

マルチエージェントに基づく
電子商取引支援に関する研究

2004年1月

服部 宏充

論文要旨

エージェント／マルチエージェントの分野において，電子商取引を具体的な応用対象とする研究が活発になっている．電子商取引は，インターネット上で行われる商取引の事であり，計算機とネットワークを組合せて利用することで，全世界的な規模での商取引が可能となっている．電子商取引は，空間的／時間的な制約にとらわれない大規模な商取引環境を提供するが，その一方で，人手による処理が困難になっており，効果的な支援技術へのニーズが高まっている．エージェント技術は，電子商取引支援のための有望な技術として大きな注目を集めている．

エージェントに基づく電子商取引支援では様々な分野へのアプローチが考えられるが，本論文では，商取引の過程における交渉の支援に焦点を当て，理論的／実践的な技術を提案する．本論文では，大きく分けて，以下の2通りのアプローチを試みる（1）オークションプロトコルに基づく支援技術の開発，および（2）電子マーケットにおける交渉プロトコルの開発．

オークションプロトコルに基づく支援技術の開発では，まず，理論的なアプローチとして，逐次型オークションにおける入札戦略の決定手法を提案する．逐次型オークションでは複数の財への入札が行われるため，人手による入札戦略の決定は容易ではない．逐次型オークションはマルコフ意思決定問題と等価な問題とみなせるため，動的計画法に基づく最適な入札戦略の決定が可能だが，既存の手法では計算量的な困難があった．本論文では，現実的な条件として予算制約を考慮し，その条件下での準最適な戦略を高速に決定可能な手法を示す．次に，実践的なアプローチとして，実在のインターネットオークションサイトを対象とした，マルチエージェントに基づく入札支援システムの実装技法を示す．実在のオークションサイトを対象とした支援システムの構築は煩雑な作業であり，開発者の負担が大きい．本論文では，論理型言語に基づく実装技法を示し，特に情報収集機構の実装に関して有用であることを示す．さらに，本論文では，電子商取引の分野で培われた技術の応用の一環として，組合せオークションに基づくスケジューリング手法を提案する．組合せオークションにおける解の決定は一種の最適化問題であるため，同様の性質を持つスケジューリング問題への適用が可能である．

本論文では，スケジューリングに関する制約の表現力と処理時間のトレードオフを解消し，質の高い解を現実的な時間で求める手法を示す．

電子マーケットにおける交渉プロトコルの開発においては，ボリュームディスカウントを仮定した商取引環境における売り手支援のために，財の交換に基づく交渉手法を提案する．ボリュームディスカウントを仮定した場合，売り手が，取引において多数の商品を要求されるケースが増加すると考えられる．そのため，十分な数の財を持たない場合，売り手は取引を成立させる事が困難となる．本論文では，十分な数の財を持たない売り手エージェントが，売買の機会を失うことなく，適切に取引を行うために，同様に財が不足した売り手エージェントとの間で，不足した財を融通し合うための手法を示す．本手法により，マーケット全体の売買効率の向上が実現できる．本手法では，財の価格のみに注目しているが，実世界においては，人は様々な属性（評価基準）に基づいた評価を行い，交渉においてそれらの評価値を利用する．そこで，本論文では，エージェントによる合意形成のための基本的なメカニズムとして，多属性に基づく評価を用いた，議論の形式に基づく交渉方式を提案する．本手法では，既存の方式とは異なり，交渉の過程で生成される提案の定量的な評価を可能にしている．評価結果から，本手法では，多数決などの手法を用いた場合とは異なる，興味深い合意形成が可能である．

目次

第1章	序論	1
1.1	本研究の背景	1
1.2	本研究の目的	3
1.3	本論文の構成	5
1.4	本論文について	8
第2章	関連研究	9
2.1	序言	9
2.2	エージェント / マルチエージェントシステムの概要	9
2.2.1	エージェント	9
2.2.2	マルチエージェントシステム	13
2.3	エージェントに基づく電子商取引支援	16
2.3.1	購買行動の分類	16
2.3.2	ニーズの同定の支援	18
2.3.3	商品の選択の支援	18
2.3.4	売り手（店舗）の選択の支援	20
2.3.5	交渉の支援	20
2.4	オークション	23
2.4.1	基本的な知識	23
2.4.2	単一種類の財を扱うオークションプロトコル	26
2.4.3	複数種類の財を扱うオークションプロトコル	29
2.5	結言	32
第3章	逐次型オークションにおける入札戦略決定手法	33
3.1	序言	33
3.2	用語と記法の定義	34
3.3	加法的な効用に基づく動的計画法	35
3.4	準線形効用に基づく動的計画法	37

3.4.1	基本的なアイデア	38
3.4.2	準線形効用に基づく入札戦略決定の詳細	38
3.4.3	準線形効用の導入手法の評価	40
3.5	予算制約の導入	42
3.5.1	基本的なアイデア	42
3.5.2	予算制約の導入手法の詳細	43
3.5.3	予算制約の導入手法の評価	44
3.6	議論	48
3.7	結言	50
第4章	論理型言語に基づくオークション入札支援システムの実装技法	51
4.1	序言	51
4.2	インターネットオークション入札支援システム <i>BiddingBot</i> の概要	52
4.3	情報収集 / 入札機能の実装技法	55
4.3.1	Web サーバへのアクセス	55
4.3.2	テキストの解析と情報抽出	56
4.3.3	HTML テキストからの情報抽出パターン作成手法	56
4.4	エージェント間通信機能の実装技法	59
4.5	情報表示機能の実装技法	60
4.6	議論	61
4.7	結言	63
第5章	組合せオークションに基づくスケジューリング手法	65
5.1	序言	65
5.2	基本的なアイデア	66
5.3	組合せオークションに基づくスケジューリング問題の解決	67
5.3.1	スケジューリング問題の定義	67
5.3.2	イベント間の制約	68
5.3.3	勝者決定問題への問題の再定義	68
5.4	組合せオークションへの制約の導入	70
5.4.1	整数計画問題としての定式化	70
5.4.2	回数制約の表現	70
5.4.3	順序制約の表現	71
5.4.4	制約付き組合せオークションの定式化	72
5.5	スケジューリングのプロセス	74

5.6	議論	75
5.6.1	評価	75
5.6.2	関連研究	78
5.7	結言	79
第 6 章	分散型電子マーケットにおける財の交換に基づく交渉手法	81
6.1	序言	81
6.2	<i>E-GarageSale</i> : P2P に基づく分散型電子マーケット	82
6.3	エージェントの交渉スキーマ	84
6.4	財の交換に基づく交渉手法	87
6.5	提案手法の評価	90
6.6	議論	94
6.6.1	提案手法の有用性	94
6.6.2	関連研究	95
6.7	結言	96
第 7 章	数量化された選好による議論の形式に基づく交渉方式	97
7.1	序言	97
7.2	議論の形式による合意形成	98
7.2.1	システム構成	98
7.2.2	選好の数量化	99
7.2.3	議論の形式に基づく交渉	100
7.3	複数エージェント間の交渉プロセス	102
7.4	議論	104
7.5	結言	105
第 8 章	結論	107
8.1	成果	107
8.2	今後の課題	110
	謝辞	113
	関連文献	114
	原著となった発表論文一覧	129

目 次

1.1	本論文の構成	6
2.1	エージェントの概略	10
2.2	代表的な EC システムの支援状況	17
2.3	PersonaLogic の入力画面	19
2.4	Kasbah で用いる減衰関数	22
3.1	最適入札戦略の例 (Additive form)	37
3.2	最適入札戦略の例 (Quasi-linear form)	40
3.3	状態数の変化	41
3.4	処理時間の比較	42
3.5	期待効用の比較 (設定 1)	46
3.6	期待効用の比較 (設定 2)	47
3.7	処理時間の比較	48
4.1	<i>BiddingBot</i> の概要	52
4.2	情報抽出パターン作成プロセス	57
4.3	<i>BiddingBot</i> のインタフェースの一例	62
5.1	スケジューリング問題の表現例	73
5.2	スケジュールの処理プロセス	75
5.3	エージェント数と入札数の関係	76
5.4	入札数と処理時間の関係	76
5.5	エージェント数と評価値の関係	77
5.6	エージェント数と充足率の関係	78
6.1	<i>E-GarageSale</i> の概要	82
6.2	売り手の価格テーブルの例	84
6.3	2 つの売り手エージェント間の交換の例	87

6.4	売り手の数に関する売り手の効用の比較	92
6.5	売り手の数に関する財の販売率の比較	92
6.6	売り手が所有可能な財の最大数に関する売り手の効用の比較 . . .	93
6.7	売り手が所有可能な財の最大数に関する財の販売率の比較	93
7.1	システム構成	98
7.2	AHP における階層図	100
7.3	2 エージェント間の交渉プロセス	101
7.4	提案手法に基づく交渉例	103
7.5	複数エージェントの交渉	104
7.6	実験結果：効用の比較	106

表 目 次

4.1	<i>MiLog</i> の代表的な組み込み述語	54
-----	------------------------------------	----

第 1 章

序論

1.1 本研究の背景

自律的エージェントの必要性

前世紀末，1990 年代に著しい発展を遂げたインターネットは，学術分野のみならず，実社会に対しても大きなインパクトを与え，全世界的なインフラストラクチャとして急速に，そして広範囲に普及した．さらに現在では，ADSL や光接続などによる高速な常時接続の環境が一般的になりつつある．ネットワークを介して，世界中に存在する様々な情報資源へのアクセスが可能となったことで，人々の知的生産性が飛躍的に向上し，実社会に多くの恩恵をもたらしている．また，一般家庭においても，家電製品の情報化 [112] を促すなど，生活環境の向上に欠かせないものとなっている．今後，インターネットは，さらなる発展を遂げつつ，社会活動のあらゆる面において必須なものと成ることが予想される．

このように，インターネットを中心とした情報技術が急速な発展を遂げているが，その使い手である人の情報処理能力は，短期間のうちに簡単に向上するものではない．実際に，インターネットを介して可能となる様々な活動では，すでに人手による処理が困難になってきている．その結果，技術の発展による恩恵を受けることなく，むしろ弊害を生じる場合もある．例えば，WWW (World Wide Web) 上のテキストは基本的に自由に閲覧 / 利用が可能であるが，存在するテキスト量が膨大であるため，希望する情報の検索においてさえ，人手による効果的な利用が難しい [102] ．また，近年一般的にも人気を集めている，Yahoo! Auctions や eBay などの商業インターネットオークションサイトでは，休むこと無く売買活動が行われるが，人の活動時間は限られているから，適切な売買の機会を逃してしまう可能性が十分考えられる．つまり，インターネットを介して，時間的 / 空間的な

制約を受けない商取引が可能となったものの、その恩恵を十分に受けられない可能性がある。

以上の状況から、人の限られた情報処理能力を補完するために、人の手に負えない様々なタスクを高度に支援するソフトウェア技術の必要性は明白であり、人に成り代わって、ネットワーク上で高度なタスク実行が可能な知的ソフトウェアの実現が求められている。インターネット上では、情報環境が動的に変化するため、その時々環境に応じて適切に振る舞う、高度な柔軟性を持つソフトウェアを実現しなければならない。この要件を満たすためのアプローチとして、個々のソフトウェアに自律性を実現する方法がある*。ソフトウェアの自律性を実現するための具体的な技術として、エージェント技術 [13, 108] に注目が集まっている。エージェントは、環境との相互作用により駆動するソフトウェアであるから [71]、環境の変化に応じて適切に機能することが期待できる。また、エージェントは「人の代理として振る舞うソフトウェア」[108] という、一般にも理解しやすい様相を持つため、人を支援するためのソフトウェア技術として、広く注目を集めている。

さらに、エージェントに人間の社会性を取り入れたマルチエージェントシステム [23, 104, 88, 89] が、より大規模かつ高度な情報処理を実現するための技術として、特に分散人工知能 [22] に携わっていた多くの研究者の注目を集めている。マルチエージェントシステムでは、分散環境下に置かれた複数のエージェントが、相互作用を通して協調し、問題解決を行う。分散システムをマルチエージェントシステムとして設計する方法は、システムに高度な柔軟性を実現するための有力なアプローチと考えられている [103]。

マルチエージェントと電子商取引

マルチエージェントシステムに対する有力なアプローチとして、ゲーム理論に基づいたアプローチがある。Rosenschein らは、ゲーム理論 [117] に基づくエージェント間の交渉モデルを提案している [68, 69, 97]。ここでは、共通の利得関数に基づいて行動を決定するエージェントが、実際に行動する前に相互に通信し、交渉を行うことで、より良いプランで行動することが可能になることが示されている。

ゲーム理論に基づくアプローチは、数学的に洗練されたモデルを示すことはできたが、様々な仮定のもとで議論が行われるために、現実的な問題への適用にお

*ここでは“自律性”を、単に「外部から操作されること無く、環境に対して適切に振る舞う性質」と考える。本研究における自律性の捉え方については、2.2.1 節で述べる

いて困難があった．例えば，文献 [97] では，エージェントが完全な知識を持つことが仮定されているが，実世界における問題では，様々な不確実性が存在し，またエージェント間で全ての知識が共有されるとは限らない．

実世界指向でマルチエージェント研究を行うための具体的な応用領域として，近年，電子商取引に大きな注目が集まっている．XML を利用した企業間電子商取引，および商業オークションサイトの活動の本格化等に伴う支援技術へのニーズを背景に，電子商取引研究は，理論的なものから実践的なものまで，幅広く活発に行われている．電子商取引研究では，情報の不完全性，交渉の期限，契約破棄の可能性とその対応など，現実が発生しうる様々な問題を考慮する必要がある．そのため，ここで得られる研究成果は，実世界の問題に対して十分にインパクトを与え得る．特に，オークションに関する研究は，Yahoo!Auctions や eBay などのインターネットオークションサイトの商業的成功も手伝って，最も活発な研究分野となっており，実践的な研究が多数存在する．実際に，オンラインショッピングに関連する研究では，企業に採用され，広く一般に公開／利用された技術が数多く提案されている [20, 79] ．

また，電子商取引研究が進むに従って，経済学の分野と結び付いた研究成果も報告されている．経済的な要素の導入は，マルチエージェントシステムの設計に関して大きな影響を与えている．特に，経済学の一分野であるメカニズムデザイン [52] に関する研究が活発化しており，マルチエージェントシステムの構築に関して，様々な知見を与えている．

1.2 本研究の目的

前節で述べたように，電子商取引を具体的な応用領域とする研究は，エージェント／マルチエージェントの分野における大きな流れを形成している．商取引は，基本的には個人の利得を追求する活動であるため，電子商取引研究で培われる技術は，個々のユーザを的確に支援する知的なエージェントの構築技術に大きく貢献するものと考えられる．

以上により，本論文では，電子商取引への応用を念頭に置き，マルチエージェントの交渉技術，および構築技術の提案／開発を目的とする．

本研究の目的1：オークションにおける入札支援技術の開発

インターネットオークションの普及に伴い、単一の財に対してではなく、価値に依存関係を持つ複数の財への入札が可能なオークションプロトコルが提案されている。複数の財への入札では、ユーザの選好は複雑なものになり、人手による入札戦略の決定が困難になる。本論文では、複数の財に関する選好の表現が可能な逐次型オークションにおける、入札戦略の決定手法を提案する。オークションでは、取引に締め切りが定められているから、計算に時間を要しない、高速な入札戦略の決定が求められる。また、当然ながら、ユーザは予算以上の金額を支払うことはできない。従って、限られた予算の中で最適な戦略を決定する必要がある。本論文では、入札戦略の最適性を高いレベルで維持しつつ、既存手法と比較して高速な計算が可能な手法を提案する。

現在、複数のオークションへの参加が可能であるが、複数の財を対象として入札を行うことは、一般のユーザにとっては負担が大きい。そこで、エージェントによる入札支援が考えられるが、実在のオークションサイトを対象とした入札支援システムの構築は容易では無い。特に、オークションサイトの情報の提供形式は不定期に変化し、またそのバリエーションも多数存在するため、オークションの情報を得るための機構の開発は、開発者にとって負担の大きいタスクとなる。実際に、既存の研究において、実在のオークションサイトを対象とした入札支援システムは構築されていない。本論文では、エージェントに基づく入札支援システムを構築するための、論理型言語に基づく実装技法を提案する。また、本実装技法に基づく情報収集機構の具体的な実装方法を示す。

本研究の目的2：オークションの理論に基づく応用手法の開発

オークションに関連する理論/技術は、これまでに様々なものが提案されている。本論文では、電子商取引研究において培われた技術の、他の領域への応用を試みる。具体的な応用領域として、本論文では、スケジューリングに注目する。オークションは、一般的には資源割り当ての一手法であるため、文献[60]等に見られるように、スケジューリングの手段としてオークションを用いるアプローチは十分に妥当である。本論文では、スケジューリングのプロセスを、複数財を処理可能なオークションプロトコルの一種である、組合せオークション[47, 50, 54, 74, 77, 86, 118]として定式化する。これにより、関連する複数のイベント間の依存関係が表現でき、スケジューリングにおける複雑な選好の表明が可能となる。また、一般に、組合せオークションでは、解の決定に計算量的な困難が生じるが、本論文では、

整数計画問題として求解することにより，十分に実用可能なスケジュールを，現実的な時間内で得られることを明らかにする．

本研究の目的3：電子マーケットにおける交渉支援技術の開発

商取引のためのプロトコルには，様々なものが考えられる，これまでに，オークション以外の独自のプロトコルに従って，エージェントが商取引を行う研究が行われている [19, 95]．本論文では，複数の買い手 / 売り手エージェントが存在する電子マーケットを想定し，効果的かつユーザの満足度の高い商取引を実現するための，エージェント間の交渉方式を提案する．

複数の買い手 / 売り手エージェントが存在する電子マーケットに関して，文献 [95] では，買い手側の支援に焦点を当て，ボリュームディスカウントの導入に基づく効率的な売買を実現している．ボリュームディスカウントを仮定した場合，取引を成立させるために必要な財の数が大きくなるため，財の不足による機会損失を生じる可能性が高くなる．本論文では，売り手側の支援に焦点を当て，売り手間の協調により，相互に不足している財の補完を可能にする手法の提案を行う．

また，実世界において人がそうするように，エージェントは，単純に商品の価格のみに注目して商取引を行うのではなく，他の様々な付加価値を考慮に入れた意思決定に基づき，行動することが望まれる．そこで，本論文では，エージェントが，多属性の評価に基づいて合意形成を行うための基本的な計算メカニズムについても検討を行う．

1.3 本論文の構成

本論文の構成を，図 1.1 に示す．

第2章

第2章では，本研究に関連する既存の研究について述べ，基本的な知識について概説する．まず 2.2 節では，エージェント，およびマルチエージェントに関して述べ，続いて，エージェントに基づく電子商取引支援について述べる．ここでは，具体的にどのような支援が求められており，かつこれまでどのような技術が提供されてきているかを示す．最後に，近年の電子商取引研究において，最も重要な研究トピックであるオークションについて説明する．

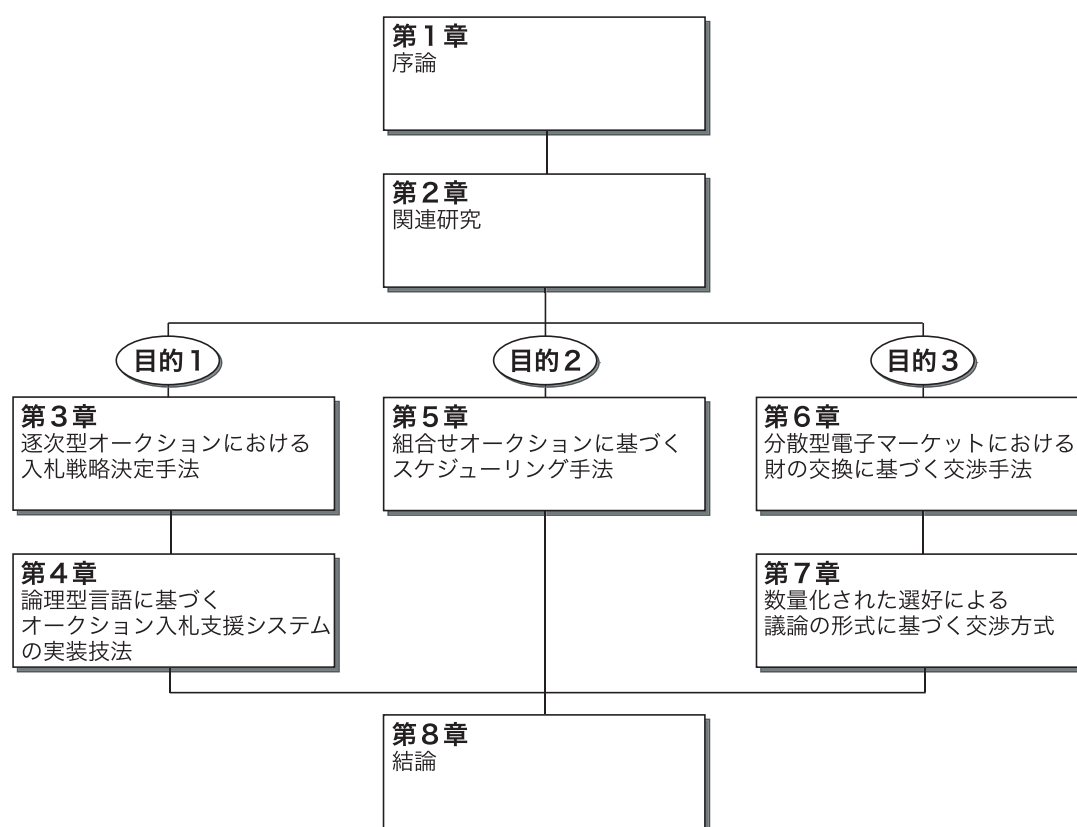


図 1.1 本論文の構成

第3章

第3章では，逐次型オークションにおける入札戦略の決定手法を提案する．

従来の手法は，解の最適性が保証される一方で，現実的な時間内での計算が困難であるという欠点があった．本章では，問題の新たな形式化を与えることで，計算の大幅な高速化を実現している．ただし，ここで与える定式化は，予算に関する制約が厳しい場合に，利用が困難となる可能性がある．本章では，解の最適性を犠牲にすることで，予算制約の導入を可能にしている．また，得られる解の準最適性を実験的に明らかにしている．

第4章

第4章では，実在のインターネットオークションを対象とした，マルチエージェントに基づく入札支援システムの実装技法を示す．

エージェントが入札を行う既存のシステムには，実在の商業オークションサイトへの入札は扱わず，仮想的な入札環境のみを提供するものが多い．ただし，実

在のオークションサイトへの入札支援を実現するためには、様々な技術的困難があり、システムの構築が容易でないことも事実である。本章では、そのような技術的困難を解消し、開発者の負担を軽減するための実装技法を示す。ここでは、不定期に変化する情報の提示形式に対応するための手法について、特に詳しく述べる。

第5章

第5章では、組合せオークションプロトコルに基づくスケジューリング手法について述べる。

本章では、オークション関連技術の電子商取引以外の研究領域への応用として、組合せオークションプロトコルのスケジューリング問題への応用を行う。ここでは、組合せオークションを整数計画問題として表現するための形式化を示し、実用的な時間で十分な品質の解が得られることを実験的に示す。問題の形式化においては、スケジュールに関する複雑な制約の表現を可能とすることを試みる。

第6章

第6章では、複数の買い手/売り手エージェントが存在する電子マーケットにおける、エージェントの財の交換に基づく交渉手法を提案する。

本章では、マーケットにおいて、財を効率的に売買するためのボリュームディスカウントが行われる事を前提とする。そのため、買い手（および買い手の集合）から多数の財が要求される機会が増加し、売り手が買い手の要求を満たすことができない可能性が高くなる。本章では、売り手同士が協調的に財の交換を行い、不足分の財を相互に補完し合うことで、効率的な売買の実現を試みる。

第7章

第7章では、ユーザの選好を数量化し、議論の形式に基づいて合意形成を試みる交渉手法を提案する。

本章では、人手による複数の属性に基づく評価を、エージェント間交渉に利用する。提案手法では、AHPと呼ばれる数量化手法に基づいてユーザの主観的評価を数量化/構造化する。エージェントは、ユーザの選好を逐次、部分的に表明することで、各々にとって望ましい合意形成を試みる。当然ながら、全てのエージェントが、最適な合意案を得られるわけではないが、エージェントは、合意案に関して適宜妥協することで、より効用の高い合意案が得られるよう機能する。

第8章

第8章では、本論文の結論と今後の課題について述べる。

1.4 本論文について

本論文の第3章は、The 5th International Conference on Autonomous Agents (Agents-01) で発表した論文 [39]、The 17th International Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence (UAI-01) で発表した論文 [40]、および電子情報通信学会論文誌に発表した論文 [114] に基づいている。

第4章は、情報処理学会論文誌に発表した論文 [115]、The 11th International World Wide Web Conference (WWW-02) で発表した論文 [38]、ならびに Pacific Asian Conference on Intelligent Systems 2001 (PAIS-01) で発表した論文 [94] を基にしている。

第5章は、The 17th International Conference on Industrial & Engineering Applications of Artificial Intelligence & Expert Systems (IEA/AIE-04) で発表予定の論文 [37]、ならびに The 2nd International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS-03) で発表した論文 [36] を基にしている。

第6章は、人工知能学会誌に発表した論文 [113]、ならびに The International Journal of Electronic Commerce Research and Applications (ECRA) に発表した論文 [42] に基づいている。

第7章は、The 14th International Conference on Industrial & Engineering Applications of Artificial Intelligence & Expert Systems (IEA/AIE-01) で発表した論文 [34]、ならびに The 2nd International Conference on Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking & Parallel/Distributed Computing (SNPD-01) で発表した論文 [35] に基づいている。

第 2 章

関連研究

2.1 序言

本章では，本研究に関連する既存の研究について述べる．本章では，最初に，本研究の最も基本的なトピックであるエージェント，およびマルチエージェントに関して述べる．次に，近年エージェント技術の応用分野として活発に研究されている，電子商取引に関する研究について，具体的な研究例を含めて概説する．最後に，電子商取引の一形式であるオークションに関して，基本的な知識，および代表的なオークションプロトコルについて述べる．

2.2 エージェント / マルチエージェントシステムの概要

本節では，本研究の基盤となる背景知識であるエージェント，およびマルチエージェントシステムに関して述べる．本節では，最初にマルチエージェントシステムの構成要素であるエージェントについて概説した後，マルチエージェントシステムに関する説明を述べ，本研究におけるエージェント，およびマルチエージェントシステムの見方を明確化にする．

2.2.1 エージェント

エージェントとは何か？

エージェント (Agent) [13, 89, 108] は，複雑なソフトウェアを設計 / 開発するための新たなパラダイムとして注目を集めた技術であり，この十数年に渡って活発に研究が行われている．それにもかかわらず，“エージェント”の定義は，現

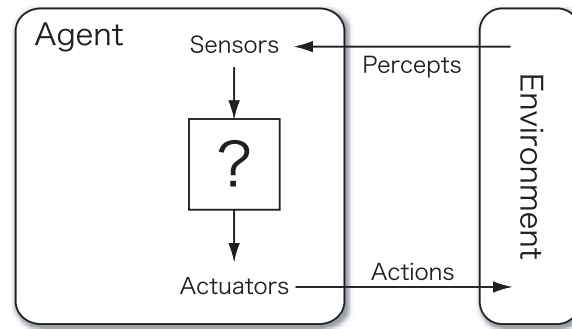


図 2.1 エージェントの概略

在に至っても明確には定まっておらず，依然として議論が続いている [90]*．これは，エージェント技術が様々な分野に適用可能であり，かつ各分野ごとにエージェントに求める性質が異なることが一因であると考えられる．しかし，“自律性 (Autonomy)” については，最低限エージェントが持つべき性質として，一般的に認められている．ここで，エージェントの定義の一例として，文献 [91] における定義を示す．

定義：エージェント (Wooldridge & Jennings 1995)

エージェントとは，ある環境に存在し，かつ自身の目的を達成するための自律的動作が可能なコンピュータシステムである．

本論文では，基本的に上記の定義に従ってエージェントを理解する．ただし，この定義は「エージェントとは何か？」という問題を「自律性とは何か？」という問題に置き換えたに過ぎない．本論文では，文献 [88] の記述に従って，“エージェントが，自身の内部状態と振る舞いを制御し，人間や他のシステムからの干渉無しに動作可能とする機能” を自律性と捉え，自律性の定義に関して詳細な議論は行わない†．

図 2.1 は，エージェントの概略を表している [71]．図 2.1 から，エージェントが，センサーを介して環境から情報を取得し，アクチュエータを介して行動を環境に出力していることが分かる．エージェントは，環境から得た情報を，何らかの行動にマッピングするための関数を持つ．この関数は，環境のある状況において選択し得る行動の中から，どの行動を実行するかを決定する，意思決定のため

*AI 研究も，知性 (Intelligence) の一般的な定義が成されないまま進められてきたのだから，エージェントの定義が定まらないことは深刻な問題ではない，という意見もある [44]．それではいけないと思う．

†自律性に関しては，文献 [71, 108] 等で若干の議論がされている．

のメカニズムである．目的を達成するためにどの行動を選択すべきかを決定する意思決定メカニズムの設計は，エージェントの構築において重要な問題となる．

知的エージェント

知的エージェントの理解のために，まず，知的ではないエージェントの例を以下に挙げる [90]．

- 制御システム

いくつかの制御システムは，エージェントと見なすことができる．単純な例としてサーモスタットがある．サーモスタットは室温の感知センサを備えている．センサは，室温が低すぎる，もしくは室温が適温であることを示す2通りの信号を出力する．サーモスタットが可能な行動は，「暖房運転」，および「暖房停止」の2つである．「暖房運転」を行うことで室温を上昇させる効果が期待できるが，これは必ずしも保証されない．例えば，部屋のドアが開いている場合，室温の上昇は期待できない．極めて単純なサーモスタットの意思決定ルールとして以下が考えられる．

室温が低すぎる → 暖房運転

室温が適温である → 暖房停止

当然ながら，より複雑な環境制御システムは，より高度な意思決定機構を持つ．例えば，fly-by wire による航空機などが挙げられる．

- ソフトウェアデーモン

UNIX 系 OS のバックグラウンドプロセスのような，多くのソフトウェアデーモンのように，環境を監視し，何らかの行動を出力して環境に影響を与えるソフトウェアをエージェントと見なすことができる．例として，X Window システム上で動作する xbiff を考える．xbiff は，ユーザに届けられる電子メールを継続的に監視し，GUI アイコンを介して，未読メッセージが存在するかどうかをユーザに示す．xbiff は，例えば ls のようなシステムコマンドを利用して環境の情報を取得し，アイコンの変更やプログラムの実行などの行動をとる．サーモスタットと同様，ここでの意思決定は簡単に実現できる．

以上の例では，エージェントとは，目的を達成するために，様々な環境において自律的に行動することが可能なコンピュータシステムと言える．一般的に，エー

ジェントは、環境の状況を感知して環境を変化させるための種々の行動が可能であり、一見すると非決定的な環境においても適切に機能するように思われる。

しかし、これらのエージェントは知的エージェント (Intelligent agent) ではない。“知的エージェントとは何か？”という疑問に直接回答することは困難であるが、知的エージェントに必要と考えられる性質として以下が挙げられる [91]。

- 反応性 (Reactivity)
知的エージェントは、目的を達成するために、環境を知覚し、環境に生じた変化に適宜対応できる。
- 自発性 (Proactiveness)
知的エージェントは、目的を達成するために、率先して、目的達成に向けた振る舞いをとることができる。
- 社会性 (Social ability)
知的エージェントは、目的を達成するために、他のエージェント (あるいは人間) とのインタラクションが可能である。

これら、知的エージェントが持つべき性質に関して、以下に考察する。まず、自発性により、知的エージェントは、目的の達成に向けて積極的に行動する。単純にある目的の達成に向けて動作するシステムの構築は、実際にはそれほど困難ではない。しかし、そのようなシステムを構築する場合、一般的には、システムが動作する前提条件と、前提条件が妥当である場合に処理を行った結果得られる効果を、事前に明確化する必要がある。すなわち、処理の過程において、環境が予想外の変化を起こさないことが前提となる。そのため、例えば、次節で述べるマルチエージェントシステムのような複雑なシステムや、不確定性を含む環境のように、エージェントが環境に関する完全な情報を得ることが困難な場合は、前提条件や得られる結果を事前に定めることは難しい。従って、動的に予測困難な変化が生じる環境において、適宜、適切な行動を実行可能とするために、知的エージェントは、反応性を持つべきであると言える。また、様々な問題解決機能を持つ複数のエージェントが、協調 / 交渉することで問題解決可能性が向上することは、実世界での人間による問題解決を考えれば自明である。従って、知的エージェントが社会性を持つことは妥当であると言える。

2.2.1 節で述べたように、エージェントの構築においては、意思決定メカニズムの設計が重要な課題となる。これまでに、知的エージェントのための具体的なアーキテクチャが数多く提案されている。本論文では、既存の個々のアーキテク

チャに関しては詳述しないが，アーキテクチャに基づくエージェントタイプの分類を以下に示す [90, 99] ．

- 論理に基づくエージェント
論理における演繹手続きに基づいて意思決定を行う．システムの記号表現に基づく，最も伝統的なアプローチである [28] ．
- 反応型エージェント
何らかの形式で状況と行動を直接マッピングすることで意思決定を行う [22] ．最も広く知られたアーキテクチャとして，Brooks による包摂アーキテクチャ (Subsumption architecture) がある [16] ．
- 信念-願望-意図エージェント
エージェントの信念，願望，および意図を表現するデータ構造への操作に基づいて意思決定を行う．BDI アーキテクチャでは，エージェントの心的状態 (Mental state) が，信念 (Belief) ，願望 (Desire) ，および意図 (Intention) を用いて構築される [14, 15] ．
- 階層型エージェント
複数のソフトウェア階層を介して意思決定を行う．各階層は異なる抽象度で環境に関する推論を行う．階層型アーキテクチャの代表例として，InteRRaP がある [24, 55] ．

2.2.2 マルチエージェントシステム

マルチエージェントシステム (Multi-Agent Systems) [23, 104, 88, 89] の研究は，もともと分散人工知能 (Distributed Artificial Intelligence) [109] に関する研究から生まれた．分散人工知能の研究は，分散問題解決 (Distributed Problem Solving) に関する研究と，マルチエージェントシステムに関する研究に大別できる[‡]．分散問題解決の研究では，問題を分割し，問題解決単位の各モジュール (もしくは“ノード”) にタスクとして割り当てる方法が探求される．各モジュールは，主として，問題解決におけるパフォーマンスの改善などを目的として設計される．

一方，マルチエージェントシステムの研究では，異種の (Heterogeneous) エージェントの間での，協調的な振る舞いが探求される．マルチエージェントシステムは，エージェントを構成要素とし，複数のエージェントが協調的に振る舞うこ

[‡]現在では，マルチエージェントシステムの方がより一般的な意味を持っていると思われる．

とで、問題解決を行うシステムである。2.2.1 節で述べたように、知的エージェントは、自身が置かれた環境の変化に対応して、柔軟に自律的な行動が可能である。そのため、マルチエージェントシステムは、大規模かつ複雑性の高い問題の解決に適している。例えば、インターネットのような、動的かつ高頻度で変化する環境においても、個々のエージェントのレベルで環境の変化への対応が可能であり、適切な問題解決が期待できる。マルチエージェントシステムの一般的な特徴として以下が挙げられる [44]。

- 各エージェントが持つ情報、もしくは問題解決能力は不完全である。すなわち、単体のエージェントでは、システムに対して与えられた問題を解決することができない。
- 全体を制御するシステムが存在しない
- 情報が分散している。すなわち、問題解決に有用な情報を各エージェントが部分的に保持している
- 問題解決処理が非同期に行われる

マルチエージェントシステムの利点はいくつかあるが、システムの頑健性や拡張性の向上、および複数エージェントの平行動作による処理の効率化などが挙げられる [82]。

マルチエージェントの研究については様々な分類方法が考えられるが、一つの方法として (i) 協調的なエージェントを前提とするアプローチと (ii) 利己的なエージェントを前提とするアプローチに分類することが出来る [44]。前者では、エージェントが明示的に協調してタスクを実行するのに対して、後者では、エージェントの協調、および競合解消のための交渉を行う必要がある。

(i) 協調的なエージェントを前提としたアプローチ

本アプローチでは、複数のエージェントが共通目標 (Common goal) の達成に向けて、言わばチームのように協調的に動作する。例えば、Robocup Soccer [87] や Robocup Rescue [110]、およびエンターテインメントなどの分野は、本アプローチとの相性が良いと考えられる。

共通目標の達成に向けて動作するエージェントのグループを扱った既存の研究では [48, 49]、協調戦略に従ったエージェント間のインタラクションにより、複数エージェントによる問題解決のパフォーマンス向上を試みていた。初期の段階では、分散プランニングの分野において盛んに研究が行われ、エージェントが実

際に行動する前に、完全なプランニングを行う、などのアプローチが提案された。文献 [29] では、生成されるプランの検証を行うための synchroniser の役割を果たすエージェントを用いる手法が提案されている。また、文献 [17] では、航空管制への応用について述べられている。

近年になって、研究の方向性は明示的なチームワークのモデル化に向けられている。ここでは、特に、チームの心的状態の特徴付けに関連した Joint Intention 理論 [43] や、SharedPlan モデル [30] に注目が集まった。Tambe らは、これらの理論に基づいた、STEAM (Shell for TEAMwork) と呼ばれる、チームワークのモデルを提案している [83]。STEAM は、拡張した Soar アーキテクチャ [56] と、領域に依存した約 300 個の Soar ルールから構成されている。Tambe らは、実際に、STEAM を用いて RoboCup 用のチームの実装を行っている。

(ii) 利己的なエージェントを前提としたアプローチ

利己的なエージェントは、協調、および競合解消のために交渉を行い、基本的には、個々に期待効用 (Expected utility) の最大化を試みる。交渉により、例えば、プランニングにおける目標の不一致の解消や、資源割り当てにおける制約解消などが行われる[§]。本アプローチに関連して、近年、経済学的な観点に基づく研究が活発化している。マルチエージェント研究の初期の段階で注目を集めた契約ネットプロトコル (Contract Net Protocol) [81] では、メッセージの交換のために、オークションの形式が採用されている。オークションは、利己的なエージェントによる交渉手法として有望視されており、近年では、電子商取引の発展に伴い、より詳細な研究が多数行われている [63, 67, 93]。オークションに関しては、2.4 節で詳述する。

また、複数の利己的なエージェントから成る組織においては、個々のエージェントの効用が最大化されるならば、組織としての効用も最大化されることが望ましい。個々のエージェントが何らかのルールに従って振る舞うことで、組織にとって望ましい結果が得られるようなメカニズムの設計はメカニズムデザイン (mechanism design) [52, 96, 106] と呼ばれ、マルチエージェントシステムの構築における有力なアプローチと考えられている。

[§]現時点では、“交渉”の定義もエージェントの定義同様に曖昧なもので、エージェント間で行われるどのような形式のインタラクションを“交渉”と呼ぶのかは明確ではない。

2.3 エージェントに基づく電子商取引支援

電子商取引 (Electronic Commerce) は、エージェント技術の応用領域として有望視されている。エージェント技術は、電子商取引を容易化し、ユーザにとってより良い結果をもたらす可能性があるからである。これまでに、理論的なものから実践的なものまで、多くの研究成果が報告されている。

文献 [32] では、消費者の購買行動を理解するための CBB (Consumer Buying Behavior) モデルに基づき、幅広く行われているエージェントに基づく電子商取引研究を分かりやすく分類している。CBB モデルは、電子商取引へのエージェント技術の適用を考える際に、アプローチする分野を明確化するために有用であり、様々な文献で用いられている [84, 116]。本節では、まず、CBB モデルに従って商取引をいくつかの局面に分類し、エージェントの適用が有用な分野を明確化する。また、各分野にアプローチした既存の研究について概説する。

2.3.1 購買行動の分類

消費者の購買行動を把握するためのモデルは様々なものが提案されているが [21, 57]、いずれのモデルも、以下の基本的な 6 つのステージを含んでいる。

1. ニーズの同定 - Need Identification -

本ステージの特徴は、消費者自身がまだ意識していないニーズを、消費者に気付かせることにある。本ステージにおいて、消費者は、商品に関する情報を与えられることで商品購入を促進される。

2. 商品の選択 - Product Brokering -

本ステージでは、消費者が購入する商品を決定するための、有益な情報の取得が行われる。取得される情報には、消費者が与えた、商品の評価基準に基づく、代替商品の情報が含まれる。本ステージで得られる結果は、商品の“考慮集合 (consideration set)”と呼ばれる。

3. 売り手 (店舗) の選択 - Merchant Brokering -

本ステージでは、どの売り手 (店舗) から商品を購入するかを消費者が決定するために有益な、売り手固有の情報と、“商品の選択” ステージで得られた考慮集合の結合が行われる。売り手固有の情報には、消費者が選択した売り手の評価基準 (*e.g.*, 値段, 保証, 入手の可能性, 配達時間, 評判) に基づく各売り手の評価が含まれる。

	Amazon.com New For You	Persona Logic	FireFly	Bargain Finder	Jango	Kasbah	AuctionBot	T@T
1. ニーズの同定	★							
2. 商品の選択		★	★					★
3. 売り手(店舗)の選択				★	★			★
4. 交渉						★	★	★
5. 購入と配達								
6. サービスと評価								

図 2.2 代表的な EC システムの支援状況

4. 交渉 - Negotiation -

本ステージでは、取引条件の決定方法が考慮される。交渉の継続時間と複雑さの度合いは市場に依存しており、一様ではない。伝統的な小売り市場では、商品の価格や、取引に関するその他の事柄に関して、交渉の余地がない場合がしばしばある。その他の市場（*e.g.*, 株, 自動車, 芸術品）では、価格や、取引のその他の詳細な点に関する交渉は、商品や売り手の選択には不可欠である。

5. 購入と配達 - Purchase and Delivery -

商品の購入と配達は、交渉ステージの終了を示す。場合によっては、可能な支払い方法（*e.g.*, 現金払い）や配達方法が、商品、および売り手の選択に影響を及ぼすこともある。

6. サービスと評価 - Service and Evaluation -

本ステージは商品の購入後に発生し、商品サービス、カスタマーサービス、および購入時の体験や、意思決定に関する満足度の評価が行われる。

図 2.2 は、CBB モデルにおける 6 つのステージのリストであり、電子商取引研究における代表的なシステムが、具体的にどのステージに関する支援を実現しているかを示している。図 2.2 に示す通り、上記の 6 つのステージの中で、ニーズの同定、商品の選択、売り手（店舗）の選択、および交渉の 4 つのステージが代表的なシステムによって支援されている。次節以降では、各ステージにおいて支援を実現しているシステムについて概要を述べる。

2.3.2 ニーズの同定の支援

ニーズの同定ステージは、消費者を新たなニーズに気付かせるためのステージである。すなわち、消費者に対して、購入行動のきっかけを与えることが具体的な目的となる。新たなニーズに気付いた消費者は、最も適切な商品を見つけるために、複数の商品を比較する必要がある。実際に、購入する商品を選択・決定するのは、次の、“商品の選択”ステージである。本ステージを支援するシステムとして、Amazon.com が提供している NEW FOR YOU のサービス [1] がある。NEW FOR YOU のサービスでは、消費者のお気に入りのカテゴリーや、過去の購入履歴に基づいて、関連する商品情報をまとめた個人ページの提供とメールの配信を行っている。ここでは、消費者が興味を持つと予想した新商品が購入可能となった場合、消費者に対して新商品の情報が提供されることになる。その結果、消費者を新たなニーズに気付かせることができ、購買行動の促進が期待できる。

2.3.3 商品の選択の支援

CBB モデルにおける、“商品の選択”ステージは、消費者が何を購入するかを決定するステージである。商品の選択は、“ニーズの同定”ステージにおいて消費者のニーズが確定した後に、検索された商品情報に対する評価を通して行われる。図 2.2 に示す通り、本ステージを支援するシステムとして、PersonaLogic、Firefly、および Tête-à-Tête がある。これらのシステムは、基本的には、膨大な商品情報から、ユーザのニーズに合う商品を探し出す検索システムとして機能する。

PersonaLogic [51][¶]は、買い手が、膨大な数の商品の中から、自身のニーズに最も適合する商品の特定を支援する、一種の意思決定支援システムである。本システムでは、買い手が商品の特徴に関する制約を明らかにすることにより、購入を希望しない商品を、対象としている商品のドメインからふるい落とす、すなわち商品情報のフィルタリングを行う。図 2.3 は、ハンドヘルド機器に関する条件の入力画面である。買い手は、複数の属性に関して、各々の重要度、および制約として考慮するか否かを入力できる。この結果、買い手は欲しい財を特定することができる。PersonaLogic が備えている制約充足エンジンは、買い手が示すハードな制約を全て充足する商品のみを、ソフトな制約を充足する度合いが高い順で、リスト表示で買い手に提供する。

[¶]PersonaLogic は、1998 年に AOL 社によって買収されている。また、AOL によるサービス提供方法はすでに変更されており、図 2.3 に示すような Web ページは、現在は存在しない。

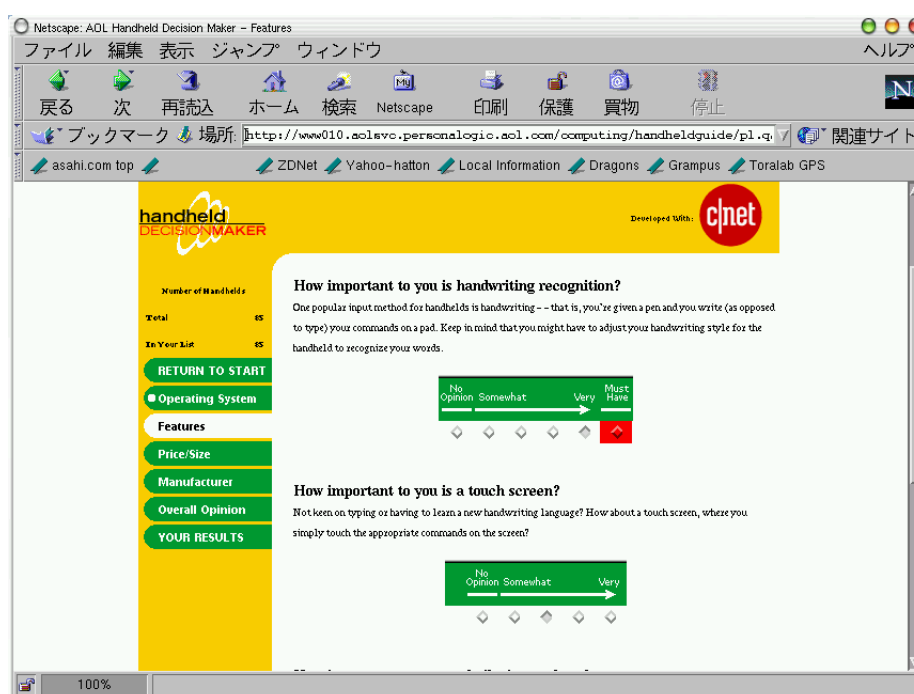


図 2.3 PersonaLogic の入力画面

Firefly は, PersonaLogic と同様, 買い手が商品を見発することを支援する. Firefly では, PersonaLogic のようなフィルタリングを行うのではなく, ACF (Automated Collaborative Filtering) と呼ばれる技術に基づく, “Word of Mouth” と呼ばれる推薦メカニズム [79] を利用して商品の推薦を行う. ACF の基本的な動作は, まず最初に, ある買い手 *Buyer* の商品に対する評価と, その他の買い手の評価の比較を行い, 近い嗜好を持った買い手の集合 (Nearest neighbor) を特定する. 次に, *Buyer* は低い評価を与えているが, Nearest neighbor に属する買い手が高い評価を与えている商品を *Buyer* に推薦する. この ACF のメカニズムにより, 買い手は, 類似した嗜好を持つ他の買い手の意見に基づいて, 時として意外な商品の推薦を受けられる^{||}.

^{||}Firefly を運営していた Firefly Network 社 (創設者は MIT Media Lab. の Pattie Maes 博士) は 1998 年に Microsoft 社に買収されている. 現在, Maes 博士は新しいベンチャー企業である Open Ratings 社の運営に携わっている.

2.3.4 売り手（店舗）の選択の支援

“商品の選択”ステージでは代替商品間での比較を行うが，“売り手（店舗）の選択”ステージでは，代替可能な売り手（店舗）間での比較を行う．図 2.2 より，本ステージを支援するシステムとして，BargainFinder，Jango，および Kasbah がある．Kasbah については，次節でより詳しく述べる．

BargainFinder は，オンラインでの価格比較を実現した最初のショッピングフレームワークである．ユーザが Web ブラウザを介して特定の商品名を与えると，システムは9つの異なる店舗の Web サイトを対象として，商品の価格の検索を行う．BargainFinder 自体は，概念的裏付けの乏しいシステムではあるものの，オンラインでの価格比較に関して，様々な問題があることを示唆していた．例えば，BargainFinder は，価格比較のみにフォーカスを絞ったシステムとなっているため，価格以外の付加的なサービスの充実に注力している店舗には，システムは有効に機能するとは言えない．そのため，いくつかの店舗からは BargainFinder からのアクセスを拒否されている [32]．実世界における商取引がそうであるように，電子商取引においても，付加価値に着目した支援の必要性を認識すべきであることが分かる．

Jango [20] は BargainFinder を発展させたシステムである．Jango の初期のバージョンでは，BargainFinder のように，特定のサーバから商品の情報に関する要求を送信するのではなく，各買い手の Web ブラウザから要求を送信する．すなわち，Jango からのアクセスは，一般のユーザが Web ブラウザを介してアクセスする方法と変わらないため，店舗側は Jango からのアクセスを判別することが困難となった．このように，Jango では，システムアーキテクチャの変更により，BargainFinder における店舗側のアクセス拒否問題を解決している．Netbot 社が開発した Jango の技術は，1997 年に，当時の Excite 社による Netbot 社の買収を経て，Excite のショッピングサイトに統合され，実際に多くのユーザが利用するシステムとして運営されていた．

2.3.5 交渉の支援

“交渉”ステージでは，商取引における価格や，その他諸々の条件に関する決定が行われる．商品の価格を固定せず，動的に価格交渉を行うことにより，各店舗は，商品の価値を事前に定めておく必要が無くなる．これは，各店舗が，商品の適切な価格を事前に定めるためにコストをかけるのではなく，市場のメカニズムに価格の決定タスクを委ねることを意味している．このため，限りのある商品の

公平な割り当てなど，社会的に望ましい商取引メカニズムが必要となる．

実世界での商取引とは異なり，電子商取引では，商取引における空間的な制約が存在しない．例えば，Yahoo!Auctions [2] や eBay [3] は老舗のオンラインオークションサイトであるが，これらのサイトで開催されているオークションに参加する場合，実世界のオークションとは違って，参加者が地理的に集まっている必要がない．参加者は，コンピュータを使ってネットワーク越しにオークションに参加すれば良い．その一方，参加者はオークションに長時間注意を払わねばならなくなる．実世界におけるオークションは，通常，数日間に渡って継続されることはないが，インターネット上で開催されているオークションは，より多くの参加者を集める意味でも，開催期間が長く設定されるからである．このように，長期に渡って交渉に携わらねばならない問題は，交渉方式としてオークションを用いている場合に限らず発生する．ここに，エージェント技術による支援の必要性を見いだすことができ，また，エージェント技術が最も貢献できるのは，複雑性の高い，交渉に関する分野であると考え，「交渉」ステージを支援するシステムとして，AuctionBot，Kasbah，および Tête-à-Tête がある．

AuctionBot [92] は，ミシガン大学の Wellman らが開発した汎用のオンラインオークションサーバーである．AuctionBot のユーザは，商品売るための新しいオークションを自由に生成することができる．オークションを生成する際には，いくつかのオークションタイプの中から1つを選択し，必要なパラメータを入力する．例えば，落札時間や引き分けの解決方法などが設定できる．AuctionBot の特筆すべき特長は，AuctionBot のマーケットプレイス上で自律的に交渉を行うエージェントを作成するための API が提供されていることである．ユーザは提供されている API を利用して，エージェントの入札戦略をコード化できる．この優れた機能により，ICMAS2000 で開催された，オークションによる商品の売買ゲーム TAC (Trading Agent Competition) [4] では，AuctionBot が基盤システムとして採用された．

Kasbah [19] は，マルチエージェントに基づくオンラインの広告システムであり，エージェントがユーザの代理として商取引の交渉を行う．Kasbah では，シンプルなプロトコルに基づいて買い手エージェントと売り手エージェントが交渉を行う．ここで，買い手/売り手エージェントは，時間と価格に基づいて行動を決定し，事前に設定した期間内で，希望する価格での売買成立を試みる．ユーザは，関数の選択により，エージェントの交渉戦略を指定できる．ここで選択する関数は，ある時点において要求する価格を調整するために利用される．具体的には，図 2.4 に示すような関数を指定できる．図 2.4 は，売り手のユーザが選択できる

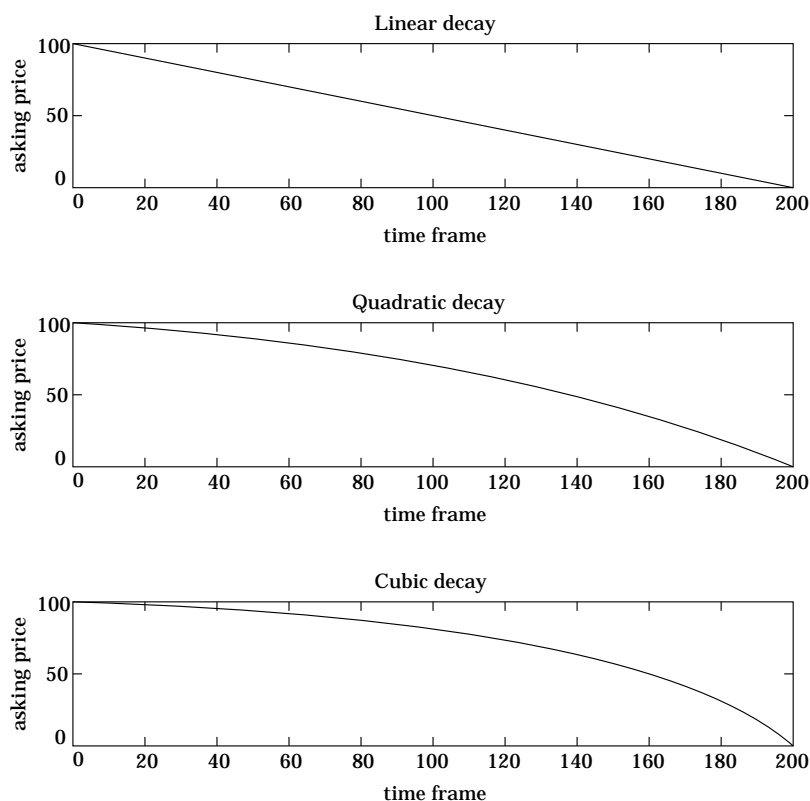


図 2.4 Kasbah で用いる減衰関数

関数を示している。Kasbah におけるエージェントの戦略はシンプルかつヒューリスティックなものであるが、ユーザがエージェントの行動を理解する上では逆に有効であったことが文献 [19] で述べられている。また、Kasbah は、PAAM97 において会議の参加者による大規模な実験が行われており、文献 [18] で結果が報告されている。

Tête-à-Tête [31] は、Kasbah と同様、仮想的なマーケットプレースを提供するマルチエージェントシステムであるが、より優れたメカニズムを持っている。Tête-à-Tête におけるエージェントは、価格のみに関して交渉するのではなく、協調的に複数の取引の条件について交渉を行うことができる。そのため、ユーザは商品に関する様々な特徴に対して要求が可能となり、より複雑な選好の充足が期待できる。Tête-à-Tête において、エージェントは、多属性効用理論 [46] を基礎とする、議論に基づく交渉 [61] を行う。Tête-à-Tête では、商品进行评估する複数の属性に対してユーザが割り当てた、離散的 / 連続的な評価値を組合わせて効用を計算できるため、ユーザの複雑な選好から効用値を計算することが可能である。買い手

エージェントと売り手エージェントには、数種類の交渉用パフォーマティブが用意されており、交互に送信し合うことによって、効用の高い取引の成立を試みる。

2.4 オークション

2.4.1 基本的な知識

オークション (Auction) とは、財やタスクを効率的に割り当てる方法であり、古くから用いられている商取引のルールの一つである [65]。人工知能の分野でも、オークションは資源 / タスク割り当て、および交渉のメカニズムとして用いられてきた [44]。近年では、インターネットの普及に伴う電子商取引の急速な発展により、特に商取引の基本メカニズムとして積極的に用いられ、多くの研究成果が報告されている。本節では、オークションに関連する基本的な用語と周辺知識について説明する。

オークションを成り立たせる要素として、以下の3つがある。

- 取引のルールを規定したプロトコル
- 参加者
- 出品財

オークションのプロトコルは、扱う財の種類や数、参加者数、および価格の変化の仕方に基づいた様々な分類の方法がある。各プロトコルの詳細については、次節で述べる。

オークションの参加者は、オークションの主催者 (売り手) と入札者 (買い手) である。簡単のために、本論文では、各参加者は、オークションによって効用が増加することを望むとする。すなわち、expected-utility maximizer であるとする。従って、売り手が希望するのは、効用が最大化される財の割り当てであり、一方買い手が希望するのは効用が最大化される入札である。

次に、オークションに出品される財の性質について述べる。オークションにおける財の性質として、個人価値、共通価値、相関価値の3つが考えられている [65, 105]。

個人価値 (Private-value)

財が個人価値である場合、その財の価値は買い手の価値観のみによって決定される。例えば、絵画等の芸術品や骨董品などが個人価値の財に相当する。また、

個人価値の財を扱うオークションでは、財の再販は目的としないことが規定される。実世界で伝統的に行われてきたオークションでは、個人価値の財を扱ったものが多い。個人価値の財という仮定は、理論的な解析を容易化するために、一般に良く用いられる [105]。

共通価値 (Common-value)

財が共通価値であるとは、全ての買い手にとって財の価値が共通であることを言う。より分かりやすく言えば、財を得た場合の効用が全ての買い手にとって共通であることを言う。例として、2億円分の鉱石が埋蔵されている鉱山の採掘権のオークションについて考える [65]。この場合、たとえどの買い手が採掘権を獲得したとしても、得られるのは2億円分の鉱石である。すなわち、オークションの結果は、どの買い手にとっても常に同一となる。また、共通価値のオークションにおいて、入札者が財が本来持っている以上の価値を予測して過剰な入札額を設定し、損害を被る現象を勝者の災い (Winner's Curse) と呼ぶ [25, 65]。上記の採掘権の例では、鉱石の埋蔵量を楽観的に評価した結果、3億円で落札してしまった場合、この落札者は、落札には成功しても、結果的に1億円の損害を被ることになる。つまり、この落札者は、オークションの勝者となってしまったために、災いを被ったことになる。

相関価値 (Correlated-value)

個人価値と共通価値の中間が相関価値である。一般的なオークションにおいては、財の価値は相関価値である [65]。ある買い手が財に対して与える価値が、価値観が異なる他の買い手の価値と相互に関連する場合、その財は相関価値の性質を持つ。また、この性質の極端な場合として、共通価値の財が含まれる。財の性質を相関価値と仮定した場合、プロトコル等の解析が困難になるため、一般には解析を容易にするために、財の性質は個人価値、共通価値の両極端であることを仮定される場合が多い。

買い手が複数種類、もしくは複数個の財を必要とする場合、財の価値が互いに依存する場合がある。このような複数の財の組み合わせに対する選好に関しては、以下に述べる代替性と補完性の2つの性質が考えられている。

代替性

複数の財を同時に所有することで効用が増加しない場合、それらの財は代替性

を持つ（代替的である）と言う．すなわち， U を財に効用を与える関数として，

$$U(A) + U(B) \geq U(\{A, B\})$$

である時，財 A と財 B は代替的であるという．例えば PHS と携帯電話は，普通どちらか一方は必要でも両方同時には必要としないため，これらの財は代替的であると言える．また，財の代替性によって，同一の財を複数個必要としないということも表現可能である．例えば，PHS 一台分の契約しかしていないにも関わらず，PHS の機体を 2 個，3 個と手にいれたとしても，通常，効用は増加しない．

補完性

複数の財を同時に所有することで効用が増加する場合，それらの財は互いに補完性を持つ（補完的である）と言う．すなわち，

$$U(A) + U(B) < U(\{A, B\})$$

である時，財 A と財 B は補完的であるという．例えば，一般に，テレビとビデオ，あるいはコンピュータとプリンターは，同時に所有することによって，単独で持っている時以上の価値を得ることができるため，これらの財は互いに補完的であると言える．

次に，オークションのメカニズム自体が満たすべき性質として，以下の 3 つが挙げられる [52] ．

- 誘因両立性 (Incentive compatibility)

オークションが誘因両立性を満たしている場合，入札者にとっては，財に対する真の評価値で入札することが支配戦略となる．すなわち，誘因両立性が満たされている場合，嘘の評価値で入札することによって利益を得ることがない．

- パレート効率性 (Pareto efficiency)

オークションがパレート効率性を満たしているならば，各財は，財を最も高く評価している入札者に割り当てられる．パレート効率的な財の割り当てが行われた場合，全ての参加者の効用の和が最大化される．

- 個人合理性 (Individual rationality)

オークションが個人合理性を満たしているならば，オークションに参加することによって効用が減少することはない．すなわち，割り当てられた財の支払額は，必ずその財への評価値以下となる．

2.4.2 単一種類の財を扱うオークションプロトコル

本節では、単一種類の財を処理可能なオークションプロトコルについて概要を述べる。まず、文献 [65] の分類に基づき、最も基本的な4つのオークションプロトコル（英国型、オランダ型、第一価格秘密入札、第二価格秘密入札）について述べる。これら4つのプロトコルは、買い手/売り手のいずれかのみが複数である片方向（one-sided）のオークションプロトコルである。そして次に、買い手/売り手が共に複数存在し、入札を行うダブルオークションについて述べる。

片方向オークションプロトコル

【英国型オークション（English auction）】

英国型オークションは一般的に広く知られているオークションプロトコルである。インターネットオークションサイトが採用しているプロトコルも、基本的には英国型オークションに則ったものが多い。本プロトコルでは、入札者は金額を自由に上昇して入札できる。入札額を変更する者がいなくなった場合、その時点で最も高額の入札をしている入札者が財を落札し、入札額分の金額を支払う。従って、落札者の利益は、自身の財に対する評価値から、入札額を引いた金額となる。また、本プロトコルにおける入札戦略、すなわち表明する入札額は、(i) 自分自身の評価値、(ii) 他の入札者の評価値の推定値、(iii) 全ての入札者の過去の入札履歴に基づいて決定される。従って、入札額は、個々の入札者が持っている情報の変化に伴って更新されることになる。

個人価値の財を仮定した英国型オークションでは、評価値に達するまでは最高入札額よりも少額だけ競り上げ、評価値に達したら入札を辞めることが支配戦略となる。すなわち、この戦略以上に効用の高い入札は存在しない。従って、通常は、財に対して最も高い評価値を与えている入札者が、2番目に高い評価値 + 少額で財を落札することになる。実際のインターネットオークションサイトが提供している自動入札機能では、英国型オークションの支配戦略に基づいた入札が行われる。

【第一価格秘密入札オークション（First price sealed bid auction）】

第一価格秘密入札オークションプロトコルは、英国型オークションプロトコルと並んで、実世界で頻繁に用いられる一般にも馴染みの深いプロトコルである。本プロトコルでは、入札者は、他の入札値を知らずに一度だけ入札し、最も高額の入札をした入札者が、自身が入札した金額で落札する。落札者の利益は、英国

型と同様，自身の財に対する評価値から，入札額を引いた金額となる．また，本プロトコルにおける入札戦略は，自分自身の評価値と，他の入札者の評価値に関する推定値に基づいて決定される．

第一価格秘密入札オークションには，英国型オークションプロトコルとは違って，厳密な支配戦略が存在しない．例えば，ある入札者 *Bidder* の財に対する評価値が\$100 であると仮定する．*Bidder* が\$100 で入札した結果，財の落札に成功し，その時の2 番目に高い入札額が\$80 だった場合，*Bidder* の入札額は高すぎたことになる．つまり， $\$80 + \epsilon$ (ϵ は少額の金額) で入札するべきであった，と考えられる．しかし，特別な情報を持っていない限り，2 番目に高い入札額を正確に知ることは困難である．高額で入札して落札確率を高めることと，低額で入札して落札した場合の利益を増やすことの間にはトレードオフが生じるため，結局最適な戦略は入札者の選好に依存することになる．従って，第一価格秘密入札オークションでは，厳密な支配戦略を定めることができない．

しかし，ある特殊な仮定をした場合，ナッシュ均衡 (Nash equilibria) が見い出され得ることが文献 [65] で述べられている． N 人の入札者の評価値が任意の金額まで一様に分布している場合，自分の評価値の $(N - 1)/N$ の額で入札することがナッシュ均衡となる．例えば，2 人の入札者がいる場合，それぞれの評価値の半分の価格を入札することがナッシュ均衡となる．すなわち，入札額をこれ以上高くすると財の落札確率は増すが利益は減少し，低くすると利益は増すが落札確率は下がる．

【オランダ型オークション (Dutch auction)】

英国型オークションプロトコルでは，価格が競り上げられていくのに対して，オランダ型オークションプロトコルでは，主催者は，入札者が落札を宣言するまで連続的に価格を下げていく．落札を宣言した入札者が財の落札者となり，宣言時の金額を支払う．落札者の利益は，自身の財に対する評価値から，入札額を引いた金額となる．本プロトコルにおける入札戦略は，入札者自身の評価値と，他の入札者の評価値の推定値に基づいて決定される．また，支配戦略は一般には存在しない．

一見すると全く異なった印象を受けるが，オランダ型オークションは，第一価格秘密入札オークションと戦略的に同値である．戦略的に同値であるとは，これら2つのオークションにおける戦略集合が相互にマッピング可能であることを意味する．すなわち，オランダ型オークションにおける任意の戦略から得られる結果に対して，同一の結果が得られる第一価格秘密入札オークションの戦略が存在する．戦略的に同値となる理由は，いずれのプロトコルにおいても，オークショ

ンの過程において情報が全く公開されず、明らかになるのはオークションの終了時だけだからである。一見すると、オランダ型オークションの方が、第一価格秘密入札オークションよりも多くの情報が得られるように思われる。しかし実際には、ある金額に達するまで他の入札者が落札を宣言していないという情報は、入札者の意思決定に対して、なんら有効に働かない。

【第二価格秘密入札オークション (Second price sealed bid auction)】

第二価格秘密入札オークションは、ヴィックリーオークション (Vickrey auction) と呼ばれるオークションプロトコルである。本プロトコルでは、入札者は、他の入札値を知らずに一度だけ入札を行う。入札は公開され、最も高額の入札をした入札者が、2番目に高い入札額を支払って落札する。従って、落札者の利益は、自身の評価値から、2番目に高い入札額を引いた金額となる。また、本プロトコルにおける入札戦略は、入札者自身の評価値と、他の入札者の評価値の推定値に基づいて決定される。

第二価格秘密入札オークションは、上述した、誘因両立性、パレート効率性、個人合理性の3つの性質を同時に満たす。従って、第二価格秘密入札オークションにおける支配戦略は、財に対して与えている真の評価値で入札することになる。しかし、第二価格秘密入札オークションは、理論的解析やモデル化に用いられることはあっても、現実にはほとんど用いられていない。その原因として、普通、入札者は自分の真の評価値を明らかにすることを望まない、等の理由が挙げられる [73]。

双方向オークションプロトコル

買い手/売り手が共に複数存在し、入札を行う双方向のオークションはダブルオークションと呼ばれ [45, 53, 92, 98]、外貨、証券等の取引において広く用いられている。ダブルオークションは、連続時間オークション (continuous double auction) と離散時間オークション (clearing-house、もしくは continuous call market) に大別できる。連続時間オークションでは、任意の時刻に取引が可能である。連続時間オークションは、株式市場のように、財の価値が頻繁に変化する場合に有効である。一方、離散時間オークションは、一定の時間単位毎に処理が行われる。すなわち、ある期間、買い手/売り手の入札を集め、その期間の最後に可能な取引の処理を行う。文献 [45] や文献 [53] では、離散時間オークションを対象とした研究成果が報告されている。具体例として、文献 [53] で提案されているダブルオークションプロトコルを以下に示す。

b_1, \dots, b_m を買い手の評価値, s_1, \dots, s_n を売り手の評価値とする. また, 評価値の順序を以下のように表す.

$$b_{(1)} \geq b_{(2)} \geq \dots \geq b_{(m)}$$

$$s_{(1)} \leq s_{(2)} \leq \dots \leq s_{(n)}$$

ここで, i 番目に高い買い手の評価値, および i 番目に低い売り手の評価値を, それぞれ $b_{(i)}$ および $s_{(i)}$ と表記する. また簡単のため, $b_{(m+1)}$ を, 買い手の可能な最低の評価値とし, $s_{(n+1)}$ を, 売り手の可能な最高の評価値とする. 可能な取引の数を $k \leq \min\{m, n\}$ で表し, 以下の条件を満たすものとする.

$$b_{(k)} \geq s_{(k)}$$

$$b_{(k+1)} < s_{(k+1)}$$

この条件が成立する場合, 最初から k 番目までは, 買い手の評価値が売り手の評価値より高いことになるから, 最大で k 個の取引が可能となる.

取引価格の候補 p_0 を以下のように定義する.

$$p_0 = \frac{1}{2}(b_{(k+1)} + s_{(k+1)})$$

取引が行われるケースとして, 以下の2つが考えられる.

1. $p_0 \in [s_{(k)}, b_{(k)}]$ が成り立つ場合
(1) ~ (k) の買い手と売り手が, 価格 p_0 で取引を行う.
2. $p_0 \notin [s_{(k)}, b_{(k)}]$ が成り立つ場合
(1) ~ ($k - 1$) の買い手と売り手のみが取引可能となる. ここで, 買い手は $b_{(k)}$ を支払い, 売り手は $s_{(k)}$ を受け取るため, 差分 $(k - 1)(b_{(k)} - s_{(k)})$ の金額が余ることになる. 一般に, この余剰の金額は, オークションの開催者が得る.

文献 [53] では, 上記のプロトコルは誘因両立性と個人合理性を満たすことが示されている. しかし, ある参加者が, 複数の参加者になりすまし, 他人の名義で入札を行う, 架空名義入札 (False-name bid) と呼ばれる不正行為を働いた場合, 誘因両立性が成立しないことが指摘されている [98].

2.4.3 複数種類の財を扱うオークションプロトコル

前節では, 単一種類の財を扱うオークションプロトコルについて述べた. しかし, インターネットオークションの発展により, 入札者が複数の財に対して入札

することが可能となったため，複数の財の価値の依存関係を考慮する必要がある．より具体的には，入札者が，2.4.1 節で述べた代替的／補完的な選好を持つ場合を考える必要がある．本節では，複数種類の財に対する代替的／補完的な選好を処理可能な，代表的なオークションプロトコルについて述べる．

組合せオークション (Combinatorial auction)

組合せオークション [47, 50, 54, 86] では，個々の財に対して入札するだけでなく，複数の財の組合せに対する入札の処理が可能である．財の割当て方法は，入札額の合計が最大化されるように決定される．組合せオークションを用いることにより，買い手の効用と売り手の収入の双方を増加することが可能となる．組合せオークションは，古くは空港における航空機の発着枠の決定に利用され [66]，また近年では，マルチエージェントによるタスクプランニングや [41]，電車のスケジューリングに利用されるなど [60]，電子商取引の分野に限らず，多くの分野で利用されている．

組合せオークションでは，入札者が個々の財の入札に関して予測をする必要がなく，入札額の決定に関する計算は比較的容易である．しかしながら主催者は，入札額の合計を最大化する財の割り当てを決定するために，複雑な計算を行う必要がある．組合せオークションにおける最適な財の割り当ての問題は，勝者決定問題 (Winner Determination Problem) と呼ばれ，組合せオークションに関する主要な研究トピックの一つとなっている．勝者決定問題は以下のように定義される [74]． G を財の集合とし，入札者の集合を A とする．ある入札者 i の財の組合せ $S \subseteq G$ に対する入札を $b_i(S)$ と表し，財の組合せ S に対する最高入札額を以下のように定義する．

$$\bar{b}(S) = \max_{i \in A} b_i(S)$$

従って，最適な財の割当ては

$$\operatorname{argmax}_{\chi} \sum_{S \in \chi} \bar{b}(S)$$

の解となる．ここで， χ は以下に定義される財の割当ての集合である．

$$\chi = \{S \subseteq G \mid S \cap S' = \emptyset \text{ for every } S, S' \in \chi\}$$

つまり， χ は財の組合せ S の集合であり，かつ同一の財が χ 中の複数の組合せに重複して含まれることがない．

勝者決定問題は一種の組合せ最適化問題であり，最適な財の割り当ての決定は NP 完全問題であることが知られている [70]．これまでに，様々な勝者決定アルゴリズムが提案されている [8, 25, 74, 77, 118]．文献 [77] では，CABOB と呼ばれる探索アルゴリズムが提案されている．CABOB では，線形計画問題による勝者決定問題の解決と，効果的な探索範囲の絞り込みを行っており，多くの場合で商用のソルバーよりも高速に解が計算できる事が報告されている．文献 [118] では，解の最適性に関して妥協することで，大規模な問題の解を現実的な時間内で計算するための手法が提案されている．

また，組合せオークションは，プロトコルの性質上，実在のインターネットオークションサイトへの適用が難しい．Sandholm らは実践的な研究の一環として，組合せオークションをサポートする電子商取引サーバー eMediator[75, 76] を開発している．

逐次型オークション (Sequential auction)

逐次型オークションは，単一財のオークションを逐次的に連続して行うことによって複数の財を販売するオークション方式である [47, 75]．逐次型オークションでは，個々の財は独立したオークションで扱われることになるため，組合せオークションのような，勝者決定に関する困難は生じ無い．また，各財のオークションのプロトコルに関する特別な規定は無いため，様々なプロトコルに基づく複数のオークションを，一度の逐次型オークションで扱うことも可能である．

しかし，逐次型オークションにおいては，個々の入札者が入札額を決定する事が困難な問題となる．なぜなら，入札者が財に与える評価値は，その後のオークションの落札結果に依存するからである．つまり，複数の財の組合せに対して選好を持つ場合，組合せに含まれる財の落札結果に従って，各々の財に与える評価値が決定されることになる．例えば，2つの財 A, B に関する逐次型オークションにおいて，入札者が次のような選好を持つ場合を考える．

$$\begin{aligned} U(\{A, B\}) &= 10 \\ U(A) &= U(B) = 0 \end{aligned}$$

すなわち，財の組合わせ $\{A, B\}$ が得られれば効用が増加し，どちらか一方でも得られなければ効用は増加しない．この場合入札者は，財 B の落札の可能性を慎重に考慮して財 A の評価値を決定する必要がある．もし財 A のみを落札してしまった場合，入札者は財 A への支払額分だけ効用を減少させることになる．従って，逐次型オークションにおいて，入札者は，他の入札者の評価値を考慮した，未来

のオークションの結果の予測に基づいて入札戦略を決定しなければならない．そのため，逐次型オークションにおける入札戦略の決定は困難で，少なからず不確定性を含むことになる．

2.5 結言

本章では，本研究の関連研究について述べた．本章で述べた通り，電子商取引はエージェント技術の有望な応用領域と目されている．本論文では，マルチエージェントに基づく電子商取引に焦点を当て，理論と実践の双方にアプローチし，新たな技術の提案を行う．本論文では，エージェントを問題解決の基本要素として用いているが，本章で述べた通り，現時点で，エージェントに関する一般的な定義は存在しない．そこで，基本的に本論文では，以下の定義に従ってエージェントを理解する．

定義：エージェント（本研究における限定的定義）

エージェントとは，商取引に関するユーザの選好（好み）を保持し，他のエージェントとの自律的な相互作用を介して，効果的に取引処理を遂行する知的ソフトウェアである．

第 3 章

逐次型オークションにおける 入札戦略決定手法

3.1 序言

現在，インターネット上には数多くのオークションサイトが存在している．入札者は，ネットワークを通じて，多数のオークションへの同時並行的な参加が可能となった．そのため，入札者が複数の財に対して，補完的／代替的な選好を持つ場合がある．第 2 章で述べた通り，これまでに複数の財に関する選好を処理可能なオークション方式が提案されている．本章では，複数財を処理可能なオークション方式の一つである逐次型オークションにおける，入札戦略の決定手法を提案する．逐次型オークションでは，単一財のオークションが逐次的に連続して行われるため，マルコフ意思決定問題 [64] と等価な問題とみなすことができる．文献 [12] では，入札者が動的計画法を用いて，期待効用を最大化する最適な入札戦略を求める手法が提案されている．しかし，文献 [12] の定式化では，入札者の効用が一般的な加法的な形式（additive form）であることを仮定しており，オークションの過程での所持金の額を，動的計画法で考慮する状態中に陽に表現する必要があった．このため，初期状態での所持金の額が大きくなった場合に，考慮すべき状態数が非常に大きくなるという問題点がある．

本章では，入札者の効用が，加法的な形式の一種である準線形と呼ばれる形式（quasi-linear form）であることを仮定する．この仮定により，状態中で所持金の額を表現せず，かつ，財に対する支払額を状態遷移に伴うコストとして表現することで状態数を抑え，動的計画法を用いて最適戦略が得られることを示す．また，加法的な形式では表現できるが，準線形の形式では表現できない実用上重要な場

合として、予算制約 [107] が存在する場合がある。本章では、準線形の効用を仮定して得られた戦略を修正して、予算制約が存在する場合の準最適戦略を高速に得る手法を提案し、その有効性を示す。

本章の構成を以下に示す。3.2 節では準備として、逐次型オークションに関連した種々の用語、記法の定義を行う。3.3 節では、文献 [12] で示されている問題の表現方法と、動的計画法を用いた解法を示し、その問題点を明確化する。3.4 節で、準線形の効用を仮定した場合の新しい問題の表現方法を示し、動的計画法で考慮すべき状態数が削減可能であることを示す。さらに実験的評価により、予想した以上の処理時間の高速化が得られることを示す。3.5 節では、予算制約を満足する準最適な戦略を求める手法を示し、提案手法の有効性を実験的に評価する。3.6 節では、本章での提案手法によって得られた高速化に関して議論する。

3.2 用語と記法の定義

本節では、本章における基本的な用語と記法を定義する。オークションにかけられる財が n 個あるとして、各財を r_1, r_2, \dots, r_n と表し、財はこの順にオークションにかけられるものとする。各財のオークションは A_1, A_2, \dots, A_n と表す。簡単のため、各財のオークションプロトコルは、実世界においても頻繁に用いられている第一価格秘密入札オークション [65] のプロトコルが用いられるものとする。第2章で述べた通り、第一価格秘密入札オークションでは、各入札者は他者の入札値を知らされずに入札を行い、最も高い入札値をつけた入札者がその価格で財を落札する。以下、本章では、財に対して入札を行う特定のエージェントに注目して、このエージェントの最適戦略を求める方法について考察する。財 r_i のオークション A_i に関して、エージェントは他のエージェントの最高入札額 h を予測する分布関数 $F_i(h)$ を持っているものとし、かつ、各オークションにおける最高入札額の分布は互いに独立であるとする。簡単のため、最高入札額を申告したエージェントが複数存在する場合でも、このエージェントが財を落札できるとする。この定義により、エージェントは、財 r_i のオークション A_i において z なる入札をした場合に財を得られる確率を、分布関数 $F_i(h)$ を用いて、 $F_i(z)$ として得ることができる。また、確率 $F_i(z)$ は他の財の落札状況には依存しない。

文献 [12] に示されているように、これは非常に強い仮定であり、オークションに参加しているエージェントが、互いの行動とは独立に入札額を決定することを意味している。すなわち、エージェントは、すでに終了している、もしくは今後行われるオークションを考慮して戦略を決定するのではなく、現在オークション

にかけられている財に関する最高入札額の分布関数のみに基づき、近視眼的に戦略を決定する。ただし、他のエージェントの財に対する評価値を事前に正確に見積もる事は困難であるため、実際には、エージェントの持つ分布関数は、財を得られる確率に関する推定値を得るための関数となる。エージェントは、この分布関数から得られる推定値が正しいと仮定した場合の最適な戦略を求める。また、他のエージェントの最高入札額の分布は、文献[12]に示されているように、エージェントが経験を通して修正していくことが可能である。

全ての財の集合 $R = \{r_1, r_2, \dots, r_n\}$ の部分集合 $R_s \subset R$ に関して、エージェントの R_s に対する評価値を $v(R_s)$ と記述する。この財の集合の評価値は、他のエージェントの評価値に依存することなく決定される。第2章で述べたように、このような財は個人価値の財と呼ばれ[52, 65]、個人価値の財を仮定することで、理論的な解析を容易化できる。

3.3 加法的な効用に基づく動的計画法

逐次型オークションでは、エージェントは個々の財に関して入札額を決定する必要がある。複数の財の価値の間に、補完的 / 代替的等の依存関係が存在する場合には、個々の財に対する入札額をどのように決定するかが問題となる。そこで文献[12]では、動的計画法 (Dynamic Programming) [11] を用いて最適な入札戦略を求める手法が提案されている。動的計画法は、マルコフ意思決定問題 (Markov Decision Problem) [64] において最適な戦略を求めるための手法である。マルコフ意思決定問題とは、状態の集合と各状態で実行可能なアクションの集合、および各状態で任意のアクションを実行した場合の遷移確率と遷移に伴う報酬 / コストが与えられた時に、報酬 / コストの和を最適化する行動の系列を決定する問題である。

文献[12]の手法では、エージェントの効用が加法的な形式であることが仮定されている。エージェントの効用が加法的であるとは、すべての財のオークションが終了した時点において、エージェントが落札した財の集合を R_s 、所持金を d とした場合に、エージェントの効用が以下の式で与えられることを言う。

$$v(R_s) + f(d)$$

ここで f は、所持金に対して何らかの効用を与える任意の (増加) 関数である。

最適な戦略を得るために、意思決定過程、すなわち複数のオークションに参加する過程を $n + 1$ 個のステージに分割し、各ステージを参照するための整数値の

タイムインデックス t ($0 \leq t \leq n$) を割り当てる．最初の n 個のステージでは，財に対する入札が行われる．最後の $n+1$ 番目のステージは，全てのオークションが終了した後の状態である．つまり， $0 \leq t \leq n-1$ の範囲では，エージェントはステージ t において，オークション A_t に参加していることになる．また，あるステージ t において，入札者の所有財の集合が R_s ，所持金が d である状態を，これらの組合せ $\langle R_s, d \rangle^t$ で表現する．入札戦略 π は，状態から入札額に対するマッピングであり， $\pi(\langle R_s, d \rangle^t) = z$ は，ステージ t において，所有している財の集合が R_s で，所持金が d である場合に，財 r_{t+1} に対して， z を入札することを意味する．また，現在の状態が $\langle R_s, d \rangle^t$ である場合に，戦略 π を実行して得られる期待効用を $V^\pi(\langle R_s, d \rangle^t)$ と記述する．初期状態でのエージェントの所持金の額を m とすると，戦略 π を実行した場合の期待効用は $V^\pi(\langle \emptyset, m \rangle^0)$ で与えられる．

最適戦略 π^* は以下のように定義される．ただし，ステージ n における状態 $\langle R_s, d \rangle^n$ では， $V(\langle R_s, d \rangle^n) = v(R_s) + f(d)$ とする．

$$\begin{aligned} Q(\langle R_s, d \rangle^t, z) &= F_{t+1}(z) \cdot V(\langle R_s \cup \{r_{t+1}\}, d - z \rangle^{t+1}) \\ &\quad + (1 - F_{t+1}(z)) \cdot V(\langle R_s, d \rangle^{t+1}) \\ V(\langle R_s, d \rangle^t) &= \max_{z \leq d} Q(\langle R_s, d \rangle^t, z) \\ \pi^*(\langle R_s, d \rangle^t) &= \operatorname{argmax}_{z \leq d} Q(\langle R_s, d \rangle^t, z) \end{aligned}$$

ここで， $Q(\langle R_s, d \rangle^t, z)$ は，ステージ t のある状態 $\langle R_s, d \rangle^t$ において z なる入札をした場合の期待効用を表す．また， $V(\langle R_s, d \rangle^t)$ は，状態 $\langle R_s, d \rangle^t$ において z なる入札をした場合の最大の期待効用，すなわち最適戦略から得られる期待効用を表す．この定式化では，状態遷移に伴う報酬／コストは0としている．値反復 [64] を実行することにより，最適戦略 π^* を求めることができる．つまり，ステージ $t+1$ における状態の期待効用に基つき，ステージ t における状態の最適戦略が計算され，その繰り返しにより，最終的に全ての状態の期待効用，および最適戦略が決定される．

図 3.1 に，以下の簡単な例題における最適戦略を示す．財は r_1 と r_2 の2個で，初期状態での所持金は4とし，財の集合に対する評価値は，両方の財を所有する場合にのみ4，その他の場合は0とする．また，各財に対する他のエージェントの最高入札額は，どちらの財に関しても，確率 $1/2$ で1，確率 $1/2$ で2とする．すなわち，0を入札すると勝つ確率は0，1を入札すると $1/2$ ，2以上を入札すると1である．また，最終状態での所持金 d の評価値は d そのものであるとする．

図 3.1 では，最適戦略を取った場合に遷移する可能性のある状態，およびその状態の評価値 V と戦略 π を示し，状態遷移を矢印で，遷移確率を矢印上の数値

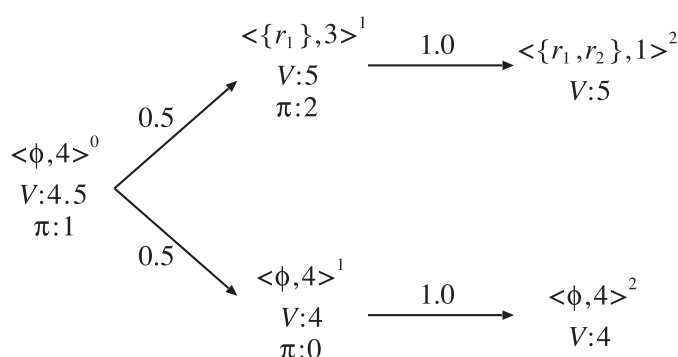


図 3.1 最適入札戦略の例 (Additive form)

で示している．この例における最適戦略では，財 r_1 に対して 1 を入札する．その結果，確率 $1/2$ で財 r_1 が得られ，確率 $1/2$ で財が得られない．もし財 r_1 が得られた場合は，財 r_2 には 2 を入札し，確実に両方の財を入手する．この場合の効用は $4 + 1 = 5$ となる．一方，財 r_1 が得られなかった場合は財 r_2 を得ても無駄であるから，財 r_2 には 0 を入札する．すなわち，オークションに参加しない．この結果得られる効用は，所持金の効用 4 に等しい．よって，この例における最適戦略の期待効用は $0.5 \times 5 + 0.5 \times 4 = 4.5$ となる．

本節で述べた，加法的な効用に基づく問題表現を用いた場合の，ステージ t における状態数を考える．まず，ステージ t までに落札した財による，可能な財の組合せの個数は 2^t であり，初期状態の所持金を正整数 m とすると，財を全く得ていない場合以外では，可能な所持金のバリエーションの数が $m + 1$ となる．従って，ステージ t における状態数は $(2^t - 1) \times (m + 1) + 1$ となり，さらに全ての状態数の合計は $O(m \times 2^n)$ となる．このため，初期状態での所持金が多額である場合，状態数は非常に大きくなる．状態数を減らす方法として，各状態で考慮する入札額の刻みを粗くする (e.g., \$100 単位) ことが考えられる．しかし，すべてのエージェントが同様な粗い刻みで入札することが保証されていない場合，粗い刻みで入札額を決定することにより，期待効用が減少する可能性が生じる．

3.4 準線形効用に基づく動的計画法

本節では，エージェントの効用が加法的な形式の一種である準線形 [52] で定義される場合に，状態中に所持金を表現する必要がなく，状態数を効用が加法的な形式の場合の $1/m$ に削減可能であることを示す．

3.4.1 基本的なアイデア

逐次型オークションのある時点においてエージェントが財の集合 R_s を得ており、財に対する支払額の合計を Z_{R_s} とすると、準線形の効用は以下の式で定義される。

$$v(R_s) - Z_{R_s}$$

すなわち、エージェントがオークションに参加した場合の効用は、得られた財の集合の評価値と支払額の合計の差分で与えられる。この準線形の効用という仮定は、オークション、およびメカニズムデザイン等のミクロ経済学の研究で頻繁に用いられているものである [52]。

効用が加法的な形式で与えられている場合、初期状態の所持金の効用 $f(m)$ を効用の基準値として定義し直すと、オークションに参加しない場合の効用は0となる。この時、エージェントが財の集合 R_s を所有しており、それらの財に対する支払額の合計が Z_{R_s} である場合の効用は、 $v(R_s) + f(m - Z_{R_s}) - f(m)$ となる。従って準線形の効用は、加法的な効用において、 $f(x) = x$ とおいた場合に等しくなる。エージェントがオークションで支払う金額が比較的少なく、オークション以外で得る財に対する影響が少ない場合（より正確には所得効果が無い場合 [52]）には、準線形の効用という仮定は妥当なものであると考えられる。

3.4.2 準線形効用に基づく入札戦略決定の詳細

準線形効用に基づく問題表現

準線形の効用を仮定した場合、問題の表現が簡単化できることを以下に示す。

エージェントの効用が加法的な形式である場合、ステージ t の状態は、所有している財の集合と所持金の組 $\langle R_s, d \rangle^t$ で表現されていた。一方、準線形の効用を仮定して、エージェントの入札する金額に上限を設けない場合（*e.g.*, 利子なしで借金をして支払うことが可能な場合）、2つの状態 $\langle R_s, d \rangle^t$ と $\langle R_s, d' \rangle^t$ では、それ以降の最適な戦略は全く同一である。すなわち、無料で R_s を得ていようとも、100万ドルを支払って R_s を得ていようとも、それ以降のオークションにおける最適な戦略は全く同一である。また、ステージ n の2つの状態、 $\langle R_s, d \rangle^n$ と $\langle R_s, d' \rangle^n$ の効用の差は、所持金 d と d' の差に等しい。以上の性質により、状態に所持金を含めず、かつ、支払額を状態遷移に伴うコストとして問題が定式化可能である。

従って、ステージ t の状態は、所有する財の集合 R_s のみを用いて、 $\langle R_s \rangle^t$ と記述できる。入札戦略 π は状態から入札額に対するマッピングであり、各状態に関

して $\pi(\langle R_s \rangle^t) = z$ は、財の集合 R_s を得ている場合に、財 r_{t+1} に対して z を入札することを意味する。以下、本章では、状態 $\langle R_s \rangle^t$ で戦略 π を実行した場合に得られる期待効用を $V^\pi(\langle R_s \rangle^t)$ と記述する。また、初期状態で戦略 π を実行した場合の期待効用は $V^\pi(\langle \emptyset \rangle^0)$ で与えられる。

準線形効用に基づく最適入札戦略

3.4.2 節で述べた問題表現に基づき、準線形効用を仮定した場合の最適入札戦略 π^* が以下のように定義できる。ただし、ステージ n における状態 $\langle R_s \rangle^n$ では、 $V(\langle R_s \rangle^n) = v(R_s)$ とする。

$$\begin{aligned} Q(\langle R_s \rangle^t, z) &= F_{t+1}(z) \cdot (V(\langle R_s \cup \{r_{t+1}\} \rangle^{t+1}) - z) \\ &\quad + (1 - F_{t+1}(z)) \cdot V(\langle R_s \rangle^{t+1}) \\ V(\langle R_s \rangle^t) &= \max_z Q(\langle R_s \rangle^t, z) \\ \pi^*(\langle R_s \rangle^t) &= \operatorname{argmax}_z Q(\langle R_s \rangle^t, z) \end{aligned}$$

ここで、 $Q(\langle R_s \rangle^t, z)$ は、ステージ t のある状態 $\langle R_s \rangle^t$ において z なる入札をした場合の期待効用を表す。また、 $V(\langle R_s \rangle^t)$ は、状態 $\langle R_s \rangle^t$ において z なる入札をした場合の最大の期待効用、すなわち最適戦略を用いて得られる期待効用を表す。効用が加法的な場合と同様、値反復を実行することにより、最適戦略 π^* を求めることができる。

上述の定義に基づいて最適な入札戦略を求める過程では、各状態で考慮すべき入札額 z の上限を、 $V(\langle R_s \cup \{r_{t+1}\} \rangle^{t+1})$ と $V(\langle R_s \rangle^{t+1})$ の差分で抑えられる。明らかに、この差分以上の金額を入札するよりは、0 を入札した方が期待効用は大きくなる。一方、文献 [12] で議論されているように、効用が加法的な形式である場合、各状態において考慮する入札額に上限を設ける適切な方法は存在しない。 $f(x) = x$ とおいた場合に、準線形効用を仮定せず、一般的な加法的な形式で効用を表現した場合、全ての財を得た場合の効用を入札額の上限とすることができる。しかしこの上限は、準線形の効用の場合に定まる上限よりも大きくなるため、考慮すべき入札額は明らかに多くなってしまう。

図 3.2 では、図 3.1 と同じ問題に関して、最適戦略を取った場合に遷移する可能性のある状態、およびその状態の評価値 V と戦略 π を示し、状態遷移を矢印で、遷移確率を矢印上の数値で示している。図に示されるように、最適戦略は図 3.1 と、図 3.2 のどちらの表現でも同じである。また各状態での V の値は、図 3.1 の表現において各状態での所持金の効用を基準とすれば、図 3.1 と、図 3.2 のどち

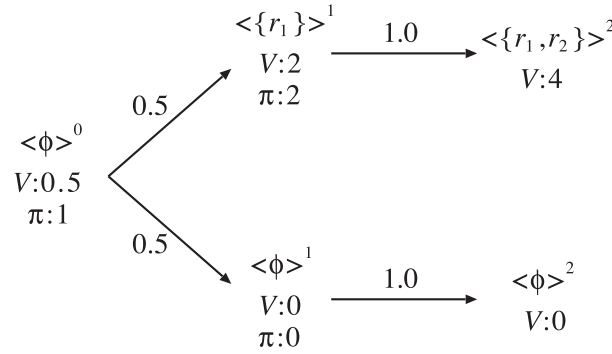


図 3.2 最適入札戦略の例 (Quasi-linear form)

らの表現でも同じ値となる．例えば，図 3.1 の初期状態では所持金は 4， V は 4.5 であるので，所持金 4 の効用を基準とすれば，最適戦略を取ることで効用は 0.5 増加することになる．この値は図 3.2 の表現における V の値と同じである．

効用が加法的な形式である場合，初期状態の所持金を正整数 m とすると，ある財の組合せを得ている状態に関して，可能な所持金のバリエーションの数が $m+1$ であるため，状態数の合計は $O(m \times 2^n)$ となる．一方，準線形効用を仮定した場合，所持金の額によって状態を区別する必要はない．そのため，ステージ t における状態数は，ステージ t までに落札した財による，可能な財の組合せの個数が 2^t であることから 2^t となり，全ての状態数の合計は， $O(2^n)$ となる．従って，準線形効用を仮定した場合の状態数は，効用が加法的な形式の場合の $1/m$ に削減される．

図 3.3 に状態数の例を示す．図 3.3 は，2 つの財 r_1 ，および r_2 に対して，初期状態の所持金が $m = 2$ である場合に生成される状態を表している．効用が加法的な形式の場合，図 3.3 (a) に示すように，所持金によって状態が区別される．従って，オークションの各過程において，所持金による状態のバリエーションを考える必要があり，状態数が増加する．一方，準線形効用を仮定した場合，図 3.3 (b) に示すように，オークションの過程において，所有する財によってのみ状態が区別され，所持金による状態数の増加が生じない．そのため，状態数の大幅な削減が実現されている．

3.4.3 準線形効用の導入手法の評価

本節では，提案した準線形効用の導入に基づく新しい問題表現の有効性を実験によって評価し，得られた結果に関する考察を行う．

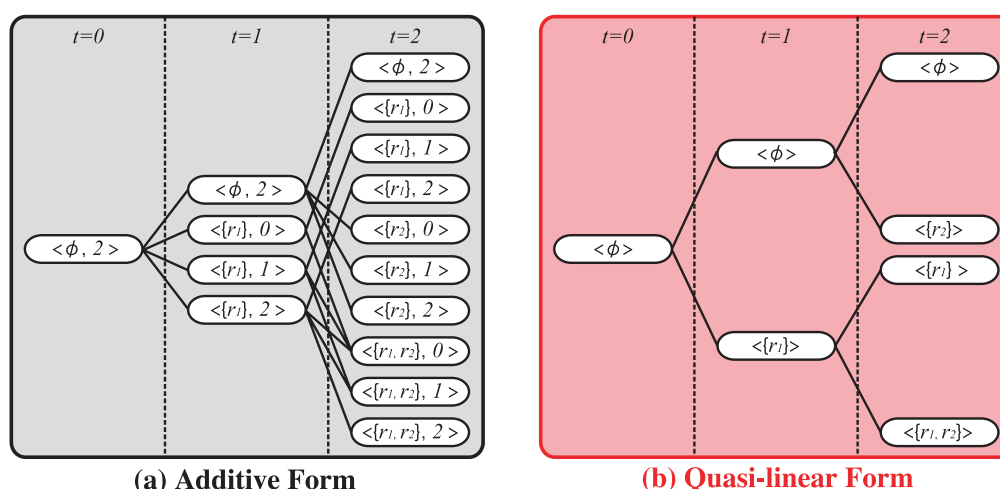


図 3.3 状態数の変化

本実験では、財の数は偶数で n 個あると仮定し、初期状態の所持金を m とする。エージェントは、奇数番号の財の集合である $\{r_1, r_3, \dots, r_{n-1}\}$ と偶数番号の財の集合である $\{r_2, r_4, \dots, r_n\}$ のどちらか一方を手に入れたいとし、それぞれの集合に対して $100 \times n/2$ の評価値を与えると仮定する。2つの集合は互いに代替的であり、どちらか一方の財の集合を得るだけでなく、余分に財を得たとしても、効用は増加しないとする。また、各集合内での財は互いに補完的であり、1つでも得られない財があれば効用は0になるとする。さらに本実験では、各財の他のエージェントの最高入札額は、 $[0, 100]$ で一様に分布していると仮定する。

図 3.4 は、効用が加法的な形式の場合の問題表現と、本論文で提案した問題表現のそれぞれについて、財の個数 n を変化させた場合に入札戦略が決定されるまでの処理時間を示している。図の横軸は財の数、縦軸は処理時間を表す。図 3.4 では、効用が加法的な形式である場合に関して、初期状態の所持金が 500, 1000, および 1500 の場合の 3 通りのグラフを示している。本実験は、ワークステーション (170MHz Sun TurboSparc) 上で行い、プログラミング言語には Java を使用した。

本論文で提案した手法では、動的計画法における状態数の合計が、効用が加法的な形式の場合の $1/m$ に削減されることから、 m 倍程度の処理時間の高速化が予想できた。しかし実験の結果では、 m 倍以上の処理時間の高速化が得られている。提案手法では、状態数の削減だけでなく、各状態における入札額の上限が $V(\langle R_s \cup \{r_{t+1}\} \rangle^{t+1})$ と $V(\langle R_s \rangle^{t+1})$ の差分で抑えられる。そのため、各状態で考慮すべき入札数が削減され、予想以上の処理時間の高速化が得られることが、実験結果から分かる。

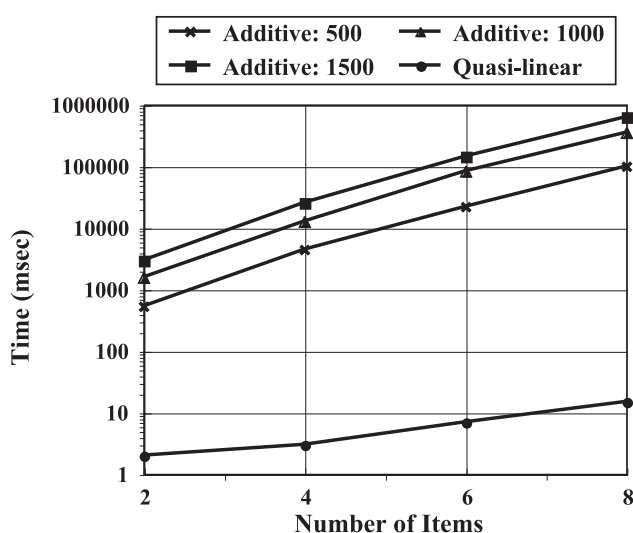


図 3.4 処理時間の比較

3.5 予算制約の導入

3.5.1 基本的なアイデア

本章ではこれまでに、エージェントの効用が準線形と呼ばれる形式であることを仮定した場合、財に対する支払額を状態遷移に伴うコストとして表現することが可能となることから、状態数を効用が加法的な形式の場合の $1/m$ に削減し、動的計画法を用いて最適戦略が得られることを示した。逐次型オークションを扱う上で、準線形な効用という仮定は十分に一般的なものである。しかしながら、加法的な形式では表現できるが、準線形の形式では表現できない実用上重要な場合として、予算制約が存在する場合がある。予算制約が存在するとは、エージェントがオークションで支払える金額の上限が決まっていることを意味する。効用が加法的な形式である場合、状態中に所持金の額を表現し、かつ支払額が所持金の額を越えないようにすることにより、予算制約の範囲内での最適戦略を得ることができる。一方、準線形の形式では、予算制約が十分大きければ問題は生じないが、予算制約が厳しい場合には、得られた戦略が予算制約の元で実行不可能となる可能性がある。つまり、3.4 節で提案した手法では、入札戦略を決定する過程で所持金が考慮されないため、得られた入札戦略に、合計の支払額が初期状態の所持金以上になるケースが含まれる可能性がある。例えば、図 3.2 の例において、初期状態の所持金を 2 と仮定した場合、財 r_1 のみを落札したケースでは入札額の合計は 1 となり、問題は生じないが、財の組合せ $\{r_1, r_2\}$ を得るケースでは合

計の入札額が3となるため，初期状態の所持金を越えてしまう．従ってこの場合，図3.2の最適戦略は明らかに実行不可能となる．

そこでさらに，準線形の効用を仮定した場合の戦略（予算制約なしの場合の最適戦略） π^* を変形することにより，予算制約の下で実行可能な準最適な戦略 π' を高速に得る手法を示す．具体的には， π^* で決定された入札額を基準とし，各状態において予算制約を満足するように可能な入札額の上限を設定する．この上限内で最適な入札戦略を動的計画法を用いて決定する*．

3.5.2 予算制約の導入手法の詳細

入札戦略の決定手順

予算制約を満たす準最適な入札戦略を得るための手法は，以下の2つの手順から成る．

（手順1）3.4節で述べた，準線形効用を仮定した動的計画法に基づく処理により，予算制約を考慮しない場合の最適入札戦略 π^* を決定する．

（手順2）手順1で得られた入札戦略 π^* の各状態に関して，ステージ $n-1$ から順に動的計画法に基づく処理を行う．ただし，動的計画法の過程では，予算制約を満たすために，各状態における入札額の上限を計算し，得られた上限の範囲内で入札額を決定する．

提案する手法では，準最適な入札戦略を得るために，動的計画法を2回適用することになる．3.4.3節で示したように，予算制約を考慮しない場合は，効用が加法的な形式の場合と比較して， m 倍以上の処理時間の高速化が可能であった．このため，本手法を用いた場合の処理時間は，効用が加法的な形式の場合と比較して， $m/2$ 倍以上高速であることが予想できる．

上限の計算

ステージ t の状態 $\langle R_s \rangle^t$ において，戦略 π^* において初期状態 $\langle \emptyset \rangle^0$ からこの状態に到達するまでに支払った金額の合計を Z_{former} ，戦略 π^* での最適な入札額を z_{opt} とする．また，状態 $\langle R_s \rangle^t$ で落札に成功した結果の状態 $\langle R_s \cup \{r_{t+1}\} \rangle^{t+1}$ 以降

この上限を適切に設定することが可能であれば，得られた戦略は予算制約の下での最適戦略となるが，本論文で提案する手法では，入札額の上限は π^ を基準にしたヒューリスティックな方法で決められるため，得られた戦略の最適性は保証できない．

における支払額の合計の最高額を Z_{latter} とする．ここで， Z_{latter} はすでに修正された入札額で計算されていることに注意する必要がある．また予算の上限を Z_{bud} とする．

状態 $\langle R_s \rangle^t$ における入札額の上限 z_{max} を以下の式で決定できる．

$$z_{max} = z_{opt} \times (Z_{bud} - Z_{latter}) / (Z_{former} + z_{opt})$$

ステージ $t + 1$ 以降の状態ではすでに入札額の調整を終えているため，すべてのケースにおいて予算制約を満たすために，支払額の合計が最も高いケースを想定する．従って，初期状態 $\langle \emptyset \rangle^0$ から状態 $\langle R_s \cup \{r_{t+1}\} \rangle^{t+1}$ までに支払う金額の合計を $Z_{bud} - Z_{latter}$ 以下とする．この金額を，初期状態 $\langle \emptyset \rangle^0$ から状態 $\langle R_s \rangle^t$ までの $t + 1$ 個の状態でどう分配するかが問題となるが，ここでは， π^* で決定された入札額を基準として各状態に比例配分することにより，上限を設定している．本論文で提案する準最適戦略の決定手法では，この z_{max} 以下の入札額に関して $Q(\langle R_s \rangle^t, z)$ を計算し，最適な入札額を決定して， $V(\langle R_s \rangle^t)$ を更新する．

3.5.3 予算制約の導入手法の評価

本節で提案した，予算制約の下で準最適な戦略を得る手法の有効性を実験的に評価する．

本実験では，本節の提案手法 (Prorated)，効用が加法的な場合の手法 (Additive)，最適入札戦略 π^* を利用したトリビアルな手法 (Trivial)，および入札額の上限を所持金を等分割して与える手法 (Uniform) によって得られる期待効用を比較している．ここで，トリビアルな手法では，入札戦略 π^* で決定されている入札額の支払いが可能な間は，その金額で入札を行う．もし残りの金額が戦略 π^* で定められた額よりも少ない場合，エージェントは，単純に残っている全ての金額を入札額として決定する．残りの金額が0になった時は，エージェントは以後のオークションへの参加を中止する．また，所持金を等分割する手法では，最適戦略 π^* を修正して戦略 π'' を得るが，その過程において，各財に対する入札額の上限を，単純に，ある状態での所持金を残りの財の数で等分割した金額で与える．

ここで， r_1, r_2 および r_3 の3つの財があり，エージェントの予算制約が150で，各財に対する他のエージェントの最高入札額が $[0, 100]$ で一様に分布しており，かつ全ての財を落札した時にのみ効用が得られる場合の入札を例として，各々の手法に基づく入札について説明する．まず，効用が加法的な場合の手法では，各ステージにおいて発生し得る財の組合せと所持金から成る全ての状態を列挙した上で，予算制約の範囲内での最適戦略が決定できる．一方，すでに述べた通り，

3.4 節で提案した手法から得られる最適戦略 π^* では、財の評価値次第で、合計の入札額が 150 を越えてしまう可能性がある．例えば、 $v(\{r_1, r_2, r_3\}) = 300$ であり、それ以外の財の組み合わせに対する評価値が 0 である場合、 $\pi^*(\langle \emptyset \rangle^0) = 50$ 、 $\pi^*(\langle \{r_1\} \rangle^1) = 100$ 、および $\pi^*(\langle \{r_1, r_2\} \rangle^2) = 100$ となり、合計の入札額は 250 となる．トリビアルな手法では、入札戦略 π^* に従って単純に入札を行うため、財 r_2 のオークションが終了した時点で所持金が 0 となる．その結果、財 r_3 に対する入札額は 0 となり、明らかに期待効用が減少する．従って、トリビアルな手法では、戦略の修正処理が必要とされない反面、多くの場合で低い効用しか得られないと考えられる．次に、3.5.2 節で提案した手法では、最適戦略 π^* に基づき、財の落札状況に関する全てのケースにおいて、合計の入札額が予算制約の範囲内となるように戦略が修正される．本例においては、まず、 $\pi'(\langle \{r_1, r_2\} \rangle^2) = 60$ となり、さらに $\pi'(\langle \{r_1\} \rangle^1) = 60$ となる．ここで、合計の入札額が予算制約を越えないための財 r_1 に対する入札額の上限は 30 となるが、ここまでの戦略の修正により、状態 $\langle \{r_1\} \rangle^1$ の期待効用が減少していることから、 $\pi'(\langle \emptyset \rangle^0) = 25$ となる．提案手法では、最適入札戦略 π^* における入札額に応じて戦略が修正されるため、期待効用の減少を低く抑えることができると考えられる．また、所持金を等分割する手法では、まず、財 r_1 のオークションにおける入札額の上限が $150/3 = 50$ となるが、 $\pi^*(\langle \emptyset \rangle^0) = 50$ であるため、戦略は変わらず $\pi''(\langle \emptyset \rangle^0) = 50$ となる．しかし、財 r_2 のオークションでは、 $\pi^*(\langle \{r_1\} \rangle^1) = 100$ であるが、上限が $100/2 = 50$ となるため、 $\pi''(\langle \{r_1\} \rangle^1) = 50$ となり、同様に、 $\pi''(\langle \{r_1, r_2\} \rangle^2) = 50$ となる．結果的に、戦略 π^* において高い金額で入札されていた財 r_2 、および r_3 の入札額が大幅に低くなってしまう．所持金を等分割する手法では、提案手法のように戦略 π^* に基づいて入札額の上限を設定せず、財に対する評価値が戦略の修正に反映されないため、最適戦略に近似な期待効用を得ることは困難であると考えられる．

実験は、以下の 2 つの問題設定の下で行った．

- 【設定 1】 財の個数は $n = 9$ とする．エージェントは、財の集合 $\{r_1, r_2, r_3\}$ 、 $\{r_4, r_5, r_6\}$ 、および $\{r_7, r_8, r_9\}$ のどれか 1 つを手に入れたとし、それぞれの集合に対して 300 の評価値を与えると仮定する．また、これらの集合は互いに代替的であり、いずれかの財の集合に加えて余分に財を得たとしても、効用は増加しないとする．また、各集合内での財は互いに補完的であり、1 つでも得られない財があれば効用は 0 になるとする．さらに、各財の他のエージェントの最高入札額は、 $[0, 100]$ で一様に分布しているとする．
- 図 3.5 では、予算制約が無い場合の最適戦略における最高支払額が 251 である場合に、予算を 10 から 260 まで変化させ、上述の 4 通りの手法から得ら

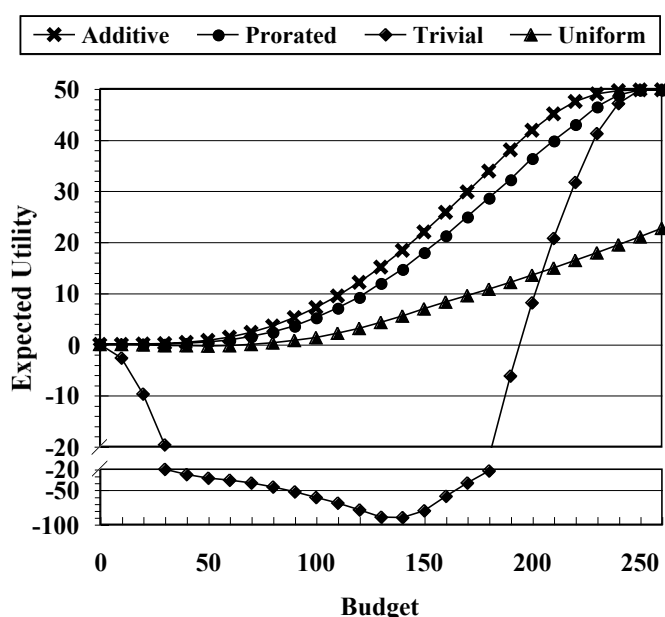


図 3.5 期待効用の比較（設定 1）

れる期待効用を示している．図の横軸は予算，縦軸は期待効用を表す．実験の結果から，提案した手法では最適戦略から得られる期待効用に非常に近い期待効用が得られることが分かる．その一方で，トリビアルな手法から得られる期待効用は，ほとんど負の値となっている．これはエージェントが，補完性を持つ財の集合の一部のみしか所有できないことが多いためである．所持金を等分割する手法では，トリビアルな手法のように極端な期待効用の減少は見られないが，最適戦略から得られる期待効用と比較すると，非常に低い期待効用しか得られていない．さらに，予算が多くなるにつれて，得られる期待効用はトリビアルな手法よりも低くなり，十分な予算がある場合でも最高の期待効用が得られない．これは，財の評価値が入札戦略の修正に反映されないため，入札額の上限を適切に設定できていないためである．特に，より早い時点で行われるオークションにおいて，入札額の上限が低く抑えられてしまうため，最適な戦略を取ることが困難となる．

【設定 2】 財の個数は $n = 9$ とする．エージェントは財の集合 $\{r_1, r_2\}$, $\{r_3, r_4, r_5\}$, および $\{r_6, r_7, r_8, r_9\}$ に対して，それぞれ 200, 300, および 400 の評価値を与えると仮定する．設定 1 と同様，これらの集合は互いに代替的であると

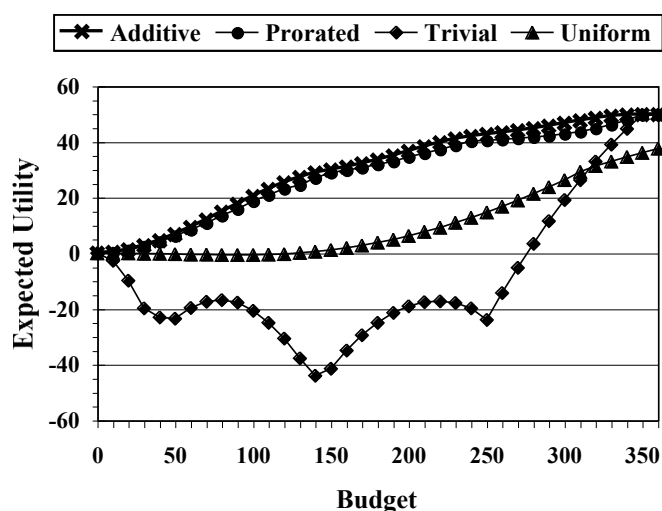


図 3.6 期待効用の比較（設定 2）

し、複数の財の集合を同時に得た場合は、より高い評価値をその集合の評価値として与える。すなわち、財の集合 $\{r_1, r_2, r_3, r_4, r_5\}$ を得た場合の評価値は 300 となる。また、各集合内での財は互いに補完的であるとする。各財の他のエージェントの最高入札額は、 $[0, 100]$ で一様に分布しているとする。

図 3.6 では、予算制約が無い場合の最適戦略における最高入札額が 351 である場合に、予算を 10 から 360 まで変化させた時の期待効用を示している。設定 1 の時と同様、トリビアルな手法から得られる期待効用は、ほとんど負の値になっている。その上、予算が 250 を越えるまでは、より評価値の高い財を得ようと試みた結果、補完性を持つ財の集合の一部のみしか所有できず、より状況を悪化させてしまっているケースが見られる。また、所持金を等分割する手法でも、図 3.5 と同様に、トリビアルな手法を用いた場合ほどの期待効用の減少は見られないが、やはり低い期待効用しか得ることができない。一方、提案手法では、依然として最適戦略から得られる期待効用に非常に近い期待効用が常に得られていることが分かる。

さらに、設定 1 の下での処理時間の比較を図 3.7 に示す。図の横軸は予算、縦軸は処理時間を表す。トリビアルな手法では、必要とする処理時間は一定である。提案手法では（手順 1）における動的計画法に基づく処理の際に必要な処理時間は、トリビアルな手法と等しい（手順 2）における動的計画法の適用の際に必要な処理時間は、予算によって変化はするものの、処理時間の増加はわず

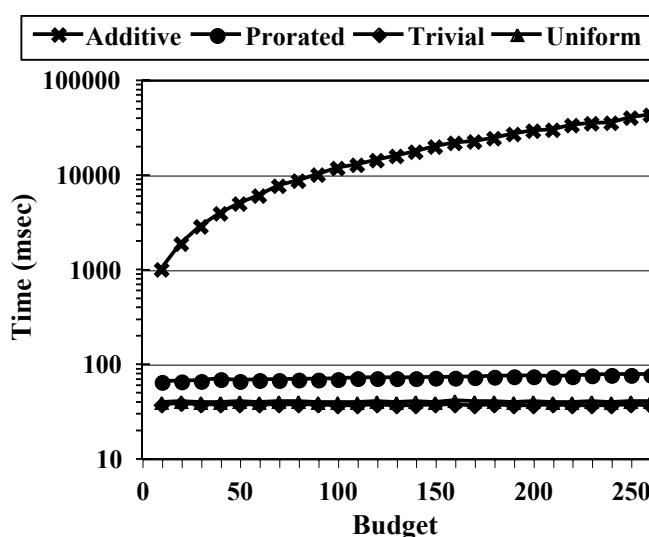


図 3.7 処理時間の比較

かである．また，所持金を等分割する手法では所持金の分割処理が必要となるが，必要とする時間はわずかであるため，トリビアルな手法とほぼ等しい処理時間となる．一方，効用が加法的な場合の手法では，予算の2乗に対してほぼ線形に処理時間が増加していることが分かる．

以上の実験から，本論文で提案した手法を用いることにより，最適戦略から得られる期待効用に非常に近い期待効用が得られる準最適な入札戦略が，高速に計算できることが示された．しかしながら，本実験による評価だけでは，提案した手法の有効性の証明にはまだ十分ではなく，様々な問題設定の下でさらに検証を行う必要がある．特に，本実験では，他のエージェントの最高入札額の分布を一様分布としたため，入札額の増減に対して落札確率が変化する度合いが小さくなっていた．このため，単純に予算を比例配分する提案方法により，比較的良い結果を得ることができた．入札額の変化に対して落札確率が急激に変化するように設定を変更した場合，入札額の変化の結果生じる影響も考慮しなければならない．この場合は，入札額の上限を決定するための，より複雑な手法が必要になると考えられる．

3.6 議論

本章では，主要な貢献として，動的計画法に基づいた最適入札戦略の決定における処理時間の高速化について述べた．3.4.2 節で述べた通り，本章で提案した手

法では、初期状態での所持金の額 m を基準として高速化の効果が現れる．そのため、3.4.3 節では異なる所持金の下で実験を行い、提案手法の有効性を検証した．ここでの実験の設定によれば、効用が加法的な場合に関して、全てのオークションでの支払額の合計が、全ての財を得た時の評価値以上になる場合が考慮される．一見すると、最も高い評価値以上の支払いは無意味に見える．しかし、最も高い評価値以上の合計支払額の計算を必要とする場合は、以下に示す通り十分に考えられる．

3つの財 r_1, r_2 , および r_3 があるとし、この順番でオークションが行われるとする．財の組合せ $\{r_1, r_2\}$ と $\{r_1, r_3\}$ の評価値は100であり、これらの財の集合は互いに代替的であるとする．すなわち、全ての財を手に入れたとしても、評価値は100であるとする．また、個々の集合内の財は互いに補完的であり、個々の財を単独で得た場合の評価値は0であるとする．さらに、財の落札に関して以下を仮定する．

- 財 r_1 は、入札額を40とした場合に確実に落札でき、それ以下の入札額では落札できない[†]
- 財 r_2 は、入札額を40とした場合に99%の確率で落札でき、それ以下の入札額では落札できない．また、入札額を40以上としても落札確率は増加しない．つまり、入札額を増加しても確実に財を落札できることが保証されない
- 財 r_3 は、入札額を90とした場合に確実に落札でき、それ以下の入札額では落札できない

以上の設定の下で、エージェントの最適な入札戦略を考察する．まず、 $\pi(\langle \emptyset \rangle^0) = 40$ は明らかである．なぜなら、少なくとも財 r_1 を手に入れなければ期待効用を増加できないからである．次に、財の落札に関する仮定より $\pi(\langle \{r_1\} \rangle^1) = 40$ が言える．ただし、稀な場合として、財 r_2 の落札に失敗する場合がある．もし、財 r_2 の落札に失敗してそれ以上入札をしない場合、エージェントの効用は財 r_1 に支払った入札額40の分だけ減少してしまう．そこで次に、財 r_3 への入札を考えると、財の落札に関する仮定から明らかに $\pi(\langle \{r_1\} \rangle^2) = 90$ となる．この時、支払額の合計は130となり、エージェントが得られる最も高い評価値100よりも大き

[†] 実世界におけるオークションでは、確実な財の落札を保証することは困難であるが、インターネットオークションでは、売り手があらかじめ設定した価格で入札することにより、確実な財の落札が保証できる．例えば、Yahoo!Auctions では、売り手が設定した希望落札価格以上で入札が行われると即座にオークションが終了し、入札者は確実に財が手に入ることが保証される．

くなるが、効用の減少分は 30 に抑えることができる。すなわち、最も高い評価値以上の金額を支払うことがエージェントにとって最適な戦略となる。従って、最適な入札戦略を求める過程では、支払額の合計が最も高い評価値以上になる場合も考慮すべきであることが考察によって明らかになった。

3.7 結言

本章では、逐次型オークションにおいて、エージェントが最適な戦略を動的計画法を用いて決定する手法を示した。従来の手法では、エージェントの効用が一般的な加法的な形式であることを仮定している。そのために、オークションの途中での所持金の額を、動的計画法で考慮する状態中に表現する必要があり、動的計画法における状態数が増加する一因となっていた。そのため、大規模な問題に対しては、計算量の点で適用が困難であった。

本章では、エージェントの効用が、加法的な形式の一種である準線形と呼ばれる形式であることを仮定した。この仮定により、動的計画法における状態数を抑え、最適な入札戦略が高速に得られることを示した。ただし、効用を準線形の形式で表現した場合、予算制約の表現ができない。本章では、予算制約がない場合を仮定して得られた戦略を修正して、予算制約が存在する場合の準最適戦略を得る方法を提案し、実験的評価によってその有効性を示した。

第 4 章

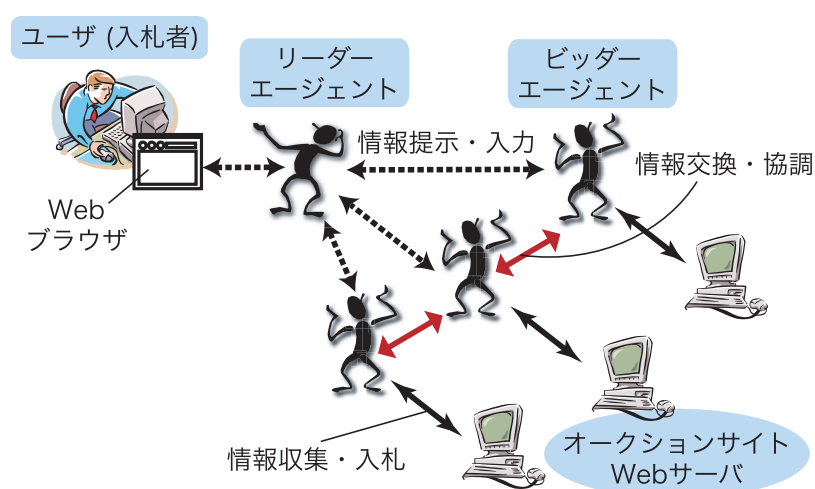
論理型言語に基づく インターネットオークション 入札支援システムの実装技法

4.1 序言

本章では，実在のインターネットオークションを対象とした，マルチエージェントに基づく入札支援システムの実装技法について論じる．

第 3 章では，エージェントが適切な入札戦略を決定するための手法について論じた．オークションは利得に直結する活動であるから，入札戦略の決定に関しては，第 3 章のような理論的アプローチが欠かせない．しかし，インターネットオークションは現実には運営されているサービスであるから，具体的な支援を実現するための，実践的なアプローチによる研究は不可欠である．

これまでの研究において，いくつかの入札システムが提案 / 構築されている [76, 93]．しかし，既存のシステムは，仮想的な入札環境を提供するものであり，実在のオークションサイトへの入札を支援するものではない．一方，本章においてその具体的な実装技法を示す *BiddingBot* [101] は，実在のオークションサイトを対象とした，実際的な入札支援が可能である．本システムは，各オークションに特化した複数のエージェントから成るマルチエージェントシステムである．ここでは，ユーザ，オークションサイト，および複数エージェント間で，適切に情報を処理する機能をエージェントに実装する必要がある．本章では，論理型言語の機能を内包するエージェント記述言語 *MiLog* [26] に基づいた，各機能の実装の詳細について述べる．

図 4.1 *BiddingBot* の概要

本章の構成を以下に示す．4.2 節では，インターネットオークション入札支援システム *BiddingBot* に関する概要を述べる．4.3 節では，入札支援システムの構築において，最も重要かつ実装が煩雑な機能である，情報収集／入札機能の実装技法について述べる．4.4 節では，入札の過程において，エージェント間で種々の情報を交換するための，エージェント間通信機能の実装技法について述べる．4.5 節では，エージェントからの情報提示に関して，Web ブラウザをインタフェースとして入札情報の提示を行うための，情報表示機能の実装技法について述べる．4.6 節では，本章で述べる実装技法に関して，システムの実行例も交えて議論する．

4.2 インターネットオークション入札支援システム *BiddingBot* の概要

BiddingBot は，同一の財を出品している複数のオークションが存在する場合において，効用の高い入札を実現するための，マルチエージェントに基づく入札支援システムである．図 4.1 に示すように，*BiddingBot* では，1 つのリーダーエージェントと，各オークションに 1 つずつ割り当てられた複数のビッダーエージェントからシステムが構成されている．エージェントは，実在のオークションサイトからの情報収集，および収集した情報に基づく入札戦略の決定を自律的に行い，さらに Web ブラウザを介したユーザへの情報の提示を行うことで，一連の入札活動を支援する．ここでは，複数のビッダーエージェントが，リーダーエージェン

トの仲介を経て相互に情報交換しながら協調的に動作し、最も期待効用の高い入札を自律的に行うことで支援を実現している。

実在のオークションサイトに対して利用可能で、実用性の高いシステムを実現するためには、(i) オークションサイトからの情報収集機能（入力）、(ii) 入札処理のためのソフトウェア間の通信機能（実処理）、および (iii) 情報表示機能（出力）の実装が必須であると考えられる。(i) では、情報を表す文字列と HTML タグが混在するテキストから情報の抽出を行う。ここでは、サイトごとの情報の記述形式の違いや、不定期に行われる記述形式の変更に対する柔軟な対応が必要となる。(ii) では、任意の入札手法を実行するために、複数のエージェント間でデータ交換のための通信を行う。一般に、通信時における通信主体の制御処理の記述は困難であるため、より簡便化された通信処理の記述手法が求められる。(iii) では、ユーザへのオークション情報の提示を行う。オークション情報の閲覧は頻繁に行われることから、様々な計算機環境に対応した情報の提示方式が求められる。また、ユーザにとって、情報の表示形式の変更が容易であることが望ましい。

本研究では、論理型言語の機能を内包するエージェント記述言語 *MiLog* [26] に基づく実装により、これらの機能を効率的に実現した。具体的には、まず、論理型言語の基本操作である単一化に基づく情報収集機能を実現した。ここでは、情報抽出のためのコード記述を簡明化し、様々な情報の記述形式への柔軟な対応を可能にしている。エージェント間の通信機能については、*MiLog* の組み込み述語を利用し、煩雑な通信処理を必要としない、柔軟な通信機能の実現を可能にしている。さらに、情報表示機能の実現に関連して、エージェントを Web サーバとして機能させることにより、HTML に基づく情報提示を可能にしている。

MiLog は Java を用いて実装された Prolog 言語処理系であり、インターネット上で商取引を行うエージェントの作成を主眼において設計されている。*MiLog* は、制御言語に論理型言語を採用することで、パターンマッチング等のテキスト処理、および探索処理を実現すると共に、インターネット上での通信を最大限に利用するための Web 処理機能（Web サーバ/クライアント機能）と複雑なエージェント間通信を容易化する機能を併せ持つ。また、データベースを共有する複製（クローン）を生成することで、効率的なマルチタスク処理が可能である。

以下、本章では、表 4.1 に示す *MiLog* の組み込み述語に基づいた、各々の処理を実現するためのエージェント機能の実装について示す。

組み込み述語	機能の概要
【HTTP の処理】 getURLText(+Url,+Method,+List,-Html) getURLBin(+Url,+Method,+List,-Bin)	List を引数とし, Url にコマンド Method を送信し, HTML テキストを得る List を引数とし, Url にコマンド Method を送信し, バイナリデータを得る
【HTML の解析】 parseHTML(+Html,-Parsed) extract(+Pattern,+List)	テキスト Html を解析し, 文字列を要素とするリスト Parsed を得る リスト List から特定のパターン Pattern と一致する部分を取り出す
【エージェント間通信】 query(+Agent,+Query) request(+Agent,+Query) interruptAndQuery(+Agent,+Query) interruptAndRequest(+Agent,+Query) queryC(+Agent,+Query) requestC(+Agent,+Query)	エージェント Agent に対する Query の評価を同期遠隔手続き呼び出しによって行う エージェント Agent に対する Query の評価を非同期遠隔手続き呼び出しによって行う エージェント Agent の処理への割り込み後, query を実行 エージェント Agent の処理への割り込み後, request を実行 エージェント Agent にクローンを生成させ, query を実行させる エージェント Agent にクローンを生成させ, request を実行させる
【Web サービス】 doService(+ID,-Html)	HTTP 経由のサーバリクエストに対する処理を行い, HTML テキスト Html を出力

+付きのパラメータは, 事前に値の束縛が必要であることを表し, -付きのパラメータは述語の評価後に値が束縛されることを表す

表 4.1 *MiLog* の代表的な組み込み述語

4.3 情報収集 / 入札機能の実装技法

オークションサイトからの情報収集, および入札のためには, まず, オークションサービスを提供している Web サーバにアクセスし, その結果出力される HTML テキストを解析して, 必要な情報 (e.g., 財の情報, 入札結果) の抽出を行わねばならない. 具体的な情報収集の手順は2つのステップに分けられる: (1) 財の情報を表示する Web ページにアクセスし, HTML テキストをダウンロードする. (2) テキストを解析し, 必要な情報を抽出する.

4.3.1 Web サーバへのアクセス

Web サーバへのアクセスは, 4 引数の述語 `getURLText` を用いて実装される. 具体的な記述形式は以下の通りである.

$$\text{getURLText}(\text{Url}, \text{Method}, [[p_1, v_1], \dots, [p_n, v_n]], \text{Html})$$

第1引数の変数 `Url`*で Web ページの URL を指定し, 第2引数の変数 `Method` で GET と POST のいずれかのメソッドを指定する. また, 第3引数は, CGI プログラムに対するパラメータ名 p_i と, その値 v_i のペアから成るリストである. 出力された HTML テキストは第4引数の変数 `Html` に束縛される. 例えば, Yahoo!Auctions において, “palm” をキーワードとして財の検索を行う場合, 検索用の CGI プログラムには, パラメータとして `p=palm&aucclat=20000&allocate=Ous&acc=us` が与えられるが, この場合, 以下の記述により, 検索結果を表示する HTML テキストがダウンロードされる.

$$\text{getURLText}('http://search.auctions.shopping.yahoo.com/search/auc', \\ \text{GET}, [[p, palm], [aucclat, 20000], [allocate, 'Ous'], [acc, us]], \text{Html})$$

現在のオークションサイトでは, 情報の表示処理だけでなく, 入札の受け付け処理にも CGI が利用されている. ここでは, 入札者のアカウントや入札額がパラメータとして送信される. そのため, 入札額等の情報のアップロードが必要である入札機能も, HTML テキストを得る場合と同様の方法で実装可能である. この場合, ダウンロードされる HTML テキストは, 入札結果 (例えば, 現時点での最高入札額として受理されたか) を示すものとなる.

*通常の Prolog 言語と同様, *MiLog* においても大文字で始まる文字列は変数を表す.

4.3.2 テキストの解析と情報抽出

HTMLテキストの解析は、2引数の述語 `parseHTML` で行うことができる。 `parseHTML` による解析では、テキストをタグと文字列に分解してリストを生成する。さらに、A タグや IMG タグのような属性を持つタグが存在する場合には、タグ要素に関して解析を行い、タグの属性の情報を、属性名と属性値から成るリストに変換する。例えば、`<HTML><BODY></BODY></HTML>` の解析結果は `[[html],[body],[a,[href,'item.html']],[/body],[/html]]` となる。

情報の抽出は、2引数の述語 `extract` を用いて行われる。 `extract` による処理では、第1引数に束縛された情報抽出パターンと、第2引数に束縛された解析結果のリストの単一化を行い、必要な情報を変数に束縛することで抽出する。本研究における情報抽出パターンとは、情報収集の対象である HTML テキストの記述形式や HTML テキスト中に含まれる情報の意味内容を記したものである。しかしここでは、単純に「HTML テキストの解析によって得られるリストと同一の構造を持ち、抽出すべき要素の位置を変数で明示したリスト」を情報抽出パターンと呼ぶ。例えば、以下の記述では、変数 `Url` に“`http://www.ebay.com`” が束縛されることで、URL の抽出が行われる。

```
extract ([[a,[href,Url]]],[a,[href,'http://www.ebay.com']])
```

単一化の処理自体は、*MiLog* が内包する論理型言語の機能を利用できるため、単一化処理を実際に記述する必要はない。

4.3.3 HTML テキストからの情報抽出パターン作成手法

4.3.2 節で述べた情報抽出パターンを用意するためには、通常、HTML テキストの記述形式を解析し、抽出すべき情報の位置や、その意味内容といった情報を明らかにする作業が必要となり、非常に多くの時間と労力を要する。本節では、情報抽出パターンの作成にかかる負担を軽減するための、情報抽出パターン作成手法を提案する。本手法により、HTML テキストの記述形式を直接解析することなく、半自動的に情報抽出パターンを作成できる。

一般に、オークションサイトでは財に関する情報をデータベースに格納して管理している。ユーザからアクセスを受けた時、データベースに格納された情報が整形され、HTML テキストとして情報が提示される。この時、HTML テキストの生成は、サイトごとの規則に従い、CGI プログラムなどにより自動的に行われる。そのため、同一のオークションサイトが提供している、異なる財の詳細情報を提

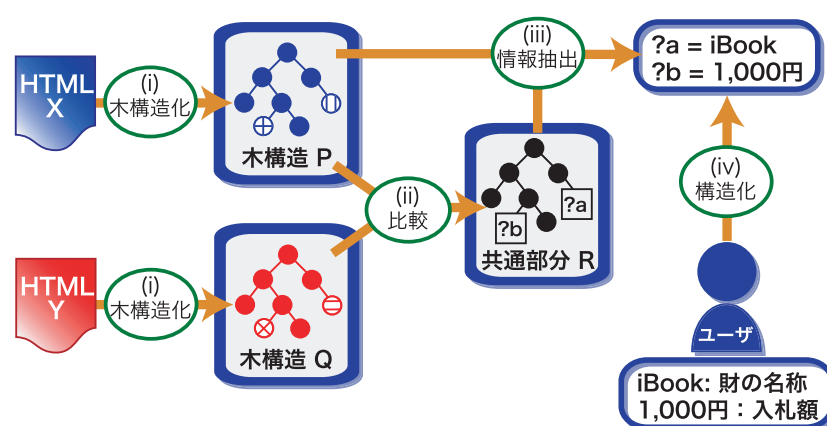


図 4.2 情報抽出パターン作成プロセス

示しているページを比較すると，HTML テキストの記述形式に共通部分を見い出すことができる．HTML テキストの整形に関する規則を見出すことができれば，データベースに格納されている情報のみを抽出するパターンとして利用することが可能となる．以上の考察に基づき，オークションサイトが提供する HTML テキストから情報の提示規則を規定する部分を取り出し，情報抽出パターンとして利用する手法を以下に示す．

情報抽出パターンの作成プロセスの概略を図 4.2 に示す．本プロセスでは，次の (i) から (iv) に示す 4 つのステップを経て情報抽出パターンを作成する．

- (i) 情報収集の対象であるオークションサイトから，情報の記述形式が同一の HTML テキストを取得し，木構造に変換する．

本ステップでは，まず，テキストを HTML タグとタグ以外の文字列ごとに区切り，それぞれをノードとみなす．そして，HTML タグの包含関係に注目し，各ノードについて，自身を囲むタグに対応するノードを親ノードとし，自身が囲む要素に対応するノードを子ノードとする．実際のプログラム中では，木構造は論理型言語におけるリスト構造を用いて表現する．例えば，`<HTML><HEAD><TITLE>財の名称</TITLE></HEAD><BODY>iBook</BODY></HTML>` という HTML テキストは，`[[[html],[[head],[[title], '財の名称']], [[body], 'iBook']]]` というリスト構造に変換される．なお，HTML タグについては，先頭要素としてタグの名前，2 番目以降の要素として属性名と属性値の対から成るリストを持つリスト構造として表現する．以下，ある財に関する HTML テキスト X と，異なる財に関する HTML テキスト Y を，それぞれ木構造 P と Q に変換したものと説明を行う．

- (ii) テキストから変換した木構造を比較して，HTML テキストの記述形式を規定する共通部分を取り出す．

P と Q を比較し，共通部分 R を抽出する．具体的には， P と Q をそれぞれルートノードから行きがけ順になぞり， i 番目の要素 p_i と q_i を比較し，比較結果から共通部分 R の i 番目の要素 r_i を決定する． $p_i = q_i$ ならば $r_i = p_i$ とし，そうでなければ $r_i = \$DIFF$ とする．以上の処理を P 中の全ての要素に施し，共通部分 R を得る．例えば， $[[[html],[[head],[[title], '財の名称']], [[body], 'iBook']]]$ と $[[[html],[[head],[[title], '財の名称']], [[body], 'VAIO']]]$ を比較すると， $[[[html],[[head],[[title], '財の名称']], [[body], '$DIFF']]]$ という共通部分が得られる．

- (iii) 木構造化された情報収集対象の HTML テキストに共通部分をマスクとして適用し，情報を抽出する．

木構造 P と共通部分 R を先頭から順に比較して情報の抽出を行う．具体的には， $p_i = \$DIFF$ なる p_i だけを取り出し，リスト S に追加していく．この結果， S は抽出された情報のリストとなる．例えば， $[[[html],[[head],[[title], '財の名称']], [[body], 'iBook']]]$ というリスト構造に $[[[html],[[head],[[title], '財の名称']], [[body], '$DIFF']]]$ という共通部分をマスクとして適用すると $['iBook']$ というリストが得られる．

- (iv) 抽出した情報の構造的な利用を可能にするために，情報の構造化を行う．

リスト S の要素 s_i をユーザに対して順番に提示し， s_i が収集すべき情報であるか否かを問い合わせる．ユーザによる回答は，同じ共通部分 R を有する HTML テキストが含む情報を構造化するためのラベルのリスト L_R に保存される． s_i が収集すべき情報でないという回答が得られた場合， L_R の要素 l_i には WASTE という項目が記録され，情報収集の際には無視される．収集すべきであると回答された情報については，どのような属性に関する情報であるかを示す情報の入力を要求する．ユーザからの s_i に対する回答は要素 l_i として記録される．例えば， $['iBook', '10000 円']$ といった情報が抽出された場合，ユーザには $'iBook'$ ，および $'10000 円'$ という文字列が順番に提示される．ユーザは HTML テキストを閲覧しながら，提示された情報の意味を判断し，回答を行う．例えば， $'iBook'$ に対しては“財の名称”，そして $'10000 円'$ に対しては“現在の価格”といった属性名を回答とする．

得られた共通部分 R とラベル L_R を併せて情報抽出パターンとして利用することで，同じ共通部分 R を有する HTML テキストから情報を構造的に収集できる．

ステップ(iv)で必要となるデータは人間の手で与える必要があるが、抽出すべき情報の所在については、HTML テキストを解析することなく知ることができる。従って、本手法により、ユーザは抽出された情報に対して意味内容を与えるだけで良く、その他全ての処理をソフトウェアが自動的に行うことで情報抽出パターンが作成される。

4.4 エージェント間通信機能の実装技法

BiddingBot では、効用の高い入札を実現するために、複数のエージェント間で情報交換を行い、協調的に動作するための通信が行われる。通常、入札処理の過程では様々な局面が考えられるため、処理コードの記述は困難となる。具体的には、エージェントの同期処理、および割り込み処理を適切に行うための記述が必要となる。

通信を行うエージェント間でタスクに依存関係が存在する場合、同期処理が必要である。例えば、財 g_1 に入札しているエージェントと財 g_2 に入札しているエージェントが存在する状況において、2つの財を同時に落札した場合にのみ効用が増加する場合、一方のエージェントは、他方のエージェントの落札の可能性を確認した後に、入札額を決定する必要がある。同期処理を伴う通信は述語 *query* で実行できる。*query* による通信では、エージェントは他のエージェントに依頼した処理の結果を待ち、結果を受信後、次の処理に移る。一方、同期処理が不要である場合は、述語 *request* が利用できる。*request* による通信では、エージェントは他のエージェントに問い合わせをした後、処理の結果を待つことなく、即座に次の処理に移る。*query* はコードの記述においては扱いやすいが、返答を待つ時間が無駄になる場合がある。相手からの返答を待つ必要がない場合、余計な待ち時間を必要としない *request* の方が適切である。

インターネットオークションにおける入札では、特に、締め切り間際の時間帯において、エージェントの即応的な動作が必要とされる。しかし、*query* と *request* による通信では、通信先のエージェントが他の処理を実行中の場合、処理の終了を待つ必要がある。述語 *interruptAndQuery*、および *interruptAndRequest* では、通信先のエージェントの処理に割り込みをかけ、*query* および *request* による通信処理を即座に実行できる。具体例として、入札中のエージェントを即座に停止させるコードを示す。ここで、述語 *stopAllBidders* の引数は、エージェントのリストであり、*stop* は、エージェントの動作を緊急に停止させる述語である。

```

stopAllBidders([]).
stopAllBidders([Agent|RestAgents]) :-
    interruptAndRequest(Agent,stop),
    stopAllBidders(RestAgents).

```

本例では、`interruptAndRequest` に基づく、処理結果を待たない非同期型の通信により、全てのエージェントに即座に入札停止命令を通知できる。

また、エージェントは、同時に複数のタスク処理を要求される場合がある。例えば、新規の入札のための通信を Web サーバと行っている際に、他のエージェントからの問い合わせを受信した場合、Web サーバとの通信と並行して、受信内容の処理を行う。そこで、エージェントがマルチスレッド処理を行うために、述語 `queryC` と `requestC` による同期並行処理、および非同期並行処理を伴う通信が利用できる。これらの述語では、複数の処理を並行して行うために通信先のエージェントがクローンを生成し、通信で要求された処理をクローンに実行させる。そのため、割り込み型の通信と同様に、通信先のエージェントが他の処理を実行中でも通信が可能であり、かつ処理の実行を妨げることなく、要求した処理を実行できる。

複数のプロセス間の処理の同期を考慮したプログラミングや、データの不整合が生じない割り込み処理の実装は、一般に困難である。しかし、本節で述べた実装手法により、ユーザは適切な述語の選択にのみ注意すれば良い。

4.5 情報表示機能の実装技法

MiLog によるエージェントは Web サーバーの機能を持つため、HTTP アクセスに対する出力処理を記述することで、CGI プログラムとして機能する。本機能により、ユーザは Web ブラウザを介してエージェントへアクセスが可能である。本機能を用いるためには、述語 `doService` を用い、その本体部分に HTTP アクセスに対する出力処理を記述する。`doService` は、第1引数にアクセスの識別子を取り、第2引数にエージェントによる処理結果が束縛される。ここでの処理結果は、リスト構造で表現された HTML テキストであり、*MiLog* のパーザによって通常の HTML テキストに変換される。例えば、エージェントが内部データベースに “`itemName('iBook')`”, “`itemPrice('iBook','800')`”, および “`itemTime('iBook','15min')`” を持つ場合、以下の記述により、情報を Web ページとして出力できる。

```
doService(ID, OUT) :-  
    itemName(X_0),  
    itemPrice(X_0, X_1),  
    itemTime(X_0, X_2),  
    OUT = ['<html>', '<body>',  
          'Items Information', '<BR>',  
          'Name: ', X_0, ' ', '<BR>',  
          'Price: ', X_1, ' ', '<BR>',  
          'LeftTime: ', X_2, ' ', '<BR>',  
          '</body>', '</html>'].  

```

通常のCGIプログラムと同様、パラメータを伴うアクセスも可能である。*MiLog*では、HTTPアクセスを受けた場合、各パラメータの情報が以下の形式で内部データベースに追加される。ここでParameterはパラメータ名、Valueはパラメータの値である。

```
option(ID, Parameter, Value)
```

そのため、パラメータ情報の存在を条件として出力処理の分岐が可能である。例えば、ブラウザの種類を表すラベルを値として取るパラメータ browser を利用し、適切な出力を生成する場合を考える。パラメータ値が netscape である場合に、Netscape Navigator に適した出力処理を記述した doService を実行するには、その本体部分に option(_browser, netscape) を加えれば良い。エージェント agent が server.ics.nitech.ac.jp 上で動作しており、通信で利用されるポート番号が 17008 番ならば、以下の URL からエージェントにアクセスできる。

```
http://server.ics.nitech.ac.jp:17008/agent?browser=netscape
```

4.6 議論

BiddingBot では、情報の記述形式が異なる複数のサイトからの情報収集を、各サイトに特化したビッダーエージェントが行う。本章で述べた実装技法により、情報収集のためのパラメータを変更するだけで、ビッダーエージェントを各サイトに特化できる。これは、情報の抽出処理を、リスト化された HTML テキストと情報の抽出パターンとの単一化によって実現したためである。そのため、各サイトに対応するために、エージェントの実装そのものを変更する必要がない。さらに、単一化の処理には、論理型言語である *MiLog* の機能を利用できるため、情報抽出のための特別なコードは記述する必要がない。本章で述べた実装技法により、

Status	BID	PHOTO	Goods Name	Price	Deadline	AuctionSite
Watching	<input checked="" type="checkbox"/>		Palm M-500	156.00	Nov. 18 13:11	Amazon.com Auction
Watching	<input checked="" type="checkbox"/>		Sony Clie PEG-N710C 320x320, 16MB, MP3 Player, Palm OS vers ...	201.50	Nov. 19 1:23	Amazon.com Auction
Bidding	<input checked="" type="checkbox"/>		BRAND NEW 8 MB PDA Palm Handheld PC-OS+Voc Record	68.00	Nov. 18 16:21	Yahoo!Auction
Watching	<input checked="" type="checkbox"/>		NEW Sony CLIE PEG-S320 PDA NO RESERVE	152.00	Nov. 18 17:29	Yahoo!Auction
Bidding	<input checked="" type="checkbox"/>		Direct From IBM c3 PC Companion WorkPad NoRsv	50.99	Nov. 18 23:05	Yahoo!Auction

図 4.3 *BiddingBot* のインタフェースの一例

オークションサイトの情報の記述形式が変化したり，新規のオークションサイトが出現した場合に柔軟な対処が可能となる．また，入札のメカニズムを変更する場合，エージェントのタスク，および扱われる情報が変化するため，エージェント間の通信機構についても何らかの変更を加える必要がある．入札処理の過程では，エージェント間の同期／非同期の通信や，割り込みが必要な通信が行われる可能性がある．通常，これらの通信機能の実装は煩雑で，コストの高い作業であるが，本章で述べた実装技法では，各々の通信機能を実現するためのコードの記述作業を，*MiLog* における通信用述語の選択の問題として抽象化している．そのため，エージェントの通信機能の実装／修正作業は大幅に簡単化される．

図 4.3 に *BiddingBot* のインタフェース例を示す．本例では，財を監視している各エージェントから得られた財の価格，終了時間等の情報を統合的に表示している．ここで，各財の画像，財の名称，価格，および入札の締め切り時間は，本章で述べた実装技法に基づき，各財の情報を表示する HTML テキストから抽出することにより，得られた情報である．Web ブラウザをインタフェースとしてエージェントにアクセスできるため，ユーザは，携帯型端末を含めた，様々な計算機環境上でオークションの状況を確認できる．

インターネットオークションでは，提供される財の数や種類は短期間に大幅に変化し，また財の情報の記述形式も非定期的に変化する．本章で述べた実装技法

により, *BiddingBot* では, 財の出品状況に適した入札手法や, 情報収集の機能を少ない労力で実装可能であり, 今後のオークションの発展に伴う様々な変化に対応するための十分な柔軟性を備えていると言える.

本章で述べた実装技法では, 論理型言語の単一化に基づく情報抽出機能を実現している. ここでは, 情報抽出のためのパターンを用意し, HTML テキストとの単一化によって必要な情報を抽出する. 文献 [9] では, 情報抽出におけるパターンの記述のために YACC を用いているため, ユーザは YACC の記述方法を知る必要がある. 一方, 本章で述べた情報抽出機能では, ユーザは, Prolog におけるリストの形式で情報抽出パターンを記述すれば良いため, 情報抽出のために特別な知識を必要としない.

4.7 結言

本章では, 実在のインターネットオークションに対して利用可能な入札支援システム *BiddingBot* の実装技法を示した. ここでは, 情報収集 / 入札機能, エージェント間通信機能, および情報表示機能に関して, 論理型記述言語 *MiLog* に基づく実装の詳細を具体的に述べた.

インターネットオークションは, 一般に普及しつつある, 最も活発な電子商取引の形態であるが, 実在のオークションサイトへの適用を積極的に試みている研究は少ない. 本章では, 第3章で提案した手法を含めた, 様々なオークション技術を実際に利用するための入札支援システムの構築に関連して, 具体的な実装技法を示した. 本章で述べた実装技法は, 実践的なシステムを構築する際の煩雑な実装作業による負担を軽減し, 入札メカニズムに関連する本質的な実装に注力することを可能にする.

第 5 章

組合せオークションに基づく スケジューリング手法

5.1 序言

本章では，電子商取引の分野で培われたオークションの技術を応用する試みの一環として，組合せオークションに基づくスケジューリング手法について述べる．

会議のように複数の人間が参加する場合のスケジューリングを行う際は，各参加者の希望を適切に反映し，かつ，全体として矛盾が生じないようにしなければならない．本章では，組合せオークションに基づいてスケジューリングを行うことで，適切な解を得ることを試みる．スケジューリング問題を，時間を買うオークションとして考えることは，ユーザにとって直感的でわかりやすく，現実での適用に有効であると考えられる．しかし，組合せオークションとして問題を捉える場合，様々な制約を組合せとして表現する必要があり，表現力と処理時間の点において問題がある．本章では，入札に対する制約を導入することで，この問題の解決を目指した．また，本章では，組合せオークションを整数計画問題 (Integer programming problem) として考え，入札に対する制約を，整数計画問題における制約として表現する．これにより，表現力と処理時間の両面において十分な効果が得られる．実際の利用では，解の品質が優先される場合や，処理速度が優先される場合がある．本章では，解の品質を優先する場合の方法として整数計画問題として求解する手法を，処理速度を優先する場合の方法として探索により求める手法を示し，実験によりその性質の違いを示す．

本章の構成を以下に示す．5.2 節では，まず，本章で述べるアプローチに至る基本的なアイデアについて述べる．5.3 節では，組合せオークションによるスケ

ジューリング問題を定式化する．5.4 節では，スケジューリング問題を効率的に解くために，組合せオークションにおける入札に対する制約表現を導入する．5.5 節では，具体的なスケジュールの決定処理手続きと，提案するスケジューリング方式の実装方法について述べる．5.6 節で，本章で提案するスケジューリング方式に関して評価と議論を行い，関連研究について述べる．

5.2 基本的なアイデア

スケジューリング問題は，複数のメンバーに関係する一種の最適化問題と見なすことができる．そのため，適切な問題の定式化と，その定式化の下での最適解の決定が本質的な課題となる．これまでに，スケジューリング問題を制約充足問題 (Constraint Satisfaction Problem) として定式化し，制約解消を行うことでスケジュールを決定する研究が行われている．一方，本章では，スケジューリング問題を組合せオークション [74] と等価な問題として定式化し，スケジュールの決定プロセスを，勝者決定問題の解の探索に帰着させ，最適なスケジュールを決定する手法を提案する．勝者決定問題は複雑な最適化問題であり，最適なスケジュールの決定問題として再定義が可能である．既存の研究のように，制約充足問題としてスケジューリング問題を定式化した場合，過制約な場合の制約解消のための特別な処理が必要とされる．しかし，勝者決定問題として定式化することで，特別な処理を加えることなく，経済的な規範に基づく最適な解が決定可能である．具体的に本章では，各々のメンバーが希望する連続した時間帯を占めるイベントを，オークションにおける財の組合せとして表現し，問題を定式化する．ここでは，イベントを行う際に利用可能な複数の資源，およびイベントの参加者を考慮するスケジューリングを行う．この結果，あるメンバーが，同一の時間帯に，異なる資源を用いて行われるイベントに重複して参加することが無いようにスケジュールを決定できる．

組合せオークションは，スケジューリング問題を扱うのに都合がよい．組合せオークションを用いることで，連続する時間帯を要求するスケジューリング問題のように落札すべき財に関する制約が複雑である場合に，より効果的な財の割当てを実現できる．組合せに対する入札を扱えない場合，同時に落札することに無価値な複数のタイムスロットを落札してしまう可能性がある．例えば，文献 [66] では，空港の発着枠を決定するために，組合せオークションを利用している．ここでは，連続する時間帯の発着枠が必要とされている．組合せオークションにより，連続する時間帯の発着枠には価値があり，そうでない場合には無価値であること

を明示的に表現できるので，全体として効果的な発着枠の割当てが可能になる．

5.3 組合せオークションに基づくスケジューリング問題の解決

5.3.1 スケジューリング問題の定義

本章では，会議時間の調整等，複数のイベントから成るスケジューリング問題を扱う．ここで，イベントとは，会議などのスケジュール上の要素を表す．スケジューリングにおいては，個々の参加者の都合を合わせる必要がある．すなわち，好都合な空き時間が見つからない場合，イベントの時間をずらしたり，またはイベントをキャンセルすることで，個々のスケジュールを調整する必要がある．本章で提案するスケジューリング手法の枠組みでは，参加者が，イベントに対する制約とその評価値を表明し，表明された制約と評価値に基づき，全体にとって最適なスケジュールを決定する．イベントに対する制約としては，次の3種類の制約を扱う：(1) 参加者のリスト，(2) イベント長，および(3) イベントが実行可能な時間帯．つまり，参加者とイベントの開催される長さは決定しているが，イベントの開始時間は，ある範囲内でしか決まっていない状況を想定している．本章では，以後，人間や資源（*e.g.*, 会議室，利用する計算機）を r と表し，参加者や資源の集合を $R = \{r_1, r_2, \dots\}$ とする．説明の簡単のために，以下，本章では，参加者と資源については，共に単純に“資源”と記述する．

各資源のスケジュールは，タイムスロットと呼ぶ単位時間に基づいて管理されているとする．例えば，現実の1時間を1タイムスロットとすれば，1日を24タイムスロットで管理することができる．各タイムスロットは t_i と表し， i の増加は時間の経過を意味する．すなわち， t_1 は t_2 よりも前の時間帯である．ある参加者のすべてのタイムスロットには，一意なインデックスが割り当てられており，参加者 r_i の j 番目のタイムスロットを t_{ij} と表す．また，全参加者の j 番目のタイムスロットの集合を T_j と表し，参加者 r_1, r_2, \dots, r_k の j 番目のタイムスロットの集合を $T_{j\{r_1, r_2, \dots, r_k\}}$ と表す．

イベントの開催を決定することは，イベントの主催者が必要なタイムスロットを落札することと見なす．例えば，3人の参加者との会議を14:00～15:00に行うならば，イベントの主催者は，これら3人と会議室1室の14:00～15:00を表すタイムスロットを，同時に落札する必要がある．タイムスロット t_{ij} の落札は， r_i のスケジュールにおける時間 t_{ij} において， r_i を拘束する権利を買ったと考えても良

い．ここで，参加者 r_i のスケジュール E_i を次のように表現する．

$$\begin{aligned} E_i &= \{e_{i1}, e_{i2}, \dots, e_{in}\} \quad (n \geq 0) \\ e_{ij} &= (T_{ij}, R_{ij}, v_{ij}) \end{aligned}$$

ここで， e_{ij} は個々のイベントであり，3つのパラメータ T_{ij} ， R_{ij} ，および v_{ij} によって特徴付けられる． T_j ，および P_j は，それぞれが異なる種類の制約の集合であり，論理記号を用いて表現される． T_j は，イベント e_{ij} の時間に関する制約である．イベントの時間に関する制約として，開始時間 T_{ij}^0 ，終了時間 T_{ij}^1 に関する制約，およびイベントの実行時間の長さ $T_{ij}^1 - T_{ij}^0$ を含む．例えば，開始時間と終了時間が，それぞれ， t_a^* と t_b の間， t_c と t_d の間であり，さらにイベントの実行時間の長さが l_0 以上 l_1 の場合，時間に関する制約は， $T_j = (t_a \leq T_{ij}^0 \leq t_b) \wedge (t_c \leq T_{ij}^1 \leq t_d) \wedge (l_0 \leq T_{ij}^1 - T_{ij}^0 \leq l_1)$ と表現される． $R_{ij} \subseteq R$ はイベント e_{ij} に関する資源の集合を表す．また， v_j は参加者 i の e_{ij} に対する評価値を表す．

5.3.2 イベント間の制約

現実のスケジューリング問題を扱うには，複数のイベント間の制約を表すための手段が必要である．そこで，複数のイベント間の制約として，回数制約と順序制約の2つの制約を導入する．回数制約とは， n 個のイベントから m 個のイベントを選択するための制約である． E をイベント全体の集合とすると，回数制約は $|E_0'| = m$ ， $|E_0| = n$ ， $E_0' \subseteq E_0 \subseteq E$ と表すことができる．回数制約により，イベント間の排他性を表現可能になる．順序制約は，2イベント間の順序と間隔に対して制約を与える．順序制約 $e_{i1} <_l e_{i2}$ は，イベント e_{i1} の終了時間が，イベント e_{i2} の開始時間よりも，タイムスロット l 個分以上先行することを意味する．

5.3.3 勝者決定問題への問題の再定義

5.3 節で定式化したスケジューリング問題を，組合せオークションの勝者決定問題として定義する．すなわち，スケジューリング問題を，財と財への入札の集合として表現する．本オークションにおける基本的な財はタイムスロットである．入札は，各イベントが必要とするタイムスロットの集合に対して行われる．1つのイベントが表すタイムスロットの集合として，複数の代替案が存在する．例えば，3つのタイムスロット t_{i0}, t_{i1}, t_{i2} から連続する2つのタイムスロットを必要と

*ここでの t_x はタイムスロットを意味するのではなく，時系列上のある一点を意味する．

するイベントなら, $\{t_{i0}, t_{i1}\}$ と $\{t_{i1}, t_{i2}\}$ の2つの代替案が存在する. 考えられる代替案の集合は, $AT_{ij} = \{AT_{ij}^1, AT_{ij}^2, \dots, AT_{ij}^k\}$ と表現する. ここで, AT_{ij}^k は, イベント e_{ij} に関する k 番目の代替案を表す. 組合せオークションでは, これらのすべての組合せに対して入札が可能のため, イベントの実行時間に関する好みを, きめ細かく表現することが可能である.

入札を表現するためには, 財の組合せの集合を列挙し, それらの組合せに対して評価値を割り当てる. 参加者 r_i が入札すべき財の組合せの集合 S_i は以下のようになる.

$$\begin{aligned} S_i &= \bigcup_{j|e_{ij} \subseteq E_i} S_{ij} \\ S_{ij} &= \{S_{ij}^1, S_{ij}^2, \dots, S_{ij}^k\} \\ S_{ij}^k &= \left(\bigcup_{l|t_{il} \in AT_{ij}^k} T_{lR_j} \right) \cup \{d_{ij}\} \end{aligned}$$

イベント d_{ij} はダミーの財であり, 同じイベントから生成される複数の入札間の排他性を表現するために導入されている. S_{ij} は, イベント e_{ij} の代替案から成る集合である. ある代替案 S_{ij}^k は, ダミーの財 d_{ij} と, S_{ij}^k において資源 R_j が拘束されるタイムスロットから成る. 例えば, イベント $e_{ij} = ((\{t_1, t_2\}$ から1スロット必要), $\{r_1, r_2\}, 100)$ に対する代替案として $\{\{t_{11}, t_{21}, d_{ij}\}, \{t_{12}, t_{22}, d_{ij}\}\}$ の2つが生成される[†]. 財の組合せの列挙後, それぞれの組合せに対する入札額を決定する. 入札額によって様々な希望を表現可能である. 例えば, 上記の例において, イベントをより早く行うことが好ましいならば, $\{t_{11}, t_{21}, d_{ij}\}$ に対しては110の入札額を割り当て, $\{t_{12}, t_{22}, d_{ij}\}$ に対しては100の入札額を割り当てる, といったように, 各々の代替案への入札額に差をつければ良い.

最終的なスケジュールは, 以下の式の解として得られる.

$$\operatorname{argmax}_{\chi} \sum_{j|S_{ij} \in \chi} v_{ij}$$

ここで, χ は以下のように定義される.

$$\chi = \{S_{ij} \subseteq S_i | S_{ij} \cap S' = \emptyset \text{ for every } S_{ij}, S' \in \chi\}$$

[†]“ $\{t_1, t_2\}$ から1スロット必要”は, $\{(t_1^0 \leq T_{ij}^0 \leq t_2^0) \vee (t_2^0 \leq T_{ij}^1 \leq t_2^1)\} \wedge (T_{ij}^1 - T_{ij}^0 = 1)$ と表現できる. ここで, $t_1^0(t_2^0)$ および $t_1^1(t_2^1)$ は, それぞれタイムスロット $t_1(t_2)$ の開始時間と終了時間を表す.

5.4 組合せオークションへの制約の導入

前節で述べた定式化に基づいて回数制約や順序制約を表現するためには，これらの制約から考えられるすべての組合せを列挙し，それら全ての組合せに対して適切な入札額で入札する必要がある．これは，好みに関するきめ細かな表現を可能にする反面，組合せの爆発的な増加に伴う処理時間の増大を招く．最適解の発見に要する時間は，入札数に対して指数関数的に長くなるので，最適解の発見はもとより，より良い解の発見にも長い時間が必要になる．そのため，制約の表現に関して，組合せを列挙する以外の手段を考慮する必要がある．本研究では，組合せオークションを整数計画問題として表現し，回数制約や順序制約を組合せの列挙以外の方法で表現することにより問題を解決する．

5.4.1 整数計画問題としての定式化

組合せオークションの整数計画問題としての定式化は，Anderson [8] によって示されており，本章における定式化もこれに従う．

m 個の財 $M = \{g_1, g_2, \dots, g_m\}$ と n 種類の入札 $B = \{b_1, b_2, \dots, b_n\}$ が与えられたとする．各々の入札は， $b_i = \langle S_i, p_i \rangle$ と表す．ここで， S_i は $S_i \subseteq M$ なるアイテムの集合を表す．また， p_i は S_i への入札額を表し， $p_i \geq 0$ である．このとき，組合せオークションにおける勝者決定問題は，以下のように定式化できる．

$$\begin{aligned} \max \quad & \sum_{i=1}^n p_i x_i \\ \text{s.t.} \quad & \sum_{i|g_j \in S_i} x_i \leq 1, \quad g_j \in M \\ & x_i \in \{0, 1\} \end{aligned}$$

もし入札 b_i が落札に成功した場合， $x_i = 1$ となり，そうでない場合は $x_i = 0$ となる．つまり，上の問題を解き， $x_i = 1$ の場合に， b_i が落札されたとして処理すればよい．

5.4.2 回数制約の表現

回数制約は， n_0 種類の入札の集合 $B_0 \subseteq B$ 中から， $n_0'(n_0' \geq n_0)$ 以下の入札だけを落札することを表現した制約である．回数制約は，次式によって表現可能で

ある．

$$\sum_{i|b_i \in B_0} x_i \leq n_0'$$

回数制約は，同一のイベントから生成される複数の入札の排他性を処理する際に有用である．あるイベント e に関する入札のバリエーションを $B_e = \{b_{ei} | b_{ei} \text{ はイベント } e \text{ に対する入札, } b_{ei} \in B\}$ とすると，排他処理のための回数制約は，次式により表現することが可能である．

$$\sum_{i|b_{ei} \in B_e} x_i + x_{B_e} = 1 \quad (5.1)$$

x_{B_e} は，新たに導入した変数である． x_{B_e} は， B_e 中のどの入札も落札に結びつかない場合に $x_{B_e} = 1$ となり，そうでない場合に $x_{B_e} = 0$ となる変数である． x_{B_e} を使わずに， $\sum_{i|b_{ei} \in B_e} x_i \leq 1$ とすることも可能だが，順序制約の表現で利用する必要があるため導入している．

5.4.3 順序制約の表現

順序制約は，複数のイベントの順序に関連する選好（好み）を表現するための制約である．順序制約の表現に関して，2つのイベント e_1 と e_2 間の順序と間隔を表現する場合を例として説明する．ここでは， $e_1 <_l e_2$ ，すなわち， e_1 の終了時間が， e_2 の開始時間よりも l だけ早いとする． B_{e_1} と B_{e_2} は，それぞれ，イベント e_1 と e_2 に関する入札の集合である．また，入札 b_i によって要求される開始時間と終了時間を，それぞれ $t_{b_i}^0, t_{b_i}^1$ と表す．

$$f = - \sum_{i|b_i \in B_{e_1}} t_{b_i}^1 x_i + \sum_{i|b_i \in B_{e_2}} t_{b_i}^0 x_i \geq l \quad (5.2)$$

ここで，どちらかのイベントが落札されない場合，式 (5.2) が満たされない点が問題となる．例えば， e_1 が落札される可能性があり， e_2 が落札される可能性がない場合，

$$- \sum_{i|b_i \in B_{e_1}} t_{b_i}^1 x_i < 0 \text{ and } \sum_{i|b_i \in B_{e_2}} t_{b_i}^0 x_i = 0.$$

となり，式 (5.2) が満たされない．この問題を解決するために，以下の式 (5.3) を用いる．

$$f + (\max\{t_{e_b} | b \in B_1\} + l)x_{B_2} \geq l \quad (5.3)$$

$\sum_{i|b_i \in B_{e_2}} t_{b_{ij}}^0 x_j = 0$ の場合は、式 (5.1) より、 $x_{B_{e_2}} = 1$ となり、式 (5.2) が満たされる。

イベント間の間隔を $l_{min} \leq f \leq l_{max}$ と記述することで、間隔の最小値 l_{min} と最大値 l_{max} を指定することも可能である。具体的に、タイムスロット t_1, t_2, t_3 の中から 1 スロットのみを必要とするイベント e_1 および e_2 を考える。ここで、 e_1 は e_2 よりも先行するイベントとし、 e_1 と e_2 の最短の間隔を 1 スロットとする。また、参加者は両イベントとも同じであるとする。この場合、順序制約は以下のよう表現できる。

$$-x_{11} - 2x_{12} - 3x_{13} + x_{21} + 2x_{22} + 3x_{23} + 4x_{B_{e_2}} \geq 1$$

$$\sum_{i|b_i \in B_{e_1}}^3 x_{1i} \leq 1$$

$$\sum_{i|b_i \in B_{e_2}}^3 x_{2i} + x_{B_{e_2}} = 1$$

$x_{11}, x_{12}, x_{13} : e_1$ に関する変数

$x_{21}, x_{22}, x_{23} : e_2$ に関する変数

5.4.4 制約付き組合せオークションの定式化

財の組合せと、それに対する入札額以外の制約として回数制約と順序制約を取り入れた組合せオークションを、以下のように定式化できる。

$$\begin{aligned} \max \quad & \sum_{i=1}^n p_i x_i \\ \sum_{i|t_j \in S_i} x_i & \leq 1, \quad t_j \in M = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}, \quad x_i \in \{0, 1\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} c_{11}x_1 + \dots + e_{1n}x_n + x_{n+1} & = 1 \\ & \dots \dots \end{aligned}$$

$$c_{d1}x_1 + \dots + e_{dn}x_n + x_{n+d} = 1$$

$$\begin{aligned} t_{11}x_1 + \dots + t_{1n}x_n + t_{1n+1}x_{n+1} & \geq l_1 \\ & \dots \dots \end{aligned}$$

$$t_{r1}x_1 + \dots + t_{rn}x_n + t_{rn+1}x_{n+r} \geq l_r$$

	Bids for e_1 [B_{e_1}]			Bids for e_2 [B_{e_2}]					
	b_{11}	b_{12}	b_{13}	b_{21}	b_{22}	b_{23}	x_{Be_1}	x_{Be_2}	Const.
t_1	x_{11}			x_{21}					≤ 1
t_2		x_{12}			x_{22}				≤ 1
t_3			x_{13}			x_{23}			≤ 1
XOR	x_{11}	x_{12}	x_{13}				x_{Be_1}		$= 1$
				x_{21}	x_{22}	x_{23}		x_{Be_2}	$= 1$
Order	$-1 \cdot x_{11}$	$-2 \cdot x_{12}$	$-3 \cdot x_{13}$	$1 \cdot x_{21}$	$2 \cdot x_{22}$	$3 \cdot x_{23}$		$4 \cdot x_{Be_2}$	≥ 1

図 5.1 スケジューリング問題の表現例

$$c_{ij} = \begin{cases} 1 & b_i \in B_{e_i} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$t_{ij} = \begin{cases} t_{b_i}^1 & b_i \text{が先行するイベントへの入札} \\ t_{b_i}^0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

以上の定式化により，入札の排他処理を含む財の個数に関する制約，イベントの順序に関する制約が表現できる．ここでの目的は，落札された入札の評価値の和を最大化することとなる．

図 5.1 に，上述の定式化に基づいてスケジューリング問題を表現した簡単な例を示す．本例では，タイムスロット t_1, t_2, t_3 から 1 スロットを必要とするイベント e_1 および e_2 ($e_1 < e_2$) を仮定している．両イベントに対する入札の評価値を，それぞれ $B_{e_1} = \{b_{11}, b_{12}, b_{13}\}$ ， $B_{e_2} = \{b_{21}, b_{22}, b_{23}\}$ と表す．図 5.1 中の表において， x_{Be_1} と x_{Be_2} の列を除く全ての列は，入札に関する変数を示している．また，最初の 3 行 (t_1, t_2, t_3) は，各タイムスロットへの入札の状況を示している．例えば， t_1 の行の変数 x_{11} は，入札 b_{11} によって，タイムスロット t_1 が要求されていることを表している．これらの 3 つの行には，定式化に基づいて，制約“ ≤ 1 ”が与えられている．次の 2 行 (“XOR” として 1 行に纏められている) は，回数制約を表現している．より具体的には，入札の排他性に関する制約を表現している．ここで，変数 x_{Be_1} ，および x_{Be_2} の値は，式 (5.1) に従って決定される．つまり，もしも $x_{11} + x_{12} + x_{13} = 1$ ならば， $x_{Be_1} = 1$ となる．そのため，たとえイベント e_1 に対する全ての入札が落札に失敗したとしても，第 4 行は制約を満たすことができる．最下行は，順序制約を表現している．ここでは，式 (5.3) に基づき，変数 x_{Be_2} の

係数は、タイムスロットのインデックスの最大値である“3”と、間隔“1”の合計で与えられる．本例において、入札 b_{12} と b_{21} が落札に成功したとすると、変数の値は、 $\{x_{11}, x_{12}, x_{13}, x_{21}, x_{22}, x_{23}, x_{B_{e1}}\} = \{0, 1, 0, 1, 0, 0, 0\}$ となる．しかしこの場合、 $(-1 \times 0) + (-2 \times 1) + (-3 \times 0) + (1 \times 1) + (2 \times 0) + (3 \times 0) + (4 \times 0) \not\geq 1$ となり、順序制約が満たされない．すなわち、本節で示した定式化では、 b_{12} と b_{21} が同時に落札に成功することは無く、複数のイベント間の順序に関する選好を適切に表現 / 反映できる．

最終的に、本節で示した定式化により、スケジューリング問題の解決は、図 5.1 のような 1 つのテーブルで表現された全ての制約を満たす変数の値の発見に帰着できる．また、その際には、落札に成功した入札の評価値の和が最大化されなければならない．

5.5 スケジューリングのプロセス

本章で述べたスケジューリング手法による処理のプロセスを図 5.2 に示す．本章で提案したスケジューリング手法では、オークションの主催者であるエージェント（もしくはオークションにおける売り手の役割を担うエージェント）から告知されるスケジューリングに関する情報、およびオークションにおける買い手の役割を担うエージェントからのスケジュールに関する希望を入力として処理する．主催者エージェントからの情報とは、実際にスケジューリングの対象となっているタイムスロット、および資源の情報である．買い手となるエージェントが表明する希望スケジュールは、エージェントのユーザが、主催者エージェントからの情報に基づいて決定したものであり、各イベントのタイムスロット、およびイベントに付随する各種の制約から成る．入力されたスケジュールは、計算可能な形式にコンパイルされる．ここでは、買い手エージェントが表明した希望スケジュールに含まれる各イベントが占有するタイムスロットを、財の組合せとして表現し、イベントに関する制約と併せて、整数計画問題への変換処理が行われる．コンパイルされた情報から求解するためのアルゴリズムには様々なものが考えられるが、本研究では、より高速な解の導出が可能な LDS アルゴリズム [33] と、最適値に近似した解が得られる混合整数計画法（MIP: Mixed Integer Programming）を用いた．スケジューリングシステムの試作においては、LDS の実装には Java 言語を用い、MIP に関しては、C 言語で記述された線形計画問題のライブラリである GLPK（GNU Linear Programming Kit）[5] を利用した．

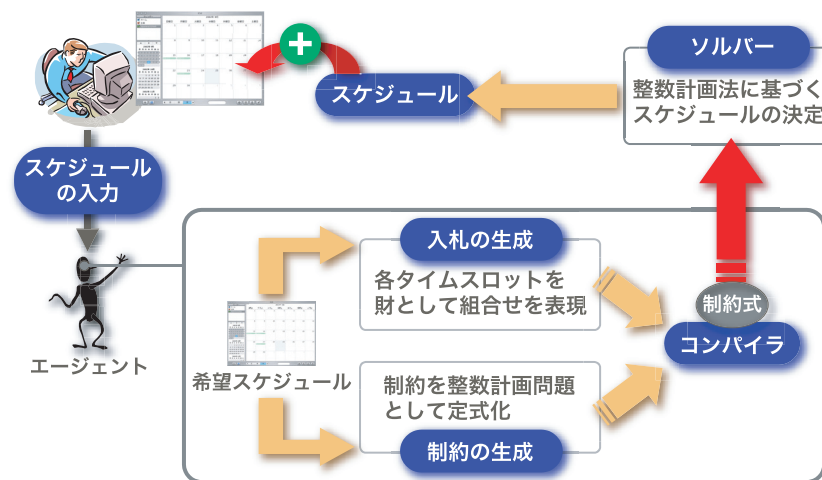


図 5.2 スケジュールの処理プロセス

5.6 議論

5.6.1 評価

本手法のスケラビリティを評価するため、スケジュールするイベント数に対する入札数の変化、および解の質や処理時間への影響を検証するための実験を行った。ここでは、エージェント数を、20 から 50 まで 5 刻みで変化させた時の、入札数、処理時間、評価値、および充足率に関する検証を行った。ここでの充足率とは、全てのエージェントが希望するイベントのうち、どの程度イベントが落札されたかを示す割合である。スケジューリングで扱うタイムスロット数は、40（8 時間を 5 日間）とし、スケジューリング問題自体はランダムに生成した。ここで、問題の生成に用いた乱数の分布は一様分布とした。全てのイベントは、参加するエージェント数とイベント長が固定であり、開始時間が未定の状態である。問題の生成は、次の (1)～(3) の手続きにより行った。(1) 個々のエージェントの個人的なイベントを生成する。個人的なイベントは、他のエージェントと共有されない。各エージェントは、個人的なイベントを 10 個ずつ持つ。(2) 複数のエージェントで共有されるイベントを生成する。ここでは、2 エージェントで共有されるイベントと、3 エージェントで共有されるイベントを 10 個ずつ与え、さらに、4～20 エージェント（エージェント数はランダム）で共有されるイベントを 10 個ずつ与える。(3) イベントの開始時間とイベント長を決定する。イベントの開始時間として可能なタイムスロットは、ランダムに決定する。イベント長は、長さ 1 のイベントが 50%、長さ 2 のイベントが 33%、そして長さ 3 のイベントが 17%の割

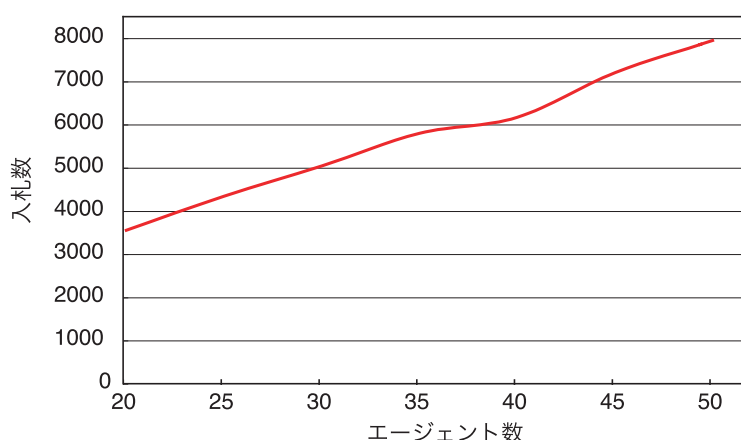


図 5.3 エージェント数と入札数の関係

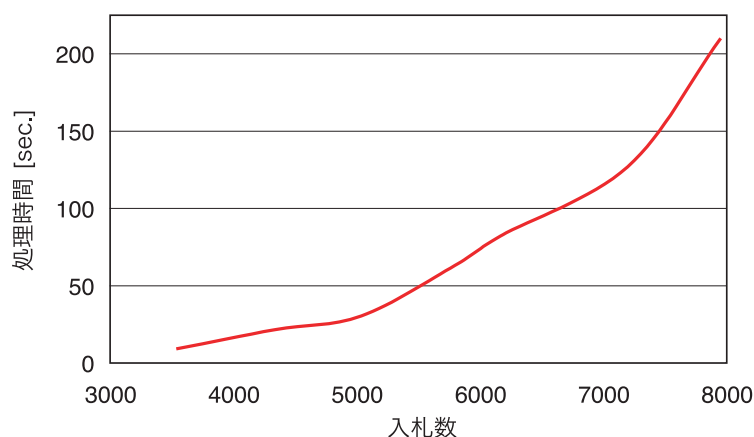


図 5.4 入札数と処理時間の関係

合になるように、ランダムに決定する。

各エージェント数につき 10 パターンの問題を生成し、各問題を LDS と MIP によって解いた。MIP に関しては、すべての実験において 30 分間で計算を終了させ、その時点で最良の解を採用した。実験結果を、図 5.3、図 5.4、図 5.5、および図 5.6 に示す。図は、それぞれ、エージェント数と入札数の関係、入札数と処理時間の関係、エージェント数と評価値の関係、およびエージェント数と充足率の関係に関する実験結果を表している。本実験では、CPU が PowerPC G4 1GHz で、メモリを 512MB 搭載した計算機を用いた。

図 5.3 は、本実験においては、エージェント数の増加に対して、入札数が線形に増加していることを示している。ランダムにイベントを生成した場合、入札数

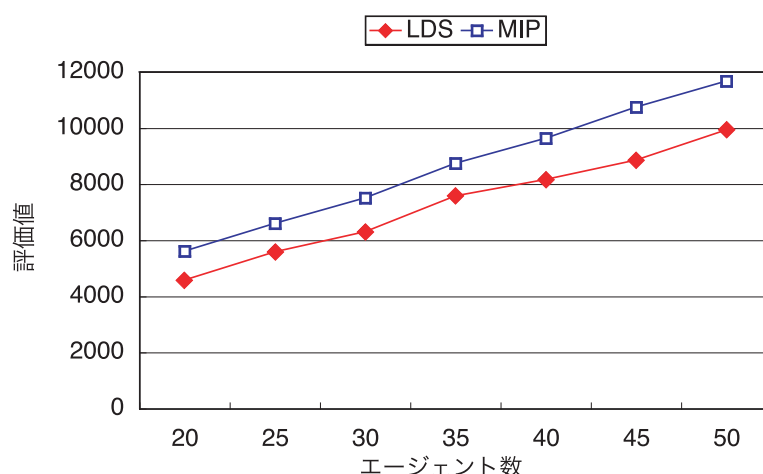


図 5.5 エージェント数と評価値の関係

は、エージェント数に対して線形に増加している。すなわち、指数関数的に入札数が増加することが無く、入札数の爆発が抑えられていることが確認できる。

図 5.4 は、LDS を用いた場合の処理時間を表している。図 5.4 に示す結果から、50 エージェントのスケジューリングにおいても、現実的な時間で解が得られることが分かる。また、図 5.3 に示す結果から、50 エージェントの場合、入札数は約 8000 であり、この場合の処理時間は 3 分 30 秒程度なので、十分に実用可能な時間内で処理されていると言える。

図 5.5 と図 5.6 は、LDS と MIP を用いた場合の、各々の評価値とイベントの充足率を示している。本実験では、MIP の評価値は、各変数が整数という制約を緩和し、線形計画問題 (LP: Linear Programming) として解いた場合の評価値の 95% 以上であった。最適解の評価値は MIP の評価値と LP の評価値の間に存在するから、MIP の評価値はほぼ最適値であると言える。図 5.5 より、LDS を用いた場合、MIP の 80% 程度の評価値の解を得られる。図 5.6 において、エージェント数が多くなるほど充足率が高くなっているのは、本実験では共有されるイベント数を固定しているため、エージェント数が増加するほど、総イベント数に対して個人的なイベントの占める割合が高くなるためである。

LDS を用いた場合でも適度な品質の解が得られることから、処理時間を優先する場合は LDS を用い、そうでない場合には MIP を用いる、といった使い分けをすることが可能であると考えられる。例えば、処理結果を見て再入札することを繰り返しながら解を収束させるような場合、LDS を用いた方が良く、処理を 1 回で済ませたい場合は、MIP を用いて適度な処理時間をかければよい。本来、MIP

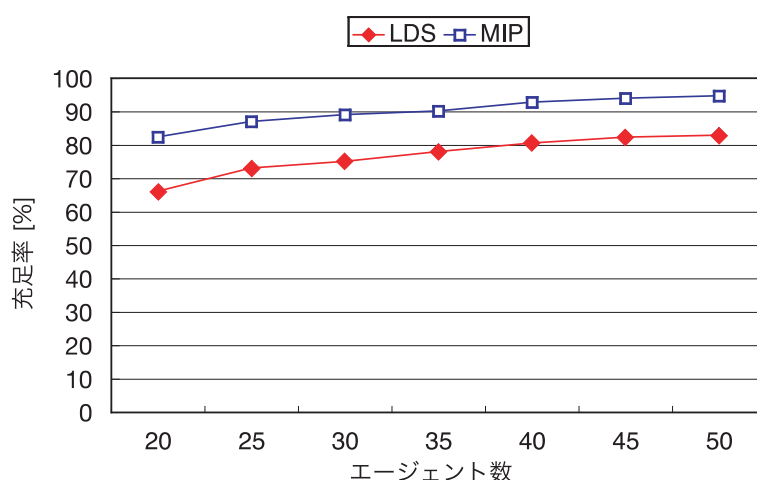


図 5.6 エージェント数と充足率の関係

による解を得るには多くの時間が必要であるが，本実験では，30 分間で処理を停止し，その時点での最良の解を用いている．しかし，図 5.5 に示すように，30 分間で計算を停止した場合でも，十分な品質の解を得られることが分かる．

5.6.2 関連研究

既存の会議スケジューリングに関する研究として，文献 [27, 78, 85] がある．文献 [27] や文献 [78] では，ユーザの希望を，会議の属性に関する値付けや重みによって表現している．文献 [27] では，高い効用を持つ時間帯で合意するための希望の緩和は，属性値の重みの変更による効用関数の係数の変化によって実現している．文献 [78] では，これらの数値をもとに契約ネットプロトコルと投票方式を組み合わせた問題解決手法に基づいてスケジューリングを行う．これらの解法ではヒューリスティックスを利用しているため，その有効性についての検証が必要であり，入力の複雑さ，およびヒューリスティックスへの依存から，大規模な問題への適用可能性について議論の余地がある．文献 [85] では，分散制約充足問題としてスケジューリングを扱っている．制約と重要度に基づくモデルはより表現力があり，希望を具体的かつ自然に表現できる．しかし，過制約な場合の制約緩和手法がアドホックなものであるため，得られた解の品質には検討の余地がある．本章では，希望スケジュールを，入札と制約として表現することで問題の表現力を高めた．また，制約緩和に関しても，アドホックなものではなく，オークションの規範に基づいているため，ユーザにとってより納得しやすいと考えられる．

組合せオークションに線形計画問題を導入した研究として、Anderson 等 [8] や Sandholm 等 [77] の研究がある。文献 [8] では、線形計画問題の汎用のソルバーを用いて、勝者決定問題を十分な速度で解決可能であることが示されている。文献 [77] では、勝者決定問題に特化した探索アルゴリズムが、より高速に勝者決定問題を解決可能であることが示されている。一方、本研究では、勝者決定問題を整数計画問題として考え、入札に関する制約を整数計画問題の枠組みで表現することで、スケジューリング問題において必要な制約表現が実現可能であることを示した。

本研究のように、マルチエージェント間の問題解決方法として組合せオークションを利用している研究として、文献 [41] の研究がある。文献 [41] では、マルチエージェントによるタスクプランニングに組合せオークションを利用している。ここでは、各エージェントが、それぞれ実行可能なタスクに対して入札を行い、各タスクの実行時間に関する制約の処理が考慮されている。解の決定には、文献 [74] のアルゴリズムを応用した探索的な手法が用いられている。一方、筆者らの手法では、混合整数計画法を利用することで、種々の制約を考慮した解の探索を行っている。

5.7 結言

本章では、複数の資源に関するスケジュールの決定を、組合せオークションにおける勝者決定問題として再定義し、最適なスケジュールを決定する手法を提案した。ここでは、入札に関する制約を整数計画問題の枠組みで表現することで、スケジューリング問題において必要な制約表現が実現可能であることを示した。スケジューリング問題を勝者決定問題として解く本手法では、得られる解が、実行不可能なイベントを含まず、かつ最適であることが保証される。本手法では、スケジュールの決定過程において多数のイベントが生成されるため、必要な計算量が非常に大きくなる。しかし、スケジュールの決定を勝者決定問題に帰着させているため、LDS や MIP を用いて、現実的な時間内で、高品質なスケジュールを計算可能である。

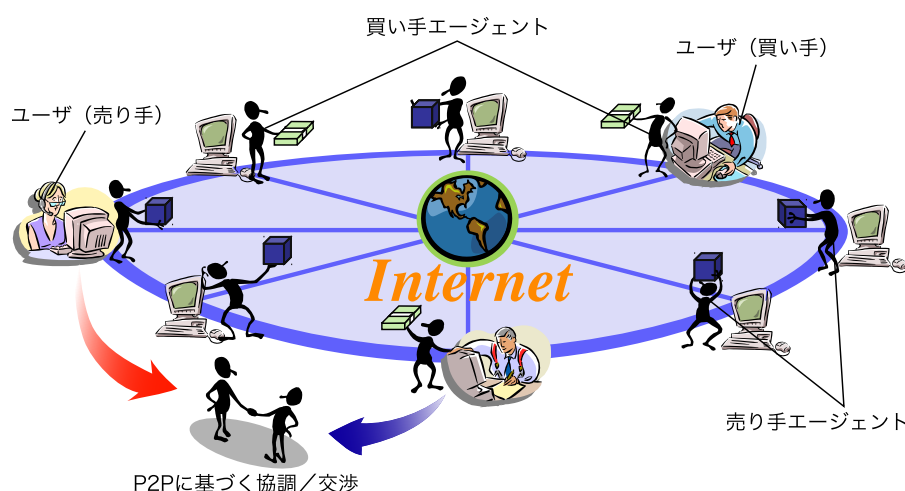
第 6 章

分散型電子マーケットにおける 財の交換に基づく交渉手法

6.1 序言

本章では，前章まで注目したオークションプロトコルに拠らない，独自の交渉プロトコルに基づく商取引手法の開発を試みる．本章では，分散型の電子マーケットである *E-GarageSale* の試作に関連して，複数の財を効率的に売買するための，ボリュームディスカウント [95] に基づくプロトコルに注目している．ボリュームディスカウントとは，買い手が複数の財を同時に購入する際に，売り手が財の単価を割り引くことである．ボリュームディスカウントを用いた場合，買い手には一度に多数の財を購入する誘因が生じるため，売り手が短期間に多数の財を販売することが可能になる．しかし，売り手が，買い手の要求に応えるための十分な数の財を常に所有しているとは限らない．売り手が所有している財の数が，買い手が要求する数より少ない場合，売り手は財の販売機会を失い，買い手は財を低価格で購入する機会を失う．そこで本章では，売り手と買い手双方の損失を防ぎ，かつ財の効率的な売買を実現するために，売り手エージェント間の，財の交換に基づく交渉手法を提案する．本手法は，文献 [100] の手法を，商取引のプロトコルとして新たに改良，精緻化したものである．本手法では，財の不足分を補うために，他の売り手と異なる財の交換を行う．本手法によって，売り手は，所有している複数の財を一度の売買機会で処理することが可能となる．また，本手法は，売り手の収益の最大化は保証しないが，財の販売効率を向上させ，少数の在庫しか持たない売り手による財の販売を容易化できる．

本章の構成は以下の通りである．6.2 節では，本研究で試作した分散型電子マー

図 6.1 *E-GarageSale* の概要

ケットである *E-GarageSale* の概要について述べる．6.3 節では，エージェントによる売買交渉の定式化，およびエージェントの交渉プロトコルを示す．次に，6.4 節では，売り手エージェント間の財の交換に基づく交渉手法について説明し，6.5 節で提案手法の評価を行う．さらに，6.6 節で，提案手法の適用性，および有用性に関して議論し，関連研究について述べる．

6.2 *E-GarageSale*: P2P に基づく分散型電子マーケット

複数のエージェントが商取引を行う電子マーケットに関しては，これまでに様々な研究が報告されている [59, 111]．既存の研究では，全ての売り手 / 買い手エージェントが特定のマーケットサーバ上で売買を行う中央集中型のマーケットメカニズムが仮定されている．中央集中型のメカニズムでは，マーケット内の情報の把握が容易であり，複数の売買を一括して清算可能である．しかし，ユーザ数が増加した場合，多数の売買の集中的な処理は計算量的に困難である．例えば，組合せオークション [74] における財の最適な割り当ての計算は，NP 完全な問題として知られている．また，マーケットには，各参加者の売買に関する選好情報が集められるため，これらの情報を管理するためのマーケット側の負担が大きい．一方，分散型のマーケットメカニズムでは，売買の処理と情報の管理が局所的に行われるため，ユーザ数の増加への対応，および情報管理の負担軽減が可能である．

本研究では，特定のマーケットサーバの存在を必要としない，分散型の電子マーケットシステム *E-GarageSale* の試作を行った．*E-GarageSale* は，C2C (Consumer

to Consumer) 型の売買の支援を目的とし、実世界におけるガレージセール、もしくはフリーマーケットに類似した形態のマーケットをインターネット上に実現することを目指している。図 6.1 に *E-GarageSale* の概要を示す。*E-GarageSale* では、売り手/買い手ユーザが利用している、インターネットに接続された計算機の集合を1つのマーケットと見なす。売り手/買い手エージェントは、これらの計算機上で自律的かつ協調的に動作する。売り手ユーザは売り手エージェントを生成し、自分の代理として売買交渉を行わせる。同様に、買い手ユーザは買い手エージェントを生成し、売買活動を行わせる。本システムでは、エージェントは、稼働中のエージェントの情報を特定のサーバから取得でき、実質的な売買を P2P (Peer-to-Peer) [58] で行う。このようなシステムは、Hybrid P2P 型と呼ばれ、BearShare[6] や Napster など で用いられている。本システムで活動するエージェントは、稼働中のエージェントの情報を得るための Web サーバへのアクセス機能、および他のエージェントと売買交渉を行うために必要な通信機能を備えている。また、エージェントはマルチスレッドで動作するため、P2P ネットワークを動的に構成しながら、複数の交渉を並行して行うことができる。本システムでは、ユーザが、あらかじめ電子商取引サイトにアクセスし、売買に関する情報を登録しておく必要がない。売り手ユーザは自分の計算機上で財を宣伝し、買い手ユーザは自分の計算機上で売買に関する要求を表明すれば、エージェントによって適切な売買が可能となる。本システムにより、一般のユーザが任意の期間、自由に売り手/買い手として活動できる。それにより、インターネット上での商取引の敷居を下げ、多種多様な財が活発に扱われる、ダイナミックな電子マーケットが実現できる。

E-GarageSale 上では、様々な形式の売買を実現可能である。現在、複数個の財を販売する売り手の存在を仮定し、ボリュームディスカウント [95] に基づくプロトコルを導入した売買の実現を試みている。売り手エージェントは、財の販売期限や所有している財の数に関する情報以外に、図 6.2 のような、ボリュームディスカウントのための価格テーブルを持つ。価格テーブルは、一度に売却する財の数に応じた単価を表す。例えば、図 6.2 の価格テーブルでは、買い手エージェント（もしくはその提携）が 5 個の財を購入する場合、財の単価は \$85.00 となり、20 個の財を購入する場合は \$35.00 になることが示されている。*E-GarageSale* では、多数の財の効率的な売買のために、ボリュームディスカウントを導入している。しかし、本システムには、一般の小売り業者と異なり、安定した財の仕入れ経路が無く、十分な数の財を所有していない一般のユーザが売り手として存在する。そのため、売り手が、多数の買い手からの要求を満たすことが不可能な場合

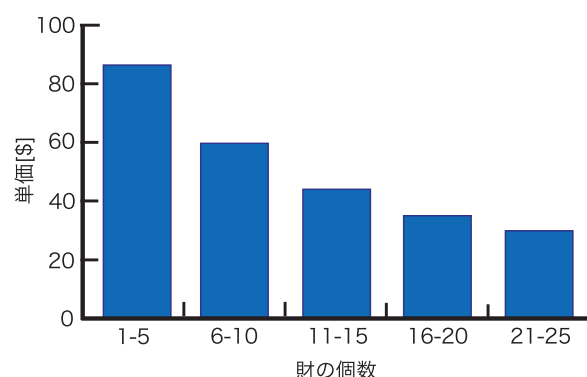


図 6.2 売り手の価格テーブルの例

が発生し得る．そこで本章では，売り手エージェントが買い手からの要求を満たすための交渉手法を提案する．

E-GarageSale は，第4章でも述べた，エージェント記述言語 *MiLog* [26] を用いて実装されている．*MiLog* は Java 言語を用いて実装された Prolog 言語処理系である．既に述べた通り，*MiLog* を用いることで，論理プログラミングに基づく高度な推論機構と，Web 処理機能（Web サーバ/クライアント機能）を持つエージェントを容易に実装可能である．

6.3 エージェントの交渉スキーマ

本節では，まず，本章における用語と記法を定義し，次に，エージェントの売買交渉プロトコルについて述べる．

買い手エージェント： 買い手エージェントの集合を， $B = \{b_1, b_2, \dots, b_l\}$ と表す．

売り手エージェント： 売り手エージェントの集合を， $S = \{s_1, s_2, \dots, s_m\}$ と表す．

財： 財の集合を， $G = \{g_1, g_2, \dots, g_n\}$ と表す．

売り手の所有財： 売り手は複数の種類の財を販売することが可能であるとし，売り手 s_j が所有する財の集合を， $G(s_j) = \{g(s_j)_1, g(s_j)_2, \dots, g(s_j)_n\}$ と表す．

買い手の希望財： 買い手 b_k が希望する財を、 $g(b_k)$ と表す。

価格テーブル： 売り手 s_j の財 g_i に関する価格テーブルを、関数 $p(s_j, g_i) : N \mapsto R$ と表す。ここで、 N は自然数、 R は実数である。 $p_{s_j, g_i}(n)$ は、売り手 s_j が、財 g_i を n 個同時に販売する場合の g_i の単価を示す。

財のコスト： 売り手 s_j が g_i の仕入れや生産にかかるコストを、 $cost(s_j, g_i)$ と表す。

希望価格： 買い手 b_k の財 g_i に対する希望価格を、 $r(b_k, g_i)$ と表す。ここでの希望価格とは、買い手 b_k が支払い可能な金額の上限であり、財の価格が $r(b_k, g_i)$ 以下であれば、 b_k は財を購入可能である。

売り手が販売可能な財の数： 売り手 s_j が売買において販売可能な財 g_i の数を、 $num_s(s_j, g_i)$ と表す。

買い手が希望する財の数： 買い手 b_k が希望する財 g_i の数を、 $num_b(b_k, g_i)$ と表す。

買い手の提携： 財 g_i に関する買い手の提携を $C(g_i)$ と表す。ただし、 $C(g_i) \subset B$ である。

提携が希望する財の数： 提携 $C(g_i)$ が希望する財 g_i の数を、 $num(C(g_i)) = \sum_{b_k \in C(g_i)} num_b(b_k, g_i)$ と表す。

取引における売り手の効用： 売り手 s_k が、買い手 b_k 、もしくは買い手の提携 $C(g_i)$ との間で取引を行う時、 s_k の効用を一般的な利潤と同様、収入と支出の差として定義する。すなわち、以下のように定義する：

$$u_{s_k}(g_i) = p_{s_j, g_i}(num_b(b_k, g_i)) \times num_b(b_k, g_i) - cost(s_j, g_i) \times num_b(b_k, g_i)$$

もしくは

$$u_{s_k}(g_i) = p_{s_j, g_i}(num(C(g_i))) \times num(C(g_i)) - cost(s_j, g_i) \times num(C(g_i))$$

買い手の提携の効用： 提携 $C(g_i)$ の効用を以下のように定義する：

$$u_{C(g_i)}(g_i) = \sum_{b_k \in C(g_i)} r(b_k, g_i) \cdot num_b(b_k, g_i) - p_{s_j, g_i}(num(C(g_i))) \cdot num(C(g_i))$$

E-GarageSale では、以下のプロトコルに従ってエージェントが売買交渉を行う。ここでの基本的なアイデアは、単独での財の売却に失敗した売り手エージェントが、他の売り手エージェントと在庫にある財を交換することで、買い手が希望する数の財を集めて売却を試みる、というものである。

(Step 1): 買い手エージェントが *E-GarageSale* にアクセスし、売買に関する要求を表明する。買い手エージェント b_k の要求は、希望価格 $r(b_k, g_i)$ と、希望する財の数 $num_b(b_k, g_i)$ から成る。ある時点において、同一の財 g_i の購入を希望する買い手エージェントが複数存在する場合、提携 $C(g_i)$ が形成される。

(Step 2): 売り手エージェント s_j が *E-GarageSale* にアクセスした時、提携 $C(g_i)$ が存在し、かつ $g_i \in G(s_j)$ であるならば、提携 $C(g_i)$ に対して財 g_i の売却を試みる。もし s_j が所有している財の購入を希望する提携が存在しないならば、あらかじめ定められた財の販売期限の間、所有している財 $G(s_j)$ の購入を希望する買い手エージェントのアクセスを待つ。

(Step 3): 提携 $C(g_i)$ は、財の単価 $p_{s_j, g_i}(num(C(g_i)))$ が、提携に属する全てのエージェントの希望価格以下であることを確認する。もし、希望価格が満たされないエージェントが提携内に存在するならば、 s_j との交渉を中断し、他の売り手を探す。ただし、条件を満たす売り手が存在しない場合、一部のエージェントとの提携を解消し、新たな提携 $C(g_i)'$ を形成する。ここでは、提携 $C(g_i)'$ を形成する全てのエージェントの希望価格が $p_{s_j, g_i}(num(C(g_i)'))$ 以上となるように、希望価格が低いエージェントから提携を解消していく。そのため、買い手のユーザは、適切な希望価格を設定しておく必要がある。極端に低い希望価格を設定した場合、提携を解消される可能性が高くなり、ボリュームディスカウントによる恩恵を受けられる見込みが小さくなる。買い手の提携に関しては、より詳細な考察が必要であるが、本章では売り手間の交渉に注目し、買い手に関しては詳しく議論しない。

(Step 4): $num_s(s_j, g_i) \geq num(C(g_i))$ が成り立つなら、売り手エージェント s_j は、財 g_i を提携 $C(g_i)$ へ売却する事が可能であるため、売買が成立し、交渉は終了する。もし、 $num_s(s_j, g_i) < num(C(g_i))$ ならば、(Step 5) へ。ここで、提携 $C(g_i)$ との売買が可能な売り手エージェントが複数存在する場合、より早い時間に *E-GarageSale* にアクセスしたエージェントが優先的に選択され、売買が成立する。例えば、2つの売り手エージェント s_1 と s_2 がこの順番で *E-GarageSale* にアクセスしたケースにおいて、提携 $C(g_i)$ が、どちらのエージェントとも売買が可能である場合、より早くアクセスした s_1 が選択される。

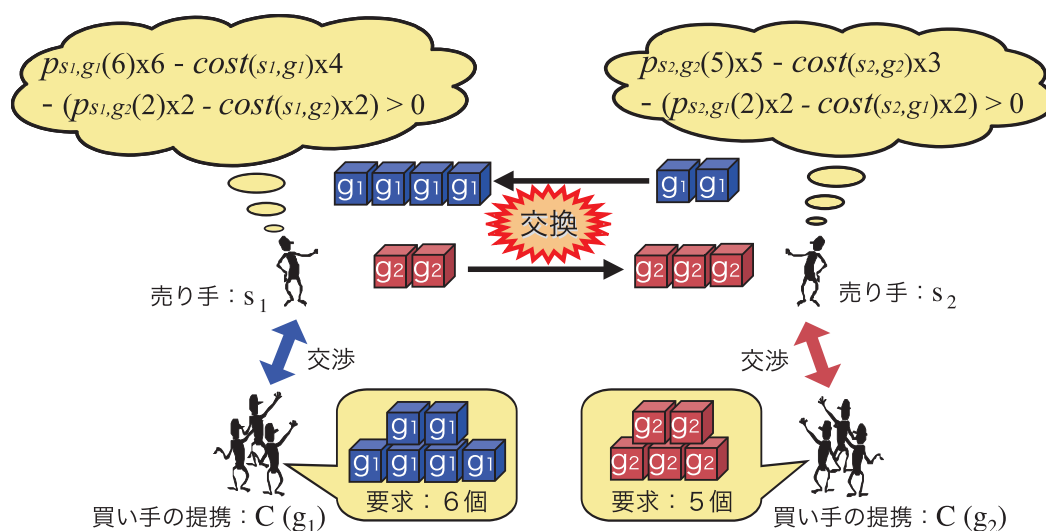


図 6.3 2つの売り手エージェント間の交換の例

(Step 5): 買い手エージェント（もしくはその提携）の要求を満足するために，売り手エージェント s_j は，財の交換に基づく交渉手法により，財 g_i の数の増加を試みる．すなわち，売り手エージェント s_j は，財 g_i を所有している他の売り手エージェント s_k から，不足分の財を獲得する．交渉において， s_j は g_i を得る代償として， g_i 以外の財 g_l を s_k に譲渡する．交換に基づく交渉の詳細は6.4節で述べるが，概要は以下の通りである．(1) 売り手エージェント s_j は，所有している g_i 以外の財 g_l との交換を希望している他の売り手エージェントを探す．(2) 財 g_l の交換を希望しているエージェントが存在する場合， s_j は交換を試みる．もしも交換が可能なエージェントが多数存在する場合には，最も良い条件で交換が可能なエージェントを選択する．(3) 交換が可能なエージェントが存在しない場合， s_j はあらかじめ定められた販売期限を越えるまで，交換可能な売り手エージェントのアクセスを待つ．

6.4 財の交換に基づく交渉手法

6.3節の (Step 5) において，売り手エージェント s_j が，買い手が要求する個数以上の財を所有していない場合， s_j は財の交換に基づく交渉により，不足分の財を得る．2つの売り手エージェントが交渉に成功した場合，それぞれのエージェントは，効用を増加させることができる．また，売り手エージェント間の交渉が成功することで，買い手エージェントもより多くの割引を期待できる．以下に，2

つの売り手エージェント間での財の交換に基づく交渉手法を示す。

図 6.3 に交渉の例を示す。本例では、2 つの売り手エージェント s_1 と s_2 が存在している。売り手エージェント s_1 は、財 g_1 を 4 個、財 g_2 を 2 個所有しているとし、売り手エージェント s_2 は、財 g_1 を 2 個、財 g_2 を 3 個所有しているとする。ここで、買い手の提携 $C(g_1)$ が、売り手エージェント s_1 に対して財 g_1 を 6 個要求し、別の提携 $C(g_2)$ が、売り手エージェント s_2 に対して財 g_2 を 5 個要求していると仮定する。この場合、売り手エージェント s_1 は、十分な数の財 g_1 を所有していないため、提携 $C(g_1)$ との売買を成立させることができない。そこで、売り手エージェント s_2 と交換に基づく交渉を行い、財 g_1 を得ることで売買の成立を試みる。

まず、売り手エージェント s_1 が次の提案を行う：『 s_1 が財 g_2 を 2 個 s_2 に渡し、 s_2 は財 g_1 を 2 個 s_1 に渡す』。この時、交換に関する売り手の効用が以下の条件を満たすならば、売り手エージェント s_1 と s_2 はこの提案に合意する。

s_1 に関して：

$$(p_{s_1, g_1}(6) \times 6 - \text{cost}(s_1, g_1) \times 4) - (p_{s_1, g_2}(2) \times 2 - \text{cost}(s_1, g_2) \times 2) > 0$$

かつ、 s_2 に関して：

$$(p_{s_2, g_2}(5) \times 5 - \text{cost}(s_2, g_2) \times 3) - (p_{s_2, g_1}(2) \times 2 - \text{cost}(s_2, g_1) \times 2) > 0$$

すなわち、売り手エージェント s_1 は、エージェント s_2 から 2 個の財 g_1 を得て、6 個同時に財 g_1 を売却して得られる効用が、自分自身で財 g_2 を 2 個同時に売却して得られる効用よりも大きいならば交換に合意する。一方、売り手エージェント s_2 も同様に、エージェント s_1 から 2 個の財 g_2 を得て、5 個同時に財 g_2 を売却して得られる効用が、自分自身で財 g_1 を 2 個同時に売却して得られる効用より大きいならば交換に合意する。双方のエージェントが交換に合意できた場合にのみ、2 エージェント間で交換が成立する。以上の条件が満たされる場合、双方のエージェントが効用を増加できるため、エージェントにとっては、財の交換を行うことが合理的な行動となり得る。財の交換条件の定義を以下に示す。

定義：財の交換条件

2 つの売り手エージェント s_1 および s_2 と、2 種類の財 g_1 および g_2 が存在する場合に、エージェントは、以下の 2 通りのケースにおいて売買の成立が可能である。

【Case 1】

$$\text{shortage}(s_1, g_1) = \text{num}(C(g_1)) - \text{num}_s(s_1, g_1) > 0$$

かつ,

$$shortage(s_2, g_2) = num(C(g_2)) - num_s(s_2, g_2) > 0$$

として, s_1 の効用が,

$$\begin{aligned} u(s_1) = & p_{s_1, g_1}(num(C(g_1))) \times num(C(g_1)) - cost(s_1, g_1) \times num_s(s_1, g_1) \\ & - (p_{s_1, g_2}(shortage(s_2, g_2)) \times shortage(s_2, g_2) - cost(s_1, g_2) \\ & \times shortage(s_2, g_2)) > 0 \end{aligned}$$

かつ, s_2 の効用が,

$$\begin{aligned} u(s_2) = & p_{s_2, g_2}(num(C(g_2))) \times num(C(g_2)) - cost(s_2, g_2) \times num_s(s_2, g_2) \\ & - (p_{s_2, g_1}(shortage(s_1, g_1)) \times shortage(s_1, g_1) - cost(s_2, g_1) \\ & \times shortage(s_1, g_1)) > 0 \end{aligned}$$

である場合.

【Case 2】

$$shortage(s_1, g_2) = num(C(g_2)) - num_s(s_1, g_2) > 0$$

かつ,

$$shortage(s_2, g_1) = num(C(g_1)) - num_s(s_2, g_1) > 0$$

として, s_1 の効用が,

$$\begin{aligned} u(s_1) = & p_{s_1, g_2}(num(C(g_2))) \times num(C(g_2)) - cost(s_1, g_2) \times num_s(s_1, g_2) \\ & - (p_{s_1, g_1}(shortage(s_2, g_1)) \times shortage(s_2, g_1) - cost(s_1, g_1) \\ & \times shortage(s_2, g_1)) > 0 \end{aligned}$$

かつ, s_2 の効用が,

$$\begin{aligned} u(s_2) = & p_{s_2, g_1}(num(C(g_1))) \times num(C(g_1)) - cost(s_2, g_1) \times num_s(s_2, g_1) \\ & - (p_{s_2, g_2}(shortage(s_1, g_2)) \times shortage(s_1, g_2) - cost(s_2, g_2) \\ & \times shortage(s_1, g_2)) > 0 \end{aligned}$$

である場合.

例外的なケースとして, 2つの売り手エージェントが存在する場合に, 上述のいずれの条件も満たされるケースが考えられる. つまり, 売り手エージェント s_1 が, s_2 に財 g_1 を渡して財 g_2 を得ることができ, また同時に, s_1 が s_2 に財 g_2 を渡して財 g_1 を得ることができる場合である. これは, 双方の売り手が, 同時に2つの財 g_1 と g_2 に関する交換相手を探している場合に生じ得るケースである. このようなケースでは, エージェントは社会的余剰, すなわち2つのエージェントの効用の和を最大化する取引を選択する. もしも, どちらの取引でも得られる社会的余剰が変わらない場合, エージェントはランダムにいずれかの取引を選択する.

また、2つ以上の売り手エージェントが存在する場合に、交換が成立可能なエージェントの組み合わせのパターンが複数存在する場合が考えられる。例えば、売り手エージェント s_1 と s_2 の間で交換が可能な場合に、別のエージェント s_3 が存在し、 s_1 と s_2 のいずれとも交換が可能なケースが考えられる。この場合、6.3 節の (Step 4) で述べた通り、*E-GarageSale* へのアクセス順に基づいて、エージェントの優先度が決定される。例えば、アクセスした時間が、 s_3 、 s_2 、 s_1 の順番で早いならば、売り手エージェント s_2 および s_3 の間で交換が成立する。

6.5 提案手法の評価

提案手法の有効性を示すためにシミュレーション実験を行った。本実験の基本的な設定は以下の通りである。

- 売り手の数: 20
- 買い手の数: 500
- 財の値段: 200 ~ 300
- 財の種類の数: 10
- 売り手が所有可能な財の最大数: 10
- 財に関する買い手の分布: 正規分布
- 売り手が所有する財の数量の分布: 一様分布
- 売り手の各財に対する価格の分布: 一様分布

ここで、“財に関する買い手の分布”は、買い手の各々の財に対する需要量を表すパラメータであり、標準正規分布（平均：5，標準偏差：1）に従う。本パラメータは、財に対する需要の偏りを疑似的に表現するために用いられる。“売り手が所有する財の数量”は、売り手が所有可能な財の最大数を上限として一様に分布しているとし、各財について売り手ごとに供給量を変化させている。また、“売り手の各財に対する価格”は、基準となる価格（本実験では1000）から $[-100, 100]$ で一様に分布しており、同一の財に対する売り手ごとの販売価格の変動を表す。本実験において、売り手は、ディスカウントする財の上限を5個とし、同時に販売する財の数が増えるごとにディスカウント率を0.02ずつ増加させる。すなわち、買い手は、最高1割値引きの価格で財を購入可能である。簡単のため、本実験で

は、買い手エージェントの希望価格は売り手の提示する価格以上であると仮定し、買い手の提携の解消は考慮しない。

本実験では、提案手法と既存の手法との比較を行った。提案手法は、6.3 節で示した (Step 1) から (Step 4) の手順から成る。一方、既存の手法は、(Step 1) から (Step 3) の手順から成る。本実験では、上で挙げたパラメータを変化させ、いくつかの異なる設定の元で比較を行った。実験では、各々の設定の元で 1000 回試行し、1 試行は 1000 単位時間とした。1 単位時間は、提案手法では (Step 1) から (Step 4)、既存の手法では (Step 1) から (Step 3) とした。買い手エージェントと売り手エージェントは、 n 単位時間毎に電子マーケットに 1 つずつ新たに参加するものとした。ここで、 n はエージェントの総数に反比例する数である。

図 6.4、図 6.5、図 6.6、および図 6.7 に実験の結果を示す。図 6.4 と図 6.5 は、売り手の数に関して、売り手の効用、および財の販売率を比較した結果を示す。図 6.6 と図 6.7 は、売り手が所有可能な財の最大数に関して、売り手の効用、および財の販売率を比較した結果を示す。ここで、本実験における販売率とは、個々の売り手に関して計算される、所有している財の数に対する販売した財の数の割合を意味する。また、図 6.4 および図 6.6 では、縦軸は売り手の効用の平均値を表し、図 6.5 および図 6.7 では、縦軸は財の販売率の平均値を表す。

図 6.4、および図 6.5 では、売り手の数に関する比較において、提案手法の方が既存の手法よりも多くの効用と高い販売率を得られることが示されている。特に、売り手の数が 10 から 25 の範囲では、効用に関しては既存の手法の 2 倍、財の販売率に関しては、3 倍から 5 倍の値が得られている。また、実験結果では、売り手の数が少ない時に、得られる効用も財の販売率も共に減少している。これは、買い手の数に比べて売り手の数が少ないために、十分な数の取引が行われなかったためである。

図 6.6 以外の全ての結果において、売り手の効用、および財の販売率が、最終的には既存の手法とほぼ同じ値に収束することが示されている。これは、図 6.4、および図 6.5 の実験では、売り手が所有可能な財の最大数が 10 に固定されているために、売り手の数が増加するにつれて売買の機会が減少するためである。売買の機会が減少することにより、個々の売り手が得られる効用、および財の販売率は自然に減少する。また、図 6.7 の実験では、売り手の数は 5 で固定されているが、買い手全体が要求する財の数は変化しない。そのため、個々の売り手が所有可能な財の個数が大きくなるにつれて、財の供給量が過剰になり、販売率が減少する。一方、図 6.6 に示す実験結果において売り手の効用が増加しているのは、所有可能な財の最大数が増加することで、売買が成立する可能性が増加するから

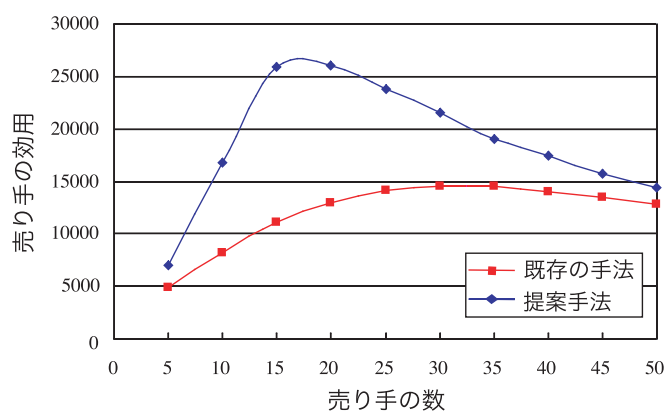


図 6.4 売り手の数に関する売り手の効用の比較

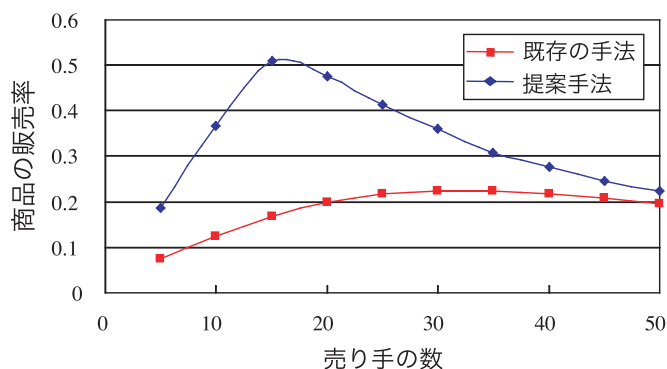


図 6.5 売り手の数に関する財の販売率の比較

である．なお，図 6.4 で売り手の数が 20 である場合と，図 6.6 で売り手が所有可能な財の最大値が 10 である場合は，売買条件が全く同じになるため，グラフ上でも同一の効用が得られている．

全ての実験において，提案手法と既存の手法が異なる値に収束している点に関する考察を以下に述べる．まず，図 6.4，および図 6.5 に結果を示す実験では，買い手の数，および所有可能な財の最大数は定数で，それぞれ 500 と 10 である．既に述べたように，たとえ売り手の数が増加しても，買い手の数は増加しないため，個々の売り手の効用と販売率は減少する．実際には，売り手と買い手の間で成立する売買の数は，売り手の数の増加と共に減少し，最終的に，買い手の数 500，および財の最大数 10 に依存した値に収束する．また，図 6.6，および図 6.7 に結果を示す実験では，買い手の数，および売り手の数は定数で，それぞれ 500 と 5 である．この実験では，所有可能な財の数の最大数が増加しても，買い手の要求は

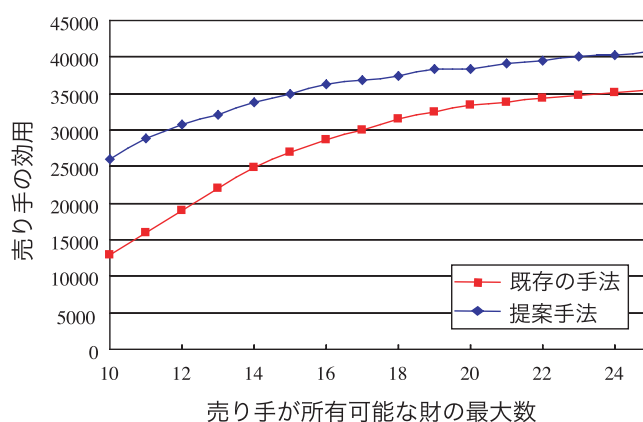


図 6.6 売り手が所有可能な財の最大数に関する売り手の効用の比較

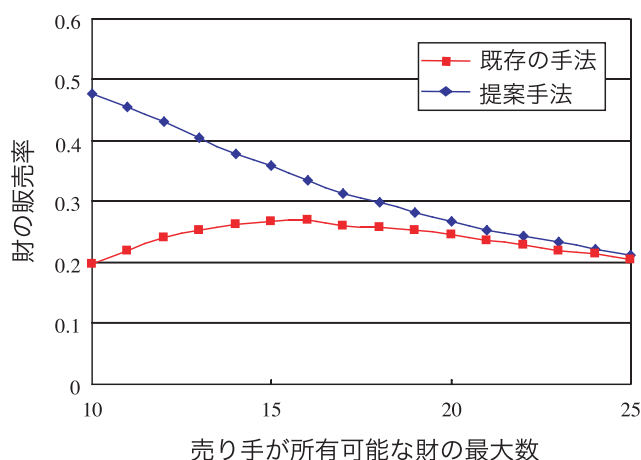


図 6.7 売り手が所有可能な財の最大数に関する財の販売率の比較

変化しないため、最終的に買い手の数 500，および売り手の数 5 に依存した値に収束する．

本章で提案した *E-GarageSale* は P2P に基づく分散型の電子マーケットシステムである．ここでは，P2P ネットワークを介して，エージェント同士が，売買に関連する比較的小規模なコミュニティを動的に構成し，交渉を行う事が予想される．従って，本節の実験で用いた，売り手の数が 50 という設定は，P2P に基づく本システムの有効性を検証するためには，十分に妥当なものであると言える．実験結果により，売り手が 50 以下の場合では，提案手法が一貫して有効であることが示されている．

6.6 議論

6.6.1 提案手法の有用性

本節では、本章で提案した、売り手エージェントの交換に基づく交渉手法について、議論と考察を行う。

まず、売り手エージェントが交換を行う際に考えられるコストについて議論する。提案手法を実際に実行する場合、交換を試みる相手の探索、および交換の可能性の見積もり等のタスクが必要となる。実世界ではこれらのタスクから生じるコストは無視できない。しかし、*E-GarageSale* では、これらのタスクはソフトウェアエージェントによって自動的に処理される。ここでの、ソフトウェアによって自動的に支援できる処理のコストは小さく、現実的には無視することができる。また、その他のコストとして、商品を交換する際に生じる、財の相互輸送のコストがある。ここでの輸送コストは、買い手への財の配送に関するサービスのレベルで対処可能と考えられる。例えば、買い手 b_i と交渉中の売り手 s_j が、他の売り手 s_k から交換によって財を獲得した場合、売り手間で物理的な交換は行わず、 s_k から b_i に直接商品を配送する手続きを整備することで、相互輸送のコストを排除できると考えられる。

本章では、売り手の財が不足した場合に、不足分の財を獲得する手法として、交換に基づく交渉を提案した。本章では、取引において売り手に財の不足が生じた場合、不足分の財を獲得する方法を、財の交換に基づく交渉に限定して議論している。不足分を獲得するための別の方法として、ある売り手 s_j が一時的に買い手となり、他の売り手 s_k から財を購入する方法が考えられる。売り手 s_j は、自身が販売する財の数よりも少数の財を s_k から購入することになる。そのため、多くの場合において $p_{s_j, g_i}(\text{num}(C(g_i))) \leq p_{s_k, g_i}(\text{num}(C(g_i)) - \text{num}_s(s_j, g_i))$ となると考えられる。すなわち、売り手 s_j は、他の売り手 s_k から購入する際の財の単価と、買い手に販売する際の財の単価の差分を負担しなければならない。一方、交換に基づく交渉では、6.4 節で述べた財の交換条件に基づいて交換が試みられる。本交換条件に基づいて交換の可否を判断することにより、不足分の財を補って買い手との取引を成立させた場合の、売り手の効用の減少を回避することができる。すなわち、売り手から財を購入する場合のように、買い手との取引において余分な金額を負担する必要はない。本章では、ランダムに設定した売り手の価格テーブルを用いたシミュレーション実験を行い、提案する交換に基づく手法の有効性を確認している。

近年、実際に運営されている商業電子商取引サイトである、楽天市場や BID-

DERS (<http://www.bidders.co.jp>)において、共同購入による売買の仕組みが提供されており、複数の買い手が同一の財を共同で購入する売買方式が一般に普及しつつある。しかし、各サイトが提供している既存のシステムは、機能的に限定された仕組みになっている。ここでは、売買活動は売り手／買い手間でのみ可能であり、売り手間では財や情報のやり取りを行うことはできない。本章で提案した交渉手法は、売買活動の活性化のために、売り手間での財のやりとりを可能にしている。本手法は、ソフトウェアエージェントに基づく商取引システムをより柔軟にし、様々な売買環境への適用を可能にする。以上により、本章で提案する、売り手エージェント間の財の交換に基づく手法は、既存の商取引の枠組みを拡張でき、広範囲に適用が可能である。

6.6.2 関連研究

本節では、関連研究について各々の概要と本研究との相違点を述べる。

GroupBuyAuction [95] は、*E-GarageSale* と同様に、ボリュームディスカウントを考慮した電子マーケットである。文献 [95] では、買い手エージェントの効果的な提携スキームと提携内での余剰の分割手法について論じられている。一方、本章における提案手法は、買い手の提携に対し、売り手が常に単独で売買を行うのではなく、状況に応じて他の売り手と交渉し、財の売却を行う方法を提案している。つまり、ある財の売買において、複数の売り手と買い手が関係し、効率的な売買を実現する方法を提供している。

WWW上に仮想的なマーケットプレースを提供するシステムとして、第2章で述べた Kasbah [19]、および Tête-à-Tête [31] がある。Kasbah では、ユーザは、自分の代理として売買を行うエージェントを生成／利用する。ここで、エージェントは、自律的に適切な価格での売買の成立を試みるが、ある財の売買において、同時に複数のエージェントが関係することはなく、売買プロトコル自体も単純である。Tête-à-Tête では、エージェントが協調的な売買交渉を行う。ユーザは、用意されている数種類の効用関数の中から、自分の選好にあった関数を選択し、エージェントに与えることで、エージェントの行動を制御することができる。Tête-à-Tête におけるエージェントの交渉は、ユーザの好みをより高いレベルで満足する一つの方法としては非常に興味深い。しかし、Tête-à-Tête では、複数の売り手／買い手エージェントによる売買は行われない。そのため、多数のエージェントが存在する場合の、効率的な売買については考慮していない。

6.7 結言

本章では、電子マーケットシステム *E-GarageSale* における売買の効率化のために、ボリュームディスカウントに基づく交渉プロトコルに着目した。本プロトコルの導入により、買い手エージェントは多数の財を同時に購入することで効用の増加が見込め、売り手エージェントは短期間に効率的に財を販売することができる。しかし、売り手エージェントは、常に十分な数の財を所有しているとは限らないため、財の販売機会を失う可能性がある。そこで本章では、売り手が不足分の財を獲得するための、財の交換に基づく交渉手法を提案した。本手法により、より安い価格で財を購入できる可能性が高まるため、売り手エージェントだけでなく、買い手エージェントの効用の増加も実現できる。本章では、提案手法の有効性を確認するためのシミュレーション実験を行った。*E-GarageSale* では、エージェントがP2Pネットワークを介して比較的小規模なコミュニティを動的に構成し、売買を行う。実験により、このような状況において提案手法が有効に作用することを明らかにした。

第 7 章

数量化された選好による 議論の形式に基づく交渉方式

7.1 序言

実世界での商取引において，人は価格のみに基づいて財を評価する訳では無い．一般的には，様々な属性（評価基準）に基づいて財を評価し，そこでの評価に基づいて商取引を試みる．第 2 章で述べた BargainFinder の研究における考察から，商取引においては財の付加価値を考慮する仕組みが必要と考えられている．第 6 章では，オークションプロトコルに拠らない商取引の方法として，財の交換に基づく交渉手法を提案したが，本手法では，財の金銭的価値にのみ注目しており，財の付加価値については全く考慮できない．本章では，複数の評価基準に基づく財の評価を反映し，エージェントが合意形成を行うための，基本的な計算メカニズムの開発を行う．

本章では，エージェント間の競合解消の有望なアプローチとして注目を集めている，議論に基づく交渉方式 [7, 61, 62, 80] に着目している．議論に基づく交渉では，エージェントが理由付け（正当化）を伴う提案，および逆提案を繰り返すことで競合を解消し，合意形成を試みる交渉方式である．本章では，複数の代替案から，交渉によって最も好ましい代替案を全体の合意案として決定するための，エージェント間の議論の形式に基づく交渉方式を実現する．既存の研究では，エージェントが保持する好みや知識を論理表現に基づいて表現し，どのエージェントの選好とも無矛盾な提案を探索する過程を議論として定式化している．本章では，エージェントが持つ知識を，ユーザの代替案に関する評価の根拠となる情報と見なす．エージェントは，これらの情報の一部を提案として表明する．また，表明

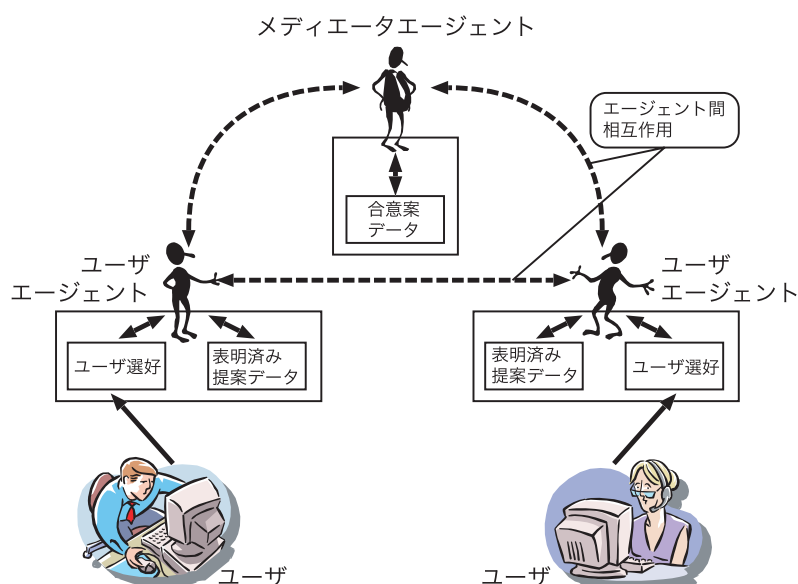


図 7.1 システム構成

された全ての提案を総合的に評価することで、交渉の過程において自律的に交渉戦略を変更することができる。

本章の構成を以下に示す。7.2 節で、システムの構成とエージェントの議論に基づく交渉の実現方法について示す。7.3 節では、複数のエージェントが議論に基づく交渉によって合意を形成するための交渉プロセスについて示す。7.4 節では、提案手法の有用性について議論する。

7.2 議論の形式による合意形成

7.2.1 システム構成

本章で提案する交渉手法を用いるマルチエージェントシステムの構成図を、図 7.1 に示す。本システムは、各ユーザに 1 つずつ割り当てられる複数のユーザエージェントと、1 つのメディエータエージェントから成る。ユーザエージェントは、2 種類のデータを保持している。1 つは、ユーザが入力した複数の評価基準に基づく代替案の評価である。ユーザエージェントは、このデータをユーザのプライベートなデータとして扱い、直接の書き換えは行わない。ユーザによる評価は、数量化手法の一つである AHP (Analytic Hierarchy Process) [72] によって数量化される。もう 1 つのデータは、交渉の過程で送信 / 受信する複数の提案である。

ユーザエージェントは、これらの提案を総合的に評価し、交渉中のある時点において、最も評価が高い代替案、および新しい提案の生成可能性を判断する。

メディエータエージェントは、エージェント全体の合意を促進する役割を果たす。メディエータエージェントは、各エージェントの希望代替案の情報を内部データとして保持し、交渉の過程で、この内部データに基づいて適切なユーザエージェントに交渉への参加を促し、合意形成を促進する。最終的に、全てのエージェントが合意に達すると、メディエータエージェントは、全ユーザエージェントに結果をブロードキャストし、交渉を終了させる。

7.2.2 選好の数量化

7.2.1 節で述べたように、本章で提案する交渉手法では、エージェントは、ユーザの代替案に対する評価に基づいて提案を生成する。通常、人は複数の評価基準に基づいて各代替案の評価を決定する。このような問題は一般に、多属性効用理論 [46] において扱われる。多属性効用理論では、代替案が A_i 、属性（つまり評価基準）が X_1, X_2, \dots, X_n 、および各属性値が $x_1(A_i), x_2(A_i), \dots, x_n(A_i)$ である場合、代替案 A_i の効用 $u(A_i)$ が以下の式で与えられる。

$$u(A_i) = f(f_1(x_1(A_i)), \dots, f_n(x_n(A_i))) \quad (7.1)$$

ここで f は、属性値を評価する関数であり、応用領域において適切な関数である。本研究では、これらの計算を行うために、人間の主観的な評価を数量化するための数量化手法である AHP を利用する。AHP は、複数の代替案を複数の評価基準に基づいて評価する際に有効な数量化手法である。AHP の手順は以下の通りである：(1) 問題を目的、評価基準、および代替案に分解し、階層図を構築する。図 7.2 に、AHP における階層図を示す。図では、問題が、目的（財の購入）、評価基準（価格、色、サイズ）、および代替案（財 A、財 B、財 C）に分解されている。(2) 階層図の各階層において、一対比較によるノード間の重み付けを行う。図 7.2 では、評価基準“価格”に関する、代替案の一対比較の例が示されている。ここでは、一対比較の結果、価格に関しては財 C が最も高く評価されている。(3) 各階層のノードの重み付けに基づいて、目的に関する各代替案の重要度 W_A, W_B, W_C を計算する。

代替案の重要度によって、ユーザの代替案に対する選好を以下のように定義できる。ここでは、代替案 A_i の重要度を W_i と表す。

$$W_i > W_j \Leftrightarrow A_i \succ A_j \quad (7.2)$$

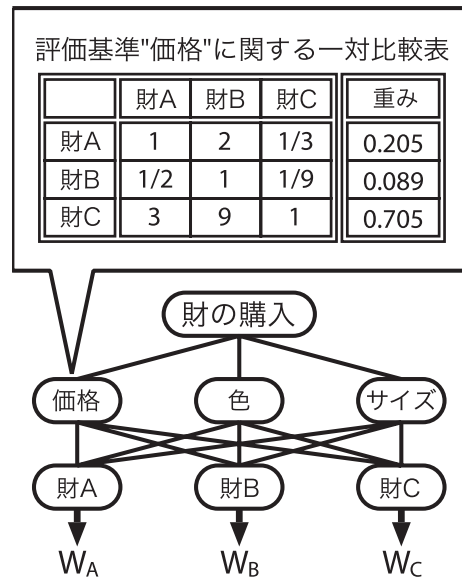


図 7.2 AHP における階層図

$$W_i = W_j \Leftrightarrow A_i \sim A_j \quad (7.3)$$

式 (7.2) は、ユーザが代替案 A_j よりも代替案 A_i を好んでいることを表し、式 (7.3) はユーザが代替案 A_i と A_j を同程度に好んでいることを表す。以上より、ユーザの主観的評価に基づく、代替案の選好順序を決定することができる。

7.2.3 議論の形式に基づく交渉

本節では、交渉の最小単位である、2つのエージェントが提案手法に基づいて交渉を行う方法について述べる。

本章での提案手法における最終的な合意案は、『新たに提案を生成可能なエージェントが存在しない状況で、既に表明された全ての提案を総合的に評価し、最も評価が高い代替案』と定義する。交渉における個々のエージェントの目的は、ユーザが最も高い評価を与えている代替案を合意案とすることである。従って、最も評価の高い代替案が異なるエージェントは、競合解消のために交渉を行う必要がある。

エージェントが生成する提案の形式を定義する。ここでは、代替案が m 個、代替案を評価する評価基準が n 個あるとして、それぞれ $A_1, A_2, \dots, A_m, C_1, C_2, \dots, C_n$ と表す。エージェントは提案 P を表明することによって、最も好ましい代替案 A_i を主張する。さらに提案 P には、主張 A_i を正当化するための情報 V が付加される。 V は

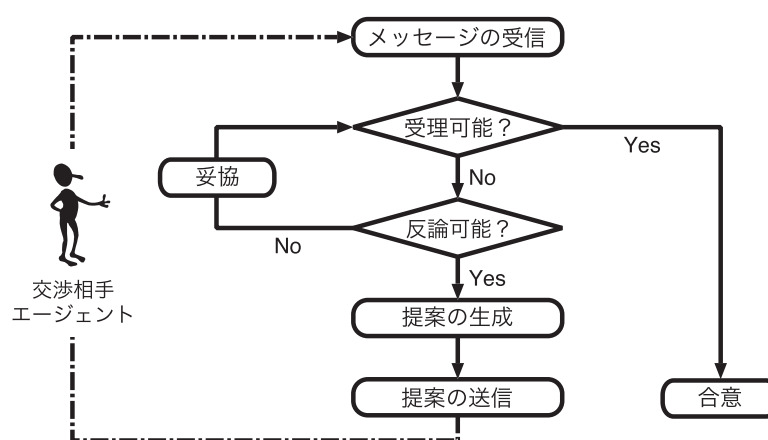


図 7.3 2 エージェント間の交渉プロセス

1つの評価基準 C_j と、 C_j に基づく代替案の評価値の集合 $\{v(A_1), v(A_2), \dots, v(A_m)\}$ から成る．以上より，提案 P は以下のように定義される．

$$P = (A_i, V)$$

$$V = (C_j, \{f(v(A_1)), f(v(A_2)), \dots, f(v(A_m))\})$$

ここで， f は各応用領域ごとに適切な関数である．本章では，7.2.2 節で述べた通り，関数 f の計算は AHP を用いて行っている．また， $P = (A_i, \phi)$ の場合は，代替案 A_i を合意案として受理するメッセージであることを表す．

提案手法に基づく，2 エージェント間の交渉プロセスを以下に示す（図 7.3）．

Step 1: メッセージを受信したエージェントは，提案が受理可能かどうかを判断する．もし，受理した提案が主張している合意案と，その時点で最も好ましいと評価している代替案（希望合意案）が一致するならば，提案を受理して合意する．提案を受理できない場合は，次のステップに進む．

Step 2: 提案を受理しない場合，エージェントは，希望合意案を，全体の合意案として主張可能かどうかを判断する．つまり，受信した提案を否定し，その時点での希望合意案を，全体の合意案として主張する逆提案を生成可能かどうかを判断する．具体的には，エージェントは，既に表明された提案と，生成可能な提案をもとに，一時的な階層図を生成し，代替案の評価を計算する．ここで，最も評価が高い代替案と，希望合意案が一致するならば，エージェントは，逆提案を生成できる．もし，逆提案が生成できない場合，エージェントは合意案に関する妥協を行う．具体的には，次善の評

価を得ている代替案を，新たな希望合意案とする．その後，Step 1 から処理をやり直す．

Step 3: 希望合意案を全体の合意案として主張する提案を生成する．正当化が複数存在する場合は，最も有効な正当化を選択する．正当化の有効性の度合いは，7.2.2 節で述べた，AHP によって得られる代替案の重みに基づいて決定する．つまり，希望代替案の評価が最も高くなる正当化を用いることとする．

Step 4: 生成された提案を相手に送信する．以後，合意に達するまでこれらの処理を繰り返す．

2つのエージェント，Agent1 と Agent2 による議論の例を図 7.4 に示す．Agent1 と Agent2 は，それぞれ， C_1, C_2, C_3 と C_1, C_2, C_4 の3つの評価基準に基づいた代替案の評価を保持しており，代替案の選好順序は，それぞれ $A \succ B \succ C$ ， $B \succ A \succ C$ となっている．従って，初期状態における Agent1 の目的は代替案 A で合意することであり，Agent2 の目的は代替案 B で合意することである．まず Agent1 が，評価基準 C_2 に基づく評価を正当化として，代替案 A を合意案として主張する提案を送信する．次に，Agent2 は，逆提案が生成可能であると判断し，評価基準 C_4 に基づく評価を正当化として，代替案 B を合意案として主張する提案を送信する．さらに，Agent1 も評価基準 C_3 に基づく評価を正当化として，代替案 A を合意案として主張する提案を送信する．この時，Agent2 は代替案 B を主張して Agent1 の提案を否定する逆提案を生成することができない．そこで Agent2 は妥協し，目的を代替案 B の次に選好順序が高い代替案 A で合意することに変更する．図 7.4 の例では，希望合意案が一致するため，Agent1 の提案を受理して，代替案 A で合意する．

7.3 複数エージェント間の交渉プロセス

本節では，7.2.3 節で述べた手法に基づいて，複数のエージェントが合意を形成する方法について述べる．ここでは，合意形成の効率化のために，メディエータエージェントが，状況に応じて交渉するエージェントのペアを決定する．メディエータエージェントは，合意形成の促進のために，以下のポリシーに従って機能する．

Policy 1: 希望代替案が同一であるエージェントは，協調的なグループとみなす．そのため，反論のための提案を生成出来ないエージェントに対して，妥協

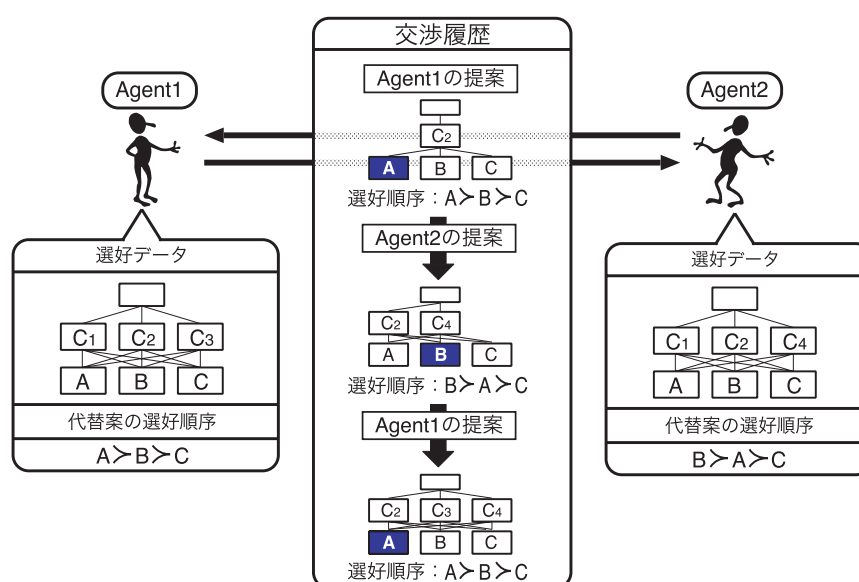


図 7.4 提案手法に基づく交渉例

を指示する前に、グループ内の他のエージェントに対して、反論，すなわち逆提案の生成が可能であることを問い合わせ、交渉への参加を依頼する．反論可能なエージェントが存在し、かつ、そのエージェントの反論に対して他のエージェントが反論出来ない場合（つまり交渉に勝った場合），元々反論のための逆提案が生成できなかったエージェントも、同様に交渉に勝ったと見なし、妥協のための処理は行わない．一方、もし、グループ内のどのエージェントも反論できない場合には、それらのエージェントは全て合意案に関して妥協する．このように、メディエータエージェントは、同一の代替案を合意案としているエージェントを、逐次的に交渉に参加させるように機能する．

Policy 2: メディエータエージェントは、ある時点において、最も多くのエージェントが希望している代替案が、全体の合意案としてふさわしいと仮定してペアを生成する．例えば、代替案 A を希望しているエージェントが3つ、代替案 B を希望しているエージェントが2つ、および代替案 C を希望しているエージェントが1つ存在する場合、メディエータエージェントは、代替案 A が合意案となることを期待し、代替案 A を希望しているいずれかのエージェントに交渉の機会を与える．上述した Policy 1 より、交渉に勝つためには、同じ代替案を合意案として希望しているエージェント数が多いほど有利となるため、効率的な合意形成が期待できる．

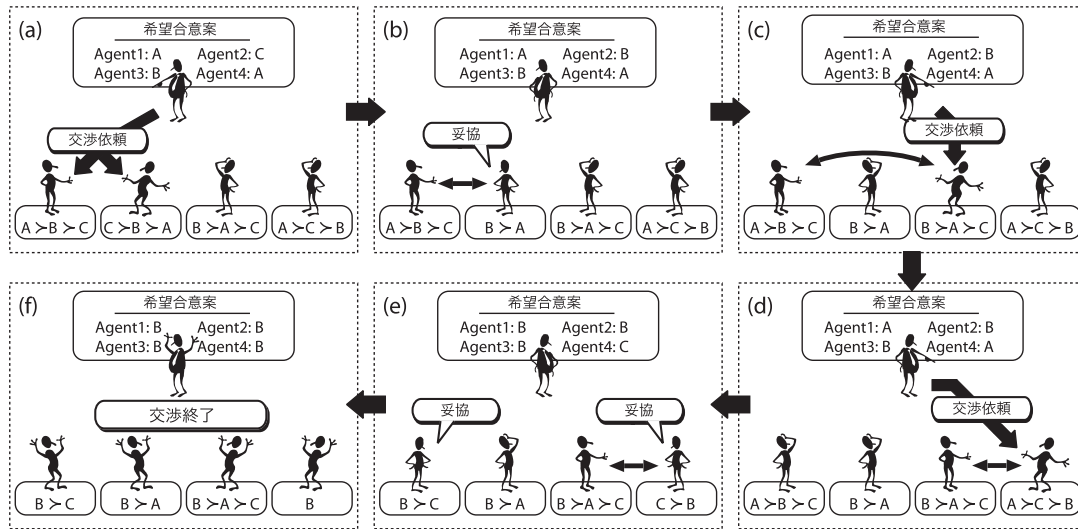


図 7.5 複数エージェントの交渉

図 7.5 に複数のエージェントによる交渉の例を示す．本例では，4 つのユーザエージェントが存在し，代替案に対する選好順序は，それぞれ $A \succ B \succ C$ ， $C \succ B \succ A$ ， $B \succ A \succ C$ ，および $A \succ C \succ B$ である．図 7.5 (a) は初期状態で，この時点では，代替案 A を希望しているエージェントが最も多い．従って，メディエータエージェントは Agent1 と Agent2 に交渉を依頼する．この交渉において，Agent2 は妥協し，代替案 B を合意案とすることに戦略を変更する（図 7.5 (b)）．さらに，Agent2 が代替案 B を主張する提案の生成が不可能となった場合，メディエータエージェントは，代替案 B を合意案として希望している Agent3 に対して，Agent2 の代わりに交渉に参加することを依頼する（図 7.5 (c)）．図 7.5 (d) では，(c) の場合と同様，Agent4 に対して，提案の生成が不可能となった Agent1 の代わりに，交渉に参加することが依頼されている．その結果，図 7.5 (e) のように，Agent1 と Agent4 がそれぞれ妥協し，Agent1 は代替案 B で合意する．Agent4 は代替案 C で合意することへ戦略を変更するが，最終的にはさらに妥協することによって代替案 B で合意する（図 7.5 (f)）．以上の通り，全てのエージェントが合意することができる．

7.4 議論

本章における提案手法の効果を確認するための検証実験を行った．本実験では，15 個のエージェントが，6 個の代替案に関して合意形成を試みとする．各々のエージェントの代替案に関する評価値は，ランダムに与えるとする．本実験では，

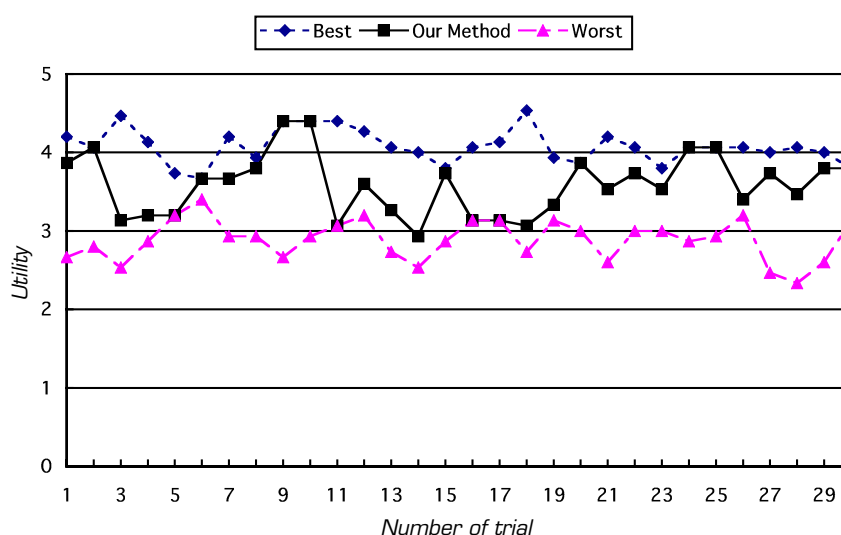


図 7.6 実験結果：効用の比較

投票の一方式である順位評点法（ボルダ方式）の投票における評点を効用と定義する．順位評点法は，投票者にとって，比較的受け入れられやすい結果を得られる投票方式として知られている [119]．図 7.6 は実験結果を示している．図 7.6 の“Best” のグラフは，各試行において取り得る最も高い効用を示している．逆に，“Worst” のグラフは，取り得る最も低い効用を示している．本章における提案手法に基づいて得られる効用は，“Our Method” のグラフで示されている．図 7.6 に示す結果から，提案手法では，基本的には“Best” と “Worst” の中間の値を取り，極端な値を取るケースが少ない事が分かる．これはすなわち，提案手法により，多数派や少数派にとらわれない，中庸な結果が得られる事を意味している．また，“Worst” の値が非常に低い場合，そのような好ましく無い合意を得ることを回避出来ている．

売買に関係する複数のエージェントの存在が考えられる電子マーケットでは，複数の買い手，および売り手間での提携の形成に関して考慮しなければならない．本章で提案した交渉手法は，複数の買い手間，および売り手間での提携形成，および提携内での意思決定等において利用が可能と考えられる．例えば，複数の買い手から成る提携において財を購入する売り手を決定する際に，売り手が提供する各種サービス等を評価基準とする売り手の評価を利用し，本手法に基づいて，取引をするひとつの売り手を決定できる．

ユーザの高い満足度，および納得を得るためには，適切にユーザの選好を反映し，かつ安易に他のユーザの選好に沿った合意を形成しない交渉手法が望ましい

と考えられる．本章における提案手法は，議論の形式に基づくことで，必要に応じて，逐次ユーザの選好を表明することを可能にしている．また，本節で示した実験結果により，多数意見にとらわれない合意形成が可能であることが示された．

7.5 結言

本章では，数量化されたユーザの選好を用いた，議論の形式に基づく交渉方式について論じた．本交渉方式は，エージェントによる商取引を高度化するための，基本的な交渉メカニズムとして利用することを目的としている．議論の形式による交渉に関する既存の研究では，論理に基づいた形式化が行われている．そのため，交渉の過程で生成される提案を定量的に評価することが難しい．本章で提案した交渉方式では，AHPに基づいてユーザの選好を数量化し，利用するため，既存の手法とは異なり，生成可能な提案の中から，最適な提案を数値データに基づいて決定できる．本章における提案手法は，電子マーケットにおける買い手間，および売り手間での提携形成のための交渉メカニズムとして利用が可能であると考えられる．第6章では，売り手間の交渉に関して，財のコストにのみ注目した，財の交換に基づく交渉方式を提案した．本章における提案手法では，様々な基準に基づく財の評価を交渉に利用できるため，エージェントを，実世界での人間の売買活動により近い形で機能させることができる．また，評価実験の結果から，提案手法により，多数意見から強い影響を受けることなく，合意が形成できることが示されている．

第 8 章

結論

8.1 成果

本節では，本研究で得られた成果について，各章ごとに述べる．

第 3 章における成果

第 3 章では，逐次型オークションにおける入札戦略の決定手法を示した．

本章では，文献 [12] で示された既存の手法における計算量的な困難を解消するために，経済学の分野で用いられる準線形と呼ばれる効用表現を導入し，効率的に最適な戦略が得られる手法を示した．提案手法では，各状態中の所持金を陽に表現しないことで高速化を実現しているため，予算制約が存在する場合に，実行不可能な戦略が得られてしまう可能性があった．本章では，準線形効用に基づいて得られた最適入札戦略を修正する手法を提案し，入札戦略の最適性を犠牲にすることで，常に，実行可能な入札戦略が得られることを示した．また，実験的評価により，準最適と判断できる入札戦略が得られることが確認できた．

実際のインターネットオークションでは，財は個別に販売されるため，単一の財のオークションを逐次的に行うことで複数の財を処理する逐次型オークションは，現実のオークションのモデル化に適していると言える．そのため，本章で示した研究成果は，インターネットオークションへの適用可能性が高い．

本章では，各財に関するオークションのプロトコルを第一価格秘密入札オークションプロトコルと仮定し，新規の入札戦略決定手法を提案した．しかし，本章で提案した手法は，他のオークションプロトコルを用いる場合にも適用が可能である．例えば，英国型オークションプロトコルに関しては，簡単には，入札可能な金額の上限を，第一価格秘密入札オークションでの入札額と同一に見なすこと

により，提案手法が適用可能である．この場合，各状態における最適戦略以下の金額で財の落札に成功する可能性があるため，その際の余剰金の扱いについて検討する必要がある．

第4章における成果

第4章では，実在のインターネットオークションに対して利用可能な入札支援システムを構築するための，論理型言語 *MiLog* に基づく実装技法を示した．

電子商取引の分野では実世界指向の研究が必要であり，特に，既に広く普及しているインターネットオークションに関しては，実用的な支援技術の開発が急務となっている．しかし，実在のオークションサイトを対象とした入札システムの構築は煩雑なタスクであり，敬遠されているのが実情である．本章で示した実装技法は，システムの構築における負担を軽減し，実践的な支援システムの構築の促進に寄与できる．

実在のオークションサイトを対象とした場合に，最も煩雑な作業を強いられるのは，オークションからの情報収集を行う機構の実装である．オークションの情報，および情報提供の形式の変化は，システムの実装を困難にし，運用時においてもシステムの更新コストの点で問題となる．本章では，論理型言語の機能を活かした，HTML テキストからの情報抽出パターンの作成手法を示した．本手法により，オークションサイト側の情報提供形式の変化に対して，少ない労力でシステムの挙動の変更が可能となった．

第5章における成果

第5章では，組合せオークションに基づくスケジューリング手法を提案した．

スケジューリングは，時間という限られた資源を，参加者に対していかに配分するかを決定する問題と見ることができる．組合せオークションは，依存関係のある資源の最適な割り当ての決定に適したオークションプロトコルであるから，スケジューリング問題への応用に適している．本章では，まず，組合せオークションにおける勝者決定問題としてスケジューリング問題を再定義し，整数計画問題として形式化を行った．ここでは，スケジューリングに関する制約として，回数制約，および順序制約という，2種類の制約の表現を可能としている．スケジューリング問題を組合せオークションとして解くことにより，解の無矛盾性と最適性が保証される．すなわち，参加者全員に関して最も好ましい実行可能な解を特別な処理を行うことなく得ることができる．

本章では、混合整数計画法を用いて、最終的なスケジュールを決定している。本章で扱った規模の問題においても、混合整数計画法による解の計算には多大な時間を要するが、実際には早い段階で最適解周辺の値に収束するため、実験結果にも示す通り、現実的な時間で十分実用的な解を得ることができる。

本章における成果により、組合せオークションプロトコルをスケジューリング問題に応用するための新たな手段を提供できた。

第6章における成果

第6章では、分散型の電子マーケットにおける売り手支援のための、財の交換に基づく交渉方式を提案した。

本章では、複数の買い手/売り手エージェントが存在する電子マーケットにおける効率的な売買の実現に関連して、ボリュームディスカウントに着目した。ボリュームディスカウントを仮定した場合、売り手エージェントは多くの取引において、多数の商品を要求されることになる。本章では、十分な数の財を持たない売り手エージェントが、売買の機会を失うことなく、適切に取引を行うために、同様に財が不足した売り手エージェントとの間で、不足した財を融通し合うための交渉手法を示した。

本章における提案手法は、十分な数の在庫を持たない売り手エージェントがマーケットに参加することを可能にしている。また、本提案手法により、買い手/売り手間の取引の効率が向上したことが実験的評価により確認できた。つまり、本手法により、通常では不可能であった取引が可能になっている。この結果は、買い手と売り手の双方において効用が増加することを意味している。本手法を用いない場合、買い手エージェントは、取引の取り下げ、もしくは、一部エージェントとの提携の解消等の手段を取る機会が増加すると予想される。提携の解消を行った場合、ボリュームディスカウントによる単価の割り引き率が低くなり、本手法を用いた場合と比較して、取引から得られる利得は少なくなる。従って、本手法は、売り手の機会損失を防ぐだけでなく、より良い条件での商取引の実現にも寄与している。

第7章における成果

第7章では、数量化されたユーザの選好を用いた、議論の形式に基づく交渉方式を提案した。

第6章で述べた手法では、財の金銭的価値にのみ着目していた。しかし、実際

には、人は様々な属性（評価基準）に関して財を評価し、商取引の過程における様々な意思決定に利用する。本章で提案する交渉方式では、人が行った複数の属性に基づく主観的な評価を AHP を用いて数量化し、エージェント間交渉において利用する。ここでは、議論の形式に基づき、エージェントが数量化された評価を逐次部分的に提示していく。

評価実験の結果から、本章における提案手法により、多数意見にのみ左右されることなく、個々のエージェントの保持する評価が適度に尊重されながら、合意が形成できることが確認できた。エージェントのユーザにとっては、合意形成において、自身の意見が反映されることが望ましい。実験の結果、本提案手法では、多数を占める意見に安易に収束しないことが示されており、ユーザにとって好ましい性質を持つと言える。

8.2 今後の課題

本節では、今後の課題について、各章における成果ごとに述べる。

第3章の成果に関する課題

第3章では、他の全ての入札者に関して、財に対する最高入札額の確率分布が既知であることを仮定しているが、この仮定は現実的ではない。そこで、強化学習等の手法 [10] に基づいて、経験を繰り返すことにより、最適戦略を学習する方法を検討する必要がある。

ただし、たとえ出品されている財が同じでも、厳密に同じ環境下で開催されるオークションは通常存在しない。従って、あるオークションで得た経験が、同じ財に関する別のオークションで効果的に作用するとは限らない。そのため、獲得した学習結果の利用方法については、慎重に検討する必要がある。

第4章の成果に関する課題

第4章で示した実装技法は、ある程度のプログラミング技術を有するユーザでなければ、実際には利用するのが困難である。従って、技術的な敷居を下げるために、何らかの開発支援環境の整備が必要である。例えば、本章で示した情報収集パターンの作成手法においては、人手による情報の構造化が必要である。このような作業を容易化するための支援の仕組みが必要である。

第5章の成果に関する課題

第5章で示した手法に基づくスケジューリングシステムを実際に運用するためには、(1) スケジュールを決定するタイミング、(2) 部分的にスケジュールが決定している際の処理、(3) 人が入札額を適切に決定する方法、および(4) 共有イベントに対する支払いの分担方法について検討の必要がある。

(1) については、全ての参加者からの入札が集まった時点で処理を開始するか、もしくは一定数の入札が集まった時点で逐次処理を行うかを検討する必要がある。もしも逐次的に処理を行う場合には、(2)にあるように、既にいくらかのスケジュールが決定している状況において、新たな入札を処理する方法について検討しなければならない。また、(3)の入札額の適切な決定方法は、今後の大きな課題である。現時点での議論では、入札額は単なる“重み”以上の意味を持たない。そのため、ユーザが、入札する値に対して明確な価値を持つための何らかの仕組みが必要である。(4)に関しては、イベントを共有する参加者に対して、入札額に比例した支払額を要求する方法が考えられるが、より詳細な検討が必要である。

第6章の成果に関する課題

第6章における提案手法では、売り手エージェントが所有する財を効率的に売却することに主眼が置かれており、買い手エージェントに関しては、特に考慮しなかった。マーケットにボリュームディスカウントを仮定する場合、買い手の提携形成メカニズムに関しても、今後詳細な考察/検討が必要である。具体的には、効率的に売買を成立させるために、より効果的に提携を解消するためのメカニズムや、提携内での利益配分手法の開発が必要であると考えられる。

第7章の成果に関する課題

第7章で提案した手法では、複数エージェント間の合意形成の手続きは、多分にヒューリスティックに頼ったものとなっており、今後の更なる洗練化が必要である。また、本論文では明示していないが、提案手法が、電子商取引におけるどのような分野、および局面で効果的に機能するかを明確化し、適用分野に合わせて精緻化する必要がある。例えば、既に述べたように、第6章では、買い手の提携に関しては詳細に検討はされていないが、本章の提案手法は、買い手の提携形成のための基本的なメカニズムとして利用できる可能性がある。

謝辞

本論文にまとめた研究は，自分ひとりで成し得るものではなく，多くの方々の御指導と御助言，そして御協力の賜物と心より感謝しております．

本論文をまとめるに当たり，御懇篤な御指導と御助言を頂いた，名古屋工業大学大学院 工学研究科 情報工学専攻 新谷虎松教授に深く感謝致します．新谷教授には，研究室に在籍した6年間，絶えず懇切丁寧な御指導と御教授を賜りました．また，常にチャレンジ精神を持ち，何事にも積極果敢に取り組むという，研究者としての日々の研究に対する心構えを御教示頂きました．ここに心より深く感謝致します．

名古屋工業大学大学院 工学研究科 情報工学専攻 伊藤孝行助教授に深く感謝致します．伊藤助教授には，本研究に関して綿密な御指導を賜り，また公私に渡って多大な御支援を頂きました．何より，博士課程への進学を決断する際に数々の御助言を頂きました事には，深く感謝致しております．ここに心から深謝致します．

名古屋工業大学大学院 工学研究科 情報工学専攻 大園忠親助手に感謝致します．大園助手には，本研究を進めるに当たり，多くの御助言を賜りました．ここに深く感謝致します．

NTT コミュニケーション科学基礎研究所 横尾真博士，櫻井祐子氏に深く感謝致します．両氏には，本研究を進めるに当たり，多くの御助力と御助言を賜りました，特に横尾氏には，数々の丁寧な御指導を賜りました．ここに深い感謝の意を表します．

静岡大学 情報学部 情報科学科 福田直樹助手に感謝致します．福田助手には，本研究を進めるに当たり，特に実装技術に関連する多くの御助力と御助言を賜り

ました．ここに感謝の意を表します．

名古屋工業大学 工学部 知能情報システム学科 新谷研究室所属の方々や，新谷研究室卒業生の皆様には，本研究を進める上で，様々に御協力頂きました．特に，山田亮太氏（現 オムロン（株）技術本部 コントロール研究所）には，オークションに関連した議論のために多くの時間を割いて頂きました．また，研究室での様々なイベントは，学生時代の大変良い思い出になりました．ここに感謝の意を表します．

また，時に苦しい研究生活を過ごすうえで，友人，知人の皆さんと過ごす時間は大変な心の支えとなりました．深く感謝致します．

最後に，私の研究生活を精神的にも金銭的にも支えて頂いた，両親と弟に心より深く感謝致します．

2004 年 冬
服部 宏充

関連文献

- [1] Amazon.com NEW FOR YOU URL: <http://www.amazon.com/exec/obidos/tg/new-for-you/new-for-you/-/main/>.
- [2] Yahoo!Auctions URL: <http://auctions.yahoo.com/>.
- [3] eBay URL: <http://www.ebay.com/>.
- [4] TAC URL: <http://auction2.eecs.umich.edu>.
- [5] GLPK URL: <http://www.gnu.org/software/glpk/glpk.html>.
- [6] BearShare URL: <http://www.bearshare.com/>.
- [7] Leila Amgoud, Simon Parsons, and Nicolas Maudet. Arguments, dialogue, and negotiation. In *Proceedings of the 14th European Conference on Artificial Intelligence (ECAI-2000)*, pp. 338–342, 2000.
- [8] Arne Anderson, Mattias Tenhunen, and Fredrik Ygge. Integer programming for combinatorial auction winner determination. In *Proceedings of the 4th International Conference on Multi-Agent Systems (ICMAS2000)*, pp. 39–46, 2000.
論文入手先: <http://user.it.uu.se/~arnea/abs/icmas00.html>.
- [9] Naveen Ashish and Craig Knoblock. Semi-automatic wrapper generation for internet information sources. In *Proceedings of the 2nd IFCIS International Conference on Cooperative Information Systems (CoopIS-97)*, pp. 160–169, 1997.
論文入手先: <http://ic.arc.nasa.gov/~ashish/research.htm>.
- [10] Andrew G. Barto, Steven. J. Bradtke, and Satinder P. Singh. Learning to act using real-time dynamic programming. *Artificial Intelligence*, Vol. 72, pp. 81–138, 1995.
論文入手先: <http://citeseer.nj.nec.com/barto93learning.html>.

- [11] Richard Bellman. *Dynamic Programming*. Princeton University Press, 1957.
- [12] Craig Boutilier, Moisés Goldszmidt, and Bikash Sabata. Sequential auctions for the allocation of resources with complementarities. In *Proceedings of the 16th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-99)*, pp. 527–534, 1999.
論文入手先: <http://www.cs.ubc.ca/spider/cebly/papers.html>.
- [13] Jeffrey M. Bradshaw, editor. *Software Agents*. MIT Press, 1997.
- [14] Michael E. Bratman. *Intentions, Plans, and Practical Reason*. Harvard University Press, 1987.
- [15] Michael E. Bratman, David J. Israel, and Martha E. Pollack. Plans and resource-bounded practical reasoning. *Computational Intelligence Journal*, Vol. 4, No. 4, pp. 349–355, 1988.
論文入手先: <http://www.eecs.umich.edu/~pollackm/distrib/chrono-pubs.html>.
- [16] Rodney A. Brooks. A robust layered control system for a mobile robot. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, Vol. 2, No. 1, pp. 14–23, 1986.
論文入手先: <http://www.ai.mit.edu/people/brooks/publications.shtml>.
- [17] Stephanie J. Cammarata, David McArthur, and Randall Steeb. Strategies of co-operation in distributed problem solving. In *Proceedings of the 8th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-83)*, pp. 767–770, 1983.
- [18] Anthony Chavez, Daniel Dreilinger, Robert H. Guttman, and Pattie Maes. A real-life experiment in creating an agent marketplace. *Software Agents and Soft Computing*, pp. 160–179, 1997.
論文入手先: <http://citeseer.nj.nec.com/chavez97reallife.html>.
- [19] Anthony Chavez and Pattie Maes. Kasbah: An agent marketplace for buying and selling goods. In *Proceedings of the 1st International Conference and Exhibition on the Practical Application of Intelligent Agents and Multi-Agents (PAAM-96)*, pp. 75–90, 1996.
論文入手先: <http://www-ec.njit.edu/~bartel/CIS767RP.html>.
- [20] Robert B. Doorenbos, Oren Etzioni, and Daniel S. Weld. A scalable comparison-shopping agent for the World Wide Web. In *Proceedings of the 1st*

- International Conference on Autonomous Agents(Agents-97)*, pp. 39–48, 1997.
<http://citeseer.nj.nec.com/doorenbos97scalable.html>.
- [21] James F. Engel and Roger D. Blackwell. *Consumer Behavior*. CBS College Publishing, 4th edition, 1982.
- [22] Jacques Ferber. Reactive distributed artificial intelligence. *Foundations of Distributed Artificial Intelligence*, pp. 287–317, 1996.
- [23] Jacques Ferber. *Multi-Agent Systems - An Introduction to Distributed Artificial Intelligence-*. Addison-Wesley, 1999.
- [24] Klaus Fischer, Jörg P. Müller, and Markus Pischel. A pragmatic BDI architecture. In M. Wooldridge, J. P. Müller, and M. Tambe, editors, *Intelligent Agents II (LNAI Volume 1037)*, pp. 203–218, 1996.
- [25] Yuzo Fujishima, Kevin Leyton-Brown, and Yoav Shoham. Taming the computation complexity of combinatorial auctions: Optimal and approximate approaches. In *Proceedings of the 16th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-99)*, pp. 548–553, 1999.
 論文入手先: http://robotics.stanford.edu/~kevinlb/recent_work.htm.
- [26] Naoki Fukuta, Takayuki Ito, and Toramatsu Shintani. MiLog: A mobile agent framework for implementing intelligent information agents with logic programming. In *Proceedings of the 1st Pacific Rim International Workshop on Intelligent Information Agents (PRIIA2000)*, pp. 113–123, 2000.
 論文入手先: <http://www-toralab.ics.nitech.ac.jp/index-j.html>.
- [27] Leonardo Garrido and Katia Sycara. Multi-agent meeting scheduling: preliminary experimental results. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Multi-Agent Systems (ICMAS-96)*, pp. 95–102, 1996.
 論文入手先: http://www.ri.cmu.edu/pubs/pub_2638.html.
- [28] Michael R. Genesereth and Nils J. Nilsson. *Logical Foundations of Artificial Intelligence*. Morgan Kaufmann Publishers, 1987.
- [29] Michael P. Georgeff. Communication and interaction in multi-agent planning. In *Proceedings of the 3rd National Conference on Artificial Intelligence (AAAI-83)*, pp. 125–129, 1983.

- [30] Barbara J. Grosz and Sarit Kraus. Collaborative plans for complex group actions. *Artificial Intelligence*, Vol. 86, No. 2, pp. 269–357, 1996.
論文入手先: <http://www.eecs.harvard.edu/~grosz/>.
- [31] Robert H. Guttman. Merchant differentiation through integrative negotiation in agent-mediated electronic commerce. Master's thesis, MIT(Massachusetts Institute of Technology, 1998.
論文入手先: <http://xenia.media.mit.edu/~guttman/thesis.pdf>.
- [32] Robert H. Guttman, Alexandros G. Moukas, and Pattie Maes. Agent-mediated electronic commerce: A survey. *Journal of the Knowledge Engineering Review*, Vol. 13, No. 2, pp. 147–159, 1998.
論文入手先: <http://web.media.mit.edu/~moux/research.html>.
- [33] William D. Harvey and Matthew L. Ginsberg. Limited discrepancy search. In *Proceedings of the 14th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-95)*, pp. 607–613, 1995.
論文入手先: <http://citeseer.nj.nec.com/harvey95limited.html>.
- [34] Hiromitsu Hattori, Takayuki Ito, Tadachika Ozono, and Toramatsu Shintani. An approach to coalition formation using argumentation-based negotiation in multi-agent systems. In *Proceedings of the 14th International Conference on Industrial & Engineering Applications of Artificial Intelligence & Expert Systems (IEA/AIE-01)*, pp. 687–696, 2001.
論文入手先: <http://www-toralab.ics.nitech.ac.jp/~hatto/index.html>.
- [35] Hiromitsu Hattori, Takayuki Ito, Tadachika Ozono, and Toramatsu Shintani. A hierarchical coalition formation mechanism using argumentation-based negotiation for group decision making. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking & Parallel/Distributed Computing (SNPD-01)*, pp. 326–331, 2001.
論文入手先: <http://www-toralab.ics.nitech.ac.jp/~hatto/index.html>.
- [36] Hiromitsu Hattori, Tadachika Ozono, and Toramatsu Shintani. Applying a combinatorial auction protocol to a coalition formation among agents in complex problems. In *Proceedings of the 2nd International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS-03)*, pp. 1008–1009, 2003.
論文入手先: <http://www-toralab.ics.nitech.ac.jp/~hatto/index.html>.

- [37] Hiromitsu Hattori, Tadachika Ozono, and Toramatsu Shintani. Coalition formation among agents in complex problems based on a combinatorial auction perspective. In *Proceedings of the 17th International Conference on Industrial & Engineering Applications of Artificial Intelligence & Expert Systems (IEA/AIE-04)*, 2004.
論文入手先: <http://www-toralab.ics.nitech.ac.jp/~hatto/index.html>.
- [38] Hiromitsu Hattori, Ryota Yamada, Tadachika Ozono, and Toramatsu Shintani. A multiple-bidding support framework for bidding and browsing information. In *Proceedings of the 11th International World Wide Web Conference (WWW2002) (included in Conference CD-ROM)*, 2002.
論文入手先: <http://www-toralab.ics.nitech.ac.jp/~hatto/index.html>.
- [39] Hiromitsu Hattori, Makoto Yokoo, Yuko Sakurai, and Toramatsu Shintani. Determining bidding strategies in sequential auctions: Quasi-linear utility and budget constraints. In *Proceedings of the 5th International Conference on Autonomous Agents (Agents-01)*, pp. 83–84, 2001.
論文入手先: <http://www-toralab.ics.nitech.ac.jp/~hatto/index.html>.
- [40] Hiromitsu Hattori, Makoto Yokoo, Yuko Sakurai, and Toramatsu Shintani. A dynamic programming model for determining bidding strategies in sequential auctions: Quasi-linear utility and budget constraints. In *Proceedings of the 17th International Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence (UAI-2001)*, pp. 211–218, 2001.
論文入手先: <http://www-toralab.ics.nitech.ac.jp/~hatto/index.html>.
- [41] Luke Hunsberger and Barbara J. Grosz. A combinatorial auction for collaborative planning. In *Proceedings of the 4th International Conference on Multi-Agent Systems (ICMAS2000)*, pp. 151–158, 2000.
論文入手先: <http://www.eecs.harvard.edu/~grosz/>.
- [42] Takayuki Ito, Hiromitsu Hattori, and Toramatsu Shintani. A cooperative exchanging mechanism among seller agents for group-based sales. *The International Journal of Electronic Commerce Research and Applications (ECRA)*, Vol. 1, No. 2, pp. 138–149, 2002.
論文入手先: <http://www-toralab.ics.nitech.ac.jp/~itota/selfintro-j.html>.

- [43] Nicholas R. Jennings. Commitments and conventions: The foundation of co-ordination in multi-agent systems. *Journal of Knowledge Engineering Review*, Vol. 8, No. 3, pp. 223–250, 1993.
論文入手先: <http://www.ecs.soton.ac.uk/~nrj/pubs.html>.
- [44] Nicholas R. Jennings, Katia Sycara, and Michael Wooldridge. A roadmap of agent research and development. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, Vol. 1, No. 1, pp. 7–38, 1998.
論文入手先: <http://www.ecs.soton.ac.uk/~nrj/pubs.html>.
- [45] Jayant R. Kalagnanam, Andrew J. Davenport, and Ho Soo Lee. Computational aspects of clearing continuous call double auctions with assignment constraints and indivisible demand. *Electronic Commerce Research*, Vol. 1, No. 3, pp. 221–238, 2001.
論文入手先: http://www.research.ibm.com/people/j/jayant/jayant_pubs.html.
- [46] Ralph L. Keeney and Howard Raiffa. *Decisions with Multiple Objectives : Preference and Value Tradeoffs*. Cambridge Univ. Press, 1993.
- [47] Paul Klemperer. Auction theory: A guide to the literature. *Journal of Economics Surveys*, Vol. 13, No. 3, pp. 227–286, 1999.
論文入手先: <http://ideas.repec.org/p/wpa/wuwpmi/9903002.html>.
- [48] Victor Lesser. A retrospective view of FA/C distributed problem solving. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Special Issue on Distributed Artificial Intelligence*, Vol. 21, No. 6, pp. 1347–1362, 1991.
論文入手先: <http://citeseer.nj.nec.com/lesser91retrospective.html>.
- [49] Victor Lesser, Edmund. H. Durfee, and Daniel D. Corkill. Trends in cooperative distributed problem solving. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, Vol. 1, No. 1, pp. 63–83, 1989.
<http://ai.eecs.umich.edu/people/durfee/vita.html>.
- [50] Jeffrey K. MacKie-Mason and Hal R. Varian. Generalized Vickrey auctions. <http://www-personal.umich.edu/jmm/research.html>, 1994.
- [51] Pattie Maes, Robert H. Guttman, and Alexandros G. Moukas. Agents that buy and sell. *Communications of the ACM*, Vol. 42, No. 3, pp. 81–91, 1999.
論文入手先: <http://citeseer.nj.nec.com/408490.html>.

- [52] Andreu Mas-Colell, Michael D. Whinston, and Jerry R. Green. *Microeconomic Theory*. Oxford University Press, 1995.
- [53] Randolph P. McAfee. A dominant strategy double auction. *Journal of Economic Theory*, Vol. 56, pp. 434–450, 1992.
論文入手先: <http://vita.mcafee.cc/>.
- [54] Paul R Milgrom. Putting auction theory to work: the simultaneous ascending auction. <http://www.cramton.umd.edu/conference/Auction-Conference.html>, 1998.
- [55] Jörg P. Müller. A cooperation model for autonomous agents. In J. P. Müller, M. Wooldridge, and N. R. Jennings, editors, *Intelligent Agents III (LNAI Volume 1193)*, pp. 245–260, 1997.
- [56] Allen Newell. *Unified Theories of Cognition*. Harvard University Press, 1990.
- [57] Francesco M. Nicosia. *Consumer Decision Processes: Marketing and Advertising Implications*. Prentice Hall, 1966.
- [58] Andy Oram. *Peer-to-Peer: Harnessing the Power of Disruptive Technologies*. O'Reilly & Associates, 2001.
- [59] David C. Parkes, Jayant R. Kalagnanam, and Marta Eso. Achieving budget-balance with vickrey-based payment schemes in exchanges. In *Proceedings of the 17th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-01)*, pp. 1161–1168, 2001.
論文入手先: <http://www.eecs.harvard.edu/~parkes/publist.html>.
- [60] David C. Parkes and Lyle H. Ungar. An auction-based method for decentralized train scheduling. In *Proceedings of the 5th International Conference on Autonomous Agents (Agents-01)*, pp. 43–50, 2001.
論文入手先: <http://www.eecs.harvard.edu/~parkes/publist.html>.
- [61] Simon Parsons, Carles Sierra, and Nicholas R. Jennings. Agents that reason and negotiate by arguing. *Journal of Logic and Computation*, Vol. 8, No. 3, pp. 261–292, 1998.
論文入手先: <http://www.sci.brooklyn.cuny.edu/~parsons/publications/journals/jlc.html>.

- [62] Henry Prakken and Giovanni Sartor. Argument-based extended logic programming with defeasible priorities. *Journal of Applied Non-Classical Logics*, Vol. 7, No. 1-2, pp. 24–75, 1997.
論文入手先: <http://www.cs.uu.nl/people/henry/publications.html>.
- [63] Chris Preist, Andrew Byde, and Claudio Bartolini. Economic dynamics of agents in multiple auctions. In *Proceedings of the 5th International Conference on Autonomous Agents (Agents-01)*, pp. 545–551, 2001.
論文入手先: <http://www.hpl.hp.com/techreports/2001/HPL-2001-107.html>.
- [64] Martin L. Puterman. *Markov Decision Processes*. Wiley, 1994.
- [65] Eric Rasmusen. *Games and information - An introduction to Game Theory* -. Blackwell Publishers, 1989.
- [66] Stephen J. Rassenti, Vernon Smith, and Robert L. Bulfin. Combinatorial auction mechanism for airport time slot allocation. *Bell Journal of Economics*, Vol. 13, No. 2, pp. 402–417, 1982.
- [67] Juan A. Rodriguez, Pablo Noriega, Carles Sierra, and Julian Padget. FM96.5:a java-based electronic auction house. In *Proc. of the 2nd International Conference and Exhibition on The Practical Application of Intelligent Agents and Multi-Agents (PAAM-97)*, pp. 75–90, 1997.
論文入手先: <http://www.iiia.csic.es/~jar>.
- [68] Jeffrey. S. Rosenschein and Michael R. Genesereth. Deals among rational agents. In *Proceedings of the 9th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-85)*, pp. 91–99, 1985.
論文入手先: <http://www.cs.huji.ac.il/~jeff>.
- [69] Jeffrey S. Rosenschein and Gilad Zlotkin. *Rules of Encounter: Designing Conventions for Automated Negotiation Among Computer*. MIT Press, 1994.
- [70] Michael H. Rothkopf, Aleksandar Pekeč, and Ronald M. Harstad. Computationally manageable combinatorial auctions. *Management Science*, Vol. 44, No. 8, pp. 1131–1147, 1998.
論文入手先: <http://dimacs.rutgers.edu/TechnicalReports/1995.html>.

- [71] Stuart Russell and Peter Norvig. *Artificial Intelligence - A Modern Approach* -. Prentice Hall, second edition, 2003.
- [72] Thomas L. Saaty. *The analytic hierarchy process*. McGraw-Hill, 1980.
- [73] Tuomas Sandholm. Limitations of the Vickrey auction in computational multiagent systems. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Multiagent Systems (ICMAS-96)*, pp. 299–306, 1996.
論文入手先: <http://gunther.smeal.psu.edu/817.html>.
- [74] Tuomas Sandholm. An algorithm for optimal winner determination in combinatorial auctions. In *Proceedings of the 16th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-99)*, pp. 542–547, 1999.
- [75] Tuomas Sandholm. Approaches to winner determination in combinatorial auction. *Decision Support Systems*, Vol. 28, No. 1-2, pp. 165–176, 2000.
論文入手先: <http://citeseer.nj.nec.com/92009.html>.
- [76] Tuomas Sandholm. eMediator: A next generation electronic commerce server. *Computational Intelligence*, Vol. 18, No. 4, pp. 656–676, 2002.
論文入手先: <http://www-2.cs.cmu.edu/~sandholm>.
- [77] Tuomas Sandholm, Subhash Suri, Andrew Gilpin, and David Levine. CABOB: A fast optimal algorithm for combinatorial auctions. In *Proceedings of the 17th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-01)*, pp. 1102–1108, 2001.
論文入手先: <http://www-2.cs.cmu.edu/~sandholm>.
- [78] Sandip Sen, Thomas Haynes, and Neeraj Arora. Satisfying user preferences while negotiating meetings. *International Journal of Human-Computer Studies*, Vol. 47, pp. 407–427, 1997.
論文入手先: <http://euler.mcs.utulsa.edu/~sandip/DAI.html>.
- [79] Upendra Shardanand and Pattie Maes. Social information filtering: Algorithms for automating 'Word of Mouth'. In *Proceedings of the Computer-Human Interaction Conference (CHI-95)*, pp. 210–217, 1995.
論文入手先: <http://citeseer.nj.nec.com/shardanand95social.html>.

- [80] Carles Sierra, Nicholas R. Jennings, Pablo Noriega, and Simon Parsons. A framework for argumentation-based negotiation. In *Proceedings of the 4th International Workshop on Agent Theories, Architectures and Languages (ATAL-97)*, pp. 167–182, 1997.
論文入手先: <http://www.iia.csic.es/~sierra/Publications.html>.
- [81] Reid G. Smith. The contract net protocol: High-level communication and control in a distributed problem solver. *IEEE Transactions on Computers*, Vol. C-29, No. 12, pp. 1104–1113, 1980.
- [82] Peter Stone and Manuela M. Veloso. Multiagent systems: A survey from a machine learning perspective. *Autonomous Robots Journal*, Vol. 8, No. 3, pp. 345–383, 2000.
論文入手先: <http://www.cs.utexas.edu/users/pstone/papers.html>.
- [83] Milind Tambe. Towards flexible teamwork. *Journal of Artificial Intelligence Research*, Vol. 7, pp. 83–124, 1997.
論文入手先: <http://teamcore.usc.edu/agent.html>.
- [84] Ioannis S. Terpsidis, Alexandros Moukas, Bill Pergioudakis, Georgios Doukidis, and Pattie Maes. The potential of electronic commerce in re-engineering consumer-retail relationships through intelligent agents. *Advances in Information Technologies: The Business Challenge*, 1997.
論文入手先: <http://agents.www.media.mit.edu/~moux/research.html>.
- [85] Takuo Tsuruta and Toramatsu Shintani. Scheduling meetings using distributed valued constraint satisfaction algorithm. In *Proceedings of the 14th European Conference on Artificial Intelligence (ECAI-2000)*, pp. 383–387, 2000.
論文入手先: <http://www-toralab.ics.nitech.ac.jp/index-j.html>.
- [86] Hal R. Varian. Economic mechanism design for computerized agents. In *Proceedings of the 1st USENIX Workshop on Electronic Commerce*, 1995.
論文入手先: <http://citeseer.nj.nec.com/varian95economic.html>.
- [87] Manuela Veloso, Peter Stone, Kwun Han, and Sorin Achim. Cmunitied: A team of robotic soccer agents collaborating in an adversarial environment. In *Proceedings of the 1st International Workshop on RoboCup*, 1997.

- [88] Gerhard Weiss, editor. *Multiagent Systems: A Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence*, chapter Intelligent Agents. MIT Press, 1999.
- [89] Michael Wooldridge. *REASONING ABOUT RATIONAL AGENTS*. MIT Press, 2000.
- [90] Michael Wooldridge. *An Introduction to MultiAgent Systems*. John Wiley & Sons, 2002.
- [91] Michael Wooldridge and Nicholas R. Jennings. Intelligent agents: Theory and practice. *Journal of Knowledge Engineering Review*, Vol. 10, No. 2, pp. 115–152, 1995.
論文入手先: <http://www.csc.liv.ac.uk/~mjw/pubs/>.
- [92] Peter R. Wurman, William E. Walsh, and Michael P. Wellman. Flexible double auctions for electronic commerce: theory and implementation. *Journal of Decision Support Systems*, Vol. 24, pp. 17–27, 1998.
論文入手先: <http://www.csc.ncsu.edu/faculty/wurman/publications.html>.
- [93] Peter. R. Wurman, Michael. P. Wellman, and William. E. Walsh. The Michigan Internet AuctionBot: A configurable auction server for human and software agents. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Autonomous Agents (Agents-98)*, pp. 301–308, 1998.
論文入手先: <http://www.csc.ncsu.edu/faculty/wurman/publications.html>.
- [94] Ryota Yamada, Hiromitsu Hattori, Takayuki Ito, Tadachika Ozono, and Toramatsu Shintani. MultiHammer: A virtual auction system based on information agents. In *Proceedings of the Pacific Asian Conference on Intelligent Systems 2001 (PAIS-2001)*, pp. 73–77, 2001.
論文入手先: <http://www-toralab.ics.nitech.ac.jp/index-j.html>.
- [95] Jun-ichi Yamamoto and Katia Sycara. A stable and efficient buyer coalition formation scheme for e-marketplaces. In *Proceedings of the 5th International Conference on Autonomous Agents (Agents-01)*, pp. 576–583, 2001.
論文入手先: <http://citeseer.nj.nec.com/yamamoto01stable.html>.
- [96] Makoto Yokoo, Yuko Sakurai, and Shigeo Matsubara. The effect of false-name declarations in mechanism design: Towards collective decision making on the

- Internet. In *Proceedings of the 20th International Conference on Distributed Computing System (ICDCS-2000)*, pp. 146–153, 2000.
論文入手先: <http://www.kecl.ntt.co.jp/csl/ccrg/members/yokoo/index-j.html>.
- [97] Gilad Zlotkin and Jeffrey S. Rosenschein. Negotiation and task sharing among autonomous agents in cooperative domains. In *Proceedings of the 11th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-89)*, pp. 912–917, 1989.
論文入手先: <http://www.cs.huji.ac.il/~jeff>.
- [98] 横尾真, 櫻井祐子, 松原繁夫. 架空名義入札に頑健なダブルオークションプロトコル. 電子情報通信学会論文誌, Vol. J84-D-I, No. 8, pp. 1140–1149, 2001.
- [99] 伊藤孝行. 意思決定支援のためのマルチエージェントの協調機構とその応用に関する研究. PhD thesis, 名古屋工業大学, 2000.
論文入手先: <http://www-toralab.ics.nitech.ac.jp/~itota/selfintro-j.html>.
- [100] 伊藤孝行, 新谷虎松. 協調的なスケジューリングのための交換条件の提示による説得手法. 電子情報通信学会論文誌, Vol. J81-D-I, No. 9, pp. 72–80, 1998.
論文入手先: <http://www-toralab.ics.nitech.ac.jp/~itota/selfintro-j.html>.
- [101] 伊藤孝行, 服部宏充, 新谷虎松. エージェント間の協調的入札機構に基づく複数オークション入札支援システム BiddingBot. 人工知能学会誌, Vol. 17, No. 3, pp. 247–258, 2002.
論文入手先: <http://www-toralab.ics.nitech.ac.jp/~itota/selfintro-j.html>.
- [102] 市村由美, 長谷川隆明, 渡部勇, 佐藤光弘. テキストマイニング–事例紹介. 人工知能学会誌, Vol. 16, No. 2, pp. 192–200, 2003.
- [103] 小野康一. 移動エージェント Aglets のセキュリティ・モデル. コンピュータソフトウェア (日本ソフトウェア科学会論文誌), Vol. 17, No. 4, pp. 2–14, 2000.
論文入手先: <http://spa.jsst.or.jp/WIT/wit98/proceedings/ono/>.
- [104] 沼岡千里, 大沢英一, 長尾確. マルチエージェントシステム. 分散協調メディアシリーズ 11. 共立出版, 1998.

- [105] 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.
- [106] 横尾真, 櫻井祐子, 松原繁夫. 架空名義表明のメカニズムデザインに対する影響 - インターネットでの集団意思決定に向けて -. コンピュータソフトウェア (日本ソフトウェア科学会論文誌), Vol. 17, No. 5, pp. 37–46, 2000.
- [107] 奥野正寛, 鈴村興太郎. ミクロ経済学 I. 岩波書店, 1985.
- [108] 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. 3–7, 1995.
- [109] 石田亨, 片桐恭弘, 桑原和宏. 分散人工知能. コロナ社, 1996.
- [110] 田所論, 北野宏明. 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.
- [111] 松原繁夫, 横尾真. 不正行為を防ぐ電子商取引メカニズム. 人工知能学会誌, Vol. 15, No. 5, pp. 473–482, 2000.
- [112] 美濃導彦, 中村素典. 情報家電の考え方. 情報処理学会誌, Vol. 42, No. 11, pp. 1049–1054, 2001.
- [113] 服部宏充, 伊藤孝行, 新谷虎松. P2P に基づく分散型電子マーケット E-GarageSale におけるエージェントの財の交換に基づく交渉手法. 人工知能学会誌, Vol. 18, No. 2, pp. 66–74, 2003.
論文入手先: <http://www-toralab.ics.nitech.ac.jp/~hatto/index.html>.
- [114] 服部宏充, 横尾真, 櫻井祐子, 新谷虎松. 逐次型オークションの入札戦略決定手法: 準線形効用と予算制約の導入. 電子情報通信学会論文誌, Vol. J85-D-I, No. 10, pp. 974–984, 2002.
論文入手先: <http://www-toralab.ics.nitech.ac.jp/~hatto/index.html>.
- [115] 服部宏充, 大園忠親, 新谷虎松. 論理型言語 MiLog に基づくインターネットオークション入札支援システム BiddingBot の実装技法. 情報処理学会論文誌, Vol. 44, No. 7, pp. 1752–1755, 2003.
論文入手先: <http://www-toralab.ics.nitech.ac.jp/~hatto/index.html>.
- [116] 西田豊明. エージェントと創るインタラクティブネットワーク. 培風館, 2003.

- [117] 鈴木光男. 新ゲーム理論. 勁草書房, 1994.
- [118] 櫻井祐子, 横尾真, 亀井剛次. 組合せオークションの高速な準最適勝者決定アルゴリズム. 人工知能学会誌, Vol. 16, No. 5, pp. 445–453, 2001.
- [119] 佐伯胖. 「きめ方」の論理 - 社会的決定理論への招待 -. 東京大学出版, 1980.

Portable Document Format (PDF) , もしくは PostScript 形式にて , インターネット上で公開されている文献に関しては , 公開先の Web ページの URL を付記した (2004 年 1 月現在) .

原著となった発表論文一覧

論文誌（国内）

1. 服部宏充，大園忠親，新谷虎松：“論理型言語 *MiLog* に基づくインターネットオークション入札支援システム *BiddingBot* の実装技法”，情報処理学会論文誌，Vol. 44，No. 7，pp. 1752–1755, 2003．
2. 服部宏充，伊藤孝行，新谷虎松：“P2P に基づく分散型電子マーケット *E-GarageSale* におけるエージェントの財の交換に基づく交渉手法”，人工知能学会誌，Vol. 18，No. 2，pp. 66–74, 2003．
3. 服部宏充，横尾真，櫻井祐子，新谷虎松：“逐次型オークションの入札戦略決定手法：準線形効用と予算制約の導入”，電子情報通信学会論文誌，Vol. J85-D-I，No. 10，pp. 974–984, 2002．
4. 伊藤孝行，服部宏充，新谷虎松：“エージェント間の協調的入札機構に基づく複数オークション入札支援システム *BiddingBot*”，人工知能学会誌，Vol. 17，No. 3，pp. 247–258，2002．

International Journal

1. Takayuki ITO，Hiromitsu HATTORI，and Toramatsu SHINTANI，“A Cooperative Exchanging Mechanism among Seller Agents for Group-based Sales”，The International Journal of Electronic Commerce Research and Applications (ECRA)，Elsevier Science, Vol. 1, No. 2，pp. 138-149，2002．
2. Hiromitsu HATTORI，Takayuki ITO，Tadachika OZONO and Toramatsu SHINTANI，“An Approach to Coalition Formation using Argumentation-based Negotiation in Multi-Agent Systems”，LNAI-2070，pp. 687-696，2001．

International Conference

1. Hiromitsu HATTORI , Tadachika OZONO and Toramatsu SHINTANI , "Coalition Formation among Agents in Complex Problems based on a Combinatorial Auction Perspective" , In Proceedings of the 17th International Conference on Industrial & Engineering Applications of Artificial Intelligence & Expert Systems (IEA/AIE-04) , 2004 .
2. Hiromitsu HATTORI , Tadachika OZONO and Toramatsu SHINTANI , "Applying a Combinatorial Auction Protocol to a Coalition Formation among Agents in Complex Problems" , In Proceedings of the 2nd International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS-03) , pp. 1008–1009 , 2003.
3. Hiromitsu HATTORI , Tadachika OZONO , Takayuki ITO and Toramatsu SHINTANI , "An Automated Budget Allocation Mechanism for Simultaneous Multiple Bidding" , Student Poster Program at 18th National Conference on Artificial Intelligence (AAAI-02) , 2002 .
4. Hiromitsu HATTORI , Ryota YAMADA , Tadachika OZONO and Toramatsu SHINTANI , "A Multiple-Bidding Support Framework for Bidding and Browsing Information" , In Proceedings of the 11th International World Wide Web Conference (WWW2002) , included in Conference CD-ROM, 2002 .
5. Takayuki ITO , Hiromitsu HATTORI and Toramatsu SHINTANI , "Incentive Compatibility on Multiple Internet Auctions based on Bidding Support Agents" , In Proceedings of the 11th International World Wide Web Conference (WWW2002), included in Conference CD-ROM, 2002.
6. Takayuki ITO , Hiromitsu HATTORI , and Toramatsu SHINTANI , "A Cooperation Mechanism among Seller Agents based on Exchanging Goods in Agent-mediated Electronic Commerce" , In Proceedings of the Pacific Asian Conference on Intelligent Systems (PAIS-2001) , pp. 89-96 , 2001 .
7. Ryota YAMADA , Takayuki ITO , Hiromitsu HATTORI , Tadachika OZONO and Toramatsu SHINTANI , "MultiHammer: A Virtual Auction System for a Testbed of Agent-Mediated Electronic Commerce , " In Proceedings of the Pacific Asian Conference on Intelligent Systems (PAIS-2001) , pp. 73-77 , 2001 .

8. Hiromitsu HATTORI , Takayuki ITO , Tadachika OZONO , and Toramatsu SHINTANI : “A Hierarchical Coalition Formation Mechanism using Argumentation-based Negotiation for Group Decision Making” , In Proceedings of the 2nd International Conference on Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking & Parallel/Distributed Computing (SNPD-01) , pp. 326-331 , 2001 .
9. Hiromitsu HATTORI , Makoto YOKOO , Yuko SAKURAI , and Toramatsu SHINTANI : “A Dynamic Programming Model for Determining Bidding Strategies in Sequential Auctions: Quasi-linear Utility and Budget Constraints” , In Proceedings of the 17th International Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence (UAI2001) , pp. 211-218 , 2001 .
10. Hiromitsu HATTORI , Takayuki ITO , Tadachika OZONO , and Toramatsu SHINTANI : “An Approach to Coalition Formation using Argumentation-based Negotiation in Multi-Agent Systems” , In Proceedings of the 14th International Conference on Industrial & Engineering Applications of Artificial Intelligence & Expert Systems (IEA/AIE-01) , pp. 687-696 , 2001 .
11. Hiromitsu HATTORI , Makoto YOKOO , Yuko SAKURAI , and Toramatsu SHINTANI : “Determining Bidding Strategies in Sequential Auctions: Quasi-linear Utility and Budget Constraints” , In Proceedings of the 5th International Conference on Autonomous Agents (Agents2001) , pp. 83-84 , 2001 (Poster Abstract) .
12. Hiromitsu HATTORI , Takayuki ITO , and Toramatsu SHINTANI : “An Approach to Improving Quality and Facilitating Consensus in Negotiation Among Agents” , In Proceedings of IASTED International Conference , Intelligent Systems and Control (ISC-99) , pp. 252-257 , 1999 .

修士論文

1. 服部宏充: “複数財オークションにおける入札支援技術の開発に関する研究”, 名古屋工業大学, 2001.

卒業論文

1. 服部宏充: “グループ意思決定支援システムにおける根回しに基づいたエージェント間交渉について”, 名古屋工業大学, 1999.

全国大会・研究会の論文

1. 服部宏充, 伊藤孝行, 大園忠親, 新谷虎松: “確率ネットワークに基づいた選好データを持つエージェントの議論に基づく交渉プロトコルの提案”, 日本ソフトウェア科学会第 20 回大会, 2003 .
2. 服部宏充, 大園忠親, 新谷虎松: “確率的因果モデルを用いたエージェントの議論に基づく交渉の提案”, 第 17 回人工知能学会全国大会, 2003 .
3. 服部宏充, 大園忠親, 新谷虎松: “組合せオークションに基づくスケジューリング問題の定式化とその解法について”, 第 1 回情報科学技術フォーラム (FIT2002), pp. 299–300, 2002 .
4. 服部宏充, 大園忠親, 新谷虎松: “複数オークションにおける財の落札状況を反映した入札予算配分手法の提案”, 第 16 回人工知能学会全国大会, 2002 .
5. 服部宏充, 山田亮太, 大園忠親, 新谷虎松: “マルチエージェントに基づく複数財への多重入札支援システム MultiBidder の実現”, 第 64 回情報処理学会全国大会, pp. 379–380, 2002 .
6. 服部宏充, 伊藤孝行, 新谷虎松: “P2P 型電子商取引のためのエージェントの提携に基づく売買交渉機構について”, 第 10 回マルチエージェントと協調計算ワークショップ (MACC-2001), 2001 .
7. 服部宏充, 寺井豊, 大園忠親, 新谷虎松: “P2P モデルに基づいたプッシュ型売買交渉システムにおける Peer 検索機構の提案”, 平成 13 年度電気関係学会東海支部連合大会講演論文集, pp. 316, 2001 .
8. 服部宏充, 伊藤孝行, 大園忠親, 新谷虎松: “マルチエージェント環境における議論に基づく交渉による合意形成手法の提案”, 第 62 回情報処理学会全国大会論文集, pp. 51–52, 2001 .
9. 服部宏充, 伊藤孝行, 新谷虎松: “多属性な意思決定問題における属性交換に基づくエージェント間の交渉手法とその応用”, 2000 年度電子情報通信学

- 会ソサイエティ大会講演論文集，電子情報通信学会情報・システムソサイエティ，pp. 87，2000．
10. 服部宏充，横尾真，櫻井祐子，新谷虎松：“逐次型オークションの入札戦略決定手法：準線型効用と予算制約の導入”，日本ソフトウェア科学会第17回大会，2000．
 11. 服部宏充，伊藤孝行，新谷虎松：“発話行為に基づくエージェント間の議論による合意形成手法の実現とその応用”，第60回情報処理学会全国大会論文集(2)，pp. 15–16，2000．
 12. 服部宏充，伊藤孝行，新谷虎松：“根回しにおける個別交渉戦略に基づいたエージェント間交渉方式の実現”，第13回人工知能学会全国大会論文集，pp. 421–424，1999．
 13. 服部宏充，伊藤孝行，新谷虎松：“効用理論に基づく根回しを導入したエージェント間交渉の実現”，第58回情報処理学会全国大会論文集(2)，pp. 209–210，1999．
 14. 服部宏充，伊藤孝行，新谷虎松：“エージェント間の交渉における根回しの実現とその応用”，第57回情報処理学会全国大会論文集(2)，pp. 402–403，1998．
 15. 服部宏充，伊藤孝行，新谷虎松：“根回しに基づく交渉エージェントとその応用”，平成10年度電気関係学会東海支部連合大会講演論文集，pp. 287，1998．
 16. 服部宏充，伊藤孝行，新谷虎松：“ユーザの性格を反映したエージェント間の交渉方式とその応用”，第12回人工知能学会全国大会論文集，pp. 564–565，1998．

その他の論文

1. 小松正樹，服部宏充，伊藤孝行，新谷虎松：“インターネットオークションにおける情報管理支援システム InfoManager の提案”，平成15年度電気関係学会東海支部連合大会講演論文集，電気関係学会東海支部連合大会，2003．

2. 向井康人，磯村厚誌，服部宏充，伊藤孝行，新谷虎松：“複数グループウェアを用いたタスク統合システムの実現”，平成 15 年度電気関係学会東海支部連合大会講演論文集，電気関係学会東海支部連合大会，2003 年．
3. 山谷孝史，永田雄大，服部宏充，伊藤孝行，新谷虎松：“モバイルエージェント開発環境 MiLog のためのテストデバッグ支援ビューワの試作”，平成 15 年度電気関係学会東海支部連合大会講演論文集，電気関係学会東海支部連合大会，2003 ．
4. 山谷孝史，永田雄大，服部宏充，伊藤孝行，新谷虎松：“モバイルエージェント開発環境 MiLog のための位置透過的なエージェント操作機能を持つビューワの実現”，日本ソフトウェア科学会第 20 回大会論文集，日本ソフトウェア科学会，2003 ．
5. 向井康人，磯村厚誌，服部宏充，伊藤孝行，新谷虎松：“マルチエージェントに基づくコミュニケーション支援システムの実現”，日本ソフトウェア科学会第 20 回記念大会論文集，日本ソフトウェア科学会，2003 ．
6. 松尾徳朗，伊藤孝行，服部宏充，新谷虎松：“商品購入におけるユーザの意思決定のための定性シミュレーションモデル”，日本ソフトウェア科学会第 20 回大会論文集，日本ソフトウェア科学会，2003 ．
7. 田代慎治，服部宏充，大園忠親，新谷虎松：“P2P 型仮想空間におけるエージェントに基づく情報共有システムの試作とその応用”，第 65 回情報処理学会全国大会論文集（2），pp. 289–290，2003 ．
8. 瀧寛和，服部宏充，大園忠親，新谷虎松：“Web プロキシサーバエージェントに基づく制約抽出機構の試作”，第 65 回情報処理学会全国大会論文集（2），2003 ．
9. 堀和裕，服部宏充，大園忠親，新谷虎松：“電子マーケットプレイスにおける擬人化エージェントの論理型言語に基づく制御について”，第 65 回情報処理学会全国大会論文集（2），pp. 289–290，2003 ．
10. 大園忠親，服部宏充，新谷虎松：“組合せオークションの枠組みに基づくスケジューリングシステム - スケジューリング問題の勝者決定問題としての定式化”，エージェント合同シンポジウム (JAWS2002)，2002 ．

11. 田代慎治, 服部宏充, 大園忠親, 新谷虎松: “情報収集エージェントによる情報統合システム ItemsGetter の実装”, 平成 14 年度電気関係学会東海支部連合大会講演論文集, 電気関係学会東海支部連合, 2002.
12. 瀧寛和, 磯村厚誌, 服部宏充, 新谷虎松: “会議スケジューリング支援のための位置情報予測システムの試作”, 平成 14 年度電気関係学会東海支部連合大会講演論文集, 電気関係学会東海支部連合, 2002.
13. 堀和裕, 服部宏充, 大園忠親, 新谷虎松: “モバイル可能な Life-like エージェントの試作”, 平成 14 年度電気関係学会東海支部連合大会講演論文集, 電気関係学会東海支部連合, 2002.
14. 山田亮太, 服部宏充, 大園忠親, 新谷虎松: “仮想オークションシステム MultiHammer におけるエージェントに基づく複数オークションサイトからの情報収集機構”, 平成 13 年度電気関係学会東海支部連合大会講演論文集, 電気関係学会東海支部連合, pp. 321, 2001.
15. 寺井豊, 服部宏充, 大園忠親, 新谷虎松: “P2P モデルに基づく売買交渉のためのエージェントによるマッチメイキングの実現”, 平成 13 年度電気関係学会東海支部連合大会講演論文集, pp. 316, 2001.
16. 伊藤孝行, 服部宏充, 福田直樹, 山田亮太, 新谷虎松: “マルチエージェント協調的入札に基づく複数オークション支援システム *BiddingBot* の実装”, 第 62 回情報処理学会全国大会論文集, pp. 53–54, 2001.
17. 山田亮太, 服部宏充, 大園忠親, 新谷虎松: “情報エージェントに基づく実験用仮想オークションサイトの実現”, 第 62 回情報処理学会全国大会論文集 (3), pp. 165–166, 情報処理学会, 2001.
18. 越智啓之, 服部宏充, 伊藤孝行, 大園忠親, 新谷虎松: “電子商取引におけるグループ購入支援のためのマルチエージェント協調システムの実現”, 第 62 回情報処理学会全国大会論文集, pp. 55–56, 2001.
19. 田中貴紘, 服部宏充, 伊藤孝行, 大園忠親, 新谷虎松: “グループ意思決定支援のための階層型合意形成機構の実現”, 第 62 回情報処理学会全国大会論文集, pp. 57–58, 2001.
20. 越智啓之, 服部宏充, 伊藤孝行, 新谷虎松: “グループディスカウントに基づく交渉を行うマルチエージェントシステムの実装”, 2000 年度電子情報通

信学会ソサイエティ大会講演論文集，電子情報通信学会情報・システムソサイエティ，pp. 85，2000．

21. 田中貴紘，服部宏充，伊藤孝行，新谷虎松：“階層型合意形成機構に基づくパーティー会場決定支援システム”，2000 年度電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集，電子情報通信学会情報・システムソサイエティ，pp. 83，2000．

索引

AHP	7, 98	Yahoo!Auctions	21	個人価値	23 , 35
Amazon.com NEW FOR YOU	18	値反復	36	個人合理性	25
AuctionBot	21	インターネットオークションサイト		混合整数計画法	74
BargainFinder	20	1		財の交換条件	88
BDI アーキテクチャ	13	エージェント	9, 10 , 11, 32	財の交換に基づく交渉手法	7, 81
BiddingBot	51, 52	異種の—	13	支配戦略	25
CABOB	31	階層型—	13	順位評点法	105
CBB モデル	16	協調的な—	14	順序制約	68, 71
E-GarageSale	82	信念-願望-意図—	13	準線形の効用	38
eBay	21	知的—		勝者決定問題	30
eMediator	31	—の社会性	12	勝者の災い	24
Firefly	19	知的—	11, 12	情報抽出パターン	56
Firefly Network 社	19	—の反応性	12	所得効果	38
GLPK	74	—の自発性	12	心的状態	13
GroupBuyAuction	95	—の自律性	10	スケジューリング問題	66
InteRRap	13	反応型—	13	整数計画問題	65
Jango	20	利己的な—	15	制約充足問題	66
Kasbah	21 , 95	論理に基づく—	13	線形計画問題	77 , 79
LDS アルゴリズム	74	オークション	3, 23	相関価値	24
MiLog	53 , 84	ヴィックリー—	28	代替性	24
—の代表的な組み込み述語	54	英国型—	26	多属性効用理論	22, 99
Netbot 社	20	オランダ型—	27	電子商取引	3, 16
Peer-to-Peer	83	組合せ—	30	動的計画法	35
PersonaLogic	18	第一価格秘密入札—	26 , 34	ナッシュ均衡	27
STEAM	15	第二価格秘密入札—	28	バレート効率性	25
Tête-à-Tête	22 , 95	ダブル—	28	分散人工知能	2, 13
TAC	21	逐次型—	31	分散問題解決	13
Word of Mouth	19	離散時間—	28	包摂アーキテクチャ	13
World Wide Web	1	連続時間—	28	補完性	25
		回数制約	68, 70	ボリュームディスカウント	81
		架空名義入札	29	マルコフ意思決定問題	35
		加法的な効用	35	マルチエージェントシステム	2, 13
		期待効用	15, 36	ミクロ経済学	38
		強化学習	110	メカニズムデザイン	3, 15 , 38
		共通価値	24	誘因両立性	25
		共通目標	14	予算制約	42
		議論に基づく交渉方式	97		
		組合せオークション	4		
		契約ネットプロトコル	15		
		ゲーム理論	2		
		考慮集合	16		