

特集 「マルチエージェント技術における新しい可能性」

マルチエージェントシステムのための 実装技術とその応用

Implementation Technologies for Multiagent Systems and Their Applications

伊藤 孝行
Takayuki Ito

北陸先端科学技術大学院大学知識科学教育研究センター
Center for Knowledge Science, Japan Advanced Institute of Science and Technology.
itota@jaist.ac.jp, <http://www.jaist.ac.jp/~itota/>

新谷 虎松
Toramatsu Shintani

名古屋工業大学知能情報システム学科
Intelligence and Computer Science, Nagoya Institute of Technology.
tora@ics.nitech.ac.jp, <http://www-toralab.ics.nitech.ac.jp/~tora/>

Keywords: multiagent systems, cooperation mechanisms, and negotiation technologies.

1. はじめに

本稿では、マルチエージェントのための実装技術、およびその応用事例を示す。本稿では、エージェント^{*1}を、ネットワーク上で自律的に行動するソフトウェアと定義する。マルチエージェントシステム [Weiss 99] とは、複数のエージェントの自律的かつ協調的な行動によって問題を解決するシステムである。マルチエージェントシステムにおいて、エージェントは個々に問題をもち、かつ個々に問題を解決しながら、システム全体としての問題もうまく解決しなければならない。

近年のマルチエージェントに関連する研究は、大きく分けて以下の二つに分類できる。一つは、エージェントが本質的に互いに協調的であることを前提にした研究である。もう一つは、経済学的な観点に基づく研究で、エージェントが互いに利己的かつ競争的であることを前提にした研究である。前者は、分散 AI を起源としており、マルチエージェントシステム全体としての目的を達成するために、個々のエージェントは明示的に協調してタスクを実行するための機構をもつ。すなわち、エージェントは本質的に協調的である。前者に分類される研究の特長は、実システムの実装に関する研究が多い点である。後者は、個々のエージェントは利己的であり、かつ競争的であることを前提とした研究である。利己的なエージェントが複数集まった場合に、いかにして協調的な振舞いを導きだし、かつ、個々のエージェントの利己性を保つかが問題となる。図 1 に、本稿で紹介するマルチエージェントに関連する研究の分類を示す。図 1 の左は、エ

本質的に協調的な マルチエージェント	経済学的なアプローチに基づく マルチエージェント
1. 議論・説得に基づく交渉技術	1. 契約ネットプロトコル
2. 分散制約充足問題	2. 市場指向プログラミング
3. 異種エージェントの協調機構 ・チームの協調機構 ・MatchMakerとBroker	3. オークションに基づく交渉技術 ・組合せオークション ・逐次オークション

図 1 マルチエージェントの研究の分類

ージェントが本質的に互いに協調的であることを前提としたマルチエージェントのための実装技術である。図 1 の右は、経済学的な観点に基づくマルチエージェントのための実装技術である。

本稿の構成は以下のとおりである。第 2 章では、議論・説得に基づく交渉機構、分散制約充足問題、および異種エージェントの協調機構に関する研究を示す。第 3 章では、経済学的な観点に基づく研究として、古典的な交渉技術やオークションを解説する。第 4 章では、第 2 章および第 3 章で紹介した実装技術の応用事例を示す。第 5 章では、本稿のまとめを示す。

2. 協調的なマルチエージェントシステム

2.1 議論・説得に基づく交渉技術

エージェントが互いに異なる選好をもつ場合、合意を形成し協調的にタスクを実行する必要がある。競合状態におけるマルチエージェントの合意形成として、議論や説得という合意形成も研究されている。

本稿ではマルチエージェントのための合意形成手法としての議論を示す。マルチエージェントによる議論に関する古典的なシステムとして PERSUADER [Sycara 88] がある。PERSUADER は、労働争議における調停案を生成するシステムである。PERSUADER は、事例ベース推論と多属性効用理論を用いて、議論の目的や議論の戦略に基づいて、さまざまな議論を生成できる。

^{*1} エージェントという言葉の定義に関しては、さまざまな議論があり、統一的な見解が得られていない。詳しい説明はほかの論文 [Franklin 96] に譲る。

Jenningsら [Sierra 97] は、エージェント間の説得的な交渉を会話理論に基づく議論として定義した。発話行為として **appeal**, **threaten**, および **reward** などを用いし、これらの発話行為を基に説得的な議論を生成する。エージェントは説得を受けたとき、社会的な役割 (Social role) に基づいて妥協するか否かを決定する。また、文献 [Parsons 98] ではマルチエージェントの合意形成を議論として定式化した。本定式化に基づいて、エージェント間の説得や妥協などさまざまな合意形成方式を記述できる。議論において主張が競合する状況として、主張そのものが衝突する **rebut**, および、ある主張が推論の途中の命題と衝突する **undercut** を明確に記述している。

沢村ら [Sawamura 00] は、**dialectical logic** に基づいて、**lift up** と呼ばれる手法を提案している。**lift up** とは、競合する議論において、妥協的な議論を生成する手法である。例えば、 $A \wedge B$ と $\neg B$ という議論において、 $A \wedge \neg B$ という妥協的な議論を生成できる。服部ら [Hattori 01] は、既存のマルチエージェントの議論が、2 エージェントによる一対一の通信を基本にしていたのに対し、共有メモリを用いることによって、複数のエージェントが非同期に議論を行う方法を提案している。Jungら [Jung 01] は、移動するターゲットを分散されたセンサで捕獲する問題を分散制約充足問題として形式化し、その解法として議論を応用している。

筆者らは、ユーザの代理としてのエージェントが、ほかのエージェントを説得することによるマルチエージェントの合意形成手法を提案した。エージェントがユーザの代理としてほかのエージェントと合意を形成する場合、ユーザの選好順序などのプライバシーを守りながらユーザの好みを反映させる点が重要である。文献 [Ito 97a] では、以上の点を満たしながら、エージェント間の説得に基づく合意形成機構を実現している。ここでは、ユーザの主観的な選好は、あいまいな基準に基づいているため、適度な範囲であればユーザの選好は調整可能とし、これに基づいて選好の翻意機構を実現している。この合意形成機構は、4.2 節で述べるグループ代替案選択支援システム GCDSS に応用されている。

2.2 分散制約充足問題

分散制約充足問題 (DCSP: Distributed Constraint Satisfaction Problem) は、マルチエージェントによる制約充足問題 (CSP: Constraint Satisfaction Problem) と捉えることができる。DCSP と CSP の違いは、初期状態において、制約や変数が複数の計算主体に分散されているか否かである。DCSP の解法の多くは、エージェントが本質的に協調的であることが仮定されている。横尾ら [Yokoo 01] によって非同期バックトラッキング、非同期弱コミットメント探索アルゴリズム、分散ブレイクアウトアルゴリズム、などの探索アルゴリズムが提案

されている。例えば、非同期バックトラッキングでは、探索途中で各エージェントの制約が満たされなかった場合、各エージェントの優先順序を付け替えて、制約を解き直す。

実世界の問題を DCSP として定式化すると、過制約になり、解が存在せず、解くことが不可能になる場合が多い。平山 [Hirayama 00] は、分散部分的 CSP の一つとして、分散階層型 CSP を示し、その制約充足アルゴリズムを提案している。鶴田 [Tsuruta 00] では、実世界の会議スケジューリングを題材として、過制約な問題を重み付き制約充足問題として形式化し、その解法を示している。

2.3 異種エージェント間の協調

互いに異なる設計者によって設計されたエージェントを異種エージェントと呼ぶ。異種エージェントを適切に協調させることにより、複雑で大規模な問題解決を行うマルチエージェントシステムを迅速に開発することが可能となる。

Sycara らの Middle-agent は、オープンな環境における異種エージェント間の仲介役となるエージェントである。Sycara らは文献 [Decker 97] で、Middle-agent として、特に、MatchMaker と Broker の二つのタイプの Middle-agent の有効性を主張している。MatchMaker も Broker も、サービスを提供するエージェント (供給者と呼ぶ) と、サービスを要求するエージェント (要求者と呼ぶ) の仲介役となる。MatchMaker と Broker は、どこにどのような供給者が存在するか、という情報をもっている。この情報は、エージェント自身が自分の情報を MatchMaker や Broker に知らせておく (advertisement) ことによって得られる。MatchMaker は、要求者と供給者の間の通信を確立する役目は果たすが、その後は仲介せず、そのエージェントどうしに直接通信させる。Broker は、要求者と供給者の間の通信を確立するために、常に間に入って通信を中継する。

Tambe [Tambe 97] らは、各エージェントに明示的にチームワークに関する知識をもたせることにより、柔軟で頑健なマルチエージェントによるチームを構築するために STEAM (Shell for TEAMwork) を提案した。STEAM は、戦闘フィールドなどの領域において有用性が示されている。STEAM は、Joint Intention 理論 [Cohen 91] および SharedPlan 理論 [Grosz 96] をもとに構築されている。STEAM では、各エージェントがリアクティブプラン (オペレータ) の階層を持つ。階層には、チームオペレータと各エージェントの個人オペレータが存在する。TEAMCORE [Pynadath 99] は、STEAM に基づいた異種エージェントの協調のための枠組みである。TEAMCORE とは、STEAM を用いて構築された Wrapper を用いて、異種のエージェントをチームとして統合する枠組みである。TEAMCORE の応用と

3. 経済学的アプローチに基づく マルチエージェントシステム

Smith の契約ネットワークプロトコル [Smith 80] は、マルチエージェントの交渉技術としては最も知られた伝統的な方式である。契約を提案するエージェントはマネージャ、請け負うエージェントは契約者と呼ばれ、互いに複数存在し得る。契約ネットワークプロトコルは、マネージャのアナウンス、契約者の入札、マネージャの落札の順でメッセージが交換され、契約が成立する。契約ネットワークプロトコルの特徴は、個々のエージェントが独立の評価基準をもつことにより、マネージャも契約者も互いに選択権をもつ。これは相互選択 (mutual selection) と呼ばれる。多段階交渉プロトコル [Conry 88] は資源割当てのためのプロトコルであり、大域的な制約があることを前提とする。エージェントは大域的な制約が満足されるまで繰り返し交渉を行う。

Wellman ら [Wellman 93] は、利己的なエージェント間での資源割当て問題のために、市場均衡理論を応用した市場指向プログラミングを提案している。市場指向プログラミングでは、分散資源割当て問題を、マルチエージェントによる市場によってモデル化し、競争的な均衡を見つけることによって、解決することを目的としている。Wellman らは、WALRAS と呼ばれるマルチエージェントによる市場のテストベットの構築し、市場指向プログラミングの有用性を示した。

オークションは、マルチエージェントのタスク割当てや資源割当てのための交渉方式として利用される。オークションは、売り手と買い手により行われる。売り手はより高く財（商品）を売ることがを望み、買い手はより安く財を買えることを望む。一般的なオークションのプロトコルとして、英国式オークション、第一価格秘密入札オークション、オランダ式オークションや Vickrey（第二秘密入札）オークションなどがある [Rasmusen 89, 横尾 00b]。四つのプロトコルのうち、最も興味深いのは Vickrey オークションである。Vickrey オークションでは、入札価格は非公開、かつ買い手の入札は一度限りである。財は最も高額な値段を入札として示した売り手

近年，複数財に対するオークションが注目を集めている．複数財に対するオークションとして，組合せオークション (Combinatorial Auction) がある．まず，組合せオークションの例を図 2 に示す．一般的に組合せオークションは，1 人の売り手，複数の買い手，および複数の財で行われる．本例では，買い手を $a1$ から $a4$ の 4 人とし，財を A から D の四つとする．そして，各買い手は，売り手に対して入札を行う．入札は，複数の財の組合せに対して，値段をつける．例えば，図 2 のエージェント $a1$ の入札は，「財 A と財 B の組合せに 500 円，または財 B に 300 円」を意味し，「財 A と財 B に 500 円」という入札と「財 B に 300 円」という入札が，売り手に提出される．次に，売り手は，集められた入札の集合のなかで，適当に入札を組み合わせることによって，「すべての財が少なくとも一つ含まれ (covering)」かつ「各入札は同じ財を含んでいない (disjoint)」ような入札の集合を計算する．これは，組合せオークションにおける勝者決定問題 (Winner Determination Problem) と呼ばれる．勝者決定問題は，NP 完全である．図 3 に本例の計算例を示す．本例では，「すべての財が少なくとも一つ含まれ」かつ「各入札が同じ財を含んでいない」という条件を満たす入札の集合は，図 3 に示す四つの候補のみである．ここで，売り手の立場から考えれば，もっとも高く売れる集合を選択すべきなので，候補 3 の入札集合が最終的な落札案となる．

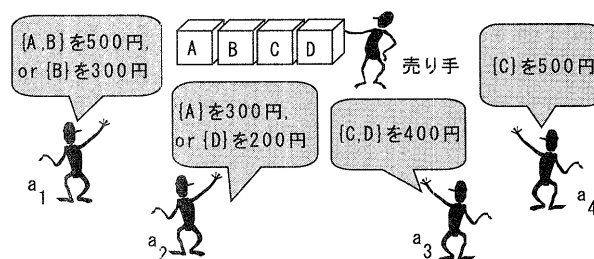


図2 組合せオークションの例

すべての入札集合		候補 1				
{A, B}	{B}		{A, B}, {C}, {D}	500円	500円	200円 = 1,200円
500円	300円	候補 2	{A, B}, {C, D}	500円	400円	= 900円
{A}	{D}	候補 3	{A}, {B}, {C}, {D}	300円	300円	500円 200円 = 1,300円
300円	200円	候補 4	{A}, {B}, {C, D}	300円	300円	400円 = 1,000円
{C, D}	{C}					
400円	500円					

図 3 勝者の決定の例

勝者決定問題は組合せ問題であり、AIの探索問題に対する研究成果が応用されている。Sandholm [Sandholm 99] は、入札集合を適切に構造化する BidTree と呼ばれる手法を用いたアルゴリズムを提案し、さらに文献 [Sandholm 00] では、複数の改善策に基づいて改善されたアルゴリズムを提案している。Fujishima らが開発した CASS という方法 [Fujishima 99] では、Bins と呼ばれる探索範囲を限定する方法などが用いている。また組合せオークションを用いたマルチエージェントのチーム形成問題に関する研究もある [Hunsberger 00]。

Boutillier ら [Boutillier 99] は、組合せオークションは最適な計算が困難であるということから逐次オークション (Sequential Auction) を提案している。逐次オークションでは、一つ一つの財に対して、順番にオークションが行われる。逐次オークションでは、勝者決定問題は存在しない。入札者の側からは、一つ目の財を落札できても、次の財を落札できるとは限らない。そのため、入札の方策を計算する必要がある。文献 [Boutillier 99] では、エージェントがダイナミックプログラミングを用いて、最適な入札方策を導き出す方法を提案している。

櫻井と横尾らのグループ [櫻井 00] は、組合せオークションの一種である一般化 Vickrey オークションにおいて、架空名義入札に対して頑健でないことを示した。さらに文献 [Yokoo 00a] では、一般化 Vickrey オークションを改良した LDS プロトコルを提案し、LDS プロトコルが架空名義入札に対して頑健であることを示した。

4. 応用事例

4.1 情報検索と電子商取引支援

インターネット上の情報検索にマルチエージェントを用いる研究が盛んである。Lieberman [Lieberman 95] は、Letizia を開発した。Letizia は、ユーザの Web 上の検索行動から、ユーザの好みを解析し、ユーザの好みに基づいてページを推薦することができる。Pazzani ら [Pazzani 96] の Syskill & Webert は、ある一つの index ページから、たどることのできるページに対してユーザに評価 (rating) させ、その評価からユーザのプロファイルを生成する。プロファイルをもとに、ユーザの好みに基づいたページを推薦する。Joachims ら [Joachims 97] の WebWatcher は、Web ページのツアーガイドとして振舞い、ユーザが正しいパス (ページ間のリンク) をたどるように支援する。Chen ら [Chen 98] の WebMate では、ユーザがページを評価する負荷を減らすために、ユーザは興味のあるページだけをエージェントに示す。Etzioni ら [Etzioni 94] の Softbot は、WWW 上の情報と、UNIX のシェルコマンドなどを用いて、情報を収集し、ユーザのタスクを代行できる。

情報検索エージェントを発展させ、エージェントがシ

ョッピングサイトから商品の情報を検索し統合するシステムが以下のように開発されている。ShopBot [Doorenbos 97] はショッピング支援エージェントであり、オンライン商店のサイトの記述や、その商店に対するクエリーを自動的に解析できる点である。ShopBot を発展させた Jango [Etzioni 97] では、ユーザが商品に対する情報を指定することを可能にしている。BiddingBot [Ito 00] は、ユーザが複数のオークションに実際に参加し入札することをマルチエージェントによって支援するシステムである。PriceBot [Greenwald 99] は、ShopBot のような買い手側の支援を効果的に行うエージェントが広く普及した場合に、売り手側の価格付けを支援するエージェントである。ここでは、ShopBot も PriceBot も広く普及した場合の考察がなされている。

情報検索に基づく電子商取引に対して、仮想的な商取引のためのサーバ上で、マルチエージェントがユーザの代理で商取引を行うシステムも研究されている。AuctionBot [Wurman 98] や FishMarket [Rodriguez 97] はオークションサーバである。ユーザは、製品を売るためにオークションに参加できる。そのオークションにおいて、エージェントが売り手と買い手となり、あらかじめ定義されたプロトコルに従って入札を行う。Kasbah [Chavez 96] はインターネット上の仮想的なマーケットプレイスであり、そのうえでユーザはユーザの代理で商品を売買する自律的なエージェントを生成できる。Kasbah でのエージェント間の取引は単純なプロトコルに従う。Tete-A-Tete [Guttman 98] も仮想的なマーケットプレイスを提供する。Tete-A-Tete の特長はエージェントが協調的に商取引を行う点である。GroupBuyAuction [Yamamoto 01] は、ボリュームディスカウントに基づく仮想マーケットである。ボリュームディスカウントとは、複数の買い手で多数の商品を共同で買う代償として、売り手が商品の単価を割引くことである。GroupBuyAuction では、買い手のエージェントの提携により、ボリュームディスカウントを実現した。Dasgupta ら [Dasgupta 99] は、電子商取引のためのマルチエージェントシステム MAgNET を提案している。MAgNET では、Aglet SDK [Lange 98] を用いることにより、エージェントをモバイルエージェントとして実装している。MAgNET では、売り手の代理のエージェントが、複数の買い手の計算機へ積極的に移動し、商品の宣伝および商取引を行う。

4.2 グループウェア

本節では、マルチエージェントに基づくグループウェアとして、会議スケジューリングシステムおよび筆者らが試作したグループ代替案選択支援システムを簡単に紹介する。

会議スケジューリングシステムは、複数のユーザのスケジュールを考慮したうえで、エージェントの交渉によ

って、会議の日程を調整するシステムである。Sen ら [Sen 95] は、一つのエージェントが中心となって、ほかのエージェントと交渉する手法を提案している。Garrido ら [Garrido 96] は、グループとしての効用を定義し、分散型の交渉手法を提案している。鶴田 [Tsuruta 00] は、会議スケジューリングを重み付きの分散制約充足問題として定式化し、制約緩和に基づく解法を提案している。筆者ら [Shintani 00] は、マルチエージェントの合意形成方式として、多重交渉方式を会議スケジューリングに応用している。

グループ代替案選択支援システム (GCDSS: Group Choice Design Support System) [伊藤 97b] は、ユーザ間の共通な問題に対する代替案の選択のための議論をマルチエージェントの交渉により支援するシステムである。エージェントは、AHP (Analytic Hierarchy Process) [Saaty 80] を用いて、代替案に対するユーザの主観的な評価を数値化する。ユーザの主観的评价に基づいて、エージェントは説得に基づく合意形成を行う。具体的には、説得における評価値の調整範囲を一対比較値の2区間とすることによって実現している。さらに文献 [伊藤 98] では、すべてのユーザの意見をなるべく反映するために、エージェント間の多重交渉方式を提案した。多重交渉方式では、マルチエージェントの合意形成に関連してすべてのグループメンバがおのおの説得者となるように複数の交渉パターンを設定し分散実行することにより、ユーザの納得が得られやすい交渉結果を導き出す。

5. ま と め

本稿では、マルチエージェントに関する研究を、本質的に協調的なエージェントを仮定する研究と、エージェントは利己的かつ競争的であると仮定した研究に大きく二つに分類した。エージェントの相互作用に関して、ゲーム理論 [鈴木 94] に基づいて、より詳細な分類と説明を行った研究 [Rosenschein 95] もある。

携帯電話や無線 LAN などの高度なネットワークの発展により、複数のソフトウェアの相互作用による大規模かつ複雑な問題の解決や、既存にない形態のアプリケーションの出現が期待されている。本稿で示したマルチエージェントの実装技術は、ネットワーク上の複数のソフトウェアの相互作用のための要素技術であり、将来のさまざまな応用が期待できる。例えば、近年、緊急大規模災害の救助活動 [田所 00] など、新たな領域への応用も増えている。

◇ 参 考 文 献 ◇

[Boutilier 99] Boutilier, C., Goldszmidt, M. and Sabata, B.: Sequential Auctions for the Allocation of Resources with

- Complementarities, in *Proc. of the 16th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-99)*, pp. 527-534 (1999)
- [Chavez 96] Chavez, A. and Maes, P.: Kasbah: An Agent Market-place for Buying and Selling Goods, in *Proc. of 1st International Conference and Exhibition on The Practical Application of Intelligent Agents and Multi-Agents (PAAM-96)*, pp. 75-90 (1996)
- [Chen 98] Chen, L. and Sycara, K. P.: WebMate: A Personal Agent for Browsing and Searching, in *Proc. of the 2nd International Conference on Autonomous Agents (Agents' 98)*, pp. 132-139 (1998)
- [Cohen 91] Cohen, P. R. and Levesque, H. J.: Teamwork, *Nous*, Vol. 35, pp. 487-512 (1991)
- [Conry 88] Conry, S., Meyer, R. A. and Lesser, V. R.: Multistage Negotiation in Distributed Planning, in Bond, A. H. and Gasser, L. eds., *Readings in Distributed Artificial Intelligence*, pp. 367-384, Morgan Kaufmann (1988)
- [Dasgupta 99] Dasgupta, P., Narasimhan, N., Moser, L. E. and Melliar-Smith, P. M.: MAGNET: Mobile Agents for Networked Electronic Trading, *IEEE Trans. on Knowledge and Data Engineering, Special Issue on Web Applications*, Vol. 11, No. 4, pp. 509-525 (1999)
- [Decker 97] Decker, K., Sycara, K. and Williamson, M.: Middle Agents for the Internet, in *Proc. of the 15th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-97)*, pp. 578-583 (1997)
- [Doorenbos 97] Doorenbos, R. B., Etzioni, O. and Weld, D. S.: A Scalable Comprison-Shopping Agent for the World-Wide Web, in *Proc. of the 1st International Conference on Autonomous Agents (Agents-97)*, pp. 39-48 (1997)
- [Etzioni 94] Etzioni, O. and Weld, D. S.: A Softbot-Based Interface to the Internet (1994)
- [Etzioni 97] Etzioni, O.: Moving Up the Information Food Chain: Deploying Softbots on the World Wide Web, *AI magazine*, Vol. 18, No. 2, pp. 11-18 (1997)
- [Franklin 96] Franklin, S. and Graesser, A.: Is it an Agent, or just a Program?: A Taxonomy for Autonomous Agents, in *Lecture Notes in Artificial Intelligence 1193, Proc. of the 3rd International Workshop on Agent Theories, Architectures, and Languages (ATAL'96)*, Springer (1996)
- [Fujishima 99] Fujishima, Y., McAdams, D. and Shoham, Y.: Speeding Up Ascending-Bid Auctions, in *Proc. of the 16th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-99)*, pp. 554-559 (1999)
- [Garrido 96] Garrido, L. and Sycara, K.: Multi-Agent Meeting Scheduling: Preliminary Experiment Results, in *Proc. of 2nd International Conference on Multi-Agent Systems (ICMAS-96)*, pp. 95-102, AAAI Press (1996)
- [Greenwald 99] Greenwald, A. R. and Kephart, J. O.: Shopbots and Pricebots, in *Proc. of the 16th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-99)*, pp. 506-511 (1999)
- [Grosz 96] Grosz, B. and Kraus, S.: Collaborative Plans for Complex Group Action, *Artificial Intelligence*, Vol. 86, No. 2, pp. 269-357 (1996)
- [Guttman 98] Guttman, R. H. and Maes, P.: Agent-mediated Integrative Negotiation for Retail Electronic Commerce, in *Proc. of the 2nd International Workshop on Cooperative Information Agents (CIA-98)* (1998)
- [Hattori 01] Hattori, H., Ito, T., Ozono, T. and Shintani, T.: An Approach to Coalition Formation using Argumentation-based Negotiation in Multi-Agent Systems, in *Proc. of the 14th International Conference on Industrial & Engineering Applications of Artificial Intelligence and Expert Systems (IEA/AIE' 2001)* (2001), (to appear)
- [Hirayama 00] Hirayama, K. and Yokoo, M.: An Approach to Over-constrained Distributed Constraint Satisfaction Problems: Distributed Hierarchical Constraint Satisfaction, in *Proc. of 4th International Conference on Multi-Agent Systems (ICMAS' 2000)* (2000)

- [Hunsberger 00] Hunsberger, L. and Grosz, B. J.: A Combinatorial Auction for Collaborative Planning, in *Proc. of the 4th International Conference on Multi-Agent Systems*, pp. 151-158 (2000)
- [Ito 97a] Ito, T. and Shintani, T.: Persuasion among Agents: An Approach to Implementing a Group Decision Support System Based on Multi-Agent Negotiation, in *Proc. of the 15th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-97)*, pp. 592-597, Morgan Kaufmann (1997)
- [伊藤 97b] 伊藤, 新谷: グループ代替案選択支援システムにおけるエージェント間の説得機構について, 電子情報通信学会論文誌 (D-II), Vol. J80-D-II, No. 10, pp. 2780-2789 (1997)
- [伊藤 98] 伊藤, 新谷: モバイルエージェント間の多重交渉に基づくグループ代替案選択支援システムについて, 情報処理学会論文誌, Vol. 39, No. 12, pp. 3165-3176 (1998)
- [Ito 00] Ito, T., Fukuta, N., Shintani, T. and Sycara, K.: Bidding Bot: A Multiagent Support System for Cooperative Bidding in Multiple Auctions, in *Proc. of the 4th International Conference on Multi-Agent Systems (ICMAS-2000)*, pp. 399-400 (2000)
- [Joachims 97] Joachims, T., Freitag, D. and Michell, T.: Web-Watcher: A Tour Guide for the World Wide Web, in *Proc. of the 15th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-97)*, pp. 770-775, Morgan Kaufmann (1997)
- [Jung 01] Jung, H., Tambe, M. and Kulkarni, S.: Argumentation as Distributed Constraint Satisfaction: Applications and Results, in *Proc. of the 5th International Conference on Autonomous Agents (Agents'2001)* (2001), (to appear)
- [Lange 98] Lange, D. B. and Oshima, M.: *Programming and Deploying Java Mobile Agents with Aglets*, Addison-Wesley (1998)
- [Lieberman 95] Lieberman, H.: Letizia: An Agent That Assists Web Browsing, in *Proc. of the 14th International Joint Conference on Artificial Intelligence*, pp. 924-929 (1995)
- [Parsons 98] Parsons, S., Sierra, C. and Jennings, N. R.: Agents that reason and negotiate by arguing, *J. of Logic and Computation*, Vol. 8, No. 3, pp. 261-292 (1998)
- [Pazzani 96] Pazzani, M., Muramatsu, J. and Billsus, D.: Syskill & Webert: Identifying Interesting Web Sites, in *Proc. of the 13th National Conference on Artificial Intelligence (AAAI'96)*, pp. 54-61 (1996)
- [Pynadath 99] Pynadath, D. V., Tambe, M., Chauvat, N. and Cavedon, L.: Toward Team-Oriented Programming, in Jennings, N. R. and Lesprance, Y. eds., *Proc. of the 6th International Workshop on Agent Theories, Architectures and Languages (ATAL-99)*, Lecture Notes in Computer Science 1757, pp. 233-247 (1999)
- [Rasmusen 89] Rasmusen, E.: *Games and information, an introduction to Game Theory*, Blackwell Publishers, Inc., 2nd edition (1989)
- [Rodriguez 97] Rodriguez, J. A., Noriega, P., Sierra, C. and Padget, J.: FM96.5: A Java-based Electronic Auction House, in *Proc. of 2nd International Conference on the Practical Application of Intelligent Agents and Multi-Agent Technology (PAAM-97)* (1997)
- [Rosenschein 95] Rosenschein, J. S. and Zlotkin, G.: *Rules of Encounter*, The MIT Press (1995)
- [Saaty 80] Saaty, T.: *The analytic hierarchy process*, McGraw Hill (1980)
- [櫻井 00] 櫻井, 横尾, 松原: 電子商取引における一般化 Vickrey オークションプロトコルの問題点: 架空名義入札に対する頑健性, コンピュータソフトウェア, Vol. 17, No. 2, pp. 1-9 (2000)
- [Sandholm 96] Sandholm, T.: Limitations of the Vickrey Auction in Computational Multiagent Systems, in *Proc. of 2nd International Conference on Multi-Agent Systems (ICMAS-96)*, pp. 299-305, AAAI Press (1996)
- [Sandholm 99] Sandholm, T.: An Algorithm for Optimal Winner Determination in Combinatorial Auctions, in *Proc. of 16th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI'99)*, pp. 542-547 (1999)
- [Sandholm 00] Sandholm, T.: Improved Algorithms for Optimal Winner Determination in Combinatorial Auctions and Generalizations, in *Proc. of 17th National Conference on Artificial Intelligence (AAAI'2000)*, pp. 90-97 (2000)
- [Sawamura 00] Sawamura, H., Umeda, Y. and Meyer, R. K.: Computational Dialectics for Argumentation-based Agent Systems, in *Proc. of 4th International Conference on Multi-Agent Systems (IC-MAS'2000)* (2000)
- [Scerri 01] Scerri, P., Pynadath, D. and Tambe, M.: Adjustable Autonomy in Real-world Multi-Agent Environments, in *Proc. of the 5th International Conference on Autonomous Agents (Agents-01)* (2001), (to appear)
- [Sen 95] Sen, S. and Durfee, E. H.: Unsupervised Surrogate Agents and Search Bias Change in Flexible Distributed Scheduling, in *The Proc. of the 1st International Conference on Multiagent Systems*, pp. 12-14 (1995)
- [Shintani 00] Shintani, T., Ito, T. and Sycara, K.: Multiple Negotiations among Agents for a Distributed Meeting Scheduler, in *Proc. of the 4th International Conference on Multi-Agent Systems (ICMAS-2000)*, pp. 435-436 (2000)
- [Sierra 97] Sierra, C., Jennings, N. R., Noriega, P. and Wooldridge, M.: A Framework for Argumentation-Based Negotiation, in Sigh, M. P., Rao, A. and Wooldridge, M. J. eds., *Proc. of the 4th International Workshop on Agent Theories, Architectures and Languages (ATAL-97)*, Lecture Notes in Artificial Intelligence 1365, pp. 177-192 (1997)
- [Smith 80] Smith, R. G.: The Contract Net Protocol: High-Level Communication and Control in a Distributed Problem Solver, in *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics*, pp. 1104-1113 (1980)
- [鈴木 94] 鈴木光男: 新ゲーム理論, 勁草書房 (1994)
- [Sycara 88] Sycara, K. P.: Resolving Goal Conflicts via Negotiation, in *Proc. of 5th National Conference on Artificial Intelligence*, pp. 245-250 (1988)
- [田所 00] 田所, 北野: ロボカップレスキュー, 緊急大規模災害救助への挑戦, 共立出版 (2000)
- [Tambe 97] Tambe, M.: Towards Flexible Teamwork, *J. of Artificial Intelligence Research*, Vol. 7, No. 4 (1997)
- [Tsuruta 00] Tsuruta, T. and Shintani, T.: Scheduling Meetings Using Distributed Valued Constraint Satisfaction Algorithm, in *Proc. of the 14th European Conference on Artificial Intelligence (ECAI-2000)*, pp. 383-387 (2000)
- [Weiss 99] Weiss, G. ed.: *Multiagent Systems: A Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence*, The MIT Press (1999)
- [Wellman 93] Wellman, M. P.: A Market-oriented Programming Environment and Its Application to Distributed Multicommodity Flow Problems, *J. of Artificial Intelligence Research*, Vol. 1, pp. 1-22 (1993)
- [Wurman 98] Wurman, P. R., Walsh, W. E., and Wellman, M. P.: Flexible double auctions for electronic commerce: theory and implementation, in *Decision Support Systems*, Vol. 24, pp. 17-27 (1998)
- [Yamamoto 01] Yamamoto, J. and Sycara, K.: A Stable and Efficient Buyer Coalition Formation Scheme for E-Marketplaces, in *Proc. of the 5th International Conference on Autonomous Agents (Agents'2001)* (2001), (to appear)
- [Yokoo 00a] Yokoo, M., Sakurai, Y. and Matsubara, S.: Robust Combinatorial Auction Protocol against False-name Bids, in *Proc. of the 17th National Conference on Artificial Intelligence (AAAI-2000)*, pp. 110-115, AAAI Press (2000)
- [横尾 00b] 横尾 真: インターネットオークションの理論と応用, 人工知能学会誌, Vol. 15, No. 3, pp. 404-411 (2000)
- [Yokoo 01] Yokoo, M.: *Distributed Constraint Satisfaction: Foundations of Cooperation in Multi-Agent Systems (Springer Series on Agent Technology)*, Springer-Verlag (2001)

2001 年 5 月 14 日 受理

著 者 紹 介



伊藤 孝行（正会員）

2000年名古屋工業大学大学院工学研究科電気情報工学専攻博士後期課程修了。博士（工学）。1999年から2001年にかけて日本学術振興会特別研究員（ポスドク）。2000年から2001年にかけて南カリフォルニア大学情報科学研究所（USC/ISI）客員研究員。2001年より北陸先端科学技術大学院大学知識科学教育研究センター助教授。現在に至る。マルチエージェントシステム、電子商取引支援、グループ意思決定支援に興味をもつ。AAAI、電子情報通信学会、情報処理学会、日本ソフトウェア科学会各会員。



新谷 虎松（正会員）

1982年東京理科大学大学院修士課程修了。同年富士通（株）国際情報社会科学研究所入所。知識情報処理、論理プログラミングなどの研究に従事。1993年名古屋工業大学知能情報システム学科助教授。1999年名古屋工業大学知能情報システム学科教授。1999年から2000年にかけてカーネギーメロン大学ロボティクス研究所客員研究員。現在に至る。工学博士。分散人工知能、意思決定支援システム、マルチエージェントシステムの研究に従事。AAAI、電子情報通信学会、情報処理学会、日本ソフトウェア科学会各会員。