーション実験で得た教訓

刺激的な話題は有効である: 実験結果は、安全な話題を提供した場合でも危険な話題を提供した場合でも、共通基盤の形成を助けることができることを示している。日本人学生の参加者は危険な話題を好んだし、アメリカ人学生も危険な話題の方をより興味深いと感じた。会話の流れに合わせて安全と危険両方の話題を提供するのが良いのではないだろうか。各利用者に適した振る舞いをするべきである: 2つの文化的に異なるグループは、同じエージェントの振る舞いに対して異なる反応を見せた。例えば、危険なエージェントに対して、両国どちらの学生も自国の人々には似通っていないと答えたが、アメリカ人学生は無愛想で友好的でないと思ったのに対し、日本人学生は親しくしたくなり、有能であると思った。また、エージェントの発言が英語であったために、日本人学生にはあまり受け入れられなかった可能性がある。各グループまたは各個人のインタラクション様式や好みに応じて、行動パターン、提供する話題の傾向、使用言語などを変えた方が良いと言え

る。

エージェントの行動が利用者の行動に影響を与える：両国の学生とも、危険なエージェントのいる環境では日本人学生はよりアメリカ人風に振る舞ったと答えている。この結果は、エージェントの特徴をうまく選択することで、会話環境の雰囲気や利用者の行動パターンを左右できることを示している。エージェントをある特定の会話グループに合うようカスタマイズすることで、そのグループに合った会話の雰囲気を仮想空間内に醸し出し、共通基盤の形成を促すことができるかもしれない。

6. おわりに

人間同士のコミュニケーションを促進するインタフェースエージェントを設計した。プロトタイプを用いた異文化間コミュニケーション実験は、共通基盤の形成においてエージェントの有効性を示すとともに、これからの開発にとって興味深い課題が得られた。仮想空間でのコミュニティ形成が広がるにつれ、このようなエージェントが仮想空間内にいることが一般的になっていくのではないだろうか。

今後エージェントに音声認識の機構を付加し、進行中の会話内容に関係のある話題を提供できるようにする予定である。また話題の提供機能に加えて、新しくやって来た参加者を既にあるグループにうまく引き入れてやる機能などを追加する予定である。

謝辞 実験に使用する広帯域国際専用線を提供していただいた NTT GEMnet 関係各位に感謝致します。また、実験に協力していただいたスタンフォード大学の Eva Jettmar 氏に感謝致します。

参考文献

- 1) Lea, R., Honda, Y., Matsuda, K. and Matsuda, S.: Community Place: Architecture and Performance, *Symposium on Virtual Reality Modeling Language (VRML'97)*, pp.41-50 (1997).
- 2) Sugawara, S., Suzuki, G., Nagashima, Y., Matsuura, M., Tanigawa, H. and Moriuchi, M.: InterSpace: Networked Virtual World for Visual Communication, *IEICE Transactions on Information and Systems*, E77-D(12), pp.1344-1349 (1994).
- 3) Waters, R.C. and Barrus, J.W.: The Rise of Shared Virtual Environments, *IEEE Spectrum*, Vol.34, No.3, pp.20-25 (1997).
- 4) Hagsand, O.: Interactive Multiuser VEs in the DIVE System, *IEEE MultiMedia*, Vol.3, No.1, pp.30-39 (1996).
- 5) Greenhalgh, C. and Benford, S.: MASSIVE: A Collaborative Virtual Environment for Teleconferencing, *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, Vol.2, No.3, pp.239-261 (1995).
- 6) Han, J. and Smith, B.: CU-SeeMe VR Immersive Desktop Teleconferencing, *International Conference on Multimedia*, pp.199-207 (1996).
- 7) Clark, H.H.: *Using Language*, Cambridge University Press (1996).
- 8) Lester, J.C., Barlow, S.T., Converse, S.A., Stone, B.A., Kahler, S.E. and Bhogal, R.S.: The Persona Effect: Affective Impact of Animated Pedagogical Agents, *International Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI-97)*, pp.359-366 (1997).
- 9) Cassell, J., Bickmore, T., Billinghurst, M., Campbell, L., Chang, K., Vilhjalmsson, H. and Yan, H.: Embodiment in Conversational Interfaces: Rea, *International Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI-99)*, pp.520-527 (1999).
- 10) Isbister, K. and Doyle, P.: Touring Machines: Guide Agents for Sharing Stories about Digital Places, *Workshop on Narrative and Artificial Intelligence in AAAI Fall Symposium Series* (1999).
- 11) Foner, L.: Entertaining Agents: A Sociological Case Study, *International Conference on Autonomous Agents (AGENTS-97)*, pp.122-129, (1997).
- 12) Isbister, K. and Hayes-Roth, B.: Social Implications of Using Synthetic Characters, *Workshop on Animated Interface Agents in IJCAI-97*, pp.19-20 (1997).
- 13) Takeuchi, A. and Naito, T.: Situated Facial Displays: towards Social Interaction, *International Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI-95)*, pp.450-455 (1995).
- 14) 西本一志, 間瀬健二, 中津良平: グループによる発散的思考における自律的情報提供エージェントの影響, *人工知能学会誌*, Vol.14, No.1, pp.58-70 (1999).
- 15) Hall, E.T. and Hall, M.R.: *Hidden Differences: Doing Business with the Japanese*, Reprint edition, Anchor Books, (1990).
- 16) Nakanishi, H., Yoshida, C., Nishimura, T. and Ishida, T.: FreeWalk: Supporting Casual Meetings in a Network, *International Conference on Computer Supported Cooperative Work (CSCW-96)*, pp.308-314 (1996).
- 17) Nakanishi, H., Yoshida, C., Nishimura, T. and Ishida, T.: FreeWalk: A 3D Virtual Space for Casual Meetings, *IEEE MultiMedia*, Vol.6, No.2, pp.20-28 (1999).
- 18) Hall, E.T.: *The Hidden Dimension*, Doubleday, (1966).
- 19) Reeves, B. and Nass, C.: *The Media Equation: How People Treat Computers, Television, and New Media Like Real People and Places*, Cambridge University Press (1996).

マルチエージェントシステムによる避難シミュレーション

Evacuation Simulation by using Multi-agent System

南一久^{*1} 村上陽平^{*1} 河添智幸^{*1} 石田亨^{*1}
Kazuhisa Minami, Yohei Murakami, Tomoyuki Kawasoe, Toru Ishida

^{*1} 京都大学 大学院 情報学研究科 社会情報学専攻
Department of Social Informatics, Kyoto University

Abstract: The traditional simulators adopted numerical analysis, such as objective information based on human positions, and did not consider social interactions. Then, we introduce social interactions with the platform software using as the evacuation simulator, and try to make an evacuation simulator closer to human evacuation action in real spaces. The described model is based on the evacuation experiment in the real space. In this experiment, effects of two evacuation methods were compared. And, we simulate evacuation based on this interaction description. Consequently, we can show the result of this simulation like as the experiment in the real spaces.

1. はじめに

近年、マルチエージェントシステムを用いた研究が経済現象や交通流のシミュレーションなどで行われている。従来のような全体をモデル化して行ったシミュレーションを用いれば、実際の結果と同様な振る舞いを視覚的に表示することが出来る。しかし、これは客観的に見た実際の振る舞いをコンピュータ上で表現しただけに過ぎず、このようなシミュレーションから得られるものは、どのような建物の構造が群集の動線の流れをスムーズにするのかといった建築空間の安全性の点検など、群集に与える建物の影響だけであった。つまり、このような従来のシミュレーションでは、実際には起こっているであろう群集内での知的な社会的インタラクションを無視し、群衆という一つの単位で個々の振る舞いを覆い隠していた。

このため各避難者が他の避難者や誘導者といった周囲の状況と、どのような方針でどのようにインタラクションを行い避難しているのか、またどのインタラクションが避難行動の速さに最も影響を与えているのかという人間集団の行動を知ることは出来ない。しかしながら、本来であれば建物の構造による避難行動への影響だけでなく、避難者への誘導といった、群集内の個々の間で発生するインタラクションをも考慮し避難行動の改善を行わなければならないはずである。

そこで本稿では従来の手法とは異なり、マルチエージェントシステムを用いることで、各避難者と誘導者の振る舞いを記述し、1988年に行なわれた避難誘導に関する統制実験のシミュレーションを行い比較する。実際にはインタラクション記述言語 Q [石田 2002]により避難行動の際に人がとりうるであろう行動を記述し、 Q 言語を実装したマルチエージェントシミュレータ上で、実際の実験との比較を行った。そして、その避難行動中に行われるインタラクションの解明を目指した。

我々はこのシミュレーションの結果により、

1. 多数のエージェントを含む効率よいシミュレータの構築
2. 行動主体の何をどこまで記述すべきかを明らかにすること
3. シミュレーション結果から何が学べるのかを示すこと

という三つの研究目的を明らかにする。今後はエージェントだけではなく人もアバターとして三次元仮想空間に登場させることで、実際に避難訓練を行うことを目標としている。仮想空間内で避

難訓練を行うことは、訓練を行う空間や設備を用意するためのコストを低減し、その上、阪神大震災に挙げられるような過去の災害状況を再現することも可能とする。また、同時にインターネットも用いることで、多くの人の参加も可能となる。

最終的には、京都駅の仮想空間モデルを利用し、100人のアバターと1000体のエージェントによる避難訓練を行う予定である。

2. 避難シミュレータ

2.1 マルチエージェントシミュレータ

従来のシミュレータでは、各行動主体に意思はなく、系全体の振る舞いを記述することで、避難開始と同時に一斉に最短距離で出口へ向かうといった物理的な人の動きだけを考慮していた。その人の動きは位置情報による数値計算から求められており、避難者の発話や誘導者の指示といった、実際の避難時に起こり各人に影響を与えるインタラクションを無視し、人間同士の相互作用はあくまで物理的な相互作用のみを取り扱っていた [Okazaki 1993]。

しかし、実際の避難状況においては、誰かの叫び声が聞こえれば、声の聞こえる方には避難しなくなり、声やジェスチャーによる指示があれば、避難経路を変更することも考えられる。つまり、従来のシミュレーションでは無視していた社会的インタラクションが、実際には避難行動の決定に重要な影響を与えている。実際に我々は、磁気モデルを利用した従来のシミュレーションにより研究をすすめていた京都大学建築科の岡崎研究室と1998年から共同研究を始め、三次元仮想空間における社会的インタラクションが与える影響を現在も引き続き調査している [中西 2001]。

そこで我々は、避難行動とは個々の人間がそれぞれ自分の意志に基づいてとりうる行動であると考え、エージェントの動きを一元的に扱う従来のシミュレータではなく、個々のエージェントが個々の状況に応じて、環境とインタラクションをとることができるマルチエージェントシステムを利用し、FlatWalk や FreeWalkV4 といったツールを開発した。またこれらのツールでは、個々のエージェントの振る舞いを、インタラクション設計言語 Q を用いて記述し、個々を集合させることでエージェント群全体の振る舞いをシミュレートしている。以下では開発したツールの説明とインタラクション設計言語 Q について説明を行う。

連絡先: 情報学研究科 社会情報学専攻 石田研究室 〒606-0801 京都市左京区吉田本町 工学部 10 号館, Tel: 075-753-4820, yohei@lab7.kuis.kyoto-u.ac.jp

2.2 FlatWalk と FreeWalk

実際に本稿で用いたツール FlatWalk は、インタラクション記述を元に仮想環境内に生成した複数のエージェントを並列制御することが出来るマルチエージェントシミュレータであり、scheme によって作られている(図 1 参照)。Q 言語処理系の母言語と同じ言語であるため、各エージェントの内部情報表示機能等の追加が容易に行うことができ、さらに系全体の動きを把握する事も可能である。また二次元におけるシミュレータであるため、人間が入ることは出来ず、エージェントによるシミュレーションを行うのみである。

一方、京都大学石田研究室の中西氏によって開発された FreeWalk[Nakanishi 1996]は、三次元仮想環境とビデオ会議システムを組み合わせたコミュニケーション環境である。最新の FreeWalkV4 では、VRML で記述された仮想空間を表示し、またジェスチャー機能も取り入れており、エージェントはより多岐にわたるインタラクションをとることが可能となっている(図 2 参照)。また FlatWalk と同様に、エージェントの振る舞いはインタラクション設計言語 Q により記述されている。FlatWalk との決定的な違いは三次元空間を利用しているため、アバターを操作することで人もエージェントと同一の環境に入ることが可能な点である。よって、ただシミュレーションを行うだけでなく、実際に避難訓練を行うことも可能である。

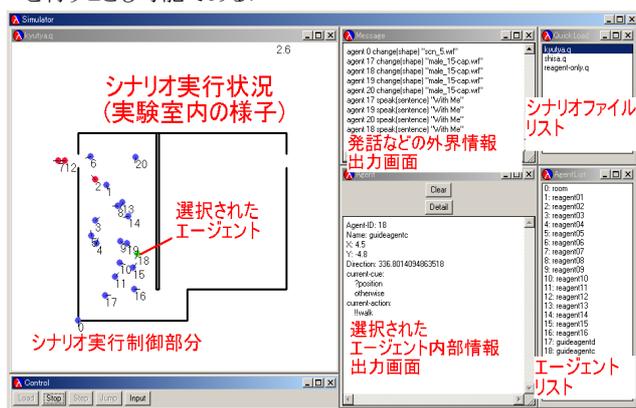


図 1: FlatWalk の概観



図 2: FreeWalkV4 の概観

2.3 インタラクション設計言語 Q

インタラクション設計言語 Q とは、エージェントの行動一つ一つの側面を表しているルールと、どの状態でどのルールが実行可能なのか、どの状態へ遷移するのかという一連の処理の流れを表しているシナリオの二つの部分から成り立っている。またシナリオ内では、guard 文の導入により外界からの観測を並行に

○インタラクション記述におけるルール例

避難時に誘導員が行う行動

(?避難者を見かける)(!その人を誘導する)

キュー アクション

キュー: 外界からの観測 <条件部>

アクション: 外界への作用 <実行部>

インタラクション記述におけるシナリオ例

誘導員シナリオ

(実験開始状態

(?!サイレンが聞こえる)(!帽子を被る)(go 誘導開始状態))

ルール 次状態へ遷移

...)

(誘導開始状態

(?!避難者を見かける)(!その人を誘導する))

...)

並行動作

(!「付いてきてください。」と避難者に話す)

(?!避難経路の歩行を開始する)

(guard

(?!誘導対象者が離れる)(!近くに来るまで待つ) ...)

(?!声をかけられる)(!「付いてきてください」と話す)...))

歩行中の並行観測

図 3: インタラクション設計言語 Q の述例例

行うことができ、さらに!!という記号の導入によりあるアクションの実行中に並行して外界からの観測を行うことが出来る。図 3 に避難訓練時における誘導員の行動の一例を示す。

3. 避難シミュレーション

誘導法には大きく分けて 2 種類ある。一つは指差誘導と呼ばれ、避難時に誘導者が、「出口はあちらです。あちらに逃げて下さい」と大声で叫ぶとともに、出口の方を指し示す誘導法である。もう一方は、吸着誘導と呼ばれ、誘導者が自分のごく近辺にいる少数の避難者に対して、「自分についてきて下さい」と働きかけ、少数の避難者を実際にひきつけて避難する誘導法である。これらの誘導法が避難誘導においてどのような有効性をもつかを比較した実験がある[杉万 1988]。その再現を FlatWalk 上で試みた。

3.1 1988 年:杉万統制実験

杉万実験の目的は異なる誘導法の効果を比較することであり、それぞれの誘導法により 16 人の避難者を誘導する。およそ 10メートル四方の実験室で、避難者の近くにある出口 A ではなく、避難者からは直接見ることが出来ない出口 B へと誘導し、避難完了時間により、各々の誘導法の有効性を調べている(図 4 参照)。実験は(吸着と指差誘導の 2 通り)×(誘導員数を 4 名と 2 名の 2 通り)=計 4 通りで行った。実験結果は、2 名吸着は全ての避難者を誘導したい出口から脱出させることが出来なかった。また、それ以外の誘導では、全ての避難者の誘導に成功し、避難が早く完了した順は 4 名吸着、2 名指差、4 名指差の順であった。この実験結果により、吸着誘導の有効性が認められた。我々は本稿において、この実験をモデルとして、避難誘導シミュレーションを行った。

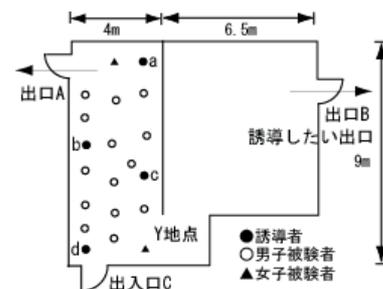


図 4: 実験現場の平面図及び避難開始前前の誘導者と被験者の配置 ([杉万 1988]より引用)

3.2 シナリオ作成プロセス

1) 論文からのルール抽出

避難誘導シミュレーションを行うに際し、各誘導員エージェント、避難者エージェントに与えるべきシナリオを[杉万 1988]による記述からルールの抽出を行い作成した。

ここで抽出された、各誘導員と避難者エージェントにおける主なインタラクション記述を以下に示す。指差誘導による各誘導員シナリオは約 200 行、10 ルール、吸着誘導による各誘導員シナリオは約 300 行、11 ルール、避難者は約 600 行、18 ルールから成り立っている。

a) 指差誘導員シナリオ

- 誰かを見かければ、大声を出しつつ、出口を指差す
- 違う方向にいる人を見れば、正しい出口に誘導する
- 近くの避難者が移動すれば、自身も避難を開始する
- 動かない人がいれば、呼びかける

b) 吸着誘導員シナリオ

- 避難開始と同時に、誘導者に一番近い避難者を探し出し、その避難者を出口まで連れて行く
- 誘導している人が離れれば、その人が近づくまで待つ
- 誘導している人が近づいてくると、誘導を再開する
- 誘導している人を見失えば、周りを見渡し、新たに誘導すべき避難者を見つける
- 誘導者自身が出口に着くまで、上記の作業を繰り返す

c) 避難者シナリオ

- 近くの出口を目指して移動する
- 誘導員の指示に従い、避難する
 - 指差誘導では、誘導員が指差した方向へ移動する
 - 吸着誘導では、誘導員の後ろに付いていく
- 誘導員の指示がない場合、避難者自身が判断し避難

2) インタビューとビデオ解析からのルール抽出

しかしこのシナリオでは、吸着誘導と指差誘導に差異がみられなかった。本来実世界においては、「火災などの危険の知覚から脱出行動の開始までに脱出所要時間の 3 分の 2 が消費され、残りが脱出行動に費やされる傾向がある」[釘原 1995]とされているのに対し、今回のシナリオでは全くそのような状況が反映されず、誘導員の発話がきっかけとなって、避難訓練開始直後から避難者は行動を行っていた。これは[杉万 1988]による記述に基づいて、誘導員の指示に従うことを主体としたインタラクション記述を行っていたためである。



図 5：誘導実験の様子
奥の出口へと指差し誘導が実行されており、手前では吸着誘導が実行されている

そこで、我々は集団行動時のインタラクション記述が不足していると考え、吸着誘導法と指差誘導法を用いた誘導実験のビデオ解析を行った(図 5 参照)。その中では誘導員の指示を優先し、それに従い避難する人は存在したが、同時に誘導員の存在に気付いても、誘導員の指示に従わず、群衆の動きに注意を払う避難者も存在した。これは全くの予想外の行動であり、避難者によって、避難を行うための優先順位が異なることが判明した。つまり、避難者に応じて、異なるシナリオを用いる必要があり、また集団行動において周囲の群衆との社会的インタラクションを追加する必要があることが分かった。特に、周囲の人に付いていくことが重要と考え、誘導員でなくても近くにいる避難者にも着目することで一種の同調行動を記述した[Milgram 1969]。具体的には

- 多くの人がいるところへ、移動する
- 周りが動いていなければ、動かない
- 近くの人が動き出したら、付いていく

などというインタラクションを取り入れ、避難者のシナリオを重点的に修正した。また、誘導員に積極的に従うタイプと周囲の避難者の動きと同調するタイプと、避難時の優先順位が異なる 2 つのシナリオを用意し、避難者エージェントにランダムに半数ずつ適用した。

さらに、避難誘導実験を行った杉万氏へのインタビューにより、論文には記述されていない実際の実験現場における視界の悪さ、群衆の過密度、音の反響といった知見を得た。我々は以上の実験現場の環境にも着目し、

- ある一定距離以内で誘導員の指差が見えれば、その指差に従う
(人の過密により誘導員の指差を確認できないため)
- 同時に複数の発話による指示を聞いたときは、その指示を無視する
(音の反響により正確に指示を理解できないため)

などというインタラクションを避難者エージェントのシナリオに追加した。

これらの修正を施したシナリオを用いて、再度行ったシミュレーションの結果を次節で説明する。

3.3 2002 年:マルチエージェントシミュレーション

再度行ったシミュレーションの実行結果は図 6 に示した通りである。このグラフは、避難開始から時間の経過と共に、出口 B に脱出した避難者の推移を示したものである。

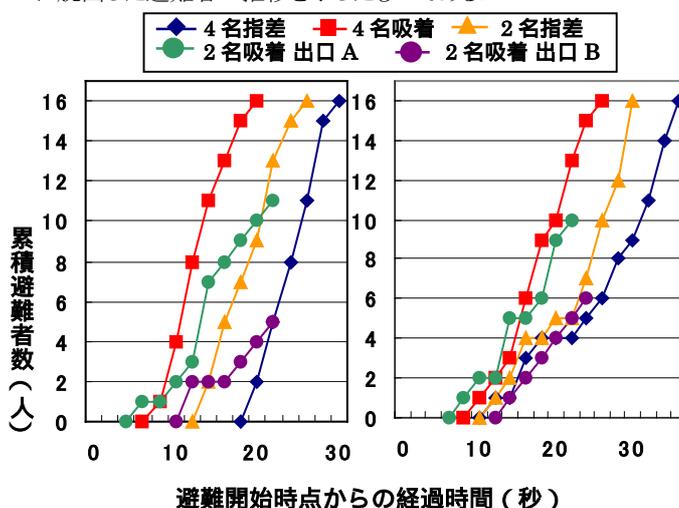


図 6：杉万実験(左)と避難誘導シミュレーション(右)における避難開始時点からの時間経過ともなう累積避難者数の推移の比較

実際の実験結果の解析から得た、空間状況による影響や避難者間の集団行動を考慮したシナリオを用いることで、今回のシミュレーションでは各誘導法別に以下のような避難行動の変化が観測された。

- 4名指差誘導法
同時に指示を聞いたときはその指示を無視するといった、音の反響を考慮したルールにより、修正前と比べて、誘導開始直後 4 秒ほどは複数の発声によりどの避難者も動くことができなくなった。
- 2名指差誘導法
4名指差誘導法の時と同様に、音の反響を考慮したルールが避難者の行動に影響を与えたが、誘導者が4名いる時と比べて、誘導者の数が少ないため発声が同時に行われることが少なく、初期動作の開始が4名指差誘導よりも早くなった。
- 4名吸着誘導法
周囲の人の移動に付いていくといった集団行動における同調行動を表すルールにより、誘導員の指示を受けなかった避難者の初期動作も早くなった。
- 2名吸着誘導法
4名吸着誘導法の時と同様に、集団行動における同調行動を表すルールが避難者の行動に影響を与えたが、4名吸着誘導の場合と異なり誘導者の数が少なかったため、誘導員の存在に気づかず間違った出口の方から脱出を試みた避難者に、他の複数の避難者が追従した。

結果として2名吸着の場合のみ誘導すべき出口からの誘導に失敗したが、その他の誘導方法では目的の出口から誘導させることに成功し、また、避難の完了順も4名吸着、2名指差、4名指差の順であった。これは先述した誘導実験と同様の結果であり、実際の実験を再現することができた。

4. 考察

今回の避難シミュレーションでは、系全体の挙動をモデル化しシミュレーションを行うのではなく、個々のエージェントの振る舞いを記述する、マルチエージェントシステムを用いてシミュレーションを行ったため、我々は当初[杉万 1988]による記述から推測される避難者、誘導者の振る舞いをシナリオとして記述することで、杉万実験を再現することが可能であると考えていた。

しかし、実際に記述から抽出したインタラクションを利用しシナリオを作成しても、実世界における実験結果とは異なる結果となり、実験者へのインタビューやビデオ解析といった実世界における実験結果を解析することで再現することが可能となった。

上記のことから我々は以下の三点について考察を行った。

- 実世界からのフィードバック
実世界における実験結果をシミュレーションにより再現するには、実世界における実験結果からのフィードバックが必要不可欠である。今回用いたマルチエージェントシステムによるシミュレータでは、系全体ではなく該当する箇所のシナリオを書き換えることで、実験結果の解析から得られた知見をシミュレーションに容易に反映することができる。
- 実世界へのフィードバック
実世界からのフィードバックを受け、実世界の実験結果をシミュレーションにより再現するだけでは、シミュレーションを行う意義が薄れていく。そこで我々は、実世界から得た知見をシナリオにフィードバックし洗練することで、実世界で実験されていない環境もしくは実験できない状況設定でそのシナリオを利用し、その結果を実世界にフィードバックすることができる。

- シナリオ記述の可読性
実世界で実験されていない環境でシミュレーションを行うために、洗練されたシナリオを利用したとしても、防災研究者や社会心理学者といったエンドユーザがシナリオを理解することができなければ、人間集団の行動を解析することができず、シナリオの正当性を確認できない。そこでどのようなシナリオが利用されているのかが分かりやすく表示される必要がある。我々は現在、シナリオから抽出されたパターンをカード化し、そのカードの空欄への入力や複数のカードを組み合わせることで、エンドユーザにとって理解しやすい表示もしくはシナリオ作成ツールを開発中である。

5. おわりに

本稿では、当初掲げた研究目的を以下のようなアプローチで達成することができた。

1. 多数のエージェントを並列に制御実行できるシミュレータ FlatWalk の構築
 2. 実際に行われた杉万実験の FlatWalk 上での再現
 3. 実際の結果の解析によるフィードバックの重要性
- このような研究目的の達成に伴い、FlatWalk の新たな位置付けとして、以下の二点を考えている。
- 実験結果の解析から得られた知見の検証ツール
 - 防災研究者や社会心理学者といったエンドユーザとのメディア

前者は、知見を検証しながら、作成したシナリオを洗練していくという側面を持ち、後者は洗練されたシナリオの記述をわかりやすく表示するとともに、実際にそのシナリオ記述を視覚化することで、議論の活性化を促すものと考えている。

今後は、FlatWalk と実社会の相互間のフィードバックにより洗練されたシナリオが、避難行動時のモデルとみなされ、どれだけ避難時の人の行動を解明することに貢献できるのかを検討していきたい。

参考文献

- [石田 2002] 石田 亨, 福本 理人: インタラクション設計言語 Q の提案, 人工知能学会論文誌, 17 巻 2 号, pp166-169, 2002.
- [Okazaki 1993] Okazaki, S. and Matsushita, S.: A Study of Simulation Model for Pedestrian Movement with Evacuation and Queuing, Proceeding of the International Conference on Engineering for Crowd Safety, pp.271-280, 1993.
- [中西 2001] 中西英之, 石田 亨, 鈴木利友, 岡崎甚幸: 3D 都市シミュレーション環境 FreeWalk, 情報処理学会シンポジウムシリーズ データベースと Web 情報システムに関するシンポジウム(DBWeb2001), Vol.2001, No.17, pp.313-322, 2001.
- [Nakanishi 1996] Hideyuki Nakanishi, Chikara Yoshida, T. N. and Ishida, T.: FreeWalk: Supporting Casual Meetings in a Network, International Conference on Computer Supported Cooperative Work (CSCW-96), pp.308-314, 1996.
- [杉万 1988] 杉万俊夫: 避難誘導法のアクションリサーチ, 応用心理学講座第 3 巻「自然災害の行動科学」第 8 章, 福村出版, pp.110-122, 1988.
- [釘原 1995] 釘原 直樹(編): パニック実験—危機事態の社会心理学, ナカニシヤ出版, 1995.
- [Milgram 1969] Milgram, S., Bickman, L. and Berkowitz, L.: Note on Drawing Power of Crowds of Different Size, Journal of Personality and Social Psychology, Vol.13, No.2, pp.79-82, 1969.

Meta-level Architecture for Executing Multi-agent Scenarios

Zhiqiang Gao¹, Tomoyuki Kawasoe¹, Akishige Yamamoto², and Toru Ishida³

¹ Department of Social Informatics, Kyoto University, Japan,
{gaoz, kawasoe}@lab7.kuis.kyoto-u.ac.jp

² Mathematical Systems Inc. Tokyo, Japan,
yamamoto@msi.co.jp

³ Department of Social Informatics, Kyoto University, Japan,
ishida@i.kyoto-u.ac.jp

Abstract. Scenarios, which constrain the behavior of agents, can be the interface between computer experts (agent system developers) and application designers (scenario writers), as well as the interface between scenario writers and agents. It raises a number of challenging issues to execute multi-agent scenarios: 1) *How can scenario writers generate customized scenarios easily?* 2) *How can scenario writers monitor and control scenario execution so as to debug errors in scenarios?* 3) *How can agents negotiate for scenarios to achieve robust behavior against scenario errors?* So, in this paper, we provide a *web style GUI* (Graphical User Interface) for scenario writers to customize scenarios. We propose a *meta-level architecture* for scenario writers to trace and control the execution of scenarios by observing scenarios, and for agents to negotiate with others as well as scenario writers for scenarios. The *meta-level architecture* is illustrated by an experimental multi-agent system of evacuation simulation.

1 Introduction

In order to bridge the gap between multi-agent technologies and their application, we introduce Q, a scenario description language, for designing interaction between agents and humans from the viewpoint of scenario writer [7]. Q does not aim at describing the internal mechanisms of agents, nor the communication and interaction protocols among agents [3,10]. Rather, it is for describing scenarios representing how humans expect agents to behave. Scenarios can also be the interface between application designers and computer experts. Figure 1(a) shows the relations among scenario writer, computer expert and agents. The procedure of creating a new scenario is described as follows. First, scenario writer and agent system developer agree upon *cues* and *actions* (sensing and acting functions of agents) as an interface between them, which are defined by scenario writers using *defcue* and *defaction* for each application. Second, the scenario writer describes a scenario using Q syntax, while the agent system developer implements *cues* and *actions*. The biggest effect of introducing Q is that

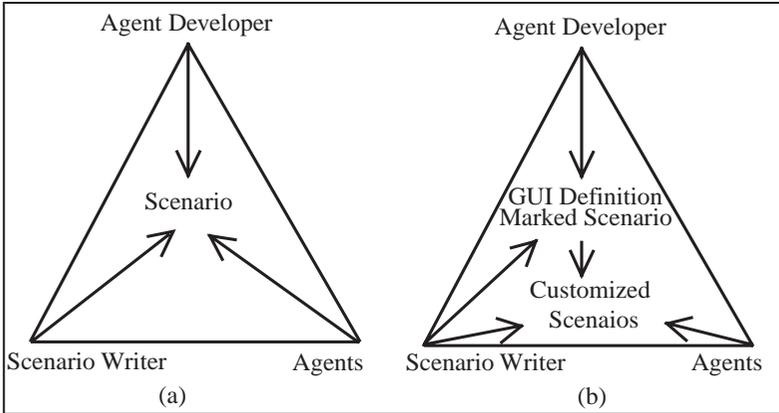


Fig. 1. Relations among scenario writer, computer expert and agents

it can provide a clear interface between computer professionals and application designers, who have totally different perspectives. Since it is developed, Q has been applied in several projects, such as information retrieval *Venus & Mars* [9], social psychological study of agents [5, 14], crossculture experiment *FreeWalk* and digital city [6, 7, 11].

Those who are not computer experts, such as sales managers, often write scenarios. Although they can write scenarios under the help of computer experts, the point is how to customize scenarios for open and dynamically changing applications. Multi-modal interface has made great progress recently [2, 12], however, it seems impossible to generate customized scenarios by gesture or conversation. Fortunately, what application designers often modify in domain specific applications are *the value of arguments in scenarios*, rather than *the sequence of cues and actions*. So, our approach is to provide a *web style GUI* for application designers to change the value of arguments.

A widely accepted methodology for multi-agent monitoring and controlling is that agents monitor the internal state and behavior of other agents as well as their interactions so as to complete tasks efficiently [1, 4]. However, in scenario execution, what scenario writer cares is how to make sure that scenarios are executed correctly, and to modify scenarios when errors are found. So, scenario writers have to trace the execution of scenarios, rather than the internal state of agents and their interactions.

Negotiation among agents for team working has been widely studied in the past decade, and a large number of communication protocols as well as interaction protocols are proposed [8, 13]. However, in scenario execution, the goal of negotiation is not for cooperation or competition, but for robustness of agents' behavior against scenario error. Negotiation does not happen at the meta-layer of agents, but between the meta-layer of Q and agents. Agents need not to communicate with each other frequently, because their strategies for collaboration are constrained by scenarios.

Table 1. Facilities of scenario description language Q

	Syntax	Example
Cue	(defcue name {(parameter in out inout)}*)	(defcue ?hear (:from in))
Action	(defaction name {(parameter in out inout)}*)	(defaction speak (:sentence in) (:to in))
Guarded Command	(guard {(cue {form})*}* [(otherwise{form})*])	(guard ((?hear "Hello" :from Tom) (!speak "Hello" :to Tom)) ((?see :south Kyoto-Station) (!!walk :to Bus-Terminl)))
Scenario	(defscenario name ({var})* (scene1{(cue{form})*}* [(otherwise{form})*]) (scene2{(cue{form})*}* [(otherwise{form})*]) ...)	(defscenario chat (message) (scene1 ((?hear "hello" :from \$x) (go scene2))) (scene2 ((equal? \$x Tom) (!say message)) (otherwise(!say "Hello"))))
Agent	(defagent name :scenario scenario-name {key value}*)	(defagent guide :scenario 'sightseeing)
Avatar	(defavatar name)	(defavatar 'Tom)
Crowd	(defcrowd name :scenario scenario-name :population number {key value}*)	(defcrowd pedestrian :scenario 'sightseeing :population 30)

So, the rest of this paper is organized as follow: we first introduce scenario description language Q, and discuss about the requirements for executing multi-agent scenarios. Then we provide a *web style GUI* for customizing scenarios, and propose a *meta-level architecture* for scenario monitor, control and negotiation. At last, we show how the *meta-level architecture* works by a multi-agent system for evacuation simulation.

2 Backgrounds

2.1 Scenario Description Language

We extend *Scheme* by introducing sensing/acting functions and guarded commands to realize scenario description language. A sensing function is defined as a *cue*. There is no side effect to sensing. An acting function is defined as an *action*, which may change the environment of agent system. Some *actions* allow other *actions* to be executed in parallel, which is noted as *!!walk*. This significantly extends the flexibility available to describe scenarios. A guarded command is used for when multiple *cues* are waited simultaneously. Each scenario defines

several states (*scene1*, *scene2*, etc). Each state is defined as just a guarded command. The scenario is written in the form of state transition. However, since any *Scheme* form can be called in state descriptions, any scenario can be called in *Scheme* forms and scenarios can be nested, it is easy to create fairly complex scenarios. Agents are defined with the scenario in which they are to be executed. Avatars controlled by humans do not require any scenarios. At times, the number of agents may be too numerous to deal with them individually, and it is more convenient to deal with them collectively as a society of agents. The facilities of Q language are summarized in table 1.

2.2 Requirements for Executing Multi-agent Scenarios

In order to execute multi-agent scenarios, a scenario *interpreter* is required to extract *cues* and *actions* from scenarios. Also, an *interface* is needed for requiring *cues* and *actions* and retrieving their execution results. Challenge to the *interpreter* is that the agent system may host a large number of agents. For example, in the virtual space platform of *FreeWalk*, more than 1000 agents operate independently at the same time. In order to control this parallelism, Q *interpreter* should execute 1000 scenarios simultaneously. So, we use *Scheme's continuation* to control process switching. The interface between scenario interpreter and agent system is implemented in COM and CORBA for standardization. However, there are much more requirements for executing multi-agent scenarios.

How Do Scenario Writers Generate Customized Scenarios? Multi-agent scenarios are not necessarily specified by computer professionals, and are instead often written by application designers such as sales managers, publicity officers, and social psychologists, who are not computer experts. So, the challenge is how to have ordinary people generate customized scenarios easily.

How Do Scenario Writers Monitor and Control Scenario Execution?

The *interpreter* and *interface* is good enough for running scenarios, if there are no errors in scenarios. However, there are often scenario errors, because error-prone human beings construct them. In addition, it is impractical to assign scenarios to agents, and agents execute them until they are finished. Because multi-agent systems are intrinsically dynamic: what an agent assumes to be true may become false as a consequence of the *actions* of other agents in the system. Therefore, scenario writers have to monitor the execution of scenarios, and change scenario execution when errors occur.

How Do Agents Negotiate for Scenarios? Scenarios assigned by humans may not match the goal of autonomous agents, and agents may not have the ability to execute certain *cues* or *actions*. Furthermore, in an open, complex and dynamic environment, agents have to adjust their goals, skip unachievable *cues/actions*, or modify the value of arguments frequently. So, we need a mechanism for agents to negotiate for scenarios at execution time.

3 Meta-level Architecture for Scenario Execution

3.1 Web-Style GUI for Customizing Scenarios

Two approaches have been made to simplify scenario writing for those who are not computer experts. One approach is to use the technology of IPC (Interaction Pattern Card) for those who are familiar with *MS Excel* to generate scenarios from cards. We think that each scenario, for example, scenario for fire drill, lecture or selling, has different interaction pattern. The format of the cards is defined according to these patterns, and humans can describe scenarios by filling in the blanks of cards and combining these cards.

Another approach is to provide *web style GUI* for scenario writers to generate customized scenarios. In the application of evacuation simulation [7], we have found that more than one hundred of parameters are specified in scenarios. For example, if an agent hopes to *walk to Kyoto station*, we have to specify its *walking speed, direction, acceleration, angle speed, angle acceleration, orientation of body, orientation of head, and so on*. So, it is rather difficult to customize scenarios. After the agents are re-designed, they can use default values of parameters and adjust these values under different situations, so the number of parameters is reduced greatly. Thus, on the basis of the simplified scenario, we implement a *web-style GUI* for scenario writers to customize scenarios.

The process for customizing scenario is as follow: scenario writer and computer expert cooperate to prepare a marked scenario, put @ mark before the atoms (*Scheme* object) need to be customized, and define a GUI structure by *defgui* syntax. Given both *defgui* definition and marked scenario, HTML form is calculated and displayed on web browser. Then scenario writer can input and submit the form. CGI engine written in *Scheme* parses the input, rewrites the scenario and start to execute the customized scenario. Figure 1(b) illustrates the process of generating multi-agent scenarios. Figure 2 presents an example of scenario customization.

3.2 Meta-level Architecture

A *meta-level architecture* is proposed to cope with the challenge issues for scenario execution discussed in section 2. *Q interpreter, controller, monitor and analyzer*, handle scenarios, as shown in Figure 3. When scenarios are given to a particular agent, a *Q messenger* is created and coupled with the agent system including the particular agent. The interaction between *Q messenger* and agents is divided into two layers: an *execution layer* and a *meta-layer*. In the *execution layer*, *Q interpreter* requires *cues* and *actions* to agent system, and retrieve their execution results. In the *meta-layer*, scenario writer monitors and controls scenario execution, and agents negotiate with others as well as humans for resolving scenario errors.

Monitor and Control of Scenario Execution by Scenario Writers. In order to find errors in scenarios, such as *an agent always collides onto the wall*,

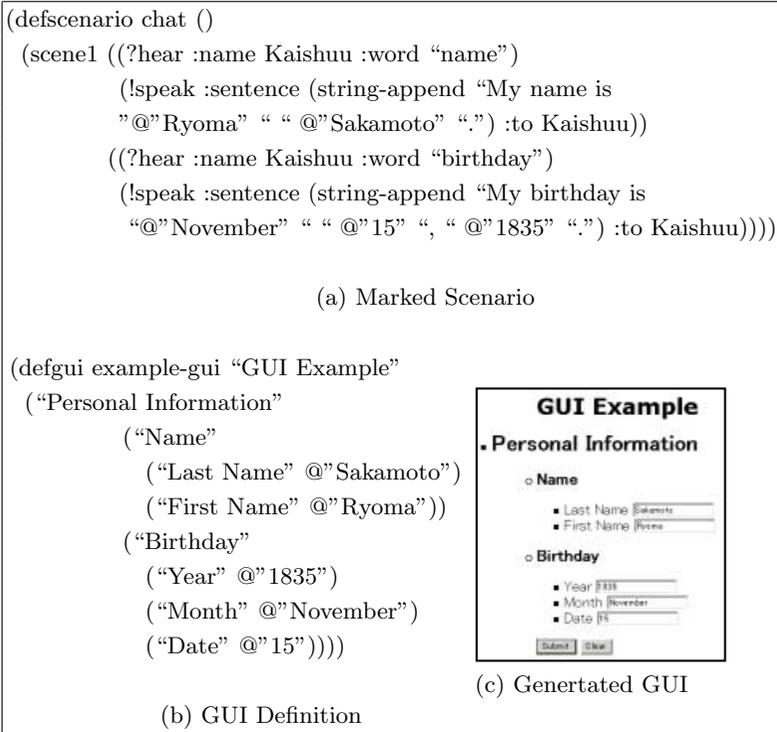


Fig. 2. Customizing scenarios by *web-style GUI*

scenario writers have to observe agent system at running time. They try to find which agent is executing which scenario, and which *cue/action* is being executed when errors occur. So, *monitor*, a component of *messenger*, is realized. Scenario writers choose the agent to be monitored from the menu item of *messenger* or by clicking right button of mouse in agent system. Then the name of agents and scenarios are shown in the title bar of the *monitor/controller* window. Execution history of scenarios is indicated by different background colors of *cues/actions* and ordinal numbers attached, as shown in Figure 4. Finished *cues/actions* are shown in yellow background, while the one being executed is shown in green. Ordinal numbers are attached to finished *cues/actions* to indicate their execution sequence.

Several control primitives are provided for scenario writers to debug errors and control scenario execution in emergency. They are *start*, *stop*, *suspend*, *resume*, *step-by-step*, *change scenario* and *add new scenario*. Facilities of the first four primitives are start, stop, suspend and resume the execution of scenarios, respectively. *Step by step* means after the execution of one *cue/action*, agents wait for further direction from scenario writers. Thus, scenario writers can debug scenario errors step by step. *Change scenario* means stopping execution of the original scenario, and starting a new one. Scenario writers use this facility to change scenario execution in emergency without negotiation with agents. *Add*

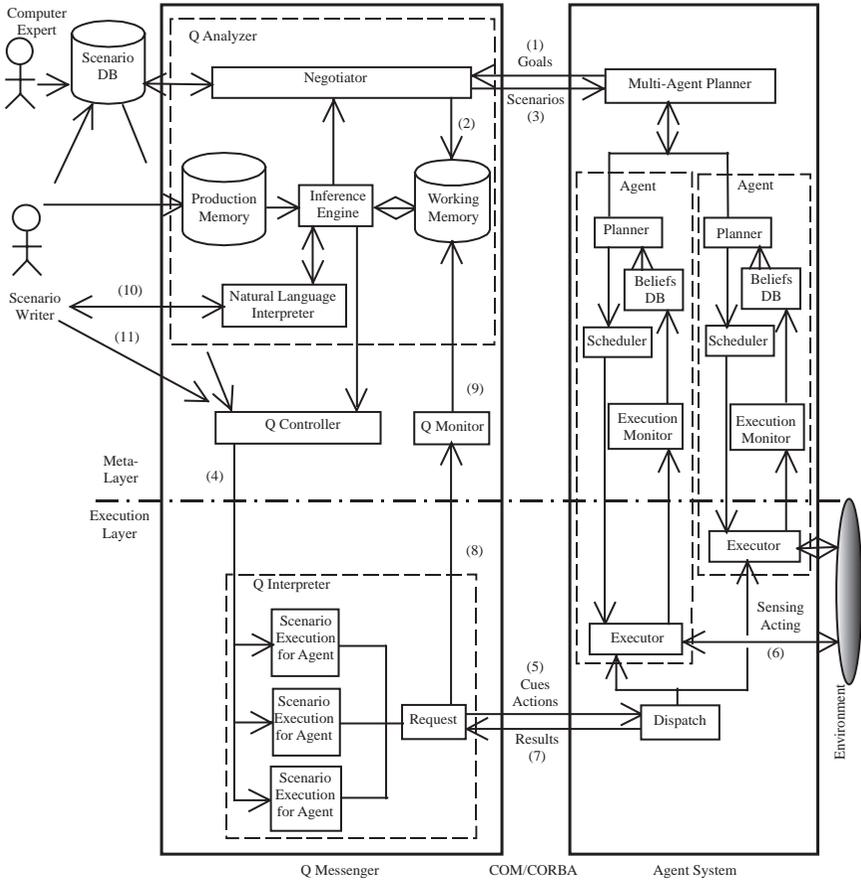


Fig. 3. Meta-level architecture for scenario execution

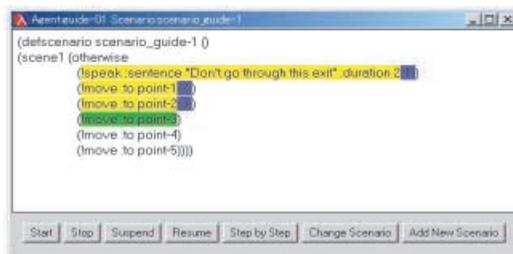


Fig. 4. Monitor and control of scenario execution by scenario writers

new scenario means starting the execution of a new scenario; meanwhile the original one is being executed concurrently.

Table 2. Different scenario errors found by agents and corresponding solutions

Scenario Errors	Solutions	
Scenario	Require for new scenario	Matching scenarios in scenario DB
		Decomposition or merging scenarios
		Negotiation with agents
	Require for changing scenario execution	Autonomous behavior
		Rules in production memory
Conversation with scenario writers		
Cue/Action	Autonomous behavior	
	Rules in production memory	
	Conversation with scenario writers	
Argument	Autonomous behavior	
	Conversation with scenario writers	

Negotiation for Scenarios among Agents and Scenario Writers. Negotiation happens when agents, not scenario writers, find scenario errors. For example, *in an information retrieval scenario agents may fail to connect to certain web site at execution time*. Agents might resolve scenario errors autonomously, or inform scenario messenger to change scenario execution according to rules stored in *production memory*. Agents might also start negotiation with others or conversation with scenario writers. Scenario errors are classified into three levels, which are scenario level, *cue/action* level and argument level. If the goal of an agent is changed, the agent requires for new scenario or changing execution of the original one. *Negotiator*, other agents or scenario writers might satisfy scenario requirement. Scenario error at *cue/action* level might be caused by that agents have not inherently the ability, or its precondition is not satisfied due to the change of internal state of agents or environments. Thus, agents send requirements to scenario writer for further direction, such as skipping it or waiting until its precondition is satisfied. Scenario error at argument level happens when an agent intends to modify the value of arguments. Possible scenario errors and corresponding solutions are summarized in Table 2.

In order to communicate with scenario messenger and other agents, the message format has to be specified. Because agents can interpret *cues/action*, so our approach is to use *action*-like messages for scenario negotiation, which are classified into inform, require, reply and accept. Some examples are given below.

```

INFORM
(!inform-scenario :for 'stop|start :agent agent
                  :scenario scenario)
(!inform-cue-action :for 'skip|wait :agent agent
                   :scenario scenario :cue-action cue-action)
(!inform-argument :for value :agent agent :scenario scenario
                  :cue-action cue-action :argument argument)

```

```

      REQUIRE
(!require-scenario :for scenario :agent agent :goal goal)
(!require-scenario :for 'start|stop|pause|resume
      :agent agent :scenario scenario)
(!require-cue-action :for 'skip|wait :agent agent
      :scenario scenario :cue-action cue-action)
(!require-argument :for value :agent agent :scenario scenario
      :cue-action cue-action :argument argument)
      REPLY
(!reply-scenario :for scenario :by agent :to agent :goal goal))
      ACCEPT
(!accept :scenario scenario :agent agent)

```

Agents interact only for scenarios, and the semantics of *action*-like message is self-explained, so no negotiation protocol is needed. For example, if an agent requires for a new scenario, it sends the requirement to Q *messenger*. According to rules stored in *production memory*, the requirement is sent to other agents, who may provide one scenario. At last the agent accepts the scenario and Q *messenger* starts its execution. An example of negotiation for scenarios between two agents are given below.

```

Agent A: (!require-scenario :for 'scenario :agent Agent-A
      :goal 'visit Kyoto")
Agent B: (!reply-scenario :for 'sight-seeing :by Agent-B
      :to Agent-A :goal 'visit Kyoto")
Agent A: (!accept :scenario 'sight-seeing :agent Agent-A)

```

A conversation interface is provided for scenario writers to interact with agents to resolve scenario errors. During the conversation, agents use *action*-like utterances, which is easy to be understood by scenario writers. Meanwhile, Scenario writers use natural language, which is translated into *action*-like utterances by *natural language interpreter*. Utterances committed by scenario writers are about agents, scenarios, *cues/actions* and arguments, and might fall into a fixed format, such as which agent executes which scenario. So simple patterns exist that indicate key pieces of information to fill in templates of scenario execution control task. Therefore, We define the patterns of utterances to identify different slots in the template, as shown in Figure 5. If the utterance of scenario writers is abbreviated, such as only one verb phrase of *stop* or noun phrase of *Kyoto Station* appears, then the context knowledge of agents' utterance is used to fill in the template slots. Exmaples of conversation are given below.

```

Agent: (!require-scenario :for 'stop :agent Agent
      :scenario 'sight-seeing)
Human: (!command :level 'scenario :for 'stop
      :agent Agent :scenario 'sight-seeing)
Agent: (!require-cue-action :for 'skip|modify
      :agent Agent :scenario 'sight-seeing)

```

```

:cue-action '(!walk :to Kyoto-Station))
Human: (!command :level 'cue-action :for 'skip
:agent Agent :scenario 'sight-seeing
:cue-action '(!walk :to Kyoto-Station))
Agent: (!require-argument :for value
:agent Agent :scenario 'sight-seeing
:cue-action '(!walk :to Kyoto-Station)
:argument 'to)
Human: (!command :level 'argument :for
'Bus-terminal :agent Agent :scenario
'sight-seeing :cue-action '(!walk :to
Kyoto-Station :argument 'to)

```

AGENT	e.g., guide-01
SCENARIO	e.g., sight-seeing
CUE/ACTION	e.g., (!walk : to Kyoto-station)
ARGUMENT	e.g., to
ARGUMENT VALUE	e.g., Kyoto-station
COMMAND NAME	e.g., stop, skip, wait, modify

(a) Template of utterances

- (1) AGENT start|stop|pause|resume SCENARIO
- (2) AGENT stop|skip|wait CUE|ACTION in SCENARIO
- (3) AGENT modify|change value of ARGUMENT as ARGUMENT VALUE in CUE|ACTION of SCENARIO

(b) Examples of utterance pattern

Fig. 5. Template and patterns of utterances for scenario writers to control scenario execution

3.3 Sequence of Scenario Execution

Let us assume a simple case, in which computer expert and scenario writer have created a set of scenarios, and one of which is called *go-to-Kyoto-statio*. An agent, named *Judy*, now wants to go to Kyoto station, and it has the capability of speaking, hearing, walking, taking the train, and taking the bus, etc. (1) The *planner* of *Judy* notifies the *planner* of multi-agent system, and the latter advertises *Judy*'s goal to *Q analyzer*. (2) *Q negotiator* matches *Judy*'s goal by searching in scenario DB, and then obtains the scenario *go-to-Kyoto-station*. (3)

Q *negotiator* sends scenario *go-to-Kyoto-station* and a list of *cues/actions* to *Judy*. *Judy* checks them with its goal and ability, and then adopts the scenario. (4) Q *analyzer* sends a command to Q *controller*, and the latter starts to execute scenario *go-to-Kyoto-station*, which is actually interpreted and executed by Q *interpreter*. (5) Corresponding *cues* and *actions* in scenario *go-to-Kyoto-station* are sent to *request* of Q *interpreter*. (6) *Judy* gets *cues* and *actions* from *dispatch* of agent system, and executes them by sensing and acting, provided they are not conflict with its schedule. (7) Executing results including scenario errors are sent back to *request*, and Q *interpreter* continues executing the scenario. (8) Meanwhile, executing results are also sent to Q *monitor* for Q *analyzer* to monitor scenario execution (9) Scenario errors are put on *working memory* of Q *analyzer*, and corresponding actions are taken by *inference engine*, such as to communicate with scenario writer. (10) Conversation between scenario writer and agents is started through *natural language interpreter*. (11) Scenario writer can even control scenario execution directly by using Q *controller*. The scenario execution sequence is shown in Figure 3.

4 Experiments on Meta-level Architecture by Evacuation Simulation

Evacuation simulation can be created by having pedestrian agents act as humans running around trying to escape. Such simulation results will help a crisis management center accumulate experience and to make correct decisions, since simulations exhibit the mistakes typical of humans. Before tackling large space, such as Kyoto station, we conducted more restricted experiments, which shows 2D simulation of how humans behave when a crisis occurs in a small room. It is the virtual evacuation space designed for the study of evacuation method [15].

4.1 Procedure of Experiment and Scenarios for Agents

We take the experiment of *Four-leader Follow Directions* to evaluate the *meta-level architecture*, which could be summarized as: Subjects and leaders entered the experimental room through Exit C, as shown in Figure 6. All lights in the basement suddenly turned off, and loud emergency alarm sounded for 20s. After the alarm had finished alarming, Exits A and B were opened from the outside. The leader at Point A called out “Don’t go through this exit”, while standing in the way of subjects who were trying to leave through Exit A. Subsequently, the leader at Point B called out “Go in that direction”, while pointing at point P1 with a waving arm. Leaders at Points C and D then began to call out the same phrase, while pointing toward Exit B. Thereafter, all of the leaders proceeded toward Exit B while calling out directions so that all of the subjects escaped by following their direction. Figure 6(a) shows the arrangement of leaders and evacuees at the beginning of evacuation. Figure 6(b) presents the positions and directions of different agents during evacuation simulation.

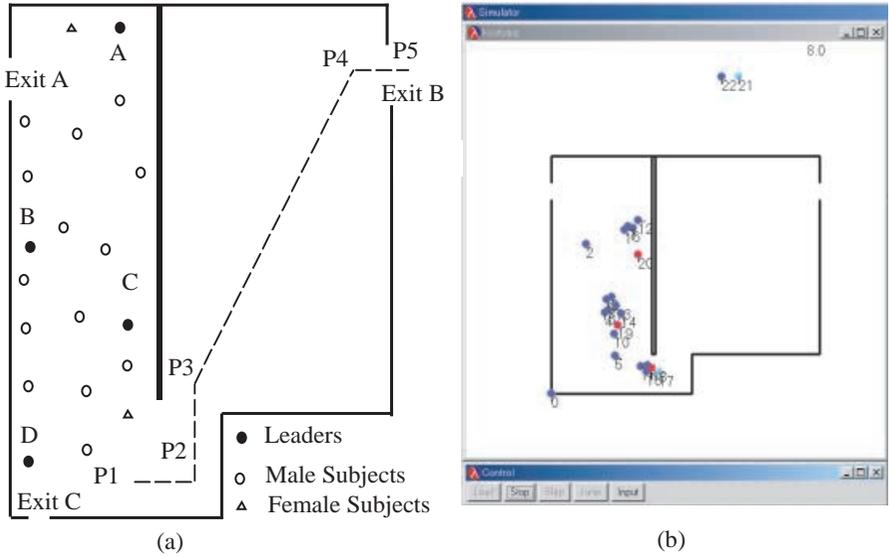


Fig. 6. Evacuation simulation with multi-agents

In order to simplify scenario writing, we first write a scenario *scenario-escape-to-Exit-B*, which provides a course of walking actions to escape to Exit B. Scenario *scenario-leader-1* is designed for the leader at point A, who speaks “Don’t go through this exit” just after the experiment starts. Scenarios for leaders at point B, C and D are omitted in this paper, and scenario *scenario-subjects* is assigned to subjects. Examples of scenario definition are given below.

```
(defscenario scenario-escape-to-Exit-B()
  (scene1(otherwise
    (!move :to Point-1)(!move :to Point-2)
    (!move :to Point-3)(!move :to Point-4)
    (!move :to Point-5))))
(defscenario scenario-leader-1()
  (scene1 (otherwise
    (!speak :sentence ‘‘Don’t go through this exit’’ :duration 6)
    (scenario-escape-to-Exit-B self))))
(defscenario scenario-subjects()
  (scene1 ((?hear :sentence ‘‘Go in that direction’’
    (scenario-escape-to-Exit-B self)
    (otherwise (go scene1))))))
```

4.2 Test for Meta-level Architecture

The first test is designed for scenario writers to find errors in scenarios and modify it. Scenario *move-around-Exit-A* is assigned to subject *female-01*, which cannot find scenario errors by itself or under the help of other agents. During evacuation simulation, scenario writers find out that *female-01* always moves around Exit A, and cannot get out of the room. He clicks on it, and Q *monitor* shows that *female-01* is executing the scenario *move-around-Exit-A*. So, scenario writer assigns correct scenario *escape-to-Exit-B* to it by using the button of *change scenario*.

The second test is designed for agent to modify scenario errors autonomously through negotiation with others. Scenario *move-around-Exit-C* is assigned to *male-04*. After the error is found by it, agent *male-04* sends “(!require-scenario :for scenario :agent male-04 :goal “escape to Exit B”)” to Q *messenger*. *Working memory* of Q *analyzer* gets this message and broadcasts it to all leaders. Agent *leader-01* replies with “(!reply-scenario :for 'scenario-escape-to-Exit-B :by leader-01 :to male-04 :goal “escape to Exit B”)”). *Male-04* then accepts the scenario and Q *interpreter* starts its execution.

So, the requirements for executing multi-agent scenarios are satisfied by the *meta-level architecture*. However, performance of the *meta-level architecture* is not evaluated in this experiment. we have used legacy systems, such as *FreeWalk* and *Microsoft Agent* to validate multi-agent scenario execution in real applications, and the *execution layer* works well in these systems after the legacy agents are *wrapped* to be scenario enabled. However, the *meta-layer* has not yet been tested in real applications.

5 Conclusions

In this paper, we have introduced Q, a scenario description language, for designing the interaction between agents and humans from the viewpoint of scenario writers. Q does not aim at describing the internal mechanisms of agents, nor the communication and interaction protocols among agents. Rather, it is for describing scenarios representing how humans expect agents to behave. Scenarios can be the interface between application designers and computer experts. After they agree upon *cues* and *actions*, scenario writers describe scenarios using Q syntax, while agent system developers implement *cues* and *actions*. So, Q provides a clear interface between computer professionals and application designers, who have totally different perspectives.

In order to execute multi-agent scenarios, we have realized scenario *interpreter*, which extracts *cues* and *actions* from scenarios and retrieves their execution results from agent system. COM/CORBA are used as the *interface* between Q *messenger* and agent system. Two approaches have been made to simplify scenario writing, IPC for those who are familiar with *MS Excel*, and a *web style GUI* for customizing scenarios. Because there may exist errors in scenarios, and multi-agent systems are intrinsically dynamic, a *meta-level architecture* is pro-

posed for scenario writers to debug errors and agents to negotiate for scenarios. Contributions of this paper are summarized as:

(1) We have developed a *web-style GUI* for scenario writers to generate customized scenarios easily. Combining marked scenarios and GUI definition generates HTML forms for scenario writers to input. After scenario writer submits the input, the CGI engine written in *Scheme* parses the input, rewrites the scenario and begins to execute it.

(2) A *meta-level architecture* for scenario execution has been proposed, with which scenario writers can monitor and control scenario execution to debug scenario errors. When they find errors in agent system, scenario writers can get scenario execution history by different background colors of *cues/actions* and ordinal numbers attached. Scenario writers can debug scenario errors step by step and change scenario execution by control primitives of *start, stop, suspend, resume, step by step, change scenario and add new scenario*.

(3) With the *meta-level architecture*, agents can resolve scenario errors robustly by negotiation with others and conversation with scenario writers. Scenario errors are classified into scenario, *cue/action* and argument levels. Requirement for new scenarios might be satisfied by matching scenarios stored in *scenario DB*, decomposition and merging available scenarios, or negotiation with other agents who have local knowledge. A conversation interface is provided for scenario writer to negotiate with agents to tackle scenario errors at *cue/action* level and argument level. Agents use *action*-like messages to negotiate for scenarios, and scenario writers use natural language to commit commands. Utterance template and patterns are used to interpret the intention of scenario writers.

References

1. Bojinov, H., Casal, A., Hogg, T.: Multiagent Control of Self-reconfigurable Robots. In Proceedings of Fourth International Conference on Multiagent Systems (ICMAS 2000). pp143-150, 2000
2. Cassell, J., Bickmore, T., Billinghurst, M.: Embodiment in Conversational Interfaces: Rea CHI-99. pp520-527, 1999
3. Finin, T., Fritzon, R., McKay, D., McEntire, R.: KQML as an Agent Communication Language. International Conference on Information and Knowledge Management (CIKM-94), 1994
4. Huber, M.J., Durfee, E.H.: Deciding When to Commit to Action During Observation-Based Coordination. In Proceedings of First International Conference on Multiagent Systems (ICMAS 1995). pp163-170, 1995
5. Isbister, K., Nakanishi, H., Ishida, T., Nass, C.: Helper Agent: Designing an Assistant for Human-Human Interaction in a Virtual Meeting Space. CHI-00, pp.57-64, 2000
6. Ishida, T., Isbister K. (ed.): Digital Cities: Experiences, Technologies and Future Perspectives. Lecture Notes in Computer Science, 1765, Springer-Verlag, 2000
7. Ishida, T., Fukumoto M.: Interaction Design Language Q: The Initial Proposal. Transactions of JSAI, Vol 17, No. 2, pp. 166-169, 2002
8. Jonker, C.M., Treur, J.: An Agent Architecture for Multi-Attribute Negotiation. In Proceedings of the Seventeenth International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI 01). pp.1195-1201, 2001

9. Kitamura, Y., Yamada, T., Kokubo, T., Mawarimichi, Y., Yamamoto, T., Ishida, T.: Interactive Integration of Information Agents on the Web. Klusch, M., Zambonelli, F. (ed.): Cooperative Information Agents V, Springer-Verlag, pp. 1-13, 2001
10. Kuwabara, K., Ishida, T. and Osato, N.: AgentTalk: Describing Multi-agent Coordination Protocols with Inheritance. IEEE Conference on Tools with Artificial Intelligence (TAI-95), pp.460-465, 1995
11. Nakanishi, H., Yoshida, C., Nishimura, T., Ishida, T.: FreeWalk: A 3D Virtual Space for Casual Meetings. IEEE Multimedia. Vol.6, No.2, pp.20-28, 1999
12. Oriatt, S.: Mutual Disambiguation of Recognition Errors in a Multimodal Architecture. CHI-99. pp576-583, 1999
13. Pitt, J., Mamdani, A.: A Protocol-Based Semantics for an Agent Communication Language. In Proceedings of the Sixteenth International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI 99). pp.486-491, 1999
14. Reeves, B., Nass, C.: The Media Equation: How People Treat Computers, Television, and New Media Like Real People and Places. Cambridge University Press, 1996
15. Sugiman, T., Misumi, J.: Development of a New Evacuation Method for Emergencies: Control of Collective Behavior by Emergent Small Groups. Journal of Applied Psychology, Vol. 73, No. 1, pp.3-10, 1988

Can Software Agents Influence Human Relations? - Balance Theory in Agent-mediated Communities -

Hideyuki Nakanishi^{1,2}, Satoshi Nakazawa¹, Toru Ishida^{1,2},
Katsuya Takanashi³ and Katherine Isbister⁴

¹Department of Social Informatics,
Kyoto University

²JST CREST Digital City Project
Kyoto 606-0801, JAPAN
+81-75-753-4859

{nakanishi, ishida}@i.kyoto-u.ac.jp
nakazawa@kuis.kyoto-u.ac.jp

³Communications Research
Laboratory

2-2-2 Hikaridai
Seika-cho Soraku-gun
Kyoto 619-0289, JAPAN
+81-774-95-2433

takanasi@crl.go.jp

⁴1904 23rd Street
San Francisco,
CA 94107, USA
+1-415-722-1945

ki@katherineinterface.com

ABSTRACT

We sought to create a social embodied conversational agent to support group interactions, using ‘balance theory’ from social science research on human-human relations. We conducted an experiment to evaluate the social ECA’s effectiveness in a group situation, depending upon how strongly it mediated the conversation among group members. First, we confirmed that it could win favorable feelings from subjects by showing an agreeing attitude to them and, conversely, unfavorable feelings by showing a disagreeing attitude. Next, we validated balance theory as a rule governing both agent-human relations and human relations if the social ECA highly mediated the conversation. We found that the social ECA’s effectiveness was very low if it did not control turn-taking, and if the human pair had a chance to converse extensively with one another. Conversation analysis corroborated these results.

Categories and Subject Descriptors

I.2.11 [Artificial Intelligence]: Distributed Artificial Intelligence; H.5.1 [Information Interfaces and Presentation (I.7)]: Multimedia Information Systems - *Artificial, augmented, and virtual realities.*

General Terms

Design, Experimentation, Human Factors

Keywords

Embodied conversational agents, social ECAs, balance theory, virtual environments, virtual communities, agent-mediated communities.

1. INTRODUCTION

Our research group is building embodied conversational agents (ECAs) to support human-human communication and relationship building in virtual environments. We have created an online digital city resource for real-life inhabitants of Kyoto, including virtual reproductions of parts of the city itself, which people can log into to explore and converse [7]. We believe ECAs can play important roles in this online community, providing assistance and information, helping to direct the flow of visitors to this online world, and assisting in making connections between these virtual Kyoto citizens. In online worlds, such agents can have special information and knowledge, and powers of movement and activity that can complement the abilities and powers of actual human visitors. We believe novel, blended interaction styles and relationships will form in these contexts. We call such environments ‘agent-mediated communities’. Within agent-mediated communities, we believe ECAs could be quite powerful—even going so far as to influence visitors’ opinions of one another as well as of the ECA.

Shared virtual environments with ECAs are becoming increasingly common (for a large-scale commercial example, see [11]), and we (and others-see [19]) see this as an important application area for ECAs. There is already evidence that non-embodied software agents that communicate with human users in text-chat virtual worlds are engaging [2]. Some would argue that ECAs could play a vital role in shaping community in online virtual worlds [8]. However, this belief presumes that ECAs can in fact be influential members of such communities.

Yet the ECAs’ effectiveness will depend upon their ability to work with visitors not just as individuals, but as members of conversational and other groups (such as crowds or tour groups), within the environment. Techniques for interacting with small or large groups socially can be very different than those used in one-on-one conversations and relationship formation. For example, an ECA might try to completely align its opinions with any individual it is working with, in a one-on-one situation. However, in a group, it needs to be careful of how it uses such agreement with each person, in order to preserve the harmony of the group, and avoid inconsistency or perceived favoritism. There are many findings of this nature in the social sciences, about the workings

Permission to make digital or hard copies of all or part of this work for personal or classroom use is granted without fee provided that copies are not made or distributed for profit or commercial advantage and that copies bear this notice and the full citation on the first page. To copy otherwise, or republish, to post on servers or to redistribute to lists, requires prior specific permission and/or a fee.

AAMAS’03, July 14–18, 2003, Melbourne, Australia.

Copyright 2003 ACM 1-58113-683-8/03/0007...\$5.00.

of groups. Developers of ECAs need to take these findings into account when designing for these contexts.

In our own efforts, we are focusing on crafting group interaction skills and competence for ECAs, so that they can have a role in supporting and sustaining human-human relations. We call an agent with such skills a social ECA. In this paper, we present preliminary studies that use principles from the study of group communication dynamics in the social sciences to craft charismatic and effective social ECAs.

2. SOCIAL EMBODIED CONVERSATIONAL AGENTS

2.1 Related Works

Much research has explored creating embodied conversational agents for one-on-one interaction applications, such as tutoring [9], training [17], and sales [1]. Less work has been done to investigate how best to create ECAs for group contexts. As far as documenting practical effectiveness of ECAs, there are as yet few results even in one-on-one application contexts (Lester et al's results are a notable exception [9]), and only one that we know of for group contexts [6].

There are, however, research findings about the general social effectiveness of one-on-one ECAs. People respond to the facial expressions, gaze, head movements, and gestures of agents as if they were human beings [1] [18]. There is a body of work (summarized in [16]) that demonstrates that people will respond similarly to characteristics (such as gender cues) and interpersonal tactics (such as flattery or reciprocity) coming from computers and ECAs as they do toward other people. Researchers have also demonstrated that people will behave in a familiar social science task (the prisoner's dilemma) with ECAs similarly to how they'll behave with a human partner in a videoconferencing system [14].

Our research follows this approach—building ECAs that use strategies and cues known to be effective in human interaction situations, and confirming their effectiveness in the agent-human interaction. We are interested in cues and tactics that enhance or dampen persuasiveness and charisma in our agents, in a group context.

2.2 What Makes a Persuasive and Effective Social ECA?

In an earlier study [6], we noticed an interesting effect—an ECA that made itself disagreeable to both conversation partners in a group (by bringing up an embarrassing subject), tended to cause them to have a more interesting and engaging experience, and to have more positive impressions of their conversation partner. Upon investigating the literature on impression formation, we learned of a social science theory that may help explain this effect, called balance theory. Balance theory, formulated by Heider [4], states that people prefer to have harmoniously aligned attitudes toward a third party or object. For example, if I dislike a third person, I will feel more in balance with you if you feel the same way toward this person. Such an alignment can cause the kinds of positive feelings and outcomes that we observed in this prior study, and is used in advertising contexts

to elicit positive impressions of products [15]. We felt this would be a helpful tactic for a social ECA to use in group situations, to drive human interaction partners toward forming particular impressions of one another, and of the agent itself.

We were also interested in what factors would affect the ability of the social ECA to influence people in this manner. In human conversation, a person's power in a group situation can be gauged by looking at how much he or she holds the conversation 'floor'. A person who maintains a higher degree of control over the interaction will tend to have more influence [13]. From this, we drew the conclusion that the more our social ECA could control the floor by mediating the conversation, the more effective it would be at driving peoples' impressions of it and of the other conversation partners. Conversely, allowing the human interaction partners to control the floor more would inoculate them against influence from the social ECA.

2.3 Our Hypotheses

We set up experiments to investigate whether we could replicate balance theory effects with our social ECA, and whether we could modulate the effects based on control of the conversation. Our hypotheses were:

1. A social ECA can create balance theory effects.
2. Widening the conversational channel (reducing the social ECA's mediation) between the human conversation partners will lessen the conversational control of the ECA, and correspondingly lessen its effectiveness.

In order to test hypothesis 1., we needed to be able to manipulate the participants' attitudes toward the social ECA, so that they could then be in alignment (or not in alignment). To do this, we manipulated whether the social ECA held the same opinion as the participant—a common and effective tactic in persuaders' attempts to influence [20]. Thus, we include two additional hypotheses:

3. A person will like the social ECA more if it shares his/her opinions, and will dislike it more if it does not.
4. A person will assume that his/her conversation partner likes the social ECA more if it shares that person's opinion, and will assume that s/he dislikes the social ECA more if it does not.

3. PROTOTYPE OF SOCIAL ECA

3.1 The Art of Agreement (or Disagreement)

In prior work, we developed a conversational mechanism through which a social ECA could build common ground among human conversationalists by highlighting agreement or disagreement among their opinions [6]. This social ECA was able to 'break the ice' among new conversation pairs using this technique. We adapted this social ECA's behavior repertoire to create our balance theory interactions.

In our experiments we created three types of social ECA behavior as shown in Figure 1. The agreeing ECA finds topics that people share opinions about, and expresses that same opinion. The disagreeing ECA finds such topics and expresses the opposite opinion. The unfair ECA finds a topic that people do

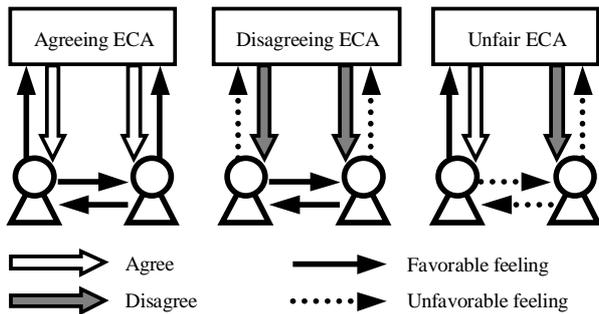


Figure 1. Three types of social ECAs and two humans

not see eye to eye on, and sides one way or the other between the participants, to create asymmetry. The idea of balance theory is that either consistent condition will create harmony for the human participants. If they both like the agent, everyone can feel part of a team with one another. If they both dislike the agent, the team just doesn't include the agent. However, if the agent agrees with one and disagrees with the other, it will pull them apart and cause less positive reactions. Since safe topics and even unsafe (embarrassing) topics could facilitate conversation in our prior work, we used both types of topics in our experiments. Favorite food is an example of safe topics and unsafe topics include opinions about social problems.

Pretests showed that, as in real life, an ECA that always agreed was a bit suspicious. Thus, in the agree and disagree conditions, we included a couple of counter-trend responses to make the social ECA's behavior more plausible.

In actual virtual environment contexts, social ECAs could use semantic web searches or other techniques to learn about the opinions and preferences of human visitors without even asking. Or, they could enquire tactfully of the participants during the encounter, and react accordingly.

In the present experiments, we used both methods in the low-mediation condition. We made use of a questionnaire given to participants beforehand, to find topics of agreement and disagreement. And also we used the conversation mechanism developed for our prior experiment to elicit opinions and adapted the social ECA's behavior accordingly.

3.2 Experiment Design

To test our hypotheses (listed in Section 2.3) about social ECAs and balance effects, we conducted an experiment in which the ECA's task was to interact with two people who were meeting for the first time, in a virtual environment. Figure 2 is a picture of the experimental setup, in the low-control condition (where participants could chat using audio and video). After participants completed their conversation, each filled out a questionnaire (items discussed in more detail below).

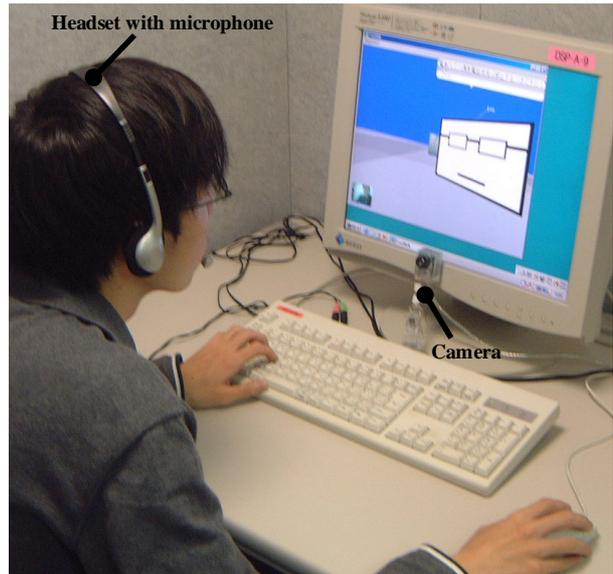


Figure 2. Experimental setup

We investigated two ways that the conversation channel could be reduced, using a two-factor, four condition (2x2) between-subjects experimental design. The first factor was whether the ECA controlled conversation or not. In the low-control condition, subjects could freely talk with one another through the video and voice communication channels of our virtual environment *FreeWalk* [12] during their virtual meeting with the ECA. In the high-control condition, participants could see each other, but could not talk with one another, and were simply participating in the menu-based question-and-answer conversations illustrated in Figure 3 and 4. The second factor was whether the ECA fully

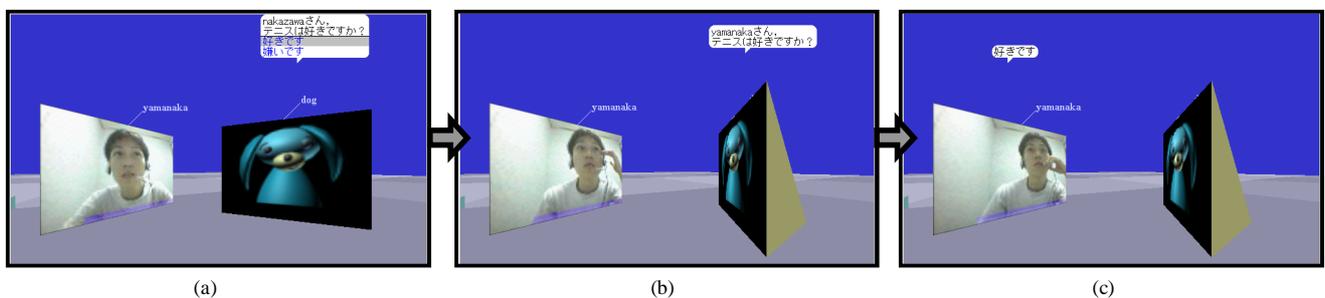


Figure 3. Low-mediation condition. (a) The ECA displays a balloon of the question to ask you, and you click one of the menu items displayed below the question to answer. (b) The ECA asks your partner. You can see the question balloon to know what question the ECA asks. (c) When your partner answers the ECA, you can see his answer in a small balloon.

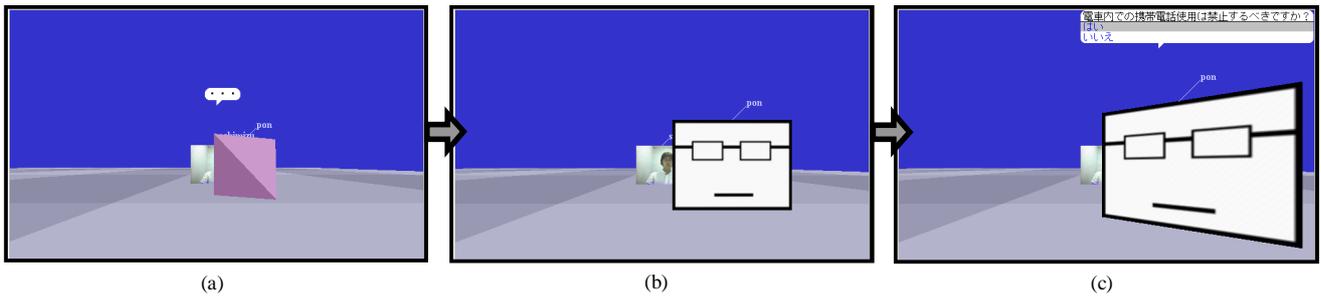


Figure 4. High-mediation condition. (a) The ECA talks to your partner. You can see that they are talking but cannot read the text in the balloons. (b) After the ECA finishes talking, it leaves from your partner and comes close to you. (c) The ECA begins talking with you. It asks you several questions.

mediated the conversation or not. In the low-mediation condition, the ECA formed a circle with the participants to be a member of their conversation group (see Figure 3—the ECA and other participant are facing this participant, who is answering a question from the ECA.). In the high-mediation condition, the ECA traveled between the participants to repeat a one-to-one interaction with each of them standing far from one another (see Figure 4). In this condition, agent-human conversations were hidden from the other person. In a follow-up conversation with another ECA that asked about feelings toward the ECA, participants then realized they either concurred or differed in their feelings toward the ECA, which were formed independently.

In each condition, balance theory effects were measured by how clearly the four balanced triads appear as shown in Figure 5. In this figure, ‘shared’ means that the subject and his/her partner

share feelings toward the agreeing or disagreeing ECA and ‘like’ means that the subject develops a favorable feeling toward the agreeing or unfair ECA. In the questionnaire, we asked subjects about the degree of similarity and attraction in their feelings toward their partner and the ECA, and also in their partner’s feeling toward the ECA. The similarity index includes questions asking how strong are ingroup and commonality aspects in these three feelings. The attraction index simply asks how likable and favorable are the feelings. Positive or negative trend in the feelings distinguishes the four triads. In the shared-like triad, every feeling is expected to be positive, while two of the three feelings are expected to be negative in the other triads. Thus, in each feeling, we have eight cells that are the two trends by the four conditions. A total of 185 university students (113 male and 72 female) participated in our experiment to provide twenty data sets for each cell (ten data sets for each triad in each condition). Figure 6 represents the whole design of the experiment.

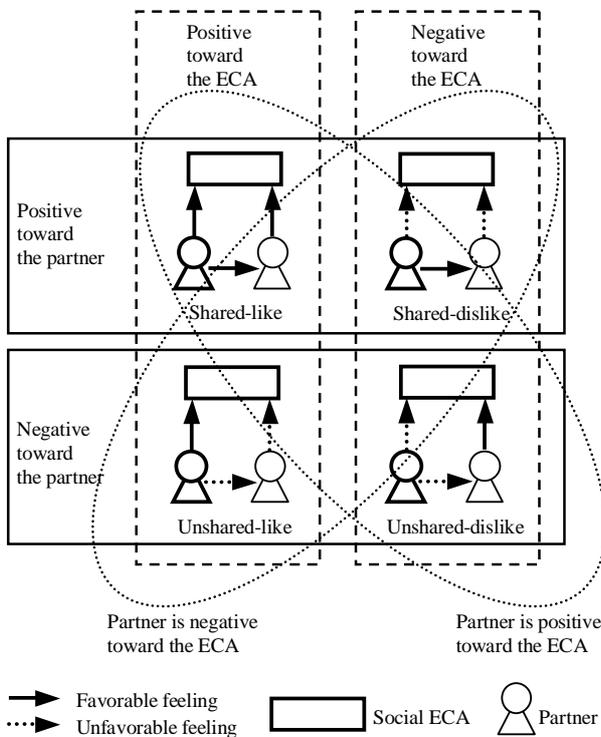


Figure 5. Four balanced triads

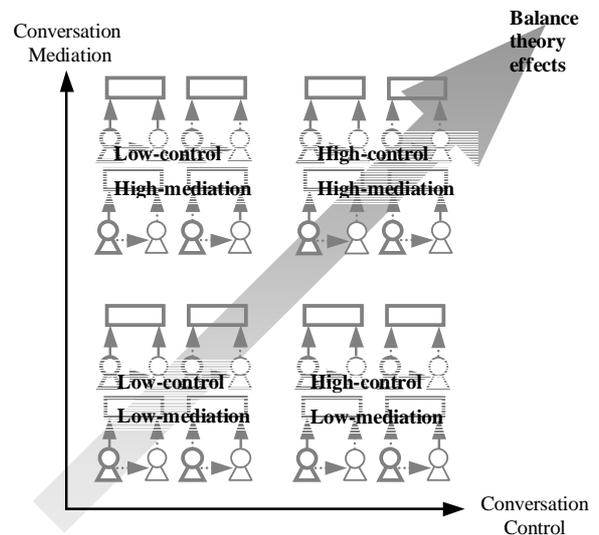


Figure 6. Design of the Experiment

4. RESULTS

4.1 Questionnaire Data

We ran statistical analyses of the effects of the three independent variables—level of conversation control (*Control*), the level of conversation mediation (*Mediate*), and the feeling trend predefined by the balanced triads (*Trend*)—on participants' answers to questionnaire items. Table 1 summarizes the main effect of *Trend* and how this interacted with the other two variables in the results of a 2x2x2 ANOVA. In this table, many significant differences were observed in the two indices of the three feelings. Since both the similarity index (Similarity) and the attraction index (Attraction) are formed by three questions, we confirmed their reliability by calculating *Cronbach's alpha* for each set of items, which are ranged from .76 to .95.

Table 1. Summary of three-way ANOVA

Feeling toward	Index	<i>Trend</i>	<i>Trend*Control</i>	<i>Trend*Mediate</i>
ECA	Similarity	146.9***	1.3	4.0*
	Attraction	25.5***	1.3	7.2**
ECA from the partner	Similarity	162.1***	0.6	0.1
	Attraction	36.0***	5.2*	4.7*
Partner	Similarity	17.1***	5.6*	1.9
	Attraction	7.4**	11.4**	0.5

* $p < .05$, ** $p < .01$, *** $p < .001$ ($df = 1, 72$)

Trend: feeling trend predefined by the balanced triads

Control: level of conversation control

Mediate: level of conversation mediation

4.1.1 A Social ECA Creates Balance Theory Effects

Significant differences found in all the six dependent variables of the main effect of *Trend* in Table 1 shows our social ECA could successfully influenced the subjects' feelings. All the means of the variables in Figure 7 are consistent with the balance theory.

- The ECA could win a favorable feeling from the subjects by agreeing with them and win an unfavorable feeling by disagreeing.

When the agreeing or unfair ECA agreed with a subject (the shared-like and unshared-like triads in Figure 5), he/she thought that the ECA was more similar ($F(1,72) = 146.9$,

$p < .001$) and more attractive ($F(1,72) = 25.5$, $p < .001$) to him/her.

- The ECA could make the subjects assume their partners' reactions to be the same way.

When the agreeing or unfair ECA agreed with the partner of a subject (the shared-like and unshared-dislike triads), the subject thought that the ECA was more similar ($F(1,72) = 162.1$, $p < .001$) and more attractive ($F(1,72) = 36.0$, $p < .001$) to his/her partner.

- The ECA could influence human relations among the subjects.

When the agreeing/disagreeing ECA agreed/disagreed with both of a subject and his/her partner (the shared-like and shared-dislike triads), the subject thought that the partner was more similar ($F(1,72) = 17.1$, $p < .001$) and more attractive ($F(1,72) = 7.4$, $P < .01$) to him/her.

4.1.2 Widened Conversation Channel and Reduced Mediation Lessens the Effects

Interaction between *Trend* and *Control* was found in the feeling toward the partner. This interaction plotted in Figure 8 shows that the ECA became less influential in human relations when it did not control conversation. When the subjects could talk with one another, similarity differences between the shared and unshared triads disappeared ($F(1,72) = 5.6$, $p < .05$) and attraction went up to the same high level ($F(1,72) = 11.4$, $p < .01$). This result demonstrates that human conversations can repair and improve their relations against the ECA's influence and conversation control contributes to keeping the influence.

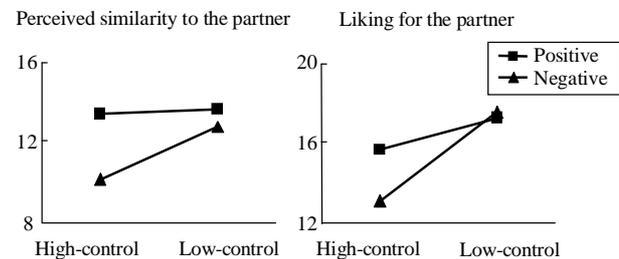


Figure 8. Interaction between *rend* and *ontrol* in the feeling toward the partner

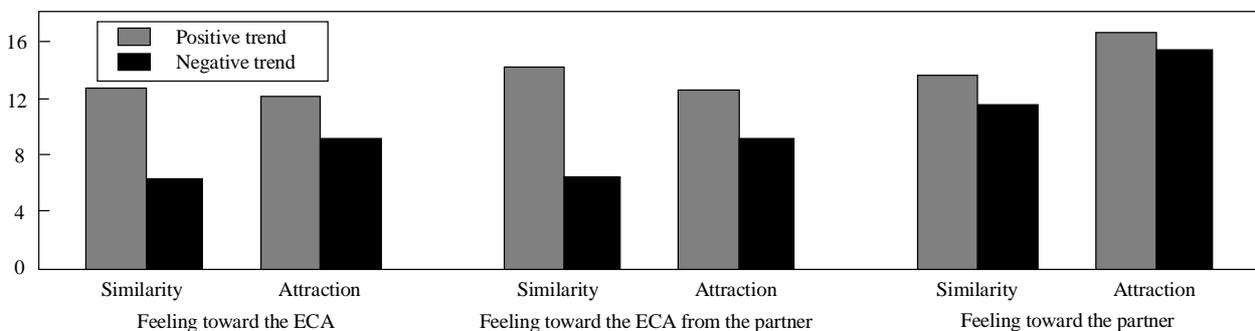


Figure 7. Index means showing balance theory effects

Another interaction was found between *Trend* and *Mediate*. In Figure 9, you can see that the ECA had difficulty in presenting itself as a likable third-party when it did not mediate conversation. When the ECA formed a circle with the subjects to have a conversation, the similarity of the ECA to the subjects in the shared-like and unshared-like triads went down ($F(1,23)=4.0, p<.05$) and its attractiveness went down to the same low level as dislikable ECAs ($F(1,23)=7.2, p<.01$). When a subject could see the interaction between the ECA and his/her partner, the ECA seemed to be evaluated badly.

To better understand the mechanisms by which the ECA's influence was lessened, we decided to take a closer look at conversations between participants in those conditions.

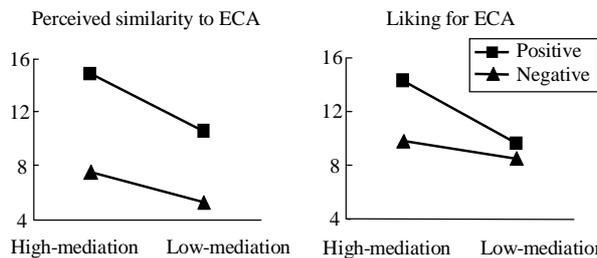


Figure 9. Interaction between *rend* and *ed at on* in the feeling toward the ECA

4.2 Conversation Data

We analyzed conversations [10], which were recorded in the low-mediation and low-control condition where the ECA took part in a conversation of two subjects. The statistical analysis indicates that this condition makes human relations better and the impression of the ECA worse. You can see the reason of these effects in the two conversation examples, in which italic sentences are menu-based interaction with the ECA.

In Example 1, the subject chose his answer to the question ($\Rightarrow 1$), while informing this answer to the partner through the vocal-speech channel ($\Rightarrow 2$). This information is redundant because responses to the ECA through the menu-based text channel can be seen by the partner; therefore, it seems that talking to the partner has priority over answering the ECA. To make matters worse, conversation between subjects often includes remarks about the agent-human exchange to evaluate the ECA.

Example 1. Priority of human conversation

ECA: *This is a little off the subject but, Mr. A, do you prefer Japanese food or Chinese food?*

A: Japanese food...

B: That is really off the subject.

$\Rightarrow 2$ A: (laugh) Well, I would say Japanese food.

$\Rightarrow 1$ A: *Japanese food.*

ECA: *I see.*

In Example 2, disagreement expressed by the ECA ($\Rightarrow 1$) causes the antipathy of the subjects toward it ($\Rightarrow 2$) and leads to

sympathy between them. People in public places generally take care to "save face," and they also take similar measures for the "face" of others [3]. For example, when someone stumbles over a stone on the road, people around him tend to pretend not to notice it. Similarly, in Example 2, subject B willingly tries to recover the partner's face after it is threatened by explicit disagreement of the ECA in the public conversation ($\Rightarrow 2$), and this motivates the subjects to have sympathy for each other.

Example 2. Antipathy to the ECA and sympathy between subjects

$\Rightarrow 1$ ECA: *I do not hit it off well with Mr. A, because you want to visit Universal Studio Japan.*

A: ...Fine.

$\Rightarrow 2$ B: Well, I think Mr. X (the ECA's name) is kind of rude.

A: I'm afraid I'll never get along with him.

Both of these examples show that participants in the study used the conversational channel, when it was available to them, to strengthen their own connection, mitigating the ability of the ECA to affect their impressions of one another.

5. DESIGN IMPLICATIONS

The results of our study suggest that, if we want to build influential social ECAs, we should make sure they take the initiative in conversation, and minimize opportunities for human conversationalists to make remarks about themselves and the ECA that will undermine its influence. Based on these findings, we propose some behaviors to create influential social ECAs and feasible implementation of the mechanisms for the behaviors.

- 1) Create proactive social ECAs that interact with each person frequently by circulating among people.

ECAs that just wait for people to come to them are easily ignored and marginalized. Instead, the ECA should actively walk through the virtual space seeking to encounter people to carry on one-to-one conversations like the ones in our high-mediation condition. The ECA could choose who to approach based on the number of past encounters with each person and the distance between him/her and the ECA. If the number is less and the distance is shorter, the priority of the person becomes high. Since social ECAs are social entities and cannot be duplicated as computational agents can, a large-scale community using this strategy would require the collaboration of multiple ECAs walking around the virtual space. Shared good (or bad) reputation for the group of ECAs could provide a common ground for establishing their credibility and authority with community members.

- 2) Lead conversation flow by controlling turn-taking.

When an ECA is engaged in conversation, it should not allow people to form side conversations, ignoring or deriding its contributions. In the experiment, agent-human communication took place entirely in text, which allowed people to carry on meta-conversations with one another in the midst of the dialog, through their voice channel. This suggested to us that it would be best if we could equip ECAs with the capability to lead a vocal dialog with people, so it could rein in their side

conversations. As current speech recognition technology is not sufficient for supporting informal chats like the ones we want our social ECA to lead, asking questions through synthesized speech and receiving answers through menu-based interaction is a practical alternative. It would also be possible to implement an ECA that could detect high voice volume and extended conversation between human participants, and then try to break in at a certain point to regain control of the conversation. Without comprehension of the contents of the speech, however, this could be perceived as rude and invasive.

- 3) Present the impression that the social ECA comprehends the conversation.

In our experiment, people talked freely about the ECA, assuming that it could not understand the contents of their conversation at all. This observation shows the potential effectiveness of giving participants the impression that the ECA understands what is being said. If people believe that the ECA can understand what they are saying, they may stop making remarks about the ECA in order to maintain friendly social relations with it. It would be easier to implement some limited ability—or example listening for keywords—than complete vocal dialog capability, so it might be feasible given current technologies. To avoid erroneous detection, the ECA could wait until the same keyword is detected repeatedly.

These behaviors all focus on the unique problems and issues of handling groups and their interactions with ECAs in virtual spaces—versus designing ECAs for one-on-one interactions in traditional GUI environments. Many people are the potential conversation partners for social ECAs but may ignore them. Multiple human-human conversations and agent-human conversations occur simultaneously. Testing social ECAs equipped with the capability of these behaviors is our future work.

6. CONCLUSION

Our research aimed to investigate whether a social ECA could use human-human balance dynamics to affect group members' perceptions of one another and of the agent, and also to look at how the agent's mediation of conversation turn-taking modulated this effect. Results of our experiment were as follows:

- In situations where the social ECA controlled the conversational floor and turn-taking, it was effective in eliciting balance effects in group situations.
- When the ECA did not maintain control of the conversation, its ability to elicit balance effects was eliminated.

These results demonstrate that social ECAs can be influential using the same tactics as humans do in group situations, shifting peoples' impressions of themselves and their conversation partners. As lifelike qualities and conversational abilities improve in ECAs, these findings suggest that we should be able to construct highly charismatic and persuasive agents for group situations, using the same tactics that persuasive humans do.

However, the results also show that social ECAs are subject to the same limits and dampeners as humans. Given the chance to converse extensively about the ECA, human participants rendered the agent's attempts at influence fruitless. This result

suggests that we need not worry about making our agents too persuasive, so long as we build in natural safeguards for users of such systems, by providing the same inoculation techniques that are available in everyday life.

How could we build ECAs to overcome the effects of conversation between the human participants about the agent? If we wish to preserve conversational parity, we could work to build agents that can 'hold their own' better in consensus-building conversations, through comprehension of face-saving and meta-comments like the ones that were observed in our conversation analysis. Even within the current technological limitation, we can make agents pretend to possess this comprehensive faculty. When the agent detects keywords that indicate negative remarks, it should show displeased animation to warn the human participants. If the agent shares the voice communication channel that is originally occupied by the human participants, it may become much easier to keep conversational parity.

However, we need not assume that it is always advantageous or even effective to provide total conversational parity among humans and agents. In virtual environments, agents may have powers that are above and beyond those of the human interaction partners, and we can exploit these dynamics to create desired effects. For example, in a tutoring situation it may be better to give the social ECA the technological ability to 'control the floor' so that students are not distracted. We see the manipulation of conversational control through the agent's mediation as one of many techniques that can be used in such communities to create new interaction paradigms that may be of great interest and benefit.

7. ACKNOWLEDGMENTS

We thank Yuko Ohara for her assistance in the experiment. This study is supported by Japan Science and Technology Corporation (CREST) and Communications Research Laboratory.

8. REFERENCES

- [1] Bickmore, T., and Cassell, J. Relational Agents: A Model and Implementation of Building User Trust, *CHI-2001*, ACM Press, 396-403, 2001.
- [2] Foner, L., Entertaining Agents: A Sociological Case Study, *AGENTS-97*, ACM Press, 122-129, 1997.
- [3] Goffman, E. *The Presentation of Self in Everyday Life*, Doubleday & Company, 1959.
- [4] Heider, F. *The Psychology of Interpersonal Relations*, Wiley, 1958.
- [5] Isbell, C.L., Kearns, M., Kormann, D., Singh, S., and Stone, P. Cobot in LambdaMoo: A Social Statistics Agent, *AAAI-2000*, 36-41, 2000.
- [6] Isbister, K., Nakanishi, H., Ishida T., and Nass, C. Helper Agent: Designing an Assistant for Human-Human Interaction in a Virtual Meeting Space, *CHI-2000*, ACM Press, 57-64, 2000.

- [7] Ishida, T. Digital City Kyoto: Social Information Infrastructure for Everyday Life, *Communications of ACM*, 45(7), 76-81, 2002.
- [8] Kim, A.J., *Community Building on the Web*, Peachpit Press, 2000.
- [9] Lester, J.C., Converse S.A., Kahler S.E., Barlow S.T., Stone B.A., and Bhogal, R.S. The Persona Effect: Affective Impact of Animated Pedagogical Agents. *CHI-97*, ACM Press, 359-366, 1997.
- [10] Levinson, S.C. *Pragmatics*, Cambridge University Press, 1983.
- [11] Matsuda, K., Miyake, T., and Kawai, H. Culture Formation and Its Issues in Personal Agent-Oriented Virtual Society: "PAW^2". *CVE-2002*, ACM Press, 17-24, 2002.
- [12] Nakanishi, H., Yoshida, C., Nishimura, T., and Ishida, T. FreeWalk: Supporting Casual Meetings in a Network, *CSCW-96*, ACM Press, 308-314, 1996.
- [13] Ng, S.H. Influencing through the Power of Language. J.P. Forgas and K.D. Williams (Eds.), *Social Influence: Direct and Indirect Processes*, Psychology Press, 2001.
- [14] Parise, S., Kiesler, S., Sproull L., and Waters, K. My Partner is a Real Dog: Cooperation with Social Agents, *CSCW-96*, ACM Press, 399-408, 1996.
- [15] Petty, R.E., and Cacioppo, J.T. *Attitudes and Persuasion: Classic and Contemporary Approaches*, Westview Press, 1981.
- [16] Reeves, B., and Nass, C. *The Media Equation*, Cambridge University Press, 1996.
- [17] Rickel, J., and Johnson W.L. Virtual Humans for Team Training in Virtual Reality, *International Conference on Artificial Intelligence in Education*, 578-585. IOS Press, 1999.
- [18] Takeuchi, A., and Naito, T. Situated Facial Displays: Towards Social Interaction, *CHI-95*, ACM Press, 450-455, 1995.
- [19] Traum, D., and Rickel J. Embodied Agents for Multi-party Dialogue in Immersive Virtual Worlds, *AAMAS-2002*, ACM Press, 766-773, 2002.
- [20] Zimbardo, P.G., and Leippe M.R. *The Psychology of Attitude Change and Social Influence*, McGraw-Hill, 1991.

Modeling e-Procurement as Co-adaptive Matchmaking with Mutual Relevance Feedback

Reiko Hishiyama* and Toru Ishida

Department of Social Informatics, Kyoto University
Yoshida honmachi, Sakyo-ku, Kyoto 606-8501, Japan
hishiyama@kuis.kyoto-u.ac.jp, ishida@i.kyoto-u.ac.jp

Abstract. This paper proposes a new e-procurement model for a large number of buyers and sellers interacting via the Internet. The goal of e-procurement is to create a satisfactory match between buyers' demand and sellers' supply. From our real-world experience, we view e-procurement as a process of negotiation to increase the matching quality of two corresponding specifications: one for buyers' demand and another for sellers' supply. To model scalable e-procurement, we propose a co-adaptive matchmaking mechanism using mutual relevance feedback. In order to understand the nature of the mechanism, we have developed two types of software agents, called e-buyers and e-sellers, to simulate human buyers and sellers. Multiagent simulation results show that the matching quality is incrementally improved if agents adaptively change their specifications. A realistic example is also provided to discuss how to extend our simulation to real-world e-procurement infrastructure.

1 Introduction

In the procurement process, buyers and sellers incrementally develop their mutual knowledge through making a deal between specifications of buyers' demand and sellers' supply. This paper proposes a computational model of an e-procurement process with a large number of buyers and sellers using the Internet. The motivation behind this research is as follows. There is a need for e-procurement infrastructure conducive to supporting complex dealings while taking into account a process for adjusting specifications. Procurement activities between buyers and sellers require negotiation to find ideal matching between demand and supply specifications, and there is a strong demand from industries to make procurement activities more open so that buyers have access to more sellers. This enables buyers to explore purchasing possibilities and to increase the transparency of their transactions. To develop e-procurement infrastructure, however, we need an e-procurement simulation model to help understand market performance when the market is scaled up.

According to literature on management science, in procurement, buyers and sellers share their purchasing and selling intentions through the exchange of information, expectations and perceptions. Their *creative collaboration* [20] leads to a successful deal. Landerous *et al.* [14] propose a buyer-seller partnership model that consists of five

* Reiko Hishiyama has been working in the procurement section of Japan Telecom Co., Ltd.

stages: buyer's expectations, seller's perceptions, mutual understanding, performance activities, and collective actions. This model explains how the buyer-seller partnership mitigates troubles in the activity stage and increases long-term stability. Though several procurement models exist, no large-scale e-procurement model, which requires computational formalization, has been studied intensively in the field of management science.

In the multiagent research community, enormous effort has been spent on studying e-auction and e-negotiation mechanisms. In particular, theoretical mechanisms and computational models of multi-attribute negotiation [7] and multi-attribute auction [5, 3, 6] have been studied. This paper focuses on the "n:n" mutual selection process, unlike the multi-attribute negotiation, which generally focuses on the "1:1" negotiation process. In addition, the multi-attribute auction has been dealt with as a winner determination problem based on the optimization of utility functions from the view of economics. In contrast, we deal with matchmaking problems, where buyers and suppliers have heterogeneous utilities.

In real-world procurement, it is relatively common that the buyer shortlists suppliers through multilateral negotiation before auction, or negotiates with multiple suppliers to build a prototype of a new product after short-listing via auction [16]. The overall procurement process is designed by combining auction and other selection methods. In the planning phase of procurement, the buyer does not have sufficient knowledge or information about the goods and services to give an announcement prepared for auction. Therefore, to make up for this lack, the buyers try to gather information and knowledge with making contact with the suppliers. These activities provide "clear focus and possibly a shortlist of qualified suppliers" [13]. On the other hand, the suppliers present several alternative proposals and look for the buyer's reaction, then conduct marketing activities to assess whether or not the buyer will be a profitable customer in the foreseeable future.

The goal of our research is to create a multiagent model for large-scale e-procurement, where buyers/sellers improve their demand/supply specifications interactively, while keeping their intentions (needs for the buyer and seeds for the supplier). To model a scalable e-procurement, we propose a *co-adaptive matchmaking mechanism* using *mutual relevance feedback*. To understand the nature of this mechanism, we have developed two types of software agents, called *e-buyers* and *e-sellers*, to simulate human buyers and sellers. Both agents present multiple attribute specifications to the market, and adjust their specifications to maximize their satisfaction. Simulation results show that the matching quality is incrementally improved if agents adaptively change their relevance feedback threshold. We have also applied this model to a procurement example in the real world, and clarified its performance and effectiveness in a practical domain.

2 Co-adaptive Matchmaking

When a buyer is willing to deal with sellers, he/she prescribes an RFI (Request for Information) and offers it to the market. However, it may not completely represent the buyer's purchasing intention. There are two reasons for this. First, the buyer does not know all products in the market. Sometimes, it is difficult for such a buyer to create

RFIs to effectively distinguish a target product from others. Second, sellers may easily produce a new catalog if requested. There is also a chance that the buyer's RFI triggers sellers to create a new catalog, which may generate feedback to the original RFI. Thus, we view the buyer's and seller's demand/supply specifications as tentative representations of their intention. An interactive feedback process is necessary for both buyers and sellers to improve their specifications.

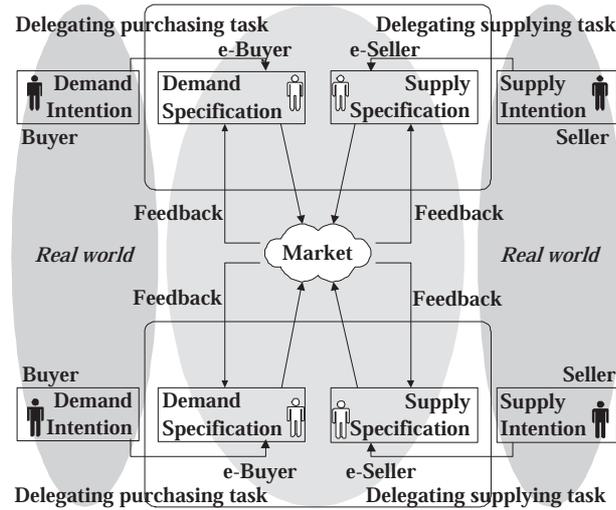


Fig. 1. Co-adaptive matchmaking

In our model, each buyer delegates the desired specification to his/her *e-buyer*. The *e-buyer* retrieves sellers' specifications and supports the buyer to refine his/her specification incrementally. Similarly, each seller delegates the desired specification to his/her *e-seller*. The *e-seller* retrieves buyers' specifications and supports the seller to refine his/her specification. Figure 1 represents the e-procurement process model, which we call *co-adaptive matchmaking*.

The four elements of this model are listed in Table 1. *Demand intention* represents the buyer's intention to purchase, and *demand specification* is a description that expresses that demand intention to the market. Similarly, *supply intention* is the seller's intention to sell, and *supply specification* is a description that expresses that supply intention to the market. In short, we denote the buyer's and seller's intention as *retrieval intention* or *query*, and the buyer's and seller's specification as *retrieval specification* or *data*. We also denote a buyer and a seller as a *searcher*. Retrieval intention shows an abstract idea of goods/services that searchers want to find through negotiation, and is explicitly represented as retrieval specification. Searchers use their retrieval specification to search corresponding counterpart specifications, and the specifications that searchers find are called *retrieved specification*.

Table 1. Four elements in e-procurement

element		definition
Buyer-side	Demand intention	Buyer's intention to purchase.
	Demand specification	Description that expresses demand intention to the market.
Seller-side	Supply intention	Sellers' intention to sell.
	Supply specification	Description that expresses supply intention to the market.

3 Mutual Relevance Feedback

3.1 Background

In this section, we implement co-adaptive matchmaking by using mutual relevance feedback. Relevance feedback [15] is one of the most popular query reformulation strategies, which automatically changes the set of query terms as well as the weights associated with those terms.

In term-weighting retrieval, a weight w_{ik} is associated with the index term t_k ($k = 1, \dots, l$) of a document d_i ($i = 1, \dots, n$), thus the subject of document i can be represented by l dimensional vectors $(w_{i1}, w_{i2}, \dots, w_{il})^T$. The weight of an index term is, for instance, the product of its term frequency (TF), an occurrence frequency of the index term in a particular document, and its inverse document frequency (IDF), a factor which enhances the terms which appear in fewer documents. The query vector q_j is also represented by l dimensional vectors $(w_{j1}, w_{j2}, \dots, w_{jl})^T$. This is called the *vector space model* [1]. The similarity between query q_j and document d_i is calculated by the cosine function of the query term-weight vector $(w_{j1}, w_{j2}, \dots, w_{jl})^T$ and the document term-weight vector $(w_{i1}, w_{i2}, \dots, w_{il})^T$, i.e.,

$$Similarity(q_j, d_i) = \frac{\sum_{k=1}^l w_{ik} w_{jk}}{\sqrt{\sum_{k=1}^l w_{ik}^2} \sqrt{\sum_{k=1}^l w_{jk}^2}} \quad (1)$$

When retrieving documents, this similarity value is compared to the pre-defined threshold: if the value exceeds the threshold, the document is retrieved.

In relevance feedback using the vector space model, the retrieved documents are further classified into relevant and irrelevant documents. Let D^+ be a set of relevant documents, where $d_1^+, \dots, d_{|D^+|}^+$ are members of D^+ , and let D^- be a set of irrelevance documents, where $d_1^-, \dots, d_{|D^-|}^-$ are members of D^- . This classification is performed by humans. Then, the result of the classification leads to an improvement in the query term-weight vector: adjust the query term-weight vector toward the document term-weight vectors of relevant documents D^+ and away from the document term-weight vectors of irrelevant documents D^- . The adjusted query term-weight vector is given

by,

$$\alpha \cdot q_j + \frac{\beta}{|D^+|} \sum_{i=1}^{|D^+|} d_i^+ - \frac{\gamma}{|D^-|} \sum_{i=1}^{|D^-|} d_i^- \quad (2)$$

where α , β , and γ are appropriate constants. Generally, the relevant documents provide more important information than the irrelevant ones. Thus, the constant γ is usually smaller than the constant β .

3.2 Mechanism

In this paper, we apply relevance feedback to both buyers' and sellers' specifications. Figure 2 shows the matchmaking process among buyers and sellers. The intentions are explicitly written into specifications, which are to be enhanced through mutual relevance feedback. In the matchmaking process, the buyer's and seller's specifications are used as queries. At the same time, they are also data to be retrieved. In this paper, we assume that buyers' and sellers' intentions do not change in the course of procurement. This is because we are focusing on a short-term problem solving process in procurement; a long-term learning process will be discussed in later different paper. Rather, we assume these intentions are not clearly recognized by buyers or sellers at the beginning of procurement. Let $i(i = 1, \dots, m)$ be buyers and $j(j = 1, \dots, n)$ be sellers. Let \hat{b}_i

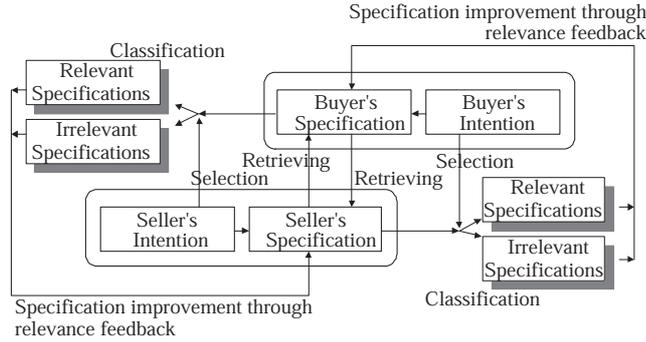


Fig. 2. Co-adaptive matchmaking process using mutual relevance feedback

be buyer i 's demand intention, and b_i be buyer i 's demand specification, \hat{s}_j be seller j 's supply intention, and s_j be seller j 's supply specification. \hat{b}_i , b_i , \hat{s}_j and s_j represent the attribute value of goods or services in the range of $[0, 1]$. We define co-adaptive matchmaking as a mutual selection process in which demand specifications are selected by buyers, while supply specifications are selected by sellers. As discussed in Section 3.1, let w_{ik} be the weight associated with attribute t_k ($k = 1, \dots, l$) of the specification d_i ($i = 1, \dots, n$). Then, each specification is represented by a l dimensional attribute-weight vector $(w_{i1}, w_{i2}, \dots, w_{il})^T$. Next, let us consider the case of a human buyer delegating demand specification b_i to his/her e-buyer. The delegation is carried

out based on his/her demand intention. The e-buyer openly expresses the demand specification, and retrieves the set of supply specifications S from the market. Let S_{b_i} be the result of the retrieval, that is, $S_{b_i} = \{s | Similarity(b_i, s) > \theta, s \in S\}$, where θ is a selection threshold of similarity in specification retrieval. In the same way, a human seller delegates supply specification s_j to his/her e-seller. The delegation is carried out based on his/her supply intention. The e-seller subsequently openly expresses the supply specification, and retrieves the set of demand specifications B from the market. Let B_{s_j} be the result of the retrieval, that is, $B_{s_j} = \{b | Similarity(s_j, b) > \theta, b \in B\}$.

A set of the retrieved supply specifications, compiled by the e-buyer, is examined by the human buyer, and classified into relevant specifications $S_{b_i}^+$ and irrelevant specifications $S_{b_i}^-$. The e-buyer then computes the relevance feedback using $S_{b_i}^+$ and $S_{b_i}^-$ to refine the original demand specification. Similarly, a set of retrieved demand specifications, compiled by the e-seller, is examined by the human seller, and classified into relevant specifications $B_{s_j}^+$ and irrelevant specifications $B_{s_j}^-$. Then the e-seller computes relevance feedback using $B_{s_j}^+$ and $B_{s_j}^-$ to refine the original supply specification.

Mutual relevance feedback is very different to traditional information retrieval. In information retrieval, query term-weight vectors can be expanded but document term-weight vectors are always fixed. In this model, however, both buyers' and sellers' attribute-weight vectors can change. Relevance feedback is applied at both sides, though to the best of our knowledge, no studies have been conducted where relevance feedback is mutually applied. The performance of mutual relevance feedback can be evaluated by comparing retrieval intentions and specifications, but it is necessary to conduct simulations to determine how this co-adaptive process works in various situations.

4 Multiagent Simulation

4.1 Setting

In order to examine the behavior of co-adaptive matchmaking, we have implemented a multiagent simulator. To simulate human buyers and suppliers, we extend e-buyers and e-sellers so that they can distinguish relevant and irrelevant specifications. Figure 3 illustrates the relevance feedback cycle of e-buyers. We assume that demand intentions, which are usually determined by purchasing planners, can also be represented by attribute-weight vectors. Demand specifications, on the other hand, are often provided by operational buyers. As in Figure 3, the e-buyer comprises two main components: a *search and selection module* and a *relevance feedback module*. Note that the relevance feedback module is for simulating the behavior of human buyers. The search and selection module retrieves supply specifications based on the selection threshold θ , while the relevance feedback module classifies the selected specifications into relevant and irrelevant specifications based on the feedback threshold φ . That is, a set of relevant supplier specifications is represented by $S_{b_i}^+ = \{s | Similarity(\hat{b}_i, s) > \varphi, s \in S_{b_i}\}$, where φ is a feedback threshold of similarity. The same computational process is applied to e-sellers. (In the case of e-seller, a set of relevant demand specifications is represented by $B_{s_j}^+ = \{b | Similarity(\hat{s}_j, b) > \varphi, b \in B_{s_j}\}$.) The threshold θ represents the performance of information retrieval. We use a fixed value for θ (0.5 in this simulation),

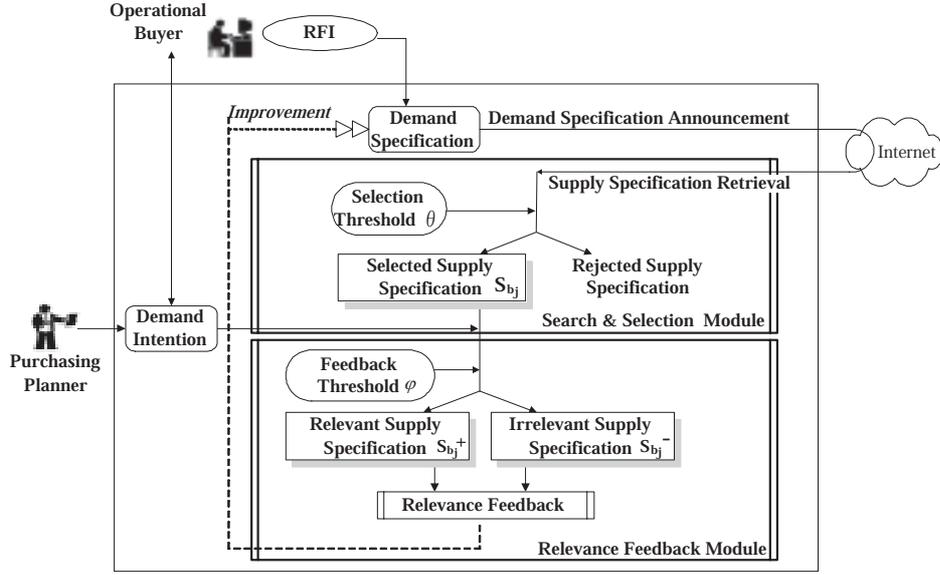


Fig. 3. Relevance feedback cycle of e-buyers

while the threshold φ represents the procurement allowance. We implement two types of agents with φ as follows:

Fixed agent The allowance φ is fixed (0.5 in this simulation). If the similarity exceeds the threshold, the specification is relevant, and if not, it is classified into irrelevant specifications.

Adaptive agent The allowance φ adaptively changes according to the market status. The threshold is set to the average similarity between the retrieval specification and all the selected specifications. The threshold φ for the buyer's classification is computed as follows.

$$\varphi = \frac{\sum_{s \in S_{b_i}} \text{Similarity}(\hat{b}_i, s)}{|S_{b_i}|} \quad (3)$$

If the similarity exceeds φ , the specification is relevant, and if not, it is classified into irrelevant specifications.

The simulation settings are as follows. The number of buyers is 10 and the number of sellers is 100. The intention of each buyer and seller is initially represented by a five-dimensional binary random vector, which means there are five attributes for each item (i.e. good/service). Each initial value of the buyer's and seller's specifications is also defined by a five-dimensional binary random vector.

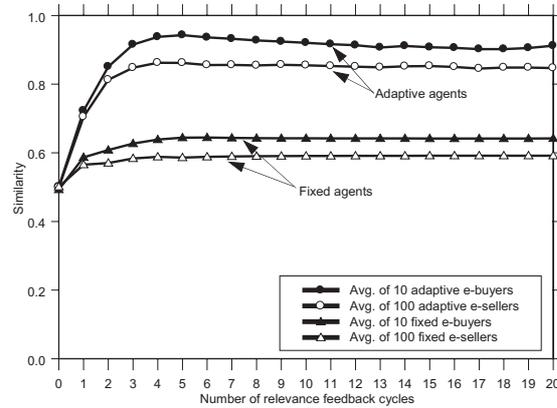


Fig. 4. Time-series similarity between intentions and specifications

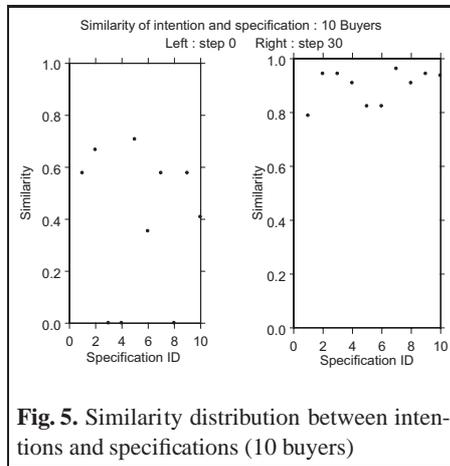


Fig. 5. Similarity distribution between intentions and specifications (10 buyers)

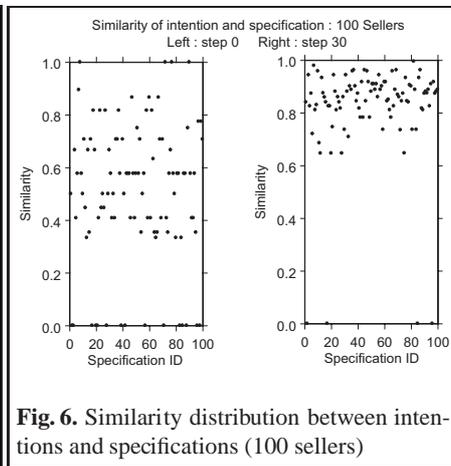


Fig. 6. Similarity distribution between intentions and specifications (100 sellers)

4.2 Result

The simulation results are shown in Figures 4, 5 and 6 ¹. Figure 4 shows a comparison of the average similarity between retrieval intention and retrieval specification. The results were obtained by averaging over 50 runs. The x -axis represents the number of relevance feedback cycles illustrated in Fig. 3, while the y -axis represents the average similarity between retrieval intentions and corresponding retrieval specifications. In the case of fixed agents, the similarity between intentions and specifications is not sufficient for successful matchmaking because the retrieval specifications cannot appropriately reflect buyers' or sellers' intentions. Conversely, in the case of adaptive agents, the result is satisfactory. The similarity between intentions and specifications is greatly improved

¹ Some agents remain at zero similarity, simply because the binary-vector dimension is small (five in this case).

Criteria	Importance Weight	Vendor Proposal			Scoring		
		Vendor A	Vendor B	Vendor C	Vendor A	Vendor B	Vendor C
Technical specifications							
First copy time : sec.	10	3.2	3.3	3.4	10.00	5.00	0.00
Copying speed : PPM	10	81.0	85.0	90.0	0.00	4.44	10.00
Full dimensions : W	5	1,401	1,463	1,202	1.19	0.00	5.00
Full dimensions : D	5	777	865	858	5.00	0.00	0.37
Other conditions							
On-site service delivery	20	3H	7H	3H	20.00	0.00	20.00
Cost estimation		33,554	38,714	33,002	49.88	0.00	50.00
Delivery charge	50	35,000	0	45,000			
Performance charge		20,772	28,980	21,276			
Designated leasing company	No	Yes	Group businesses	No			
					86.07	9.44	85.37

Fig. 7. Example of vendor proposal analysis in real business world

in comparison to the case of fixed agents. Interestingly, in both cases, the average similarity among buyers is much higher than that among sellers, which means that a large population of counterparts provides a greater chance of retrieving a better specification. This shows that co-adaptive matchmaking is scalable: a large, open market can provide a better solution to agents.

Figures 5 and 6 display a similarity distribution between intentions and specifications. Figure 5 shows the similarity distribution of 10 buyers, and Fig. 6 shows the case of 100 sellers. Each figure presents the initial state (left) and the final state after 30 relevance feedback cycles (right), clearly showing that mutual relevance feedback largely increases similarities in both cases. The specification is improved with respect to the humans' intention, which is not clearly recognized at the beginning of procurement.

5 Realistic Experiment

5.1 Setting

We applied co-adaptive matchmaking to a real-world procurement example. We consider a weighted point method to evaluate the specifications, and to ensure transparency (i.e. fairness) and objectivity in the selection process, the evaluation method weights the specifications in order of importance. This widely-used method is known as a *seller rating process*. In previous work, Forker and Lanson [8] and Thompson [19] also used weighted point models. In many cases, quantitative and qualitative information is mixed in the sellers' specifications; to rate each specification, all information is required to be quantified. Figure 7 shows a typical example of purchasing decision employing the weighted point method in a real business process. When mapping a real world problem, such as is shown in Figure 7, onto the simulation, the following points should be considered: 1) Not only for achieving the match of demand specification and supply specification, we should calculate its utility. Goods/services are originally represented with a pair of an attribute and its value, for example, (Copying speed, 81.0ppm), (Designated leasing company, No), and buyers/suppliers have heterogeneous utilities.

Table 2. Improvement in specification #4 ²

Feedback Cycle	w_1	w_2	w_3	w_4	w_5	Similarity
Intention	0.333	0.333	0.667	0	1	–
0	0.8	0.8	0.0	0.0	0.0	0.3652
1	0.831	1	0.315	0	0.611	0.7538
2	0.657	0.874	0.67	0	1	0.9322
3	0.479	0.645	0.648	0	1	0.9738
4	0.378	0.616	0.661	0	1	0.9806
5	0.255	0.563	0.572	0	1	0.9800
6	0.547	0.489	0.502	0	1	0.9727

Table 3. Best matching candidates for intention #4

Ranking	Spec No. (\hat{s}_i)	w_1	w_2	w_3	w_4	w_5	Sim. ($\hat{b}_4 \cdot \hat{s}_i$)
1	20	0.2	0.4	0.6	0.2	0.8	0.974
2	29	0.2	0.4	0.8	0.4	1.0	0.949
3	81	0.8	0.4	0.6	0.0	1.0	0.948
4	62	0.6	0.2	0.8	0.2	0.8	0.945
5	8	0.6	0.6	1.0	0.4	1.0	0.943
6	33	0.6	0.2	0.4	0.2	0.8	0.927
7	99	0.6	0.6	0.4	0.0	0.8	0.921
8	10	0.0	0.4	0.4	0.2	0.6	0.913
9	31	0.8	0.6	0.6	0.0	0.8	0.913
10	96	0.8	0.8	0.8	0.0	0.8	0.904

In section 4, we presented the value in the range of $[0,1]$. However, the similarity calculation is not better using the discrete data such as designated leasing company. In case of procurement of the copying speed, the speed does not need to be just 81.0ppm; it is better to have faster copying speed. Therefore, to calculate the coincidence level between the demand specification and the supply specification is not sufficient for this type of mapping; the degree of buyer's/supplier's satisfaction should be calculated from the (attribute) value of the demand specification and the supply specification. For example, when a buyer evaluates a supplier's specification, the degree of satisfaction for the (attribute) value that composes the supply specification is evaluated by utility. 2) The satisfaction is important for some attributes. However, for other some attributes, it may be less important. It is necessary to define the degree of importance from the both the buyer's and the supplier's viewpoints. The overall utility is calculated by adding up each utility of attribute value that is multiplied by the degree of importance.

Formula (1), which is the similarity calculation used for the relevance feedback, can be replaced by this overall utility calculation. To justify the formulation of the relevance feedback, the utility function should be a monotone increasing or decreasing function.

In the experiment we conduct, the settings are as follows. Each e-buyer and e-seller takes a five-dimensional vector for its intention and specification, and each of these

² Vector attributes are standardized.

Table 4. Time-series similarity between a buyer's intention and selected sellers' specifications ³

Ranking	Number of relevance feedback cycles												Similarity		Improvement
	1		2		3		4		5		6		1	6	
	Spec.	Sim. (a)	Spec.	Sim.	Spec.	Sim.	Spec.	Sim.	Spec.	Sim.	Spec.	Sim. (b)	Sim. (a)	Sim. (b)	
1	100	0.924	88	0.963	*20	0.953	*81	0.979	*62	0.998	*62	0.953	0.924	0.953	3.146
2	49	0.915	66	0.957	51	0.950	*20	0.965	84	0.985	1	0.950	0.915	0.950	3.831
3	91	0.915	15	0.943	88	0.945	13	0.963	48	0.977	*81	0.941	0.915	0.941	2.840
4	45	0.906	32	0.939	*62	0.926	*62	0.961	*20	0.948	35	0.939	0.906	0.939	3.727
5	57	0.893	100	0.937	1	0.920	51	0.951	13	0.946	13	0.918	0.893	0.918	2.832
6	19	0.885	89	0.924	6	0.914	1	0.947	51	0.944	*20	0.917	0.885	0.917	3.602
7	23	0.877	6	0.911	32	0.914	*99	0.920	1	0.937	*96	0.911	0.877	0.911	3.967
8	41	0.873	91	0.895	5	0.912	84	0.916	*99	0.930	51	0.910	0.873	0.910	4.243
9	59	0.854	45	0.889	22	0.905	94	0.909	94	0.926	*99	0.909	0.854	0.909	6.498
10	18	0.852	2	0.885	15	0.897	*10	0.882	95	0.902	*31	0.905	0.852	0.905	6.178
11	*20	0.835	19	0.884	14	0.891	66	0.871	35	0.898	84	0.878	0.835	0.878	5.130
12	51	0.829	41	0.883	64	0.878	76	0.866	*8	0.893	*8	0.873	0.829	0.873	5.371
13	92	0.808	57	0.882	67	0.867	73	0.865	73	0.884	*10	0.872	0.808	0.872	7.885
14	97	0.807	74	0.872	*99	0.866	17	0.859	*10	0.875	52	0.872	0.807	0.872	7.974
15	*62	0.807	49	0.868	28	0.863	5	0.846	*96	0.862	*33	0.871	0.807	0.871	7.911
Number of satisfying specifications	2		0		3		5		6		9				

vectors contains significance attribute value such as (First copy time, Copying speed, Wide, Depth, Cost estimation), encoded into an integer value from 0 to 1. If the demand intention is (0.8, 0.6, 0.6, 0.2, 0.2), and the selected supply specification is (0.4, 0.6, 0.2, 0.2, 0.2), then the similarity between the intention and specification is 0.917, which is very high. On the contrary, if the demand intention is (0.6, 0.2, 0.4, 1.0, 0.2), and the selected supply specification is (0.4, 0.8, 0.6, 0.2, 1.0), the similarity is 0.554, which is very low. The buyer's goal in matchmaking is to retrieve supply specifications as similar as possible to the demand intention.

5.2 Result

Table 2 analyzes the negotiation process of buyer No. 4 (demand intention $\hat{b}_4 = (0.2, 0.2, 0.4, 0.0, 0.6)$ and demand specification $b_4 = (0.8, 0.8, 0.0, 0.0, 0.0)$) in which the similarity between intention \hat{b}_i and specification b_i is lower than other matching candidates at the beginning of procurement. In this example, attribute weight w_5 is considered important, whereas w_4 is not. The iterations show how the e-buyer's demand specification has been improved. The similarity between the demand intention and selected supply specifications increases step by step, and eventually arrives at a satisfactory close.

³ The selected seller's specification marked with an asterisk (*) indicates that the specification is one of the best matching candidates; the corresponding seller's supply intention appears in Table 3.

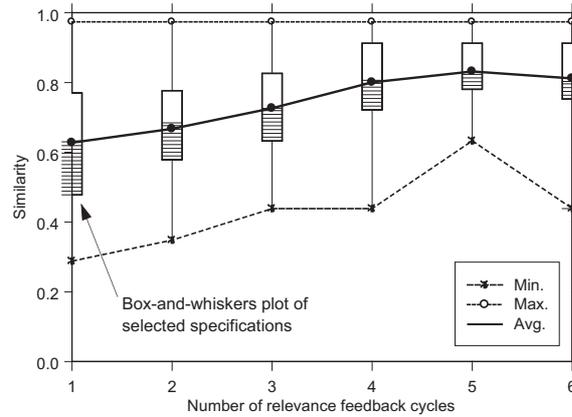


Fig. 8. Similarity between the buyer's intention and selected sellers' specifications

Table 3 shows best matching candidates for the demand intention of buyer No. 4, i.e., the table lists a similarity ranking of supply intentions for the demand intention of buyer No. 4. Table 4 shows a similarity ranking of the top 15 supply specifications for the demand intention of buyer No. 4, clearly indicating that the similarity increases at each cycle. The precise ranking changes at every cycle because of the change in market status. However, specifications with high similarity scores always stay in the list. The three rightmost columns of Table 4 show similarities before and after the repeated relevance feedback. Note that the lower the ranking, the greater the improvement. After six cycles of mutual relevance feedback, Table 4 includes nine out of ten best-matching candidates (seller's supply intentions) in Table 3. This fact supports the applicability of co-adaptive matchmaking in a procurement domain. Figure 8 displays similarities between buyer No. 4's intention and selected supply specifications. The average similarity of all the selected supply specifications increases; in practice, however, a few specifications with low similarity are still selected. To exclude low similarity specifications, it is reasonable to recommend the top five or so specifications. The human buyer, then, selects a few from the recommended list based on his/her purchasing knowledge. Thus, a combination of the human knowledge and co-adaptive matchmaking can offer a better way of enhancing the quality of e-procurement.

6 Related work

A number of research projects have focused on autonomous agent technology for B2B e-commerce applications [11]. Our research was inspired by agent-mediated e-commerce systems with brokering, matchmaking, and bilateral negotiation. For example, MARI [18] was proposed as an agent-based intermediary architecture capable of supporting multiple sellers and buyers within a multiple product domain. MARI builds upon multi-attribute utility theory formulation, as introduced in Tete-a-Tete [9].

This paper also relates to matchmaking among profiles, which are mostly referred to as agent service descriptions. Kuokka and Harada [12] presented two matchmaking

systems: COINS and SHADE. The former is based on free text matchmaking using TF-IDF. The latter uses a subset of KIF and a structured logic text representation called MAX. A more recent service broker-based information system is InfoSleuth [2]. They adopt *constrains matching*, which satisfies a user query with data constraints. Sycara *et al.* developed LARKS [17] for advertising, requesting, and matchmaking. LARKS performs both syntactic and semantic matchings. Veit *et al.* developed GRAPPA [21], whose matchmaking hosts an extensive collection of predefined profile schemas and distance functions based on a cosine similarity measure. We inherit the basic ideas of matchmaking from previous work to create a new co-adaptive matchmaking model.

In the context of e-auctions, we confirm that our system links to a special form of auction in which there are many kinds of goods to sell, and in which bidders can bid on combinations of items. Several multiple-attribute algorithms and protocols have been developed [4, 11].

He *et al.* [10] surveyed various e-commerce research projects, and pointed out that more advanced services (e.g. collaboration with other brokers) should emerge in order to provide more support to buyers and sellers involved in transactions. We think co-adaptive matchmaking will be the first step towards emerging long-term collaboration with other brokers through repeated negotiation.

7 Conclusions

In this paper, we proposed a multiagent model for a large-scale e-procurement: *co-adaptive matchmaking using mutual relevance feedback*. Our contribution is three-fold.

First, we studied cases of procurement in the real business world and proposed a co-adaptive matchmaking process in a simulation model of e-procurement using the Internet. Mutual relevance feedback is applied for modeling the negotiations between buyers and sellers to improve their demand/supply specifications. Second, to simulate human buyers and sellers, we implemented a simulation for e-buyers and e-sellers to analyze the behavior of this model. The simulation result showed that the matching quality is incrementally improved if both buyers' and sellers' adaptively change their relevance feedback threshold. Finally, we conducted realistic experiments in the context of real-world procurement activities, and confirm that co-adaptive agents are able to find desired specifications through repeated negotiation. The e-buyers/e-suppliers showed superior performance in handling transactions, monitoring the main features of products that are widely needed in the market, and screening the specifications to find the best.

This paper shows the effectiveness of co-adaptive matchmaking for *model* a large-scale e-procurement on the Internet. However, we still require an effective and efficient procurement infrastructure that actually *plays* a practical role in human users affording a diversity of reasoning. In order to handle transactions for goods/services with a large number of attributes from several hundred traders, we need software agents that act on behalf of human buyers or sellers. To extend our simulation model to real-world e-procurement infrastructure, software agents should be capable of estimating human intentions. The next step in this research, entails a plan to embed co-adaptive agents in actual e-procurement processes so as to enhance collaboration between human buyers and sellers.

References

1. Baeza-Yates, R. and Ribeiro-Neto, B.: Modern Information Retrieval, Addison Wesley (1999).
2. Bayardo, R., et al.: Infosleuth: Agent-based Semantic Integration of Information in Open and Dynamic Environments. In *ACM SIGMOD Conf. on Management of Data*, pp. 195–206 (1997).
3. Bichler, M., Kalagnanam, J.: Bidding Languages and Winner Determination in Multi-Attribute Auctions. *IBM Research Report*, RC22478, W0206-018 (2002).
4. Bichler, M.: An Experimental Analysis of Multi-attribute Auctions, *Decision Support Systems*, Vol. 29, No. 3, pp. 249–268 (2000).
5. Che, Y.K.: Design Competition Through Multidimensional Auctions, *RAND Journal of Economics*, Vol. 24, No. 4, pp. 668–680 (1993).
6. David, E., Azoulay-Schwartz, R. and Kraus, S.: Protocols and strategies for automated multi-attribute auctions, *Proceedings of the first international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems (AAMAS-2002)*, pp. 77–85 (2002).
7. Faratin, P., Sierra, C. and Jennings, N.R.: Using Similarity Criteria to Make Issue Trade-offs in Automated Negotiations, *Artificial Intelligence*, Vol. 142, No. 2, pp. 205–237 (2002).
8. Forker, L.B. and Janson, R.L.: Ethical Practices in Purchasing, *Journal of Purchasing and Materials Management*, Vol. 26, No. 1, pp. 19–26 (1990).
9. Guttman, R.H. and Maes, P.: Agent-Mediated Integrative Negotiation for Retail Electronic Commerce, *Proceedings of the Workshop on Agent Mediated Electronic Trading* (1998).
10. He, M., Jennings, N.R. and Leung, H.F.: On Agent-Mediated Electronic Commerce, *IEEE Transactions on knowledge and data engineering*, Vol. 15, No. 4, pp. 985–1003 (2003).
11. Jennings, N.R., Norman, T.J., Faratin, P., O'Brian, P. and Odgers, B.: Autonomous agents for business process management, *Journal of Applied Artificial Intelligence*, Vol. 14, No. 2, pp. 145–189 (2000).
12. Kuokka, D. and Harada, L.: Supporting Information Retrieval via Matchmaking. Working Notes 1995 AAAI Spring Symposium on Information Gathering in Heterogeneous, Distributed Environments, Technical Report SS-95-08, AAAI Press (1995).
13. Laseter, T.: *Balanced Sourcing :Cooperation and Competition in Supplier Relationships*, Jossey-Bass Publishers (1995).
14. Landeros, R., Reck, R. and Plank, E.: Maintaining Buyer-Supplier Partnership, *International Journal of Purchasing and Materials Management*, Vol. 31, No. 3, pp. 3–11 (1995).
15. Salton, G.: *The SMART Retrieval System – Experiments in Automatic Document Processing*, Prentice Hall (1971).
16. Samtani, G.: *B2B Integration – A Practical Guide to Collaborative E-commerce*, Imperial College Press (2002).
17. Sycara, K., Widoff, S., Klusch, M. and Lu, J.: LARKS: Dynamic Matchmaking Among Heterogeneous Software Agents in Cyberspace, *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, Vol. 5, pp. 173–203 (2002).
18. Tewari, G. and Maes, P.: Design and Implementation of an Agent-Based Intermediary Infrastructure for Electronic Markets, *Proceedings of the 2nd ACM conference on Electronic commerce*, pp. 86–94 (2000).
19. Thompson, K.N.: Scaling Evaluative Criteria and Supplier Performance Estimates in Weighted Point Prepurchase Decision Models, *International Journal of Purchasing and Materials Management*, Vol. 27, No. 1, pp. 27–36 (1991).
20. Tully, S.: Purchasing's New Muscle, *Fortune*, February 20, pp. 75–83 (1995).
21. Veit, D., Müller, J.P. and Weinhardt, C.: Multidimensional Matchmaking for Electronic Markets, *Journal of Applied Artificial Intelligence*, Vol. 16, No. 9-10, pp. 853–869 (2002).

超越型誘導のための仮想都市シミュレータ

Virtual City Simulator for Transcendent Guidance

中西 英之*1
Hideyuki Nakanishi

小泉 智史*2
Satoshi Koizumi

石田 亨*1*2
Toru Ishida

伊藤 英明*1
Hideaki Ito

*1 京都大学情報学研究科社会情報学専攻
Department of Social Informatics, Kyoto University

*2 科学技術振興機構 CREST
Japan Science and Technology Agency CREST

In this paper, we propose a transcendent means of evacuation guidance. Since the announcement facilities of large-scale public spaces such as railway stations cannot provide site-specific information, on-site staffs have to provide location-based guidance tailored to each location. We developed a virtual city simulator that enables site-specific information distribution from a remote place. The simulator integrates data from multiple sensors embedded in the public space. In the virtual city of the simulator, passenger agents walk according to the sensor data. Through this virtual city, off-site staffs can observe the passengers and also guide them. They can talk to anyone by pointing the corresponding passenger agents in the virtual city. We installed this system in Kyoto Station and learned the implications of its use.

1. はじめに

誘導は安全な避難の実現に非常に大きな影響を及ぼす [Klein 1976; Sugiman 1988]. 過去の大きな火災事故をみると、適切な避難誘導が行われなかったことが被害を大きくしたケースが多々ある。我々の日常生活の安全にとって、緊急時における誘導手段の確保は重要である。特に、駅などの多勢が利用する公共空間にとっては非常に重要である。一般的に公共空間における避難誘導は、放送設備と現地の係員によって行われる。放送設備は全体的な誘導を提供する。一方、現地の係員は局所的な誘導を提供する。放送設備は遠隔から多勢の人間に指示を与えることのできる利便性の高い誘導手段である。だが、その場の状況に特化した局所的な指示を与えるのには向いていない。そこで、そのような指示は現地の係員が行うことになる。我々は、このような放送設備の機能的限界を取り払うことを目的とした研究を行った。

我々はまず、「遠隔から多勢の人間に局所的な指示を与える」ための新しいコミュニケーション様式として、「超越型コミュニケーション」を提案する。これは、超越的に多勢の人間がいる空間全体を眺めつつ対話相手を選択する様式である。CSCW や HCI の分野でこれまでに盛んに行われてきた遠隔コミュニケーションの研究は、どれも対面コミュニケーションの再現を目指したものである。例えば、分散した仕事場同士をつなぐメディアスペース [Bly 1993], 分散した座席同士をつなぐテレプレゼンス [Buxton 1992; Ishii 1994], 分散した作業現場同士をつなぐ遠隔作業指示システム [Kuzuoka 1992], などである。このような従来研究に対して、我々の超越型コミュニケーションの研究は、対面環境とは全く異なる様式を提案することになる。

次に、超越型コミュニケーションによる避難誘導、すなわち超越型誘導を可能にするシステムについて述べる。このシステムの特徴は、携帯電話と仮想都市を用いている点である。従来の放送設備では一斉のコミュニケーションしかできない。携帯電話は局所的な個別のコミュニケーションを可能にする。そこで、指示を伝えるための音声チャンネルとして携帯電話を用いた。仮想都市を用いた理由は、指示を与えるべき避難群集の特定を

容易にするためである。通常、指令室には多数の監視カメラ映像が並んでおり、全体の様子を一望するのが困難である。現地の様子リアルタイムでシミュレートされた仮想都市は、任意の視点から広範囲を映し出すことができ、指示対象の特定を容易にする。

最後に、現実の公共空間に適用した例として京都駅における実装について述べる。京都駅は一日の乗降客数が 30 万人以上であり、多勢が利用する公共空間の典型である。我々は京都駅を舞台にプロトタイプングを行い、さらに予備的な使用実験を実施した。

2. 超越型コミュニケーション

遠隔から多勢の人間に局所的な指示を与える場合、一斉放送には無いタスクの実行が要求される。まず、指示者は地点ごとの状況の違いを良く把握する必要がある。過去に我々は避難シミュレーションの学習効果を比較する実験を行った [Nakanishi 2004]. その結果、群集行動全体を観察した後で群集の一人になって仮想体験する方法がもっとも良いことが分かった。この結果から、現地全体を見渡せることは局所的な状況の理解にとっても重要であることが分かる。

次に、指示対象を選択する必要がある。ある局所的な状況にもとづいた指示は、その周辺にいる人々にとってのみ有効である。指示対象を選ぶこと、その対象に有効な指示を与えることを繰り返すことになる。つまり、指示者は遠隔から現地全体を見渡して様子を把握しつつ、その中の特定の集団を選んで指示を与えることを繰り返す。

図 1 は、このようなコミュニケーションの概念図である。この図において、指示者は現地全体を上方から見渡しつつ特定の人々に話しかけている。このような様式を支援する遠隔コミュニケーション支援システムはこれまで皆無である。そこで我々はこれに超越型コミュニケーションと名付け、その支援システムを開発した。

従来の遠隔コミュニケーションの研究は対面環境の再現を目指してきたのに対し、我々は公共空間における避難誘導のための独自様式の確立を目指している。この差異を明確にするために以下において、対面コミュニケーション、遠隔コミュニケーション、超越型コミュニケーション、の三つを二つの側面で比較する。図 2 はこの比較を図示したものである。

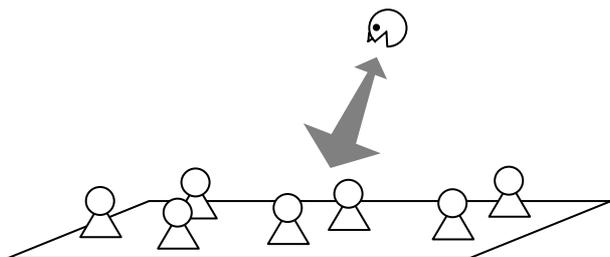


図1. 超越型コミュニケーションの概念図

1. コミュニケーション参加者同士の位置関係

対面コミュニケーションでは全員が地理的に同じ場所にいる。それに対し、遠隔コミュニケーションでは互いに離れた場所にいるのが特徴である。超越型コミュニケーションでも基本的に互いに離れた場所にいる。しかしながら、それはあまり重要な特徴ではない。重要なのは、コミュニケーション参加者が二つの異なる階層に分かれているという点である。それは、空間全体を見渡している超越的参加者の階層と、空間の中にある内在的参加者の階層である。

2. 対話開始のきっかけを伝達するコミュニケーション空間
対面コミュニケーションでは、対人距離やアイコンタクトなどの社会的合図[Okada 1994]が現実空間によって伝達され、対話開始のきっかけとして用いられる。遠隔コミュニケーション支援システムは、対面環境を再現するために、社会的合図を伝達するための仮想空間を提供する。超越型コミュニケーションでは、社会的合図はもはや対話開始のきっかけとはならない。超越的参加者と内在的参加者の間に社会的合図は存在しない。現実空間をリアルタイムでシミュレートする空間が提示する現地の状況に従って、いつどの内在的参加者との対話を開始するかを超越的参加者が決定する。

このように超越型コミュニケーションでは、他者の情報の取得やコミュニケーションの制御において、参加者間に大きな格差が生じる。これまでの遠隔コミュニケーションの研究では、覗き見によるプライバシーの侵害や、唐突にコミュニケーションチャンネルが開くことによる侵入的感覚の回避が大きな課題であった[Borning 1991; Tang 1994]。超越型コミュニケーションでは、これらのうちどちらにも回避されていない。超越的参加者は、内在的参加者のプライバシーを侵害し、唐突に話しかけることができる。このような特権的能力は回避の対象ではなく、逆に、遠隔から多勢の人間に局所的な指示を与えるために必要な能力となっている。

超越型コミュニケーションは、対面コミュニケーションの再現ではなく、現実空間の状況、すなわち実世界コンテキストにもとづいたコミュニケーションである。近年の無線通信技術やセンサー技術の発達と普及が、そのようなコミュニケーションに必要なPUI (Perceptual User Interface) [Pentland 2000]の実現可能性を高めている。実世界コンテキストにもとづいたコミュニケーションは、ユビキタスコンピューティング(UbiComp)の分野や複合現実感(MR)の分野でも探究されている。それらの研究は、

対面コミュニケーションの拡張を目指すものである。一方、我々の研究は、拡張ではなく再設計を目指すものである。この違いを以下に述べる。

Context-aware communication [Nagel 2001]では、実世界コンテキストをコミュニケーション支援システムが利用する。対話相手の状況に合わせて、マイクやスピーカなどのデバイスをどのように選択しどのように作動させるのかを決定するのに用いられる。対話相手の指定は名前を呼ぶことで行われる。超越型コミュニケーションでは、システムではなく超越的参加者が実世界コンテキストを利用する。実世界コンテキストが画面上に可視化され、それにもとづいて対話相手を決定する。

Social MR [Brown 2003; Flintham 2003]では、可視化された実世界コンテキストが対人距離のメタファを持ち込むのに用いられる。デスクトップユーザとモバイルユーザは互いの位置を画面上の仮想都市空間で確認でき、あたかも同じ複合現実空間の中にいる感覚を得る。超越型コミュニケーションでは、可視化された実世界コンテキストが超越的視点を与えるのに用いられる。デスクトップユーザである超越的参加者は、モバイルユーザである内在的参加者が存在する現実空間の状況を、仮想都市空間を通して一望できる。

3. 超越型誘導システム

超越型誘導には、避難群集のいる現実空間を遠隔の指令室などから一望でき、この視界を通して局所的指示を与える対象を直接的に選択できるシステムが必要となる。この条件を満たす超越型誘導システムを、これまで我々が開発してきた仮想都市シミュレータ FreeWalk を拡張して開発した。図3は、超越型誘導システムを使用して地下鉄のプラットフォームにいる人々に指示を与えている様子である。大型タッチスクリーンの前に立っているのは超越的参加者である誘導者である。駅の指令室にいる係員などを想定している。大型スクリーンには、FreeWalkが描画する仮想的なプラットフォーム空間が表示されている。そしてその仮想都市空間の中では、多数の人体モデルが歩いている。これらの人体モデルは、実際にプラットフォームにいる人々の実世界コンテキストを反映している。このように、誘導者は現実空間の状況を把握できる。

現実空間に埋め込まれたセンサーから得られる実世界コンテキストには常にノイズが含まれる。そこで、FreeWalkにはセンサー情報を補完するための、物理的および社会的なシミュレーション機能が備わっている。社会的なシミュレーション機能は、シナリオ記述言語 Q [Ishida 2002]で記述される行動規則によって実現される。記述可能な行動規則の例としては、周囲の人々との距離や歩調を合わせる[Reynolds 1987]、輪になって話す[Kendon 1990]、などである。物理的なシミュレーション機能は、他者や壁との衝突回避を行うための歩行者モデル[Okazaki 1993]と、動力学と運動学にもとづく歩行モデル[Tsutsuguchi 2000]からなる。FreeWalkはVRMLデータを都市空間の可視化のためだけではなく、このような物理的シミュ

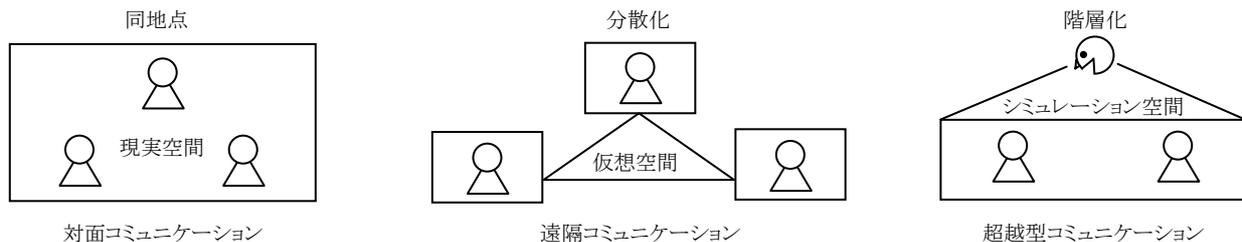


図2. 対面・遠隔・超越型コミュニケーションの比較



図3. 超越型誘導システム

レーションのための幾何モデルとしても用いることができる。

図 3 で、誘導者は人体モデルを指差している。指差しをタッチスクリーンが検知すると、誘導者のマイクが人体モデルに該当する現実の避難者の携帯電話につながるようになっている。携帯電話と FreeWalk の接続には音声応答ボードを用いている。人体モデルと電話番号の対応は、無線 IC タグや光学マーカなどの ID 取得手段によってあらかじめ分かっているものとする。このように、指差しによる直接的な指示対象の選択が、画面に映し出される仮想都市空間上で行えるようになっている。指差しの代わりにドラッグを用いたり、人体の代わりに一定範囲を指定したりするようになれば、複数の避難者を同時に指定することが可能になる。誘導者のマイクを任意の避難群集の携帯電話と同時に繋ぐことが可能である。

図 4 は、アイトラッキングデバイスを用いて図 1 の概念図により近いコミュニケーションを可能にしたものである。誘導者の視線が当たっている避難者の携帯電話と誘導者のマイクがつながるようになっている。誘導者はただ眺めるだけで指示が出せる。タッチスクリーンに比べ、指示対象の切り替えが素早くできる点で有利である。一方、タッチスクリーンでは腕という二つのポイントングデバイスが使えるのに対し、視線は一つのデバイスであるので不利である。また、指示範囲を指定する場合は人体モデルではなく何も無い所を眺めることになり、そのような視線の制御は困難であるという問題もある[Jacob 1990]。このように二つの間の優劣は明確ではない。



図4. アイトラッキングデバイスを用いたシステム

4. 京都駅における実装

超越型誘導システムをある公共空間に実装するには、二つの作業が必要となる。一つは、公共空間の VRML モデルを作成して、仮想都市空間の可視化を可能にすることである。我々は京都駅の VRML モデルを、図面から起こした単純な幾何モデルにデジタルカメラで撮影した写真を貼りつけて作成した。この方法によって作成コストを低く抑えることができ、同時に衝突判定の計算コストも低く抑えることができた。

もう一つの作業は、公共空間に埋め込まれたセンサー群と FreeWalk をつないで、実世界コンテキストの取得を可能にすることである。我々は、FreeWalk と京都駅に設置された 28 台の視覚センサー[Nakanishi 2004]をつないだ。この視覚センサーは、図 5(a) を見ると分かるとおり、CCD カメラと特殊な形状の反射鏡から構成されている[Nakamura 2002]。この反射鏡は、公共空間全体を視覚センサーによって安価に覆うのに有効な役割を果たしている。一つのカメラの画角を広げれば、少ない数のカメラで公共空間全体を覆うことができる。しかし、通常のカメラで画角を広げると画像が歪曲してしまう。我々の視覚センサーは特殊な反射鏡を備えることで、図 5(b) に示すように、この歪みを回避している。具体的には、カメラの光軸に直交する平面を透視投影で撮影できるよう反射鏡が設計されている。図 5(c) は、図 5(b) の画像から背景差分等の手法を用いて群集の位置を検出し、FreeWalk 上に可視化した結果である。京都駅のような屋内の公共空間では GPS が使用できないため、視覚センサーのような何らかの代替手段が必要となる。

現状の実装は十分ではなく、まだ多くの課題が残っている。まず、避難者の携帯電話の番号を自動的に取得する機能が入っていない。また、視覚センサーの位置検出能力が、FreeWalk のシミュレーション機能で補完できるようなレベルにも達しておらず、まだまだ実用的ではない。このような実装レベルで実験を行うために、手動による番号登録や手動による位置

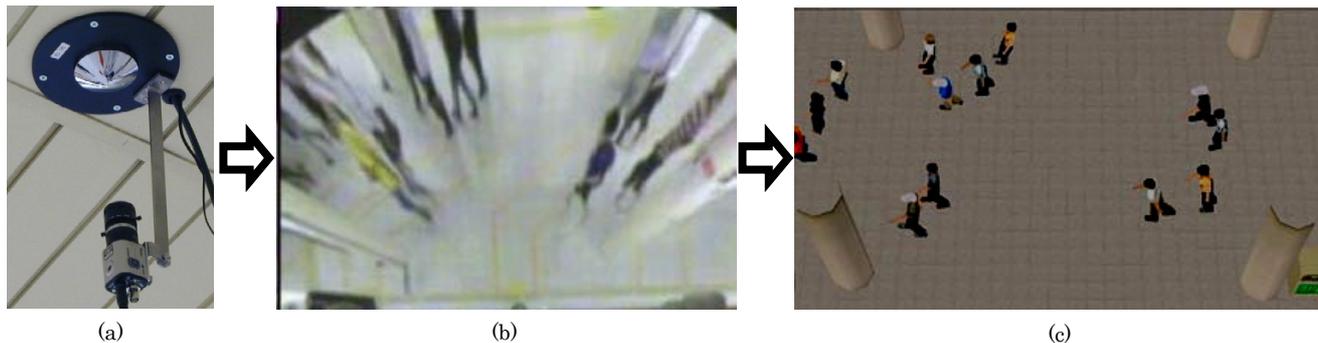


図5. 視覚センサーによる実世界コンテキストの取得

の追跡といった Wizard of Oz 法を適宜用いている。

これまでに行った予備的な使用実験で、誘導者は客観的な誘導とともに避難者の主観的な視点からの誘導も行うことが分かった。客観的な誘導とは、目的地点を「階段」のようなランドマークで指定する方法である。主観的な誘導とは、「そのまま前へ」や「後へ」といった相対的な方向指定である。このようなコミュニケーションの分析が目的であれば、現実空間にいる歩行者ではなく仮想都市空間の中のアバターを誘導する実験で事足りるかもしれない。現在は、そのような仮想実験の手法のテストを行っているところである。

5. おわりに

公共空間の安全性向上にむけて、遠隔にいる係員が現地にいる多勢の訪問者に局所的な指示を与えることのできるシステムを我々は開発した。このようなこれまでに無いコミュニケーション様式を超越型コミュニケーションとして提案した。そして、超越型コミュニケーションによる避難誘導を行うためのユーザインタフェースとして仮想都市シミュレータが有効であることを示した。屋内公共空間の実装例として、京都駅の視覚センサーと仮想都市シミュレータをつないだ事例を紹介した。

超越的参加者である誘導者は、通常の係員による内在型の誘導とは異なる独自の誘導法を用いることになる。今後、そのような誘導法の検討を行っていく必要がある。また、そのような誘導法の分析結果に合わせて、ユーザインタフェースである仮想都市シミュレータの設計も見直していく必要がある。このような実験と設計のサイクルを仮想都市空間の中で行うことを目指した研究も行っていく予定である。

謝辞

日頃よりお世話になっている京都市交通局、京都市総合企画局情報化推進室に感謝致します。

参考文献

- [Klein 1976] Klein, A.L. Changes in Leadership Appraisal as a Function of the Stress of a Simulated Panic Situation. *Journal of Personality and Social Psychology*, 34(6), (1976), 1143-1154.
- [Sugiman 1988] Sugiman, T. and Misumi, J. Development of a New Evacuation Method for Emergencies: Control of Collective Behavior by Emergent Small Groups. *Journal of Applied Psychology*, 73(1), (1988), 3-10.
- [Nakanishi 2004] Nakanishi, H., Koizumi, S., Ishida, T. and Ito, H. Transcendent Communication: Location-Based Guidance for Large-Scale Public Spaces. CHI2004, (2004) (to appear).
- [Bly 1993] Bly, S.A., Harrison, S.R. and Irwin, S. Media Spaces: Bringing People Together in a Video, Audio, and Computing Environment CACM, 36(1), (1993), 28-47.
- [Buxton 1992] Buxton, W. Telepresence: Integrating Shared Task and Person Spaces. *Graphics Interface* 92, (1992), 123-129.
- [Ishii 1994] Ishii, H., Kobayashi, M. and Arita, K. Iterative Design of Seamless Collaboration Media, CACM, 37(8), (1994), 83-97.
- [Kuzuoka 1992] Kuzuoka H. Spatial Workspace Collaboration: a SharedView Video Support System

- for Remote Collaboration Capability. CHI92, (1992), 533-540.
- [Okada 1994] Okada, K., Maeda, F., Ichikawa, Y. and Matsushita, Y. Multiparty Videoconferencing at Virtual Social Distance: MAJIC Design. CSCW94, (1994), 385-393.
- [Borning 1991] Borning, A. and Travers, M. Two Approaches to Casual Interaction over Computer and Video Networks. CHI91, (1991), 13-19.
- [Tang 1994] Tang, J.C. and Rua, M. Montage: Providing Teleproximity for Distributed Groups. CHI94, (1994), 37-43.
- [Pentland 2000] Pentland, A. Perceptual Intelligence. CACM, 43(3), (2000), 35-44.
- [Nagel 2001] Nagel, K., Kidd, C.D., O'Connell, T., Dey, A.K. and Abowd, G.D. The Family Intercom: Developing a Context-Aware Audio Communication System. UbiComp2001, (2001), 176-183.
- [Brown 2003] Brown, B., MacColl, I., Chalmers, M., Galani, A., Randell, C. and Steed, A. Lessons From The Lighthouse: Collaboration In A Shared Mixed Reality System. CHI2003, (2003), 577-584.
- [Flintham 2003] Flintham, M., Anastasi, R., Benford, S., Hemmings T., Crabtree, A., Greenhalgh, C., Rodden, T., Tandavanitj, N., Adams, M. and Row-Farr, Ju. Where On-Line Meets On-The-Streets: Experiences With Mobile Mixed Reality Games. CHI2003, (2003), 569-576.
- [Ishida 2002] Ishida, T. *Q*: A Scenario Description Language for Interactive Agents. *IEEE Computer*, 35(11), (2002), 54-59.
- [Reynolds 1987] Reynolds, C.W. Flocks, Herds, and Schools: A Distributed Behavioral Model. SIGGRAPH87, (1987), 25-34.
- [Kendon 1990] Kendon, A. Spatial Organization in Social Encounters: the F-formation System. A. Kendon, Ed., *Conducting Interaction: Patterns of Behavior in Focused Encounters*, Cambridge University Press, (1990), 209-237.
- [Okazaki 1993] Okazaki, S. and Matsushita, S. A Study of Simulation Model for Pedestrian Movement with Evacuation and Queuing. *International Conference on Engineering for Crowd Safety*, (1993), 271-280.
- [Tsutsuguchi 2000] Tsutsuguchi, K., Shimada, S., Suenaga, Y. Sonehara, N. and Ohtsuka, S. Human Walking Animation based on Foot Reaction Force in the Three-dimensional Virtual World. *Journal of Visualization and Computer Animation*, 11(1), (2000), 3-16.
- [Jacob 1990] Jacob, R.J.K. What You Look at is What You Get: Eye Movement-Based Interaction Techniques. CHI90, (1990), 11-18.
- [Nakamura 2002] Nakamura, T. and Ishiguro, H. Automatic 2D Map Construction using a Special Catadioptric Sensor. *IEEE/RSJ IROS2002*, (2002), 196-201.

QとCORMASの結合: 多層マルチエージェントシミュレーションへの挑戦

Connecting Q and CORMAS: Toward Multi-Layer Multiagent Simulation

鳥居 大祐
Daisuke Torii

石田 亨
Toru Ishida

京都大学 社会情報学専攻
Department of Social Informatics, Kyoto University

For an integrated simulation such as natural environment affected by human society, it is indispensable to provide an integrated simulator that incorporates multiple computational models. We proposed a multi-layer socio-environmental simulation by layering social interaction scenario on environmental simulation. For this simulation, we connect two legacy simulators. One is scenario description language *Q*, which is suitable for describing social interactions. Another is CORMAS, which models interactions between a natural environment and humans. The key idea is to realize a mapping between agents in different simulators. This integration becomes possible by the salient feature of *Q*: users can write scenarios for controlling legacy agents in other systems. Moreover, we find that controlling the flow of information between the two systems can create various types of simulations. We also confirm the capability of CORMAS/*Q*, in the well-known Fire-Fighter domain.

1. はじめに

地球の温暖化, 酸性雨, 森林火災, 地震災害などは世界における環境・災害問題の大きなトピックであり, 情報技術が果たす役割が期待されている。例えば, 人と環境を含めた総合的な *Socio-Environmental Simulation* が実現すれば, 問題に対する政策や訓練などに反映することができる。MABS のためのシミュレータの中には, エージェントのモデリングに汎用性を保つため, 特定の計算モデルを持たせないものもある。例えば, *Socio-Environmental Simulation* のためのシミュレータとして代表的なものに CORMAS [Bousquet 98]が挙げられる。CORMAS では, エージェントの社会的インタラクションを実現するために, 一からモデルの構築を行う必要がある。

このような問題への対策の流れとしては二つ挙げられる。一つは, 計算モデルの結合である。これは *Doking* [Axtell 96]と呼ばれ, 二つの計算モデルを比較し妥当性を得る目的と結合された計算モデルの可能性を探る目的がある。もう一つは, マルチレイヤーアーキテクチャの構築である。特徴の異なる二つのシミュレータを結合して, 目的に合わせたシミュレーションを柔軟に実現するものである。例えば, ロボカップシミュレータでは, サッカーサーバに対し, 様々なエージェントモデルを結合するプロトコルが提供されている[Noda 01]。また, *Q*[Ishida 02b]は, 既存エージェントに対し外付けで結合でき, エージェントの社会インタラクションを設計するための言語である。*Q* は, 計算機の非専門家向けの記述言語であり, ドメインに依存せずあらゆるエージェントシステムに結合できる汎用性を持っている。これまでに, *FreeWalk* や *Microsoft Agents* と結合の実績がある[Ishida 02a, Murakami 03, Nakanishi 02]。

本研究では, 実際に, 自然環境と人間とのインタラクションの記述に適したマルチエージェントシミュレータ CORMAS に対し, 社会的インタラクションの記述に適したマルチエージェントシナリオ記述言語 *Q* を結合し, 多層 *Socio-Environmental Simulation* を構築する。CORMAS は, 自然資源の管理のシミュレーションに実績がある[Bah 03, Perez 02]。自然環境のシミュレーションをセルラオートマトンモデルで実現し, エージェントは自然環境の状態に応じた行動を定義することができる。一方, シナ

リオ記述言語 *Q* では, 複雑なプランやエージェント間のインタラクションを拡張状態遷移機械モデルで記述できる。*Q* は社会的インタラクションのシミュレーションに実績がある[Murakami 03, Nakanishi 02]。

本結合は, 二つの計算モデルの結合であると共に, 二つの汎用性を持った既存シミュレータの結合によるマルチレイヤーアーキテクチャの構築でもある。即ち, セルラオートマトンモデルと拡張状態遷移機械モデルの結合だけでなく, 例えば, CORMAS 上で *Q* の特徴である *IPC*(表1参照)の利用や参加型シミュレーションを実現できる。本結合の実現には, レガシーなエージェントのシナリオが記述できるという *Q* の特徴が生かされている。本研究では, さらに, 接続されたシステム間を流れる情報を *Connection Description* で制御することにより, 両シミュレータの内部を変更することなく, 柔軟にシミュレーションを操作できる手法を提案する。また, 両者の接続には, 以下の2つの課題を解決しなければならない。

機能分担

両シミュレータ内のエージェント間の対応付けとそれぞれの役割を定義する必要がある。CORMAS/*Q* の場合には, 同一エージェントの CORMAS 側で自然環境の観察と行動を実行し, *Q* 側でエージェント間のインタラクションのシナリオを記述する。

時間管理

両シミュレータの内で進行する時間の整合性をとる必要がある。CORMAS/*Q* の場合には, CORMAS で時間を管理し, *Q* では一切の管理を行わない。

以下, 本論文では CORMAS/*Q* を説明し, 実際に行った Cohen らによる森林火災のシミュレーション[Cohen 89]を例に, 多層マルチエージェントシミュレーションの有効性を確認する。

2. 多層マルチエージェントシミュレータ

2.1 アーキテクチャ

多層 *Socio-Environmental Simulation* は, 環境シミュレーションに社会シミュレーションを結合することで実現される。このシミュレータは, 社会シミュレーションと環境シミュレーションの二層より構成される。社会シミュレーションは, 意志決定, 交渉, 協調過程のシミュレーションである。環境シミュレーションは, 環境を観察し, 環境に作用するエ

エージェントと、環境内での変動の伝播のシミュレーションである。

社会的インタラクションと、環境における変動の伝播は以下のように実行される。まず、社会的インタラクション(例えばグループ意思決定)のシナリオは、社会シミュレーションの層で実行されるが、メッセージングなど実際の行為は、環境シミュレーションの側で対応するエージェントによって実行される。これは、現実世界における行為をすべて、環境シミュレーション側に集約し、両シミュレーションの同期の問題を解決するためである。即ち、社会シミュレーションの実行が、環境シミュレーションに比べ十分に速ければ、時間の管理は環境シミュレーションの側だけで行えばよい。

一方、環境における変動の波及は環境シミュレーション側で計算されるが、エージェントの制御は社会シミュレーションのシナリオに従う。例えば、エージェントがシナリオに従って自然環境に対し何らかの行為を実行すると、その影響の波及が計算される。エージェントはその結果を、シナリオに従って観察する。

2.2 Connection Control

異なるレイヤー間の結合箇所を流れる情報を制御することにより、既存のシミュレータに手を加えなくとも、多様なシミュレーションを実現できる。例えば、次の3種の情報が結合部分を流れる。

- 環境の観察
- 環境への行為
- 他のエージェントとのコミュニケーション

上記の情報に対し、結合部分で以下の操作が可能である。

- 情報を伝達しない (accuracy)
- 情報の伝達を遅らせる (delay)

この操作を、シミュレーション利用者の視点から、organizational descriptionとして以下のように指定させる。

Communication Channel

組織内の情報伝達の正確性、速報性を指定する。Fire Fighterの例(図1参照)では、一人のFirebossの下で複数のfire fighterが働く。FirebossとFire Fighterの間の情報伝達、fire fighter同士の情報伝達に関して指定することができる。例えば、FirebossからFire Fighterへの情報伝達の正確さ(accuracy)を0.8、その遅延(delay)を3と指定したとしよう。すると、FirebossからFire Fighterへのメッセージは5回に1回は欠落し、到達したメッセ

ージは3単位時間遅延する。それに対し、Fire Fighterは現場からの情報伝達の困難さがあり、その正確さを0.5とするなどの設定が可能となる。

Efficiency of Information Gathering

組織の情報収集能力を指定する。Fire Fighterの例では、Firebossの情報収集は正確性においても速報性においてもFire Fighterに比べ、著しく劣るかもしれない。

Efficiency of Environmental Actions

組織の環境への行為の正確性、遅延を指定する。例えば、Fire Fighterの例では、現場のFire Fighterの消火作業は、70%しか有効でないかもしれない。

重要なことは、結合するシミュレータの内部に手を加えなくとも、結合部分にconnection descriptionを与え、僅かの処理を加えるだけで、社会シミュレーションと環境シミュレーションの柔軟な結合が可能となることである。

3. QとCORMASの結合

3.1 QとCORMAS

実際に社会シミュレータとしてQを用い、環境シミュレータとしてCORMASを用いて、前章のアーキテクチャに従って、両シミュレータの結合を試みる。結合されてきたシミュレータは、表1に示すようにQとCORMASのそれぞれの特徴を生かすことができる。

まず、各エージェントのQシナリオを用意する。シナリオにはエージェントが実行すべき環境の観察(Cue)、環境への行為(Action)が含まれている。同時に、シナリオには他のエージェントからのメッセージ受信(Cue)、他のエージェントへのメッセージ送信(Action)も記述される。Qのエージェントはシナリオの実行をするためのものであり、実際にキューとアクションを実行するのはCORMASの対応するエージェントである。従って、Qのシナリオ中に現れるキューとアクションの実体は、CORMAS側で定義されていなければならない。シナリオの実行中にキューとアクションの実行が必要となれば、その依頼をQからCORMASに伝え、その実行結果をCORMASからQに伝えなければならない。

注意しなければならないのは時間の管理である。一般には、QとCORMASで独立に時間を管理し、Connection Control Moduleがその同期を図る方法が考えられる。Qはイベントドリブ

表1 Q and CORMAS

	Q	CORMAS
目的	<ul style="list-style-type: none"> 複数の(レガシーな)エージェント間のインタラクションシナリオを記述するための言語。 既存のエージェントシステムに外付けで、エージェントの実行制御を行う。 	<ul style="list-style-type: none"> 自然資源を利用する個人あるいは集団間の協調過程のシミュレーションを目的とするシステム。 自然環境の変動と、自然環境を観察/実行するエージェントを定義できる。
計算モデル	<ul style="list-style-type: none"> 拡張状態遷移機械によりエージェントのシナリオを表現。 	<ul style="list-style-type: none"> セルラオートマトンにより、自然環境の変動を表現。
シミュレーション記述の特徴	<ul style="list-style-type: none"> 利用者は各エージェントが持つセンシング機能(キュー)と実行機能(アクション)を利用してシナリオを記述することができる。 インタラクションパターンカード(IPC)による計算機の非専門家によるシナリオ記述が可能。 一部のエージェントを人間に置き換えることにより、ユーザ参加型シミュレーションが可能。 	<ul style="list-style-type: none"> 各ステップ(単位時間)毎に、各セルやエージェントが実行すべき機能を記述することでシミュレーションが実行できる。 モデリングツール(空間、エージェント、コミュニケーション)、管理ツール(シミュレーション)、可視化ツール(コミュニケーション、統計情報)が提供されている。 MapInfo、ArcViewなどのGIS(Geographic Information Systems)からの空間マップをインポートして利用可能。
シミュレータの特徴	<ul style="list-style-type: none"> イベント駆動モデル。インタラクションにより生じるイベントを契機として、対応する処理を実行。 時間管理機能はなく、時間の管理はキューとアクションを実行するエージェントシステムに依存。 	<ul style="list-style-type: none"> 離散事象モデル。各ステップ(単位時間)毎に隣接するセル間での自然環境の伝播や、エージェントの行為を実行。 各ステップに時間を割り当てることにより、実時間でのシミュレーションが可能。
応用例	<ul style="list-style-type: none"> 避難誘導のシミュレーション 仮想空間上での社会心理学実験 	<ul style="list-style-type: none"> 水、森林、牧草地などの資源の再利用問題 農地の相互利用問題
実装言語	<ul style="list-style-type: none"> Scheme 	<ul style="list-style-type: none"> Smalltalk

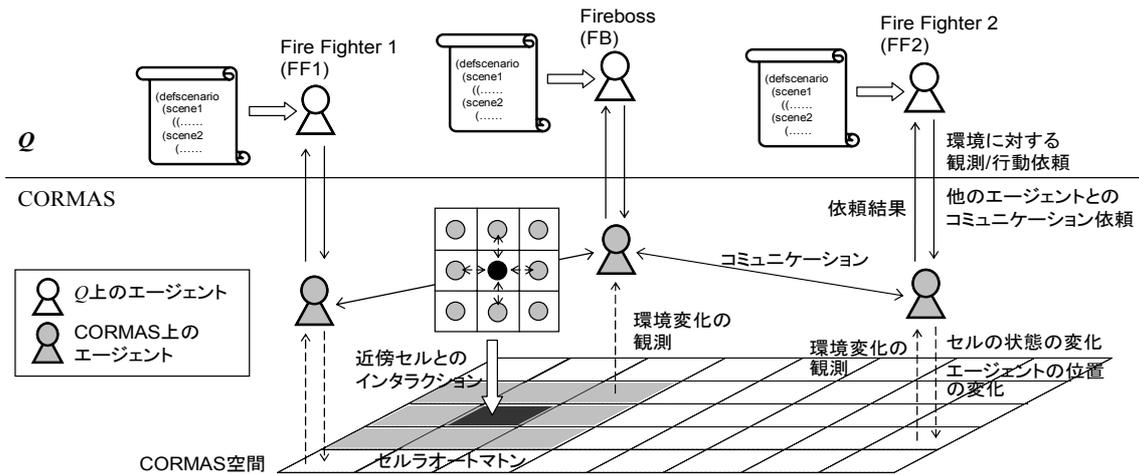


図 1 CORMAS/Q による Fire Fighter シミュレーション

ンでシナリオの実行が進んでいくが、CORMAS はステップ (単位時間) 毎にシミュレーションが進行する。従って、両者の同期のためには制御が複雑となり、 Q と CORMAS の内部にも手を入れる必要が生じる。そこで、CORMAS にすべての時間管理を任せ、時間を要する観察や行為は全て Q から CORMAS に依頼することとした。即ち、 Q での処理は CORMAS に比べ十分早く、CORMAS の実行には遅延を生じさせないという仮定をおき、CORMAS 上での時間管理にとって、 Q を意識する必要がないようにした。

CORMAS では、ステップごとに、空間的な計算の伝播と、エージェントの観察/行為が計算される。例えば、 Q のシナリオから依頼された行為が実行されると、その環境への波及は以降のステップで CORMAS により計算され、 Q のシナリオから依頼された観測により、以降のシナリオの実行にフィードバックが生じる。

3.2 Connection Control Module

Q と CORMAS を接続するために、 Q 言語処理系側に Q Connector を、CORMAS 側に CORMAS Connector を用意した。 Q Connector は CORMAS 側に Q 側の実行要求を伝える役割と、実行結果を受け取って Q 言語処理系へ返す役割がある。CORMAS Connector では、キューやアクションの実行要求を受け取り、対応する CORMAS メソッドを呼び出す。また、その実行結果を Q 側に返信する役割がある。

4. Fire Fighter モデル

4.1 問題

Q と CORMAS の接続の有効性を確認する例題として、Cohenらによって行われた Yellowstone National Park の火災シミュレーション [Cohen 89] を実装した。

この問題では、火災の広がりを防ぐため、全体の状況を見ながら指示を出す Fireboss と、その指示に従いながら公園内で行動する Fire Fighter が存在する。Fire Fighter はブルドーザーであり、Fireboss の指示に従いながら、火災を囲むように木を取り除いた道 (fireline) を作ることで、火災の広がりを防ごうとする。環境は、セルごとに川、平地、道路、木、火などの状態を持っている。火災は、風の速度と向き、湿度、地形の特性などによって広がっていく。

シミュレーションは公園内で火災が発生し、2 体の Fire Fighter が火災の位置と風向きなどから決定された集合ポイントに配置されることから始まる。Fireboss は、その時点での火災の状態から 2 体の Fire Fighter が取るべきルートを決め指示を出す。各 Fire Fighter は、指示されたルートに従って時計回りと半時計回りに動き、木を取り除いていく。Fire Fighter は、指示されたルート上に火災が広がっていれば、ルートを自ら変更する。また、急激な環境の変化により、Fire Fighter に突如として火

災が及ぶことがある。その場合は、行動プランに関係なく、瞬時にその場所から退去する。このようなルートの変更は Fireboss に報告され、Fireboss はエージェントの位置と環境全体の情報から作成したルートプランを Fire Fighter に返信する。そのプランと比較して、Fire Fighter のルート変更が適切なものでない判断されれば、Fire Fighter は、現在のルートプランを Fireboss のルートプランに変更する。また Fire Fighter は、川などの境界や他のエージェントによって作られた fireline にぶつかった場合、次の行動を Fireboss に問い合わせる。Fireboss は fireline が完成されていると判断すれば、作業の終了を指示する。仮に、火災が他の場所に飛び火などして広がっていれば、別のルートを指示する。このように、Fireboss と Fire Fighter のインタラクションによりシミュレーションが進行し、最終的に火災の進行が食い止められる。

4.2 シナリオ

図 1 にこの問題の CORMAS/Q での実装を示す。CORMAS 上には、各セルに森林、空き地、川などの地形情報と風の向きと速度の天候情報を含む環境のモデルを構築し、火災が時刻と共に広がるシミュレーションが実現された。一方、Fireboss と Fire Fighter に対応するエージェントを Q と CORMAS 双方に定義し、 Q シナリオで CORMAS 内のエージェントの行動を制御している。シナリオでは、エージェント間の社会的インタラクションや、Fire Fighter と環境とのインタラクションが記述されている。

すでに述べた Fireboss と Fire Fighter の役割は、状態遷移図で表現することができる (図 2 参照)。また、Fireboss の Q シナリオを図 3 に示す。 Q シナリオは基本的に状態遷移図を素直にコーディングしたものである。4.1 の問題説明と図 2 の状態遷移図、図 3 のシナリオ記述の対応は簡単に確認できると思われる。

4.3 結果

図 4 にシミュレーションのスクリーンショットを示す。初期値として空間の中央に小さな火災を発生させ、北風により火災を拡大させていく。CORMAS のマップ (図 4 参照) は、fireline と環境の境界 (川) により火災を囲み、シナリオが意図したように火災の広がりを食い止めることができたことを示している。このことは、エージェントの行動プランを表したシナリオの適切さと、多層マルチエージェントシミュレータの妥当性が示されたと考えられる。

5. おわりに

本論文では、総合的なシミュレーションシステムを構築する手法を示した。具体的には、拡張状態遷移機械を計算モデルとしてイベントドリブン方式の Q 言語処理系と、セルラオートマトンを計算モデルとしてステップ実行方式の CORMAS を結合した。結合されたシミュレーションシステムにより、社会シミュレーションと環境シミュレーションが可能となる。

結合を可能としたのは、 Q 言語処理系がレガシーなエージェントのシナリオを記述し、その実行を制御するという特徴を持っていたことに負うところが大きい。時間を要するエージェントの行為を全て CORMAS に任せ、時間管理を一元化し、結合された

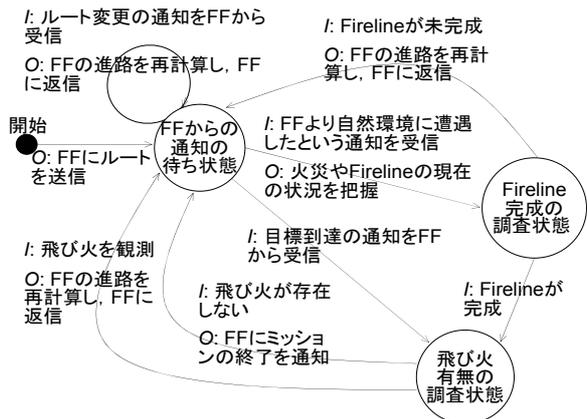


図2 Firebossの状態遷移図

```
(defscenario fireboss
  (&pattern ($FF_name "") ($FF_info "") ($env_info "") ($route ""))
  (Waiting-FF-report
    ((?route_change_report :from $FF_name :info $FF_info)
     (!get_env_info :info $env_info)
     (!calculate_route :info $FF_info :info $env_info :result $route)
     (!send_route :to $FF_name :result $route)
     (go Waiting-FF-report))
    ((?natural_boundary_report :from $FF_name :info $FF_info)
     (!get_env_info :info $env_info) (go Investigating-firelines))
    ((?goal_arrival_report :from $FF_name :info $FF_info)
     (go Searching-other-fire)))
  (Investigating-firelines
    ((?firelines_encircled :info $env_info) (go Searching-other-fire))
    ((?firelines_not_encircled :info $env_info)
     (!calculate_route :info $FF_info :info $env_info :result $route)
     (!send_route :to $FF_name :result $route)
     (go Waiting-FF-report)))
  (Searching-other-fire
    ((?no_more_fire :info $env_info)
     (!send_mission-complete :to $FF_name)
     (go Watching-FF-report))
    ((?other_fire :info $env_info)
     (!calculate_route :info $FF_info :info $env_info :result $route)
     (!send_route :to $FF_name :result $route)
     (go Waiting-FF-report))))
```

図3 FirebossのQシナリオ

システムが複雑になることを避けている。さらに、結合部分に connection description に従った情報の伝達制御を埋め込むことによって、多様なシミュレーションを可能とすることに成功している。さらに CORMAS/Q により、Cohen らによる森林火災のシミュレーションモデルを実装し、モデルが意図する結果を得ることで、システムの動作確認を行った。

我々は IRRI (International Rice research Institute) Thailand Office と CIRAD の共同プロジェクトに協力して、タイにおける環境シミュレーションに、この CORMAS/Q の適用を検討し始めている。Q は、シナリオで制御されたエージェントを容易に人間が制御するアバターに置き換えることができるので、参加型シミュレーション(人間とソフトウェアエージェントが協力しながらシミュレーションを進める)に適している。また、Q はシナリオの記述に拡張状態遷移機械を用いているため、参加型シミュレーションの結果から、機械学習を用いてシナリオの改善を図ることも可能である。今後は、さらに共同研究を進め、実問題への適用を図っていく予定である。

謝辞

本研究はパリ第六大学との共同プロジェクトの一環として行われた。御助言を頂いたパリ第六大学の Alexis Drogoul 教授、本実装において協力いただいた Stephane Bonneaud 氏に感謝の意を表す。

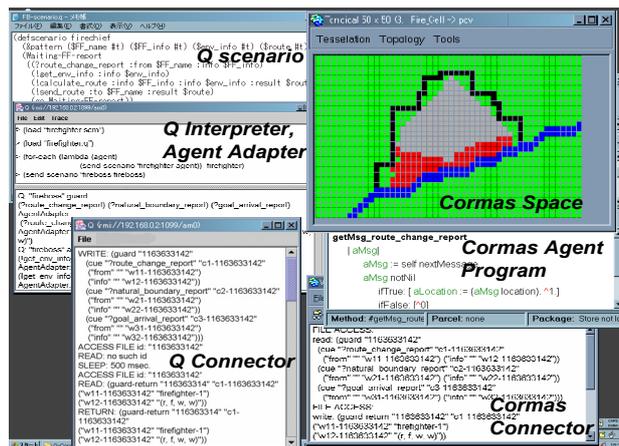


図4 Fire Fighter シミュレーションの様子

参考文献

[Axtell 96] Axtell, R. L, Epstein, J. M. and Cohen, M. D. Aligning Simulation Models: A Case Study and Results. *Computational and Mathematical Organization Theory*, vol. 1, 123-141, 1996.

[Bah 03] Bah, A., Touré, I. and Le Page, Ch. An Agent-Based Model tool for multi-agent simulation for Understanding the Multiple Uses of space Land and Resources around a Drilling Sites in the Sahel. *In Proceedings of Modsim 2003 International Congress on Modeling and Simulation*, 1060-1065, 2003.

[Bousquet 98] Bousquet, F., Bakam, I., Proton, H. and Le Page, C. Cormas: common-pool resources and multi-agent Systems. *Lecture Notes in Artificial Intelligence* 1416, 826-838, 1998

[Cohen 89] Cohen, P. R., Greenberg M. L., Hart, D. M. and Howe, A. E. Trial by fire: Understanding the design requirements for agents in complex environments. *AI Magazine*, Vol. 10 No. 3, 32-48, Fall 1989.

[Ishida 02a] Ishida, T. Digital City Kyoto: Social Information Infrastructure for Everyday Life. *Communications of the ACM (CACM)*, Vol. 45, No. 7, 76-81, 2002.

[Ishida 02b] Ishida, T. Q: A Scenario Description Language for Interactive Agents. *IEEE Computer*, Vol.35, No. 11, 54-59, 2002.

[Murakami 03] Murakami, Y., Ishida, T., Kawasoe, T. and Hishiyama, R. Scenario Description for Multi-Agent Simulation. *In Proceedings of International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS-03)*, 369-376, 2003.

[Nakanishi 03] Nakanishi, H., Nakazawa, S., Ishida, T., Takanashi, K. and Isbister, K. Can Software Agents Influence Human Relations? Balance Theory in Agent-mediated Communities. *In Proceedings of International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS-03)*, 717-724, 2003.

[Noda 01] Noda, I. and Stone, P., RoboCup Soccer Server and CMUnited: Implemented Infrastructure for MAS Research, Infrastructure for Agents. *Multi-Agent Systems, and Scalable Multi-Agent Systems*, Wagner, T., Rana, O., ed., 94-101, 2001.

[Perez 02] Perez, P. and Ardlie, N., Kunepong, P., Dietrich, C., Merritt, W. S. CATCHCROP: modeling crop yield and water demand for integrated catchment assessment in Northern Thailand. *Environmental Modelling and Software*, Vol. 17, No. 3, 251-259, 2002.

写真に見る石田研員心得（？）

その1. ソフトボールが出来ること



その2. 料理が出来ること



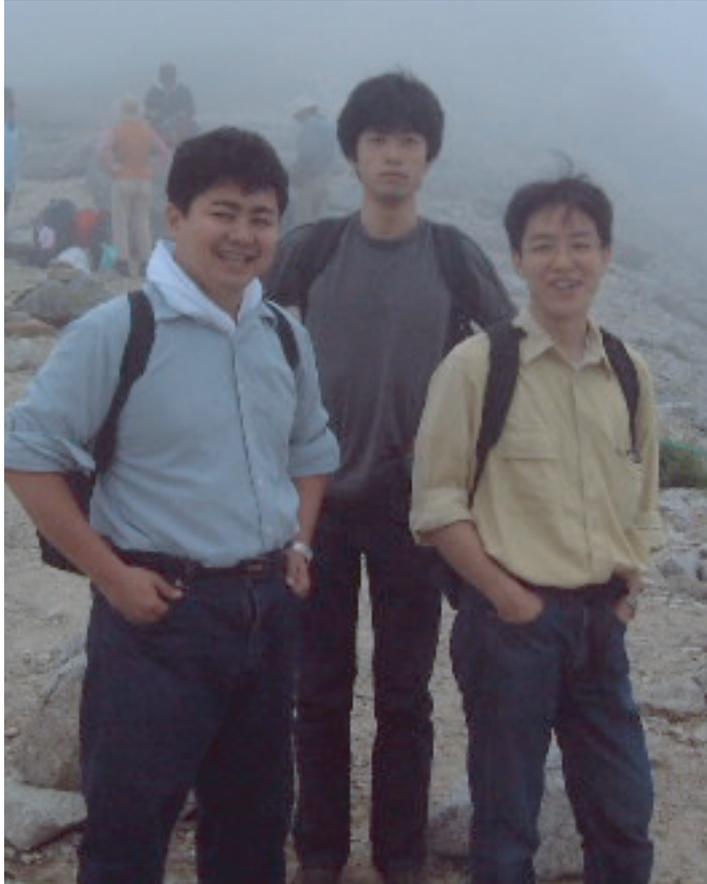
その3. 好奇心旺盛なこと

(落ち着きがない,
協調性がない,
のとは多分違います)





肉体派な3人組



リュックな3人組

写真で見る



エネルギッシュな3人組

毎年いるのは、浴衣にメガネな3人組



インテリジェントな3人組



石田研にいる色々な3人組



クールな3人組

真ん中分けな3人組



そして、たまにいるのは、
おしとやかな3人組...

写真に見る石田研の1年



花見

研究



夏合宿



出張



ソフトボール



発表



終わり



