

博士論文

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

2000年1月

伊藤 孝行

論文要旨

インターネットの普及に伴い、エージェントと呼ばれる自律的かつ協調的にユーザの代理となって行動するソフトウェアが注目を集めている。エージェントはインターネット上でユーザの代理として、情報検索をしたり、他のエージェントと協調的にタスクをこなす必要がある。エージェントはユーザの代理であるから基本的に利己的であり、他のエージェントと信念や好みに関して競合する。すなわち、エージェントが協調的にタスクをこなすには、競合的な状況におけるエージェント間の協調機構が必要となる。競合的な状況で協調するためには、信念や好みを変更した上で合意ができる機構が必要となる。本研究では、競合的な状況で協調を行うための機構として、ユーザの主観的評価と多属性効用に基づく説得による合意形成機構を提案する。説得に基づく合意形成機構の有効性を確認するために、具体的な応用例として、エージェントに基づくグループ意思決定支援システム GCDSS(Group Choice Design Support System)、および、エージェントに基づくオンラインオークション入札支援システム *BiddingBot* を実装する。*GCDSS* の実装では、エージェントが、ユーザの好みを反映しながら、効果的に合意を形成するための多重交渉方式に基づく実装方式を提案する。*BiddingBot* の実装では、エージェントが協調的に複数のオークションサイトに対して入札をする協調機構を提案する。また、説得に基づく合意形成機構の理論的な形式化として、価値交換に基づく説得機構のゲーム理論に基づく形式化を示す。以上から、本論文の目的は以下の 3 つである。(1) エージェント間の合意形成のための説得機構の実現、(2) エージェント間の合意形成機構の具体的応用、および (3) ゲーム理論に基づくエージェント間の説得機構の形式化。

本論文の構成を以下に示す。第 2 章では、本研究の関連研究として、エージェント間の協調機構、エージェントによる意思決定支援、およびエージェントに基づく電子商取引に関して述べる。

第3章では、エージェント間の合意形成のための新たな手法として説得に基づく合意形成機構を提案する。既存のシステムではエージェントの合意形成方式として投票方式が一般的であった。しかし投票方式はさまざまな矛盾を包含していることが指摘されている。そこで、本システムでは単純な投票方式は使わず、説得機構によってエージェント間の合意形成を実現する。本章では説得機構の適用例の一つとして、グループ代替案選択支援システム GCDSS を示す。GCDSS ではユーザは主観的評価によって、各々に AHP を用いて問題の構造を明らかにし、代替案の重要度を決定する。その問題の階層構造と代替案の重要度を基本情報としてエージェントは交渉し、グループとして最も好ましい代替案を 1 つ得るために合意を形成する。本システムでは AHP の特徴の曖昧な尺度による重み付けに注目して説得機構を構築する。最後に本システムの試用実験から得られた知見と説得機構に関する実験から得られた説得機構の有効性を示す。

第4章では、GCDSS におけるエージェント間の説得のための新たな選好翻意機構を提案する。ここでは、より柔軟なエージェント間の説得を実現するために、妥協における新たな効用の変更方法として、多属性効用とユーザの主観的評価の不確定性を利用する。本選好翻意アルゴリズムは、選好に対する最小変更原理と選好順序に基づく変更原理に基づいたアルゴリズムである。本章では、選好翻意アルゴリズムが、効率的、かつ、より柔軟に選好を翻意できることを示すことによって本手法の有用性を示す。

第5章では、エージェント間の合意形成機構の現実的な応用例として、エージェント間の多重交渉に基づく GCDSS を示す。2つのエージェントの組合せにおいて説得者と被説得者の選定をランダムに一人選定した場合、最終結果が説得者に依存して交渉結果が異なり、ユーザの納得の得られにくい交渉結果が導きだされることもあった。そこで、第5章では GCDSS におけるエージェント間の交渉に関連してすべてのグループメンバーがそれぞれ説得者となるように複数の交渉パターンを設定し分散実行することによって、ユーザの納得がより得られやすい交渉結果を導き出すことを目的とする。エージェント間の複数の交渉パターンを効率的に実行するためにエージェントをモバイルエージェントとして実装する。本システムの特長は、複数の交渉パターンを同時に実行できる点、GCDSS の AHP 機構などの部分的な機構を持ったエージェントを転送することによりユーザは GCDSS の部分的な機構のためのプログラムを前もって個々に持

たなくても良い点、およびユーザの個人的な主観的評価に関するプライバシーを保ちながらグループ意思決定が行われる点である。最後に多重交渉に基づくGCDSSを実際に使用した経験から考察をまとめ、有用性を示す。

第6章では、エージェント間の合意形成機構に基づく具体的な応用例として、オンラインオークション入札支援システム *BiddingBot* を示す。近年、電子商取引のためのオンラインオークションが急速に普及している。インターネット上には150を越えるオンラインオークションサイトが存在する。ユーザが同時に複数のオンラインオークションサイトに対して参加、監視、および入札を行うことは困難である。*BiddingBot*は、ユーザが複数のオンラインオークションに参加、監視および入札することをマルチエージェントによって支援するシステムである。*BiddingBot*の特長は以下の通りである。(a) 複数のエージェントが協調的に複数のオークションに対して入札を行うために、ユーザは複数のオークションに対して効果的に入札を行うことができる。(b) エージェントは複数のオークションサイトから財の価格に関する情報を集めることができるので、ユーザはその財の相場価格を知ることができ、「勝者の災い」を避けることができる。(c) マルチエージェントに基づく設計により、新しいオークションサイトに対応する場合に、インクリメンタルに対応することができる。

第7章では、合理的なエージェント間の価値交換に基づく説得機構を、ゲーム理論に基づいて形式化する。ここでは協調スケジューリングをゲーム理論の協力ゲームにおける交渉問題として定式化し、エージェント間で交渉問題を解決するための手法として説得による手法を提案する。個々に異なるスケジュールを持つエージェントが合意形成し一つのスケジュールを協調的に生成することを協調スケジューリングと呼ぶ。スケジュールとはイベントの並びである。第7章では、互いに最も好ましい案を受け入れてもらうという交換条件の提示によって説得を実現する。協調スケジューリングの例の一つとして、エージェントによる議事のスケジューリングを示し、価値交換に基づく説得の有用性を示す。

第8章では、結論としての本研究で得られた成果、本研究の貢献分野、および今後の課題を示す。

Abstract

Agents, which can act autonomously and cooperatively in network environments on behalf of their users, are being actively investigated. The aim of this work is to propose and implement efficient negotiation mechanisms for reaching an agreement among agents on user's behalf. The problem is that we must clarify the trade-off between "reaching a consensus" and "reflecting the users' preferences." In order to improve the trade-off, the aims of this thesis are described as follows: (1)Proposing effective persuasion mechanisms for cooperation among agents. (2)Implementing practical applications based on the cooperation mechanisms. In this thesis, practical systems, the GCDSS(Group Choice Design Support System) and *BiddingBot*, are implemented and evaluated. (3)Formalizing an exchanging-based persuasion mechanism among rational agents by using Game theory.

This thesis consists of following eight sections. In Section 2, related works on cooperation mechanisms among agents, agent-based decision support systems, and agent-mediated electronic commerce are discussed.

In Section 3, we propose a persuasion mechanism for negotiation among agents for the GCDSS. GCDSS helps a group decision to make a reasonable choice from alternatives. In the system, each user manages a system for an Analytic Hierarchy Process (AHP) and an agent. Each user subjectively constructs a decision hierarchy and determines the various weights of alternatives by using AHP. Based on the hierarchy and weights, agents negotiate with each other on behalf of their users. During the negotiation, agents persuade one another. Adopting some of the features of AHP, we implement a new persuasion mechanism. We have implemented the GCDSS to see

how effectively the persuasion mechanism can be used. The results of our experiments demonstrated that the persuasion mechanism is an effective method for a group decision support system based on multi-agent negotiation.

In a persuasion among agents, agents try to revise their preference in order to compromise. In Section 4, we propose a new preference revision mechanism for persuasion among agents in the GCDSS. The preference revision mechanism is based on the multi-attribute utility and uncertainty of user's subjective judgments. Firstly, we propose an effective algorithm for preference revision. Then, we show the efficiency of our algorithm. The advantage of the preference revision mechanism is that persuasion between agents is facilitated and agents can more flexibly come to a consensus.

In Section 5, we implement the GCDSS as a practical application based on the cooperative mechanisms proposed in Section 3 and Section 4. A negotiation among agents consists of persuasions between two agents. If one agent who persuades the other is selected randomly in persuasion between two agents, the result of persuasion is dependent on which the agent persuades the other. This sometimes leads a result which is not agreeable to users. Therefore, in order to get a result which can be agreeable to users, agents conduct all patterns of negotiation in the GCDSS. In order to conduct multiple patterns of negotiation, we implement agents as mobile-agents. The features of the GCDSS are shown as follows: Firstly, agents can conduct multiple negotiations simultaneously. Secondly, since agents who have programs for the GCDSS can be transported to another host, users do not need to have programs for the GCDSS. Finally, we can preserve users' privacy on individual preferences in group decision making. Section 5 concludes that the proposed mechanism is quite appropriate in supporting group decision-making based on negotiation among agents.

In Section 6, we implement *BiddingBot* as another practical application based on the cooperation mechanisms proposed in Section 3 and Section 4. *BiddingBot* is a multi agent system that supports users to attend, monitor, and bid in multiple auctions. The features of *BiddingBot* are described as follows: (a)Since multiple agents co-

operatively bid to multiple auctions, *BiddingBot* enables users to bid effectively in the multiple auctions. (b) Since agents gather information on good's prices from multiple auction sites, users can find approximate market price and can avoid "winner's curse." (c) Multi-agent based design enables designers to extend the system incrementally in order to handle new auction sites.

In Section 7, we formalize a persuasion mechanism as a bargaining problem in game theory, then we propose a persuasion method for solving the bargaining problem among agents. The cooperation of agents in creating a global schedule (a schedule being a vector of events), we call "cooperative scheduling." We propose a persuasion method based on exchanging proposals between agents. Namely, each agent receives the other's proposal in compensation for the other's acceptance of his own proposal. In our experiments, we use agenda scheduling as an example of cooperative scheduling and demonstrate the efficiency of the persuasion method proposed here.

Finally, concluding remarks and future works are presented in section 8.

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	5
1.3 本論文の構成	9
第2章 関連研究	11
2.1 序言	11
2.2 マルチエージェント協調機構	11
2.2.1 協調, 交渉, および合意形成	11
2.2.2 協調的な合意形成方式	14
2.2.3 競合状態における合意形成方式	16
2.2.4 説得に基づく合意形成	17
2.3 エージェントに基づくグループウェア	18
2.3.1 意思決定支援とグループウェア	18
2.3.2 エージェントに基づく意思決定支援	20
2.4 エージェントに基づく電子商取引支援	23
2.4.1 検索に基づく電子商取引支援	24
2.4.2 仮想的な場を提供する電子商取引支援	24
2.4.3 エージェントによる売り手側の電子商取引支援	25
2.5 本研究の位置付け	26
2.5.1 関連研究マップ	26
2.5.2 他分野との関連	26
2.6 結言	29
第3章 GCDSS のためのエージェント間の説得機構	31
3.1 序言	31
3.2 GCDSS	32
3.2.1 システム構成	32
3.2.2 AHP の利用	33

3.2.3	エージェントによる AHP の管理	35
3.2.4	階層構造の部分的共有	36
3.3	エージェント間の説得	37
3.3.1	説得機構	37
3.3.2	説明機構	43
3.4	評価	43
3.4.1	システムに関する評価	43
3.4.2	説得機構に関する評価	44
3.5	結言	46
第 4 章	エージェント間の説得のための選好翻意機構	47
4.1	序言	47
4.2	多属性効用に基づく選好翻意機構	47
4.3	ラベルの付け替えに基づく選好翻意	51
4.4	選好の翻意に基づく説得プロセス	52
4.5	実験と考察	55
4.5.1	実験	55
4.5.2	選好翻意機構の長所	55
4.6	結言	57
第 5 章	多重交渉に基づく GCDSS の実装	59
5.1	序言	59
5.2	エージェント間の多重交渉	60
5.3	モバイルエージェントに基づく GCDSS の実装方式	62
5.3.1	モバイルエージェントに基づく GCDSS の構成	62
5.3.2	GCDSS の実行方式	63
5.3.3	各エージェントの機能	65
5.3.4	交渉ビューワー	68
5.3.5	本実装方式の利点	69
5.4	考察	70
5.4.1	モバイルエージェントに基づく実装方式の特長	70
5.4.2	試用評価	71
5.4.3	エージェントの設計に関する考察	72
5.4.4	交渉結果に関する考察	73
5.4.5	AHP によるグループ意思決定支援に関する考察	73
5.5	結言	75

第 6 章 協調的入札機構に基づく <i>BiddingBot</i> の実装	77
6.1 序言	77
6.2 <i>BiddingBot</i>	79
6.2.1 システム構成	79
6.2.2 入札支援プロセス	80
6.3 エージェント間の協調的入札機構	81
6.3.1 協調機構	81
6.3.2 価格増加率に基づく入札の提案	83
6.3.3 提案された入札の評価アルゴリズム	84
6.4 議論	86
6.4.1 Weblog に基づく試作と実行例	86
6.4.2 協調的入札機構に関する実験	89
6.4.3 入札の支配戦略に関する考察	89
6.4.4 本システムの特長	90
6.5 結言	91
第 7 章 価値交換による説得機構のゲーム理論に基づく形式化	93
7.1 序言	93
7.2 協調的なスケジューリングの定式化	94
7.3 交換条件の提示による説得	97
7.4 具体例	99
7.4.1 議事スケジューリングの具体例	99
7.4.2 実験と評価	102
7.5 ゲーム理論に基づく考察	104
7.6 関連研究	105
7.7 結言	106
第 8 章 結論	107
8.1 成果	107
8.2 本研究の貢献	109
8.3 今後の課題	112
謝辞	115
関連文献	117
原著となった発表論文一覧	147

付 錄 A GCDSS の実行例	153
A.1 グループ意思決定支援過程の例	153
A.2 交渉ビューワー	159
A.3 ラベルの付け替えの例	160
付 錄 B AHP の概要	163
付 錄 C モバイルエージェント	173
C.1 モバイルエージェントの紹介	173
C.2 Aglets Software Development Kit	174

図 目 次

1.1	本論文の各章の関連図	10
2.1	関連研究マップ	27
2.2	他分野との関連図	28
3.1	システム構成	32
3.2	GCDSS のグループ意思決定支援過程	33
3.3	要素 A と B 間の重み付け	34
3.4	エージェント間の交渉の流れ	38
3.5	2 エージェント間の説得の流れ	39
3.6	重み付けの調整の例	40
3.7	一対比較行列における重み付けの調整の例	42
3.8	説得機構に関する実験	44
3.9	調整範囲に関する実験	45
4.1	多属性効用に基づく選好翻意アルゴリズム	50
4.2	ラベルの更新の例	53
4.3	選好翻意プロセス	54
4.4	実験結果	56
5.1	エージェント間の多重交渉	61
5.2	起動時の構成	63
5.3	多重交渉を同時実行する構成	64
5.4	選好の変更アルゴリズム	67
6.1	<i>BiddingBot</i> のシステム構成	79
6.2	入札支援プロセス	80
6.3	楽観主義関数とコスト回避型関数	85
6.4	リーダーエージェントの実装例	86
6.5	ビッダーエージェントの実装例	87

6.6	<i>BiddingBot</i> の実行例	88
6.7	協調的入札機構に関する実験	89
7.1	説得の例	98
7.2	合意形成の例	100
7.3	実験結果	103
A.1	意思決定問題の入力	153
A.2	参加者の指定	153
A.3	Web ブラウザによる情報取得	154
A.4	代替案の作成	155
A.5	代替案の登録	155
A.6	AHP 機構と AHP 管理工エージェント	156
A.7	AHP 機構に基づく意思決定	157
A.8	意思決定木の変更点の視覚化	157
A.9	多重交渉の視覚化	158
A.10	交渉ビューワー	159
A.11	ラベル付け替えの例	161
B.1	海外旅行の行き先選択問題の階層構造	164
B.2	より複雑な階層構造	165
C.1	RPC に基づく 2 エージェント間通信	174
C.2	モバイルエージェント間の通信	174

表 目 次

5.1 メッセージ交換に関する実験結果	71
B.1 “海外旅行の行き先の選定”について	165
B.2 “面白さ”について	166
B.3 “治安”について	166
B.4 “費用”について	166
B.5 一対比較の尺度	168
B.6 ”面白さ”に関する一対比較行列	168
B.7 ランダム整合度	170

第1章

序論

1.1 本研究の背景

元来，Artificial Intelligence(AI)[106][107]の分野では，人間の知性を解明することに重きが置かれてきた．現在は，知性自体を解明することではなく，知的な振舞をするシステムの構築に重きが置かれつつある．空を飛ぶために鳥の飛ぶ原理を解明するのではなく，ジェットエンジンを積んだ飛行機を作るアプローチと類似している．鳥の飛ぶ原理を解明することよりも，実際に空を飛ぶことのできる飛行機の方が有用なのである．知性自体を解明することも大きなテーマではあるが，現在は世の中に実際に役に立つような知的な振舞をするシステムを構築することが主流となりつつある．

元来の AI の人間の知性の解明という研究において，代表的な研究テーマが「チェス」であろう．チェスにおける最善策を，なるべく早く，なるべく少ない資源で読み切るために，さまざまな探索手法が考案されてきた．これらの研究は，AI の発展に多大な成果を残したが，1997 年 5 月にチェスのグランドマスター，カスパロフに勝利した IBM のチェスマシン Deep Blue[46]によって，その終止符を打たれたといっても過言ではない．Deep Blue はすべての可能な手を時間のある限り探し続けるといいわゆる Brute Search の手法を用いており，AI ではないとの声もある．しかし，実際に「チェスのグランドマスターに勝利する」という当初の目標が達成されたことに違いはない．その結果，研究者の興味は知性の解明から，知的な振舞いをするシステムの実現に移りつつある．

なぜ，知的な振舞いをするシステムに関心が集まっているのか？

その答えは、近年の宇宙開発技術や高度情報処理技術の発展にある。以下、この2つの技術の発展に関して知的な振舞いをするシステムが注目されている理由を論じる。

宇宙開発に関しては現在火星探査が行われている。地球から何万kmも離れた火星で地表等の探査を行うためには、人間が実際にに行くにはリスクが大きく、かつ、遠隔コントロールも通信の遅延があるために使いづらい。そのような極限状態の世界には、自律的かつ知的なシステムの活躍が期待される。ここでいう知的とは、チェスでグランドマスターを負かすほどの知性を備えている必要はない。なにか予測外なことがあこってもとりあえず対処できる程度の知性があればよいのである。通信の遅延があっても許容できるような作業（例えば採石作業など）はリモートコントロールで行えば良い。実際に火星表面で自律的に作業を行うシステムとして1997年7月、Mars Path Finderが火星に送り込まれた[92]。Mars Path Finderは実際に火星表面で作業を行い、火星表面の様々なデータを取得することに成功している。

以上のような、予期しないことに対してとりあえず対処できるという自律的なシステムをリアクティブ(Reactive)システムと呼ぶ。AIでは元来、センサーで情報を読み込み、論理(Logic)に基づいてモデルを生成し、推論する（プランを生成する）ことによって、行動するというシステムが構築されてきた。このようなシステムを論理に基づく知的システムと呼ぶ。上でも述べたとおり、論理に基づく知的システムは、予測外のことが起こった場合に、とりあえず対処することが困難であった。なぜなら、起こり得るすべてのことを記述することは不可能（フレーム問題）、および、推論を複雑にすればするほど多くの計算時間が必要となり、結果として対処が遅れる、という理由からであった。そこで論理に基づく知的システムに対して、リアクティブなシステムが注目を集めようになった。リアクティブなシステムのためのアーキテクチャの中で代表的なものは、MITのR.Brooksによる包摂アーキテクチャ(Subsumption architecture)[9]である。包摂アーキテクチャでは、複数のリアクティブな行動モジュールが、それぞれ前もって割り当てられたタスクを並行に実行する。重要な点は各行動モジュールがタスクを実行する場合に、論理的な処理を含むいかなる記号的な処理も行わず、反射的にタスクを実行するという点である！包摂」と呼ばれる理由は、これらの複数の行動モジュールの優先順序を前もって包摂的に決定しておくこ

とによって、複数の行動モジュールからのタスクの実行命令を制御しているためである¹。

最近の研究では、リアクティブなアーキテクチャから更に進み、階層アーキテクチャ（Layered architecture）[88]が注目を集めている。階層アーキテクチャは、リアクティブな機構と論理的な推論を用いた熟考機構を組み合わせ、階層的に制御するというアーキテクチャである。

Mars Path Finder にしても、階層アーキテクチャにしても、とりあえず知的に振舞うという機能に重きが置かれている。すなわち、実際に知性が導入されているわけではなく、知的に振舞い、かつ役に立つことが重要とされている。知的なシステムを構築する上で、最近の研究で注目を集めているアーキテクチャとして BDI アーキテクチャ（BDI architecture）[8]もある。BDI アーキテクチャは、人間の実際の推論をモデル化し、知的なシステムの心的状態（Mental state）を信念（Belief）、願望（Desire）、および意図（Intention）を用いて構築するものである。BDI アーキテクチャはどちらかといえば知性そのものを解明するという立場から発展したアーキテクチャである。しかし、BDI アーキテクチャを実際にシステムとして実現する場合、基本的には階層アーキテクチャの中に実装される。INTERRAP[88]は、実際のシステムとして、BDI アーキテクチャが利用された良い例であるが、基本は階層アーキテクチャであり、現実的に知的に振舞うことに重きが置かれている。

高度情報処理技術に関して、1990 年代に著しく発展した技術の一つは、インターネットである。インターネット上には、無数の情報が流れしており、その情報を検索、抽出、発見などを行う情報フィルタリングやデータマインニングが注目されている。さらに近年、インターネット上の電子商取引が爆発的に普及しはじめている。例えば、オンラインショップ www.amazon.com[1] などは有名なインターネット上の本屋である。www.ebay.com[28] などのオンラインでオークションを行うサイトも 1990 年代後半に急速な勢いで普及している。これらのオンラインのショッピングサイトは、今後の経済に大きなインパクトを与えると言われている。なぜなら、ワールドワイドな国境を越えた商取引が可能になるために、世界がより大きな一

¹ 包摂アーキテクチャは、階層アーキテクチャを指すわけではないことに注意されたい。階層アーキテクチャでは、リアクティブな階層や推論を行う階層、というような階層が分けられるのに対して、包摂アーキテクチャでは、すべての行動モジュールはリアクティブに反応できる。

つの市場と成り得るからである。

インターネット上には無数のショッピングサイトがあり、瞬時に商品やサービスの情報を取得することが可能である。人手で商品やサービスに関する情報を取得するよりも、プログラムで自動的に取得する方がはるかに効率が良くなったのである。そこで、インターネット上で電子商取引を支援する知的かつ自律的なシステムが複数開発された。代表的な例としては、ShopBot[25]がある。ShopBotは、インターネット上に無数のオンラインショップから、なるべく安価かつ、ユーザの好みにあった商品を探し出すシステムである。一方、電子商取引を行う仮想的な場（具体的にはサーバー）を提供するようなシステムも開発されている。例えば、AuctionBot[148]やKasbah[11][12]が研究・開発されている。さらに、複数のオークションサイトに対して、同時にかつ適切に入札を支援するシステムとして、本論文の第6章で述べる *BiddingBot*[54]もある。また、消費者側の支援を行うShopBotやそれに類するシステムが将来、爆発的に増えた場合に、売り手側がどのように対抗すべきか、という研究も行われている。そこでは、売り手側は PriceBot[39] という価格をダイナミックに設定するようなシステムを使うことが提案されている。以上のようにインターネット上で人間の支援をするシステムに関しても、知性自体が埋め込まれているのではなく、知的な振舞いを持たされることによって、実際に役に立つシステムとして構築されている。

以上に述べた知的な振舞いをするシステムは、エージェント [49] [68] [72] と呼ばれている。エージェントという言葉は、AI(Artificial Intelligence)の分野 [106] [107]、AIの分野から派生した分散人工知能の分野 [50] [51] [76]、分散人工知能におけるエージェントの自律性をより強く意識したマルチエージェントシステムの分野 [95] [136] [144]、HCI(Human Computer Interaction)の分野 [7]、人工生命、人工社会または複雑系 [6] の分野等で使われており、それぞれ意味を持っている。

現在、エージェントという言葉に関して統一的な合意は得られていないが、少なくとも自律性(Autonomy)のある行動主体であるということに関しては合意が得られている[144]。AIの分野でのエージェントは、現在は知的エージェントと呼ばれる。知的エージェント(Intelligent agents)とは、即応性、自発性、および社会性を持ったエージェントである[61] [72] [146]。例えば、サーモスタッフやUNIX

のデーモンプロセスはエージェントではあるが、知的エージェントではない。分散人工知能やマルチエージェントシステムの分野では、複数のエージェント間のインタラクションや協調などに焦点がおかれる、AIの分野では一つのエージェントをいかに知的にするかということに焦点が置かれる。マルチエージェントシステムとは、複数のエージェントの自律的かつ協調的な行動によって問題を解決するようなシステム [95] [136] [144] である。マルチエージェントシステムにおいて、エージェントは個々に問題を持ち、かつ個々に問題を解決しながら、システム全体としての問題もうまく解決しなければならない。システム全体としての問題を解決するためには合意を形成する必要がある。合意形成 [89] [90] [152] はマルチエージェントシステムにおける重要な問題の一つである。HCI の分野では、エージェントを「同じ仕事環境の中でユーザと協力する個人的なアシスタンント」と比喩している [80] [93]。本論文では、エージェントとは、ネットワーク上で自律的、協調的、かつ合理的に振舞うことにより人間の活動の支援を行うソフトウェアと定義する。

1.2 本研究の目的

第 1.1 節の背景から、近い将来、ユーザの代理である複数のエージェントがインターネット上、または実世界（ロボット）において、行動することが予測される。ユーザの代理をするエージェントは、主人であるユーザの好みや意見を最大限に反映した行動を取る必要があるから、本質的に利己的であると考えられる²。ユーザの支援をより効果的に行うには、各エージェントが相互に合意を形成し、協調することが必要となる。エージェントは互いに利己的であるから、エージェント間の関係は競合している。ユーザにとっては、エージェントが利己的に振舞い続けるよりも、協調的に仕事を効率良くこなす方が望ましい。そこで、競合的な状態においても、エージェント間で合意を形成ができるような仕組みが必要である。

競合的な状態において、合意を形成するには、各エージェントの選好、信念、意見、などを変更する必要がある。なぜなら、競合的な状態ではエージェントは利己的であり、自分の効用を最大化するように振舞っているからである。そこで本研究ではエージェントが

² 主人であるユーザに対しては、服従すべきである。

選好，信念，意見などを変更して合意を形成する手法として，エージェント間の説得機構を実現することを目的とする。

目的 1 エージェント間の説得に基づく合意形成機構の実現

一般社会における人間同士の説得とは「主として言語を用いて，相手方をして自発的に自己の求める行動を取らしめる作業[74][75]」である。ソフトウェア（またはロボット）であるエージェントによる説得を考える場合に重要なことは，被説得者に自発的な行動を起こさせることである。そこで，本研究ではエージェント間の説得を次のように定義する。エージェント間の説得とは「説得する側のエージェントが送信した説得のメッセージを説得される側のエージェントが受けとり，説得される側のエージェントが自らの選好や信念を変更することによって，説得のメッセージに妥協すること」である。本論文では，説得においてエージェントが妥協を試みるために，選好を変更することに焦点を絞る。選好を変更することを選好の翻意と呼ぶ。一方，信念の変更は，信念の翻意（Belief revision）[36]と呼ばれる。

エージェント間での合意を形成する機構を設計する場合の問題点としては，(1) ユーザのプライバシーを守る必要がある点，(2) 効用の個人間比較は行うべきではない点，および(3) ユーザの好みを反映させる必要がある点，などが挙げられる。(1) ユーザのプライバシーを守る必要がある，とは，エージェントが主人であるユーザの好みに関する情報を他のエージェントに必要以上に明かすことは望ましくないということである。(2) 効用の個人間比較は行うべきではない，とは，個々のユーザの好みや効用は，そのユーザの主観的な値であるから，異なるユーザ間で比較することはできないということである。すなわち，公共経済などで良く使われる大域的な効用関数は，現実的なユーザの代理としてのエージェントに埋め込むべきではない。(3) ユーザの好みを反映させる必要がある，とは，ユーザの好みの意思決定をするべきではないことを示している。すなわち，エージェントは他のエージェントに対して利己的に行動すべきである。例えば，他のエージェントの仕事を何の報酬もなく手伝ってしまうことは望ましくない。

以上の(1)，(2)，および(3)を考慮した上で，選好の翻意の手法として以下を提案する。

- エージェントがユーザの主観的な選好を扱うには、その選好を数値化する必要がある。数値化において、ユーザの主観的な選好は、厳密な定まった値で表現できない。むしろ、ある程度の範囲を持った値で表現される。そこで、適度な範囲であればユーザの選好は調整可能と考え、これに基づいて選好の翻意機構を実現する。
- 選好の翻意をより効率的に、かつ、より成功しやすくするために以下の (a) と (b) の事項を考慮に入れ、より柔軟な選好の翻意機構を実現する。(a) 多属性効用の観点から、ユーザの選好の変化を最小限にし、かつ、選好順序に従ったリーズナブルな変更を行う。(b) ユーザの主観的な評価の不確定性に基づいた選好の翻意を行う。

さらに説得に基づく合意形成を用いた時、ユーザの好みを最終的な合意により反映するための手法として、多重交渉方式を提案する。多重交渉方式では、すべてのエージェントが説得者となることが可能となる。すなわち、すべてのエージェントが自らの選好を他のエージェントの選好に反映する機会を持つことができる。

目的 1 で提案した合意形成機構が、ユーザの代理としてのエージェント間の合意形成に有効であることを示すために、具体的なアプリケーションを示す必要がある。すなわち、以下が本研究の 2 つ目の目的となる。

目的 2 エージェント間の合意形成機構の具体的応用

本研究では、エージェント間の合意形成機構の具体的な応用例として、グループ代替案選択支援システム GCDSS(Group Choice Design Support System) および、マルチエージェント入札支援システム *BiddingBot* を実現する。

GCDSS は問題を解決するための代替案が複数ある場合に、グループとして代替案を一つ決定することを支援する。本論文では、GCDSS の実装方式として、以下の (I), (II), および (III) の 3 点を満たす実装方式を提案する。(I) 多重交渉方式を実現可能。(II) ユーザのプライバシーの保持が可能。(III) 遠隔地からの利用が可能。本実装方式にはモバイルエージェントの技術(付録 C)を用いる。GCDSS の実

装によって具体的なアプリケーションとして、エージェント間の説得の有効性を確認できる。

*BiddingBot*は、インターネット上の複数のオンラインオークションでの入札をマルチエージェントの合意形成に基づく協調によって支援する。一般にオークションでは、共通価値オークションでは勝者の災いが起こることが指摘されている。そこで本システムでは、複数のオークションサイトに対するモニタリングをマルチエージェントで行うことにより、財に対する相場価格に関する情報を収集する。財に対する相場価格を知ることによって、勝者の災いを回避できる。複数のオークションサイトで、同じ財が取り引きされている場合に、なるべく安く落札することは、人間にとては大きな負担であると考えられる。そこで*BiddingBot*では、エージェントが人間の代理となって、協調的に複数のオークションで入札を支援する。さらに複数のオークションに同時に参加し効果的に入札を行うためのエージェント間の合意形成機構を提案している。

さらに本論文では、エージェント間の説得機構の理論的な形式化を行う。説得は複数の自律的なエージェント間の活動であるから、複数の意思決定主体からなる状況を表現し分析するための言葉の体系であるゲーム理論 [130] [131] [132] [133] を用いる。

目的³

ゲーム理論に基づくエージェント間の説得機構の形式化

ここでは、合理的な説得機構として、価値交換による説得機構を提案し、ゲーム理論に基づいて形式化する。価値交換による説得機構は、ゲーム理論における協力ゲームの交渉問題のための、合意形成手法の一つとして捉えることができる。交渉問題における解の概念に関しては、ナッシュ解等の概念が広く研究されている。元来ゲーム理論ではプレイヤーとして「人間」が考えられた。すなわち、プレイヤーは話し合いなどの能力を当然持ち合わせる、という仮定があったのである。本研究ではプレイヤーはソフトウェアであるエージェントであるため、何らかの合意形成手法を組み込む必要がある。そこで本研究では、価値交換という合理的な説得手法によって合意形成を実現する。価値交換とは、直感的には、二人の間で「私のこの意見を受け入れてください。その代償として、私はあなたの意見の一つを受け入れます」という説得手法である。本研究では、協調的

なスケジューリングというドメインにおいて，価値の交換に基づく説得の有用性を示す。

以上本研究の目的を以下にまとめる。

目的 1:

エージェント間の説得に基づく合意形成機構の実現。

目的 2:

エージェント間の合意形成機構の具体的応用。

目的 3:

ゲーム理論に基づくエージェント間の説得機構の形式化。

1.3 本論文の構成

本論文の構成を以下に示す。

2章では，本研究の関連研究を述べる。3~7章は大きく分けて，3,4章，5,6章，および7章に分けられる。3,4章では，目的1に関連して，エージェント間の説得に基づく合意形成機構について論じる。5,6章では，目的2に関連して，エージェント間の合意形成機構の応用として，GCDSSおよび*BiddingBot*について論じる。7章では，目的3に関連して，ゲーム理論に基づくエージェント間の説得機構の形式化について論じる。8章では，本論文の結論として，成果，貢献，および今後の課題を示す。

図1.1に本論文の構成を各章の関連図として示す。

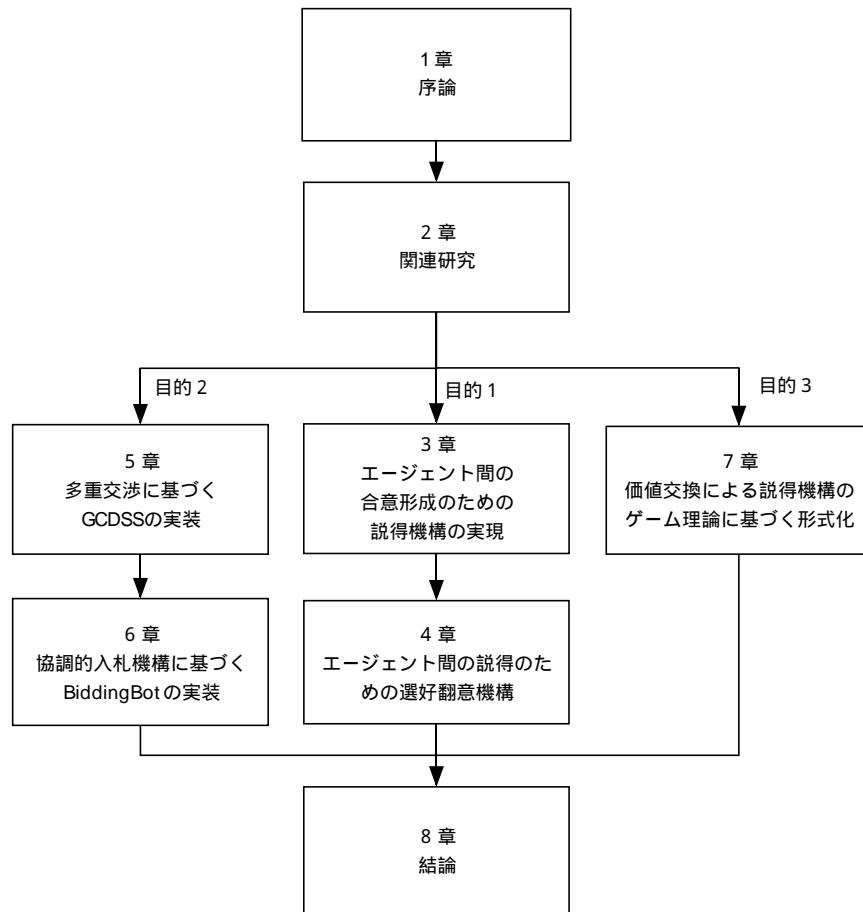


図 1.1: 本論文の各章の関連図

第2章

関連研究

2.1 序言

本章では、本研究の背景となる関連研究について述べる。まず、本研究のメインの研究テーマであるマルチエージェントの協調機構について述べる。次に、エージェントを用いたグループウェアについて述べる。最後に、近年、マルチエージェントシステムの応用分野として注目を集めているエージェントに基づく電子商取引について述べる。

2.2 マルチエージェント 協調機構

2.2.1 協調、交渉、および合意形成

本節では、エージェント間の協調、交渉、および合意形成について論じる。

協調および交渉の定義は様々であるが、例えば、分散人工知能の立場からの伝統的な定義として以下がある。

定義 1 (伝統的な協調と交渉に関する定義) 協調 (*Cooperation*) は、非対立的 (*Nonantagonistic*) エージェント間の調整 (*Coordination*)¹ であり、交渉 (*Negotiation*) は、競争的または利己主義的なエー

¹ 調整 (*Coordination*) とは、共有環境において何らかの行動を行う複数のエージェントからなるシステムの特徴である。調整の程度はシステムによって異なるが、調整によって、リソースの競合を減らしたり、デッドロックを避けたり、安全性を適切に管理することによって、エージェントが、非本質的な行動をするこ

ジエント間の調整である [144] .

定義 1 は非常にシンプルであり「協調」とは協調的問題解決における協調のみを示している。また「交渉」に関しては、とりあえずこの定義が一般的であるが、固定された定義はないことも指摘されている [61]。伝統的な分散人工知能の分野では、複数のエージェントが共通の目標を達成するために協調する機構が設計された。ある一つの設計方針に基づいて、すべてのエージェントの行動方式や協調方式が設計されたと言える。すなわち、すべてのエージェントは Homogeneous (同種、同質) であり、閉じたシステムの中で設計されており、エージェントは本質的に協調するものとして設計されていれば十分だったのである。

しかし、近年、エージェントは、オープンな環境でそれぞれ異なった設計方針で設計されるようになった。すなわち、Heterogeneous なエージェントの設計が期待されている。例えば、急速に広がっているインターネット上で人間の支援をするエージェントは、それぞれ異なった設計方針のもとで行動している。エージェントを、本質的に協調するものとして設計することは困難となったのである。さらに、本研究のようにエージェントを人間の代理として設計するならば、利用者である人間が利己的であると考えると、エージェントも利己的に設計されると考えるのが自然である。人間が完全な Utility maximizer とは限らないが、限られた範囲においても効用を最大化する(限定合理性と呼ばれる)と考えられる。そこで、その代理を務めるエージェントも限られた範囲だけでも効用を最大化する必要がある。以上のように近年のオープンな環境におけるエージェントの役割を考えると、定義 1 でいう競争的または利己主義的なエージェント間においても協調することが望まれる。

本論文ではエージェント間の協調機構を、ゲーム理論 [79] [130] [131] [132] [133] の協力的な状況と非協力的な状況に基づいて定義する。ゲーム理論を用いることによって、複数の意思決定主体の相互作用について、適切に説明できる。なぜなら、ゲーム理論とは「複数の意思決定主体からなる状況を表現し分析するための言葉の体系である」[133] であるからである。ゲーム理論では、対象とする状況において取り得る戦略に対して合意が成立するか否かで、その状況を協力ゲームと非協力ゲームに分類する。協力ゲームとは、互いに

とを避けることができる。

取り得る戦略に対して合意が成立し得る状況である。互いに合意の得られる戦略が見付かった場合、エージェントは互いにその戦略を取ることになる。非協力ゲームとは、そのような合意が成立しない状況である。協力ゲームの「協力」とは「Cooperation」を意味し、「協調」と同じ意味である。また、協力ゲームといつても、各意思決定主体が全面的に協力するというわけではなく、そこには依然としてエージェント間の競争やコンフリクトが存在し、エージェント間の駆け引きが存在し得る。

以上からエージェント間の合意形成機構を以下のように定義する。

定義 2 (エージェント間の合意形成機構) エージェント間の合意形成機構とは(1)もともと合意が可能な協力ゲーム的な状況においては、交渉を行うことによって、エージェント間でよりリーズナブルな合意を形成するための機構。(2)合意が成立しない非協力ゲーム的な状況においては、状況を協力ゲーム的な状況にするために、選好や信念を修正することによって、合意が成立する状況に変化させ、リーズナブルな合意を得るための機構。

また、エージェント間の交渉は上で挙げた伝統的な定義1[144]とほぼ同じになる。

定義 3 (エージェント間の交渉) 協力ゲーム的状態または非協力ゲーム的状態において、競争的または利己主義的なエージェント間で合意を得るための調整である²。

次に、合意形成機構の定義に基づいてエージェント間の協調機構を以下のように定義する。

定義 4 (エージェント間の協調機構) エージェント間の協調機構とは、互いの仕事を共同で行うための合意を形成しながら、エージェントのグループとして与えられた仕事を達成していくための機構である。

² ゲーム理論では協力ゲームにおいて互いに合意できる点を探す問題を交渉問題と言う。交渉問題は英語では Bargaining Problem と呼ばれる。一方、伝統的な定義1[144]では、交渉を Negotiation としている。Bargaining と Negotiation の差は、Wasington University in St. Luis の Associate Professor, Tuomas W. Sandholm によると、Bargaining では選好や信念の変更はない。すなわち、協力ゲーム的な状態で合意を得るための交渉は Bargaining であり、選好(好み)や信念の修正は考えないことを言う。また、非協力ゲーム的な状態で合意を得ることは Negotiation と呼び、選好や信念の修正を考えることを言う。

計算機上のエージェント間の相互作用について、ゲーム理論的な説明をより詳細に行ったのが、Rosenscheinら [104] [105] [155] [156] である。Rosenscheinらは、エージェント間の相互作用を、タスク指向領域 (Task-Oriented Domain:TOD)、状態指向領域 (State-Oriented Domain:SOD)、および価値指向領域 (Worth-Oriented Domain) に分類した。

タスク指向領域は、エージェントの行動はすべてタスクの集合として表される。タスクを実行するための資源はすべて利用可能である。あるエージェントのタスク集合に対するコストは、他のエージェントのコストとは独立であり、かつタスクはコストなしに分配可能である。すなわちエージェントは本質的に協調的である。ゲーム理論での協力ゲーム的な状況である。

状態指向領域は、タスク指向ドメインを含むが、エージェントはある初期状態から目標状態へ移動する実体としてとらえられる。タスク指向ドメインと異なる点は、各エージェントのタスクが他のエージェントのタスクに影響を与えることがあるという点である。そして Rosenschein らは状態指向領域を協調的状況、妥協的状況、準協調的状況、準妥協的状況、および競合的状況に分類している。協調的状況、妥協的状況、準協調的状況、および準妥協的状況は、ゲーム理論における協力ゲームにあたる。競合的状況は、ゲーム理論において非協力ゲームの状況にあたる。すなわち、上で述べた(1)のケースは、協調的状況、妥協的状況、準協調的状況、および準妥協的状況に当たる、(2)のケースの状況は、競合的状況に当たる。

価値指向領域は状態指向領域を一般化したものである。状態指向領域は、目標状態だけに価値が存在し、その他の状態は価値がゼロであったのに対して、価値指向領域では各状態に対して価値が存在する。本論文においても第7章での、協調スケジューリングの枠組は価値指向領域に含まれる。

2.2.2 協調的な合意形成方式

本節では協調的な合意形成方式の関連研究を示す。協調的な合意形成方式とは、各エージェントは、自分の選好や信念を変更することなく、合意が得られる場合に、用いられる協調方式である。

契約ネットプロトコル [128] は、エージェント間の協調方式としては最も知られた古典的な方式である。契約ネットプロトコルは、人

間社会の様々な契約プロセスをモデル化した交渉方式であり、エージェント間のタスク割り当てのために提案された。ある契約を提案するエージェントはマネージャ、請け負うエージェントは契約者と呼ばれる。マネージャと契約者は複数存在し得る。一般的な契約ネットプロトコルは、マネージャのアナウンス、契約者の入札、マネージャの落札の順でメッセージが交換され契約が成立する。契約ネットプロトコルの特徴は、マネージャと契約者が互いに独立の評価基準を持つことである。すなわち、マネージャも契約者も互いに選択権を持つ。これは契約ネットプロトコルにおける相互選択（mutual selection）と呼ばれる。

多段階交渉プロトコル [14] は資源割り当てのためのプロトコルであり、大域的な制約があることを前提とする。エージェントは大域的な制約が満足されるまで繰り返し交渉を行う。契約ネットプロトコルでは、すべての契約は互いに独立であり影響し合わない。つまり大域的な制約は考慮されていなかった。この点が多段階交渉プロトコルと契約ネットプロトコルの相違点である。

オークションもエージェント間のタスク割り当てや資源割り当てのための交渉方式として、利用される。オークション [102] は、売り手と買い手により行なわれる。売り手はより高く品物を売ることを望み、買い手はより安く品物を買うことを望む。オークションには次の 4 つのプロトコルがある。(a) 英国式オークション、(b) 第一秘密入札オークション、(c) オランダ式オークション、(d) 第二価格秘密入札（Vickrey）オークション。(a) 英国式オークションでは、買い物手は自分の入札価格を自由に何度も引き上げることができ、その入札価格は公開される。最も高額な入札価格を示したものに商品が落札される。(b) 第一秘密入札オークションでは、入札価格は非公開であり、買い物手は入札を 1 度だけ行なうことが可能である。(c) オランダ式オークションでは、売り手が徐々に値段を下げていく。そして、最初に入札した買い物手に落札される。(d) 第二価格秘密入札オークションでは、入札価格は非公開、かつ買い物手の入札は一度限りである。商品は最も高額な値段を入札として示した売り手に落札されるが、値段は入札として示された値段の中の 2 番目のものが採用される。文献 [111] では、第二価格秘密入札オークションをエージェント間のタスク割り当てに関して使う場合の矛盾点および限界を示している。

上で挙げたオークションプロトコルのいくつかの長所を組み合わ

せた，サバイバルオークション [33] が提案されている。サバイバルオークションの流れは以下の 1~5 である。

1. すべての入札者がアクティブである。オークショニアは初期の最小入札額をアナウンスする。
2. アクティブな入札者は、それぞれ、秘密入札を提出する。入札は、最小入札額以下になってはいけない。
3. オークショニアは、アクティブな入札者の内のだれがアクティブなまま残るかをアナウンスする。
- 4.もし、一人だけがアクティブな入札者として残ったならば、この人が勝者である。オークショニアは、勝者がいくら払わなければならぬかをアナウンスする。
5. 一人以上の入札者がアクティブとして残ったならば、オークショニアは次のラウンドの最小入札額と、非アクティブになった入札者のすべての入札額をアナウンスする。そして 2 に戻る。

具体的なエージェント間の交渉モデルとしては Bazaar[154] がある。Bazaar は、交渉の逐次的意思決定プロセスのモデルである。ここでは、逐次的な意思決定プロセスに基づく交渉プロセスを定式化し、その上で学習メカニズムを提案している。2 エージェント間の交渉において、逐次的な意思決定プロセスとして、提案と提案に対する受理または拒否が繰り返され、合意に至る。文献 [154] と本論文で提案する説得の異なる点は、文献 [154] の交渉プロセスでは、初期の選好は保持されたままであるが、本論文で提案する説得では、エージェントは選好自体を変更する点である。

2.2.3 競合状態における合意形成方式

本節では競合状態における合意形成方式を示す。競合状態では 2 つ以上の選好、信念、意見などがある場合にそれを一つにまとめる必要がある。すなわち、競合状況においては、合意が形成するために、選好または信念を変更する必要がある。本節で示す合意形成方式は本質的に選好または信念を変更するメカニズムが含まれている。

人間のグループによる合意形成は投票によって合意を得るのが一般的である。投票によって合意形成を行なった場合、結果が予想通りである場合もあるが、予想が全く外れて意外な結果を示すことが多い。これは、多数決原理の矛盾、単記投票方式の矛盾などによっ

て，投票された票の集計方法によって全く異なった結果を示す場合があるからである。また，投票による決定方法で「個人選好の無制約性」「市民の主権性・パレート最適性」「無関係対象からの独立性」および「非独裁性」の民主的な意思決定に必要とされる4つの公理をすべて満たす決定方法は存在しないことがArrowの一般可能性定理によって示されている[4][63][110]。実際の人間における交渉を考えた場合，投票以外の合意形成の一つとして，グループのメンバーが互いに相手を説得することによって，合意を形成していくという方法が考えられる。

合意形成機構として，合意が得られない場合に，エージェントが妥協(Compromise)する機構が提案されている[37][78]。文献[37][78]では，会議スケジューリングを例題とした，分散制約充足に関して妥協メカニズムを導入している。ここでは，すべてのエージェントは合意を得ることに失敗した場合，無条件に妥協をすることが前提とされる。

文献[89][90][152]では，エージェントの合意形成方式として，トーナメント方式および投票方式を提案している。ここでは，合意案の候補に対する重みや立場関係を数値で表現する。エージェントは基本的に提案，提案の評価，賛成/反対提案/反対，を繰り返すが，ここでは具体的な評価関数などは示されていない。

Rosenscheinら[104][105][156]は，統合交渉プロトコルを提案しており，競合状態になる場合において確率的なコイン投げの手法を用いて競合の解消を行う手法が挙げられている。

2.2.4 説得に基づく合意形成

競合状態におけるエージェント間の合意形成として，本節では説得による合意形成を示す。

PERSUADER[134][135][137]は，労働争議における調停案を生成するシステムである。PERSUADERは，事例ベース推論や多属性効用理論を用いて，議論の目的や議論の戦略に基づいて，様々な議論を生成できる。GCDSSとPERSUADERの相違点は，GCDSSではエージェントが実際に意思決定プロセスを実行するが，PERSUADERでは競合を解消するための議論を生成するので，意思決定プロセスを実行するのは利用者自身となる点である。また，PERSUADERは，属性間の関連に基づいて信念を持っている。つまり，GCDSSのエー

ジエントのようにユーザの代替案に対する選好順序を持つのではない。例えば、ある属性の値を増加させるためには、その副属性の値を増加させる。一方、GCDSSでは、エージェントは意思決定木を持つことによって代替案の間の選好順序を持ち、AHP(付録B)に基づく一対比較値の調整によって、選好順序が変更される。

N.R.Jennings のグループ [125] は、エージェント間の説得的な交渉を会話理論に基づく議論(Argument)として定義した。発話内行為として appeal, threaten, および rewardなどを用意し、これらの発話内行為を基に説得的な議論を生成する。説得を受けたエージェントが妥協する基準は、社会的な役割(Social role)である。すなわち、複数の議論(Argument)があった場合、社会的な立場が高い人の意見が通り易くなる。また、彼らは上の研究を進め文献[100]を発表した。文献[100]では議論に基づく説得エージェント間の交渉を議論として定式化した。説得や妥協など様々な交渉形式を記述できる。議論において主張が競合する状況として、主張そのものが衝突する rebut, および、ある主張が推論の途中の命題と衝突する undercut を提案している。形式的な会話の例は示されているが、具体的なシステムとして実装する場合に、ユーザの選好をどのように採り入れるか? また、フレーム問題にどのように対処するか? といった点が問題である。N.R.Jennings らのグループのエージェント間の説得と、本研究でのエージェント間の説得の相違点は、説得において選好や意見が変更される理由付けである。N.R.Jennings らのグループでは、説得において、エージェント間の立場、および、論理的な衝突を理由付けとしている。本研究では、ユーザの主観的評価における曖昧さや、価値の交換による効用の変化を理由付けとしている。文献[74][75]において、説得には「論理的な説得」「功利的な説得」および「感情的な説得」があることを示している。N.R.Jennings らの論理的な衝突に基づく説得は「論理的な説得」に相当し、本研究の効用の変化に基づく説得は「功利的な説得」と言える。

2.3 エージェントに基づくグループウェア

2.3.1 意思決定支援とグループウェア

意思決定(Decision Making)[47][70][79][82][127]とは、目的を達成するためにいくつかの行動の候補の中から選択を行うプロ

セスである [142] . さらに文献 [47] では , 意思決定をするということは , 単に選択する問題ではなく , 因果関係を判断し , 将来を予測し , 価値や選好に基づいて評価するという , 高度な認知活動である , とされている . 伝統的には , 意思決定のプロセス (Decision Making Process) には , 情報収集フェーズ (問題の発見 , 問題の分類 , 問題の分割など) , 設計フェーズ (選択基準の選択 , 代替案の生成など) , 選択フェーズ (代替案の選択) , および再検討フェーズ (過去の決定の再検討) の 4 つのフェーズがあると言われている [126] [127] . 意思決定支援とは , 以上の 4 つのフェーズを支援することを言う . 意思決定支援システム (DSS: Decision Support Systems) とは , 計算機に基づいた情報システムであり , データとモデルを用いて意思決定者が非構造的な問題を解くことを支援する [142] .

企業などの組織の複雑化と情報技術の発達により複数のメンバーによる協調作業を支援するグループウェア [53] [143] の必要性が高まっている .

グループウェア (Groupware) とは , 計算と通信の技術に基づいたシステムであり , グループを支援しグループに共通の環境を提供するシステムである [144] . グループウェアに関連する分野として CSCW がある . CSCW(Computer Supported Cooperative Work) とは , 『人間はどのように協調するのか?』『グループウェアなどの情報技術を用いれば , 人間の協調を促進または向上できるのか?』といったことを研究するエリアの名称である [144] . グループウェアの一つであるグループ意思決定支援システム (GDSS:Group Decision Support Systems) は , メンバー間のコミュニケーションにおける障壁を取り除くことにより , グループの意思決定プロセスを改善することを目的とする . そして , そのために決定分析を構造化し , 議論のパターン , タイミング , 内容にシステムティックな指示を与える技術を提供するものである [21] [143] [149] [150] .

GDSS はその支援機能に関連して , 3 つのシステム型に分けられる . 第 1 のシステム型はメンバー間の情報交換を容易にするためのサポートが中心である . 第 2 のシステム型は , 意思決定モデルやグループ意思決定技術を提供することによって , グループの意思決定プロセスの中で生じる情報の不確実性を減らすことをねらいとするものである . 第 3 のシステム型は , マシンによって誘導されるグループのコミュニケーションの支援として特徴づけられる . ここでは , メンバー間の情報交換のパターン , タイミング等に関して専門家のア

ドバイスがルール化され、ミーティングをリードする必要がある [21] [143]。第3のシステム型ではAIの導入による知的な支援効果が期待できる。例えば、金融のための知識に基づく意思決定支援システム（DSS: Decision Support Systems）の研究が多数存在する [157]。現在、GDSSの研究において第3のシステム型の効果的な実現が強く要望されている。本論文では、エージェントの構成技法を導入することにより第3のシステム型のGCDSSを実現する。

2.3.2 エージェントに基づく意思決定支援

意思決定支援システムやグループウェアに知的な情報化技術を導入することにより、個人またはグループのより効果的な意思決定支援が期待されている [64] [142]。本研究では、グループの意思決定を知的な情報化技術であるエージェントによって効果的に支援することを目標としている。グループの活動をエージェントによって支援する研究としては、エージェントに基づく意思決定を支援、グループのスケジュールの管理を支援する研究、グループにおける議論に基づく意思決定を支援する研究、などがある。以下、関連研究を紹介し、本論文で実現したGCDSSとの相違点を明らかにする。

エージェントに基づく活動支援

文献 [52] では、マルチエージェントによるオフィスワークサポートシステムのアーキテクチャを提案している。このシステムは、個人的な仕事とグループの仕事を並行に行わなければならないオフィスにおいて、個人的な仕事とグループの仕事の両方をエージェントによって支援する。文献 [52] では、オフィスワークを円滑に進めることができるとされているためエージェントはデータの要求とその答えに基づく通信を基本としてタスクを実行する。

CGX[129] は、銀行の融資を支援する AHPに基づく知的的意思決定支援システムである。CGX のルールベースには、各顧客の評価に関するルールがある。CGX は、これらのルールを用いて AHP の各一対比較値を推測する。CGX はユーザの評価を調整する機構を持たないが、GCDSS はユーザの評価を調整する機構を持つ。

SoftCord[62] はソフトウェア開発における調整を支援する知的エージェントである。SoftCord はエージェントに基づくグループウェ

アである。SoftCord では整合性管理システム (TMS:Truth Maintenance System[26]) の 1 つである ATMS (Assumption-based Truth Maintenance System[17][18][19]) で情報の競合を検知するが、GCDSS では競合はエージェント間の交渉によって解消される。

エージェントに基づく会議スケジューリング

文献 [55][56][124] では、日常の会議の日程のスケジューリングを題材として、エージェント間の説得にゲーム理論 [130][131][132] の提携ゲームを用い、特性関数を調整することによって選好の翻意を実現している。

Sen ら [114][115][116][117][118] の研究がある。彼らは契約ネットプロトコル [128]、多段階交渉プロトコル [14] を用いてスケジューリングを担うエージェントを仮定し集中的なスケジューリングを行っている。ここでは、いかに効率良くスケジューリングを行なうかについて議論している。さらに、Sen らは文献 [44] においてユーザの選好に基づく会議スケジューリングシステムを提案している。このシステムでは、会議に関する属性（日付、時間、議長、建物、各参加者等）に対するユーザの重要度を 0~1 の値で入力し、その重要度に基づいて会議がスケジューリングされる。各属性の重要度に対して閾値が設けられており、提案された会議の属性値の重要度が、その閾値を越えているかないかで、その提案に対して賛成か反対かが決定される。以上のように Sen らの研究グループのシステムでは、エージェントが、提案された会議にどの程度まで妥協できるかを示すためにユーザが決定した閾値を使っている。GCDSS では、妥協を実現するために、意思決定木における一対比較値の調整によって代替案の重要度 자체を変更している。

Bui ら [10] は、エージェントの他のエージェントの選好の学習機構を提案している。エージェントは他のエージェントの選好に関する知識を最初は持たないが、統計的に他のエージェントの選好を学習する。学習の結果、エージェント間の通信量に関するコストを減らすことが可能となる。Bui らは、特定の交渉プロトコルを定義し、このプロトコルの上でのエージェントの学習に焦点を当てて論じている。

会議スケジューリングにおける交渉において恣意的な操作を不可能にするクラーク税を導入した研究 [29] も興味深い。この研究の会

議スケジューリングの枠組では各エージェントが重み付きの投票を行なう。重み付き投票の欠点は、嘘を付くことによって、利益を得ることができるという点である。この問題を解決するための方法として彼らはクラーク税の手法を導入した。クラーク税のもとでは、真の選好を表明することが最適となる。しかし一般に投票には、様々な社会決定論におけるパラドックスが存在することが指摘されている[110]。

文献[73]では、複数のエージェント間の会議スケジューリングにおける競合解消をTMS[26] [32] 機構を用いて行っている。文献[73]では、日付はもちろん、ユーザの移動方法やホテルの予約についても扱うことができる。特に文献[73]ではATMS[17] [18] [19]の機構をマルチエージェント環境に拡張したMXFRMSという分散型整合性管理機構を用いている。MXFRMS[73]では、整合性を維持すべき文脈にだけフォーカスを当てるという手法で文脈管理を行う。

エージェントに基づく意思決定支援

CDSS(Choice Design Support System)[119] [120] [121] [122]は、本論文で実現するGCDSSの基になったシステムである。CDSSは個人ユーザの代替案の選択を支援する。CDSSでは、主観的評価に関連して、AHPを利用している。ここでは、一対比較値を±2の範囲で調整することにより、代替案の優先度を変更している。CDSSは、プロダクションシステムをベースに実装されている。GCDSSはCDSSをグループで活用する場合にエージェントの間の合意形成を導入したシステムである。また、文献[123]では、Simonの意思決定プロセス[126] [127]を分析することにより、知的な意思決定支援システムを構築するために必要となる知識プログラミング開発支援環境について論じている。

グループにおける意思決定のための議論を支援するシステムとして、gIBIS[13]が伝統的に良く知られている。gIBISは実験システムであったが、近年QuestMap[138]と呼ばれるgIBISの発展系のシステムが商用のシステムとして開発されている。gIBISおよびQuestMapは、IBIS(Issue Based Information Systems)モデルに基づいたシステムであり、議論の構築を視覚的に支援することによって意思決定を支援するシステムである。

IBISモデルは悪構造問題に関する意思決定が、発散(divergence),

収束 (convergence) , および決定 (decision) の 3 つのフェーズで実行されるべきであると提案している . 発散のフェーズでは , 問題に対する解または代替案が生成的に提案される . 収束のフェーズでは , すべての代替案から 2 , 3 の代替案に収束される . 決定のフェーズで , 採用された代替案に関して , グループのメンバーの合意を得る . 以上の 3 つのフェーズで最も重要とされるのは , 発散フェーズである . 発散フェーズにおいてメンバーは , 質問 , 質問に対する解 , 解に反対する理由 , 解に賛成する理由 , などを明確に区別して議論を行う . QuestMap や gIBIS は , この発散フェーズを支援するシステムである . QuestMap や gIBIS のユーザは質問 , 解 , 理由を表すノードと , それらを関連づけるリンクから成るグラフィカルマップを構築することにより , 議論を行うことができる .

インターネット上のグループの意思決定を支援するシステムとして Hermes[65] がある . Hermes[65] はインターネット上の議論を Web ブラウザを用いて支援するシステムである . Hermes では , 独自の議論のモデルに基づいた意思決定が支援される . 特に Hermes では議論の一貫性をチェックするメカニズムを提供している . Hermes ではシステムは分散しておらず , 単一のエージェントが複数のユーザの議論を支援する . 一方 GCDSS では , 複数のエージェントがそれぞれのユーザの選好を調整することによって , 合意を得ることを目的としている .

NegocIAD[30] は交渉およびマルチエージェントに関して , 多属性フレームワークに基づいた交渉支援システムである . NegocIAD では , 交渉において合意を得るために , 人間の仲介者が交渉プロセスを管理する . 各ユーザは個々に行列を持つ . 行列には各ユーザの評価が入力される . 仲介者は大域的な行列を持つ . そして , 大域的な行列に含まれる個人的な行列の集合に基づいて合計を求める . 一方 , GCDSS では , NegocIAD であったような人間の仲介者はもたない . そして , GCDSS では , 大域的な行列のような大域的な情報を持つことなしにエージェントは合意を得ることができる .

2.4 エージェントに基づく電子商取引支援

エージェント間協調機構の有望な応用としてインターネット上の電子商取引の支援がある . 本節では , インターネット上の複数のサイトから財の情報を検索し統合するシステム , およびオークション

または商取引を行う場を提供するシステムについて述べる。さらに、最近の関連研究である高度な電子商取引の支援を行うエージェントについても述べる。

2.4.1 検索に基づく電子商取引支援

インターネット上の複数のサイトから財の情報を検索し統合するシステムに関する研究または商用の製品としては Sherlock 2, iTrack, BargainFinder, ShopBot, Jango などがある。

Apple 社 [2] の Sherlock は、インターネット上の複数のサーチエンジンにアクセスすることによって、複数の結果を得る。また次のバージョンである Sherlock 2 では、主要なオンラインオークションの財の検索が可能になると言われている。

iTrack[15] は、主要なオークションサイトを監視し続け、ユーザから指定されたキーワードとマッチする商品が出品されたら、ユーザに E-mail で知らせるというオンラインサーバである。

BargainFinder[16] は、オンラインショップにおける商品の値段を比較しながら買物をすることを支援するエージェントである。特定の商品を与えると、BargainFinder は、前もって決定されたいいくつかの商店の Web サイトからその商品の値段を検索することができる。

ShopBot[25] は BargainFinder を発展させたショッピングエージェントである。ShopBot の特長は、オンラインの商店のサイトの記述や、その商店に対するクエリーを自動的に解析できる点である。ShopBot を発展させた Jango[31] では、ユーザが商品に対する情報を指定することを可能にしている。

2.4.2 仮想的な場を提供する電子商取引支援

オークションまたは商取引を行う場(仮想的なサーバ)を提供するシステムとしては、AuctionBot, eMediator, Kasbah, FishMarket, Tete-A-Tete などがある。

AuctionBot[147][148] はオークションサーバーである。AuctionBot のユーザは、製品を売るためにオークションを始めることができる。そのオークションにおいて、エージェントが売り手と買い手となり、あらかじめ定義されたプロトコルに従って入札を行う。AuctionBot

の特長は、ユーザが自分自身のソフトウェアエージェントを作成できるような API を提供している点である。

Kasbah[11][12] は Web 上の仮想的なマーケットプレースであり、その上でユーザはユーザの代理で財を売ったり買ったりする自律的なエージェントを生成できる。Kasbah でのエージェント間の取り引きは単純なものであり、AuctionBot のようにオークションのプロトコルに従う必要はない。

FishMarket[103] は、仮想的なオークションの場を提供するシステムである。FishMarket では、ユーザはエージェントの入札戦略をエンコードすることができる。FishMarket は実世界のシステムとしては現在のところ使われていないが、さまざまな入札戦略を持ったエージェントによるトーナメントが開催されている。

Tete-A-Tete[40] も仮想的なマーケットプレースを提供する。Tete-A-Tete の特長はエージェントが協調的に交渉を行う点である。ここでは買い手と売り手のエージェント間で協調的な議論(Argument)による交渉が行われる。

eMediator[112] は、eAuctionHouse と eCommitter からなる電子商取引サーバーである。eMediator も仮想的な取引の場を提供するサーバである。eMediator の特長は以下の通りである。eAuctionHouseにおいて、Sandholm らによって開発されたアルゴリズムによって勝者を決定する組合せオークションができる点。eCommitterにおいて、Sandholm らによって開発された Leveled commitment contracts を使って最適な価格で契約を行うことができる点。

2.4.3 エージェントによる売り手側の電子商取引支援

Etzioni らが提案した ShopBot に類似するエージェントが、現在急速に増加している。Shopbot は、財やサービスの価格や質についての情報を集めるために複数のオンライン商店へクエリーを自動的に生成する。そのため、ShopBot は、買い手の支出を最小化し、満足度を最大化するのに、より役立っている。ShopBot のようなシステムが、インターネット上に急増した場合、経済に大きな影響が与えられることが予想される。ShopBot は買い手を支援したが、PriceBot[39] は、売り手が利益を最大化しようという価格設定アルゴリズムを持つた自動化工エージェントである。文献 [39] では、シンプルな経済モデルを提案している。このモデル上で、PriceBot と ShopBot に支援さ

れた買い手，の集合の中で起こるダイナミックな振舞がシミュレートされる。そして，ゲーム理論的均衡が，このモデルにおいて動的に発生し得るということが確認されている。

2.5 本研究の位置付け

2.5.1 関連研究マップ

本章で紹介した関連研究と本研究との関連を示した関連研究マップを図2.1を示す。本研究は「説得に基づく合意形成方式」「好みを考慮した会議スケジューリング」，および「エージェントに基づく意思決定支援」などの関連研究との関連が強いことを表している。

2.5.2 他分野との関連

図2.2に，他分野との関連図を示す。本研究の成果を星の形で示す「エージェント間の合意形成のための説得機構の実現」は第3章で述べる成果である「エージェント間の説得のための選好翻意機構」は第4章で述べる成果である「多重交渉に基づくGCDSSの実装」は第5章で述べる成果である「協調的入札機構に基づく*BiddingBot*の実現」は第6章で述べる成果である「価値の交換に基づく説得」は第7章で述べる成果である。本研究の基礎となる学術分野，概念，および理論を楕円で示す。楕円と星を結ぶ矢印は，その楕円で表される学術分野，概念，および理論が，その星で表される本研究の成果に，大きく影響を与えていていることを示す。

図2.2より，第3章の成果「エージェント間の合意形成のための説得機構の実現」は，マルチエージェントの協調機構に関する分野の合意形成手法，社会的決定理論，Artificial Intelligenceの分野の知的エージェント，グループウェアの分野のグループ意思決定支援，意思決定支援におけるAHPから影響を受けている。第4章の成果「エージェント間の説得機構のための選好翻意機構」は第3章の成果および多属性効用理論という概念に影響を受けている。第5章の成果「多重交渉に基づくGCDSSの実装」は第3章の成果およびモバイルエージェントという概念に影響を受けている。また，第3章に影響を与えている諸分野からも影響を受けていることになる。第6章

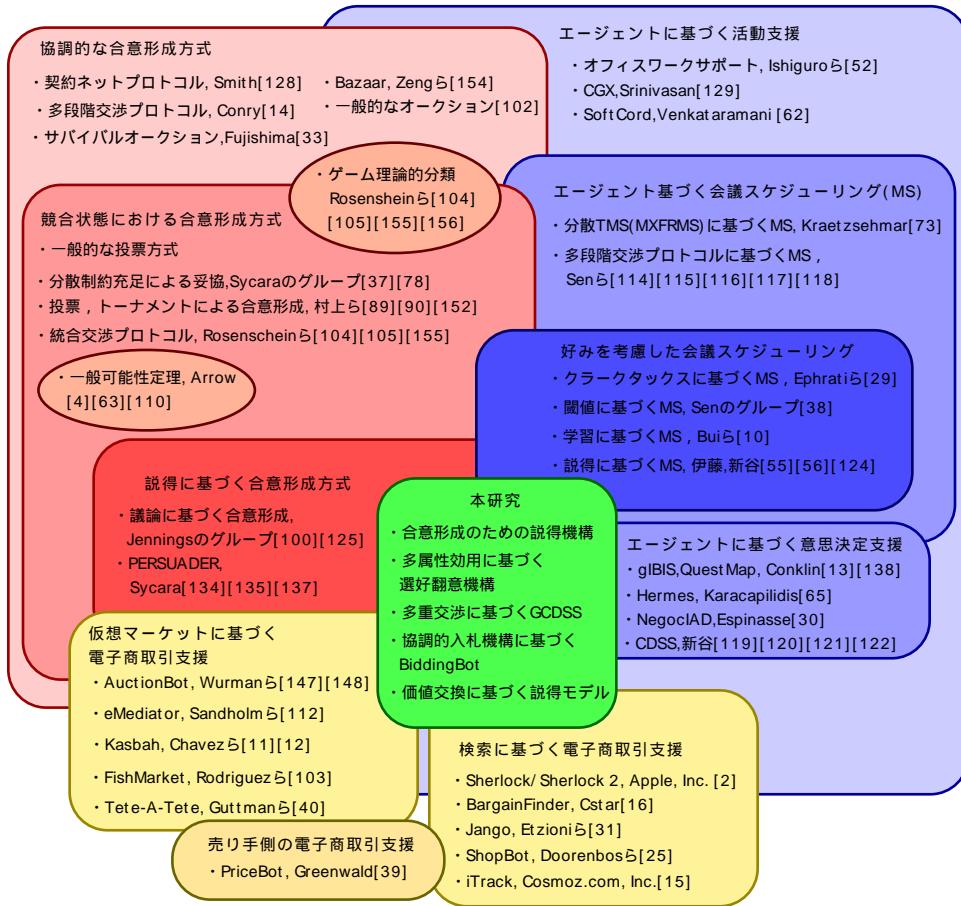


図 2.1: 関連研究マップ

の分野はマルチエージェントシステムの協調機構の分野の合意形成手法や、電子商取引の分野から影響を受けている。第7章の分野はマルチエージェントシステムの協調機構の分野の合意形成手法、社会的決定理論、およびゲーム理論から影響を受けている。



図 2.2: 他分野との関連図

2.6 結言

本章では、本研究の関連研究を述べた。まず、エージェント間の協調機構、交渉、および合意形成についてゲーム理論的観点から定義し、合意形成機構に関する関連研究を述べた。次に、エージェントに基づくグループウェアとして、エージェントに基づく活動支援システム、エージェントに基づくグループスケジュール管理システム、およびエージェントに基づく議論支援システムについて述べた。さらに、今後の発展が期待される本研究の関連研究として、エージェントに基づく電子商取引に関する関連研究について述べた。最後に、本研究と関連研究との関連図として関連研究マップ、および、他分野との関連図を示した。

第3章

GCDSSのための エージェント間の説得機構

3.1 序言

本章では、グループ代替案選択支援システム GCDSS のためのエージェント間の説得機構を提案する。ユーザの代理であるエージェントが協調的にタスクをこなすためにはエージェント間の合意形成機構が不可欠である。第 2 章で述べた通り、一般には合意形成方式として投票方式が一般的である。しかし投票方式はさまざまな矛盾を包含していることが指摘されている。そこで、本システムでは単純な投票方式は使わず、説得に基づくエージェント間の合意形成機構を実現する。本章では、説得に基づくエージェント間の合意形成機構を GCDSS に適用することによって、その有効性を確かめる。

本章の構成は、第 3.2 節で、まず GCDSS の構成要素、および GCDSS を用いたグループの意思決定支援の流れを示す。第 3.3 節では、エージェント間の合意形成のための説得機構を示す。ここでは、エージェントによる AHP (Analytic Hierarchy Process) (付録 B 参照) の階層構造の管理方式や、エージェント間の説得についての具体的な機構、およびユーザに対する信頼性を増加させるための説明機構について述べる。第 3.4 節では、本研究で試作したグループ代替案選択支援システムの実行例と試用評価を示し、本研究で提案する説得機構の有効性を実験を通して示す。最後に第 3.5 節で本章のまとめとしての結論を述べる。

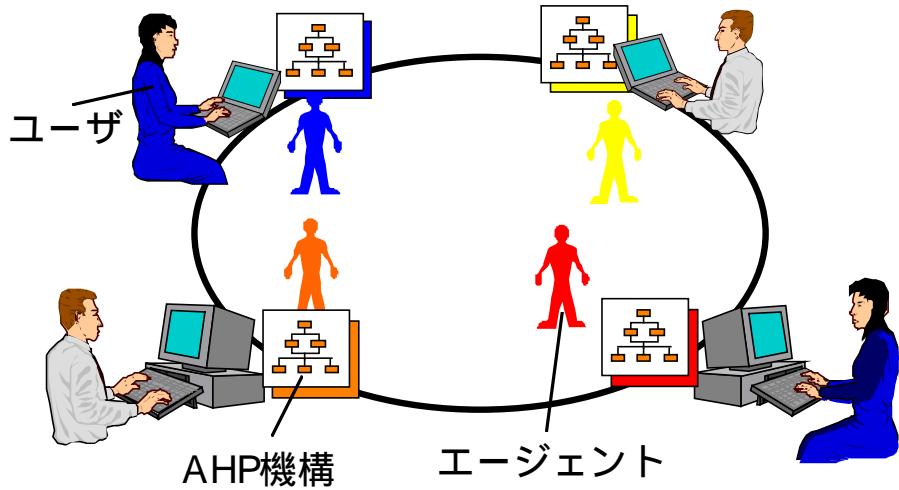


図 3.1: システム構成

3.2 GCDSS

3.2.1 システム構成

GCDSS の構成を図 3.1 に示す。GCDSS では、各ユーザの意思決定は AHP 機構によって支援する。各 AHP 機構はエージェントが管理する。エージェントは AHP 機構における情報を参照することにより、他のユーザのエージェントと交渉をする。エージェントのタスクについては 3 節で論じる。本システムは、ネットワーク環境における計算機を前提とする。AHP 機構には、ユーザが、代替案を決定し、問題を階層化し、一対比較を行なうことによって代替案の重要度を決定する機能として、代替案決定支援機能、意思決定木構築支援機能、一対比較機能が含まれる。各機能はユーザの負担を軽減するために直観的に分かりやすい GUI (Graphical User Interface) を用いて構築する。

図 3.2 に GCDSS によるグループ意思決定支援過程を示す。

まず、決定自体を提案する主催者となるユーザである主催ユーザが、決定を行なうことを他のユーザに伝える。次にユーザは、代替案決定支援機能を用いて相互に対話しながら、多数の選択肢の中から選択対象とする代替案の候補をいくつか決定する。代替案決定支援機能において、ユーザは共有する代替案のデータベースから代替

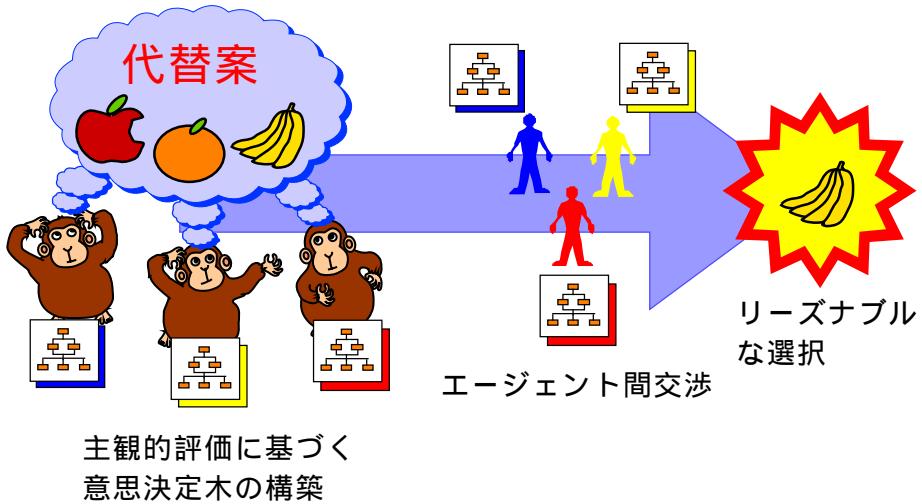


図 3.2: GCDSS のグループ意思決定支援過程

案としたい案を選びだし，他のユーザに提案する。代替案はブレインストーミングなどで決定する。代替案が決定したら，各ユーザは意思決定木構築支援機能，一対比較機能を用いて，決定された代替案について，個別に主観的評価に基づいて問題を AHP(B 節参照)の手法を用いて分析し，各代替案の重要度を決定する。

そして，ユーザごとの代替案の重要度，階層構造を基本情報としてエージェントは他のユーザのエージェントと交渉を始める。エージェントの交渉は 3.2 節で述べる説得機構を用いた説得を基本とした交渉である。

エージェントの交渉の結果，候補の代替案から一つの代替案を選択するための合意を得る。最後に合意を得られた代替案についての情報がユーザ全員に通知される。

3.2.2 AHP の利用

本システムでは，ユーザの主観的評価を数量化するための手法として AHP(詳細は付録 B 参照)を利用する。一般的に AHP はグループ意思決定支援にも用いられる [27] が，AHP を用いたグループ意思決定支援においてエージェントが人間の代理として交渉する研究は少ない。GCDSS では AHP 機構はエージェントが管理する。エー

ジエントは AHP 機構によってユーザの主観的評価によって意思決定木を生成し代替案の好みを数値化する。本章では、意思決定木の一つの状態に対する好ましさをエージェントの効用とする。エージェントは効用を基にして他のエージェントと交渉を行う。交渉において説得が行われた時、エージェントは効用を変化させることによって妥協を試みる。

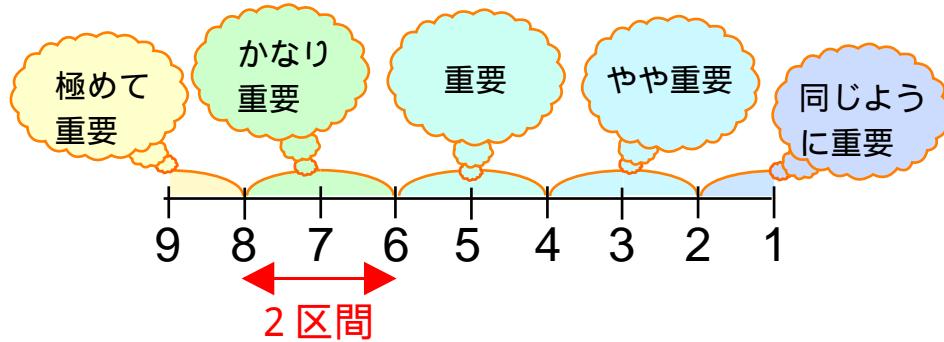


図 3.3: 要素 A と B 間の重み付け

一般的に、明確な尺度を持たない要素間の比率をユーザが厳密に答えるのは不可能である。そこで AHP では、一対比較値を獲得するため、“非常に重要”，“かなり重要”，“重要”，“やや重要”，“同じように重要”といった言葉による（verbalな）ファジィな表現を用いることによってつかみどころのない要因を含む問題に関する主観的な分析を可能にし、ユーザの負担を軽くする。つまり、AHPにおける一対比較値は人間の意思を厳密に表すのではなく、だいたいこれぐらいという人間の主観的評価値を表すのである。そこで本システムでは人間の主観的評価が、ある値を中心とした 2 区間の範囲を含むと考える。1 区間は 9 点法の最小単位で、図 3.3 では 1 目盛である。例えば、AHP の一対比較において、“かなり重要”と評価された重みは AHP の内部では 7 の重みとされるが、2 区間分もその範囲と考え、重みが 6, 7, 8 のいずれかであるとする（図 3.3）[119] [120] [121] [122]。

さらに本システムでは、一対比較において、ユーザの一対比較に対する信念を表すための 2 つの状態として”確定”および”仮定”を用意する。例えば、ユーザによって確定とされた一対比較は、その

重みが確定的（つまり、信頼できる）な値として扱われ、仮定とされた一対比較はその重みが仮定的（つまり、不確か）な値として扱われる。エージェントは説得において、全体的なウェイトの変化を要求された場合に、仮定とされた一対比較の重みを2区間の範囲で微調整することによって、全体的な代替案の重要度を変化させることができかどうかを調べる。この時、非整合度尺度 I.R. が 0.1 以下という制約の中で微調整が行なわれる。具体的な説得機構は 3.2 節で論じられる。

3.2.3 エージェントによる AHP の管理

エージェントは、ユーザが主観的な評価で AHP による階層構造の構築、一対比較行列を動的に管理する。一般に AHP では、ユーザに大量の一対比較を要求する。階層の各レベルでひとつの評価基準に対して n 個の要素があれば $n(n - 1)/2$ 回の一対比較を行う必要がある。階層のレベルや各レベルでの要素数が大きくなると、非常に多くの一対比較が必要になる。エージェントは、ユーザの負担を減らすために以下の方法を用いて一対比較の回数を効果的に減らす。そして、一対比較の回数を減らすと同時に、一対比較行列全体の整合性を動的に保つことができるようユーザをリードする。

本システムでは、一対比較要素の全要素の初期値として、“どちらも同じくらい重要”を意味する 1 を仮定な値として与える。ユーザは自分にとって確信のできる一対比較を確定とし、「確信はできないがどちらかといえば」という一対比較については仮定とする。そして、そのどちらでもない決め難い一対比較については、初期値のまま“どちらも同じくらい重要”を意味する値 1 とし、仮定とする。

AHP では、整合度のある（つまり非整合度尺度 I.R.=0 の）一対比較行列には要素間に推移性が成り立つ。例えば、要素 a_{12} の重みは W_1/W_2 、要素 a_{23} の重みは W_2/W_3 であることから、要素 a_{13} の重みが $a_{12} \times a_{23} = W_1/W_2 \times W_2/W_3 = W_1/W_3$ となる。ここで、 W_i は一対比較の対象 i の重要度である。本システムでエージェントは、一対比較の効率化のために Harker 法 [42] などの一対比較を補間する方法以外に、単に推移性を用いて確定的とされた一対比較から推移的に求められる要素を動的に求める。推移的に求めた要素がすでにユーザによって確定的または仮定的に決定されていた場合はユーザに一対比較のやり直しを促し、ユーザによって 1 度も触れられてい

ない場合は、求めた値を仮定的な一対比較の値とする。Harker 法は、カバリングという条件を満たす時のみ適用可能 [139] なことが知られており、カバリングの条件を満たすためには、少なくとも一対比較行列の中の要素が推移性によってすべて予想可能になる程度の一対比較値が必要となる。実際のシステムにおいてはユーザにカバリングを意識させることは負担が大きい。本システムでは初期値をすべて”どちらでもない”と置くことによって、ユーザに対する無理な一対比較を強制することを避けた。

一対比較において、非整合度尺度 I.R. の値が 0.1 より大きくなつた場合には、一対比較に整合性（すなわち、一対比較の推移性）がないことを意味しており、一対比較のやり直しが必要となる。一般に、AHP では、一対比較のやり直しは、煩わしい比較作業の繰り返しを再度強いることになり、意思決定者にとり大きな負担になる。本システムでは、ユーザが一対比較において重み付けをすると同時にエージェントが非整合度尺度 I.R. の値を動的に監視し、I.R. が 0.1 を越えた場合は、ユーザに GUI によって視覚的に分かりやすく伝えることによって、一対比較のやり直しを促す。以上のように非整合度尺度 I.R. をエージェントがユーザを導く形で動的に管理することによって、一対比較行列全体のやり直しの回避を可能にし、整合度の高い一対比較行列を実現できる。

3.2.4 階層構造の部分的共有

一般的に AHP を用いてグループの意思決定を行う場合、共通目標状況 [27]（すべてのユーザが同じ目標を持つ）を前提として問題の階層構造を 1 つだけユーザ間の交渉で決定し、その階層構造に基づいて、各々のユーザが一対比較などを行なう。この場合、すべてのユーザが同じ目標、つまり評価基準を持つのだから、すべてのユーザが協調的にある一つの階層構造を構築することを支援するようなシステムが考えられる。本システムが支援する非共通目標状況（各ユーザが非共通な、または隠された目標を持つ）では、非共有な目標や隠された目標があるために、階層構造は各ユーザによって異なる場合があるため、それらの階層構造から 1 つの階層構造を構築することは困難である。このようなグループの意思決定を支援するためには、個々のユーザが別々に階層構造を構築するシステムが考えられる。しかし、ある目標を共有する場合、個々に階層構造を構築す

ると他のユーザの情報を把握することが困難であり、気付かない目標が存在するなど、階層構造を効果的に構築できない可能性がある。

非共通目標状況においてグループのユーザが各々の異なる形の階層構造を持ったままでは、効率的なコンセンサスは得られない、そこで本システムでは、異なる階層構造は保持したまま重要度に関するコンセンサスを得ることを目的とする。さまざまな矛盾を包含する投票による決定に比べて、コンセンサスは、以下の2つの理由で最も望ましいとされるからである。まず第一に他のユーザの持つ情報を交渉によって知ることができ、交渉が有益になる。第二にコンセンサスをしたメンバー全員が、決定に対して満足できることが多い。

そこで本システムでは、階層構造を公開部分と非公開部分に分ける。他のユーザの階層構造の公開部分を参照することを可能とし、共通の目標に関するより多くの評価基準の情報を交換することにより、グループ意思決定のための多くの情報を得ることができる。ユーザは他のユーザの公開された階層構造については積極的に自分の階層構造に取り入れることによって、共有する目標に関しては協調的に階層化分析するものとする。また、非公開部分は他のユーザから隠蔽されるため、他のユーザとは異なる目標や隠された目標のための部分的な階層構造を自分の階層構造に組み込むことが可能である。具体的には本システムでは、階層構造全体は基本的に公開する。目的および代替案は必ず公開する。ユーザは評価基準について公開か非公開かを選択可能である。そして、非公開とされた評価基準を根とした木に含まれるすべての評価基準を非公開とする。

3.3 エージェント間の説得

3.3.1 説得機構

本システムのエージェント間の合意形成は、2つのエージェントの説得を積み上げた合意である。ここでは、まず、エージェント全体の交渉の流れを示し、次にグループ間の説得の流れ、そして2エージェント間の説得の流れを示す。

エージェント全体の交渉の流れの基本的なサイクルと例を図3.4に示す。基本的なサイクルは図3.4の左側の図のような流れである。まず主催ユーザによってエージェントの交渉が開始される。交渉が開始されると、グループがペアを生成する。交渉開始直後はグループ

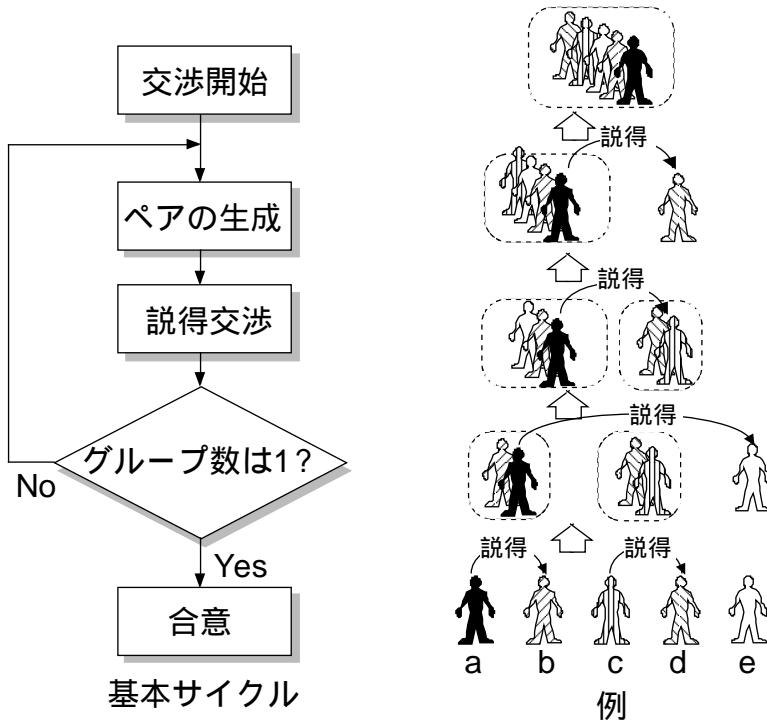


図 3.4: エージェント間の交渉の流れ

はそれぞれ 1 エージェントで構成される。ここでは 2 つのエージェントがランダムに選ばれ 1 組のペアを作り、説得する側、説得される側のエージェントをランダムに決定する。人間の説得においては声の大きい者の意見が通ったり、先に言った者勝ちであったりする場合が多い。つまり、発言機会がユーザ間で均等では無いことが多い。本システムでは、2 エージェントの組み合わせおよび説得の先手の決め方にランダム性を持たせることによって、発言機会、つまりユーザの好みを反映させる機会となるべく均等にする。ペアが生成されるとそれぞれのペアにおいて 2 エージェント間の説得が行われる。説得が成功したらそのペアは 1 つのグループを形成する。説得が失敗したら、説得する側と説得される側を入れ替わって説得を行なう。入れ替わっても成功しなければ、そのペアはグループを組まず、次のサイクルに移る。そして、グループの数が 1 つになれば合意、そうでなければ、もう一度ペアの生成から始める。以上のようなサイクルに従いエージェントは交渉する。本手法では全体的な合

意を必ず得るわけではない。合意が得られない場合は意見が分かれていると考えられるからである。本システムにおいてはこのサイクルの回数を主催ユーザが決定する。主催ユーザは合意が得られない場合は、エージェントの交渉を止め、どのような意見を持つグループに分かれているかを知ることができる。

図3.4の右の図は、エージェントの交渉の例を示している。ここで、 a, b, c, d, e をエージェントとする。まず a が b を、 c が d を説得し、説得が成功したとする。 a と b 、 c と d がグループを作る。説得

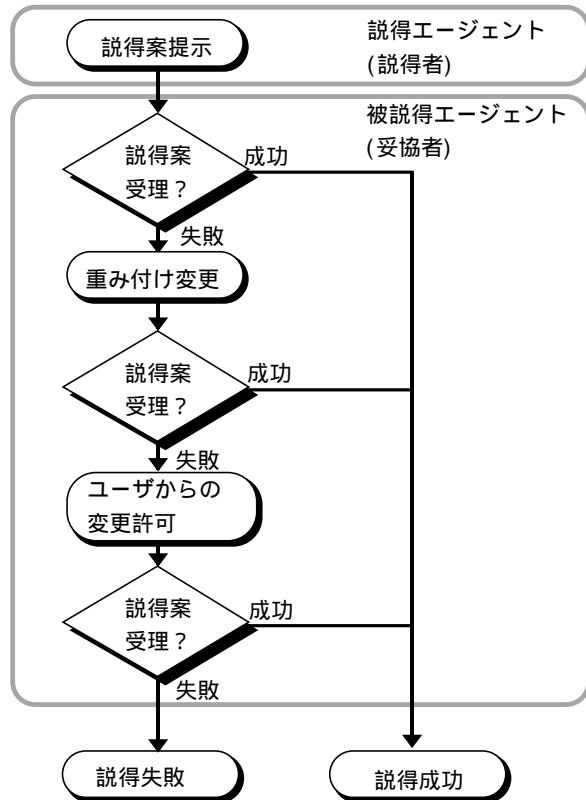


図 3.5: 2 エージェント間の説得の流れ

したエージェントがグループの代表のエージェントとなる。ここで a と b のグループ、 c と d のグループ、及び e による交渉が行われる。 e を1エージェントのグループと見ることによって、ここからはグループ間の説得による交渉となる。グループ間での説得については後に述べる。ここでは、 a と b のグループが e を説得し、最後に c と d

のグループを説得することによって合意を得る。

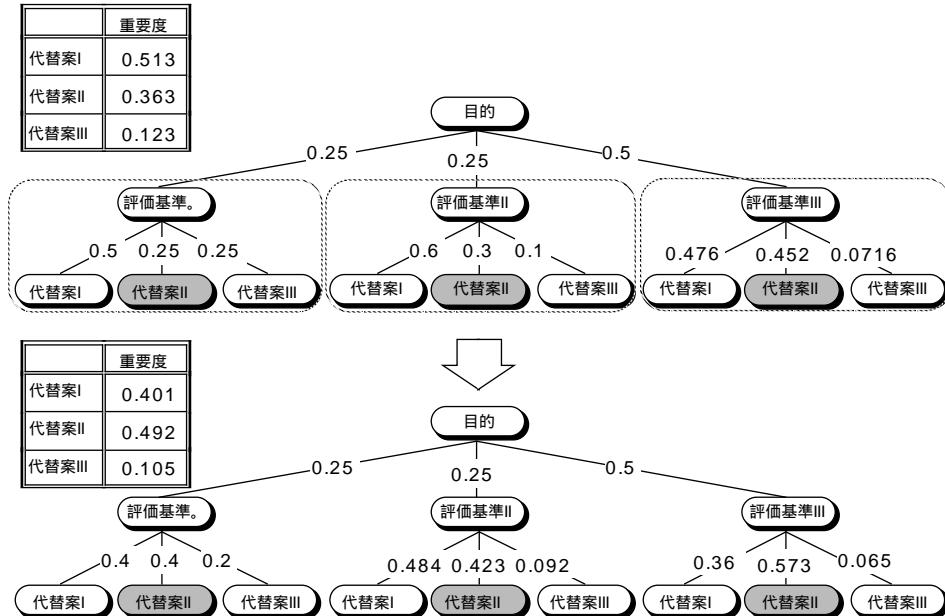


図 3.6: 重み付けの調整の例

エージェントのグループ間の説得では、グループの代表となるエージェント同士が説得を行う。説明を簡単にするためにグループ A とグループ B があるとする。グループ A の代表者がグループ B の代表者を説得し成功したとする。グループ B の代表者はグループ A に加わり、グループ B のメンバーはグループ B を解散する。解散したメンバーはグループから離脱し一つのエージェントに戻る。例えば、図 3.4 の右の図において、 a, b, e と c, d のグループにおいて a が c の説得に成功した時、 c は a, b, e に加わり、 d は一つのエージェントに戻る。つまり、全体としてはグループが a, b, c, e と d となる。

エージェント間の説得の基本となる 2 つのエージェント間の説得の流れを図 3.5 に示す。説得するエージェントを説得エージェント、説得されるエージェントを被説得エージェントとよぶ。まず、説得エージェントは、説得案を被説得エージェントに提示する。説得案は、ユーザが AHP によって主観的評価によって決定した重要度の順が最も高い代替案である。被説得エージェントは以下の流れで説得案を受理するかしないかを決定する。

第一に，説得案の受理のチェックを行う。説得案の受理のチェックにおいて，説得案を受けとった被説得エージェントは，自分の選好順序の最も高い代替案が説得案として提示された代替案と同じであれば説得案を受理するが，異なれば受理しない。説得案を受理したら説得は成功となる。

第二に階層構造の中の一対比較行列の重み付けを変更することによって，代替案の選好順序に変更を試みる。例を図3.6に示す。あるエージェントの選好順序の変更前が図3.6の上図，変更後が図3.6の下図だとする。図3.6の上図においては選好順序に関して代替案Iが代替案IIおよび代替案IIIに勝っているとする。この時，代替案IIが説得案として提示されたとすると，このエージェントは代替案IIの重要度を増加し，代替案Iと選好順序を逆転できないかを試みる。本システムでは選好順序を変更するためのヒューリスティクスとして，代替案を直接，一対比較要素として持つ一対比較行列に関してのみ，重要度を増加させるべき代替案に関する仮定的な一対比較の変更を行う。その他の一対比較行列に関しては変更は行なわない。図3.6の例では，点線で囲んだ階層の一対比較行列が対象となる。これは，各階層における一対比較は他の一対比較とは関係なく独立に行なわなければならないというAHPの特徴のためである。

代替案を直接一対比較要素として持つ一対比較行列に対して次の戦略で調整を行なう。AHPの特徴から，代替案 I_i に関する重要度を増加させるためには，一対比較行列の第*i*行の対角要素以外の要素の値を増加させれば良い。つまり本システムのエージェントは，代替案 I_i に関する重要度を増加させるために，一対比較行列の第*i*行の仮定的な要素の値を9点法の尺度において1区間ずつ，最大2区間の範囲で全体的な代替案の選好順序に変化があるまで増加させる。例を図3.7に示す。簡単のために図3.7の一対比較行列の要素はすべて仮定的とする。今，図3.7の上の図において代替案IIの重要度を増加させたいとする。この時，エージェントは代替案IIの代替案Iおよび代替案IIIに対する重みを1区間分増加させ，代替案IIの重要度を増加させる。

第三に重みの微調整を行なった結果，説得案を受理することが可能かチェックし，受理可能なら説得成功とする。第四にデフォルトとしてユーザへ重み付けの変更許可を問い合わせる。すなわち，現在までどの代替案について，どのような部分集合ができているかを説明機構によってユーザに提示し，ユーザに変更許可を問い合わせ

The diagram illustrates the adjustment of weights in a pairwise comparison matrix. It consists of two tables, one above the other, connected by a downward-pointing arrow.

Initial Matrix:

	代替案I	代替案II	代替案III	重要度
代替案I	1	2	2	0.500
代替案II	1 / 2	1	1	0.250
代替案III	1 / 2	1	1	0.250

Adjusted Matrix:

	代替案I	代替案II	代替案III	重要度
代替案I	1	1	2	0.400
代替案II	1	1	2	0.400
代替案III	1 / 2	1 / 2	1	0.200

図 3.7: 一対比較行列における重み付けの調整の例

る。第五にもう一度、説得案の受理をチェックする。以上が本システムにおける2エージェント間の説得機構である。

一対比較の重み付けにおける第四段階のユーザのエージェントに対する重み付けの変更許可は、本システムのオプション機能として実現されている。すなわち、デフォルトでは、エージェントは変更する案をユーザに提案し、ユーザの許可があれば実際に変更し、許可しなければ変更は行なわない。ユーザは本機能を用いることにより、エージェントの行動を管理することができる。オプショナルな設定では、本機能は使用されず、エージェントの自律的な行動によって交渉が行われる。エージェントを自律的にする理由は、ネットワークにおいて自律的に行動し、ユーザの日常的な活動を含めて支援するようなエージェントの実現を目指しているためである。文献[80]では、ユーザからの直接的、あるいは間接的なフィードバックに基づいて、ユーザの望む行動を学習するエージェントなどを実装している。本システムにおいても、ユーザによる重み付けの変更許可機能によってエージェントがユーザの望む行動に適した行動を学習する機能を実現することも可能であり、今後の課題である。

3.3.2 説明機構

エージェントは、交渉途中、交渉終了直前にユーザへ交渉の経緯についての説明を行なう。具体的には、エージェントの(I)推論過程、および(II)交渉過程の説明機構を用意する(I)のエージェントの推論過程の説明では、エージェントが変更した一対比較行列と元の一対比較行列、およびその推論過程をユーザに提示する(II)のエージェントの交渉過程の説明は、ある時点の、エージェントのグループ、グループの代表となっているエージェント、およびエージェント間の説得の履歴を示す。本システムでは(I)の説明は、ウィンドウによって変更前と変更後の一対比較行列を絵として表示し、推論過程としては流れを簡単に示している。推論過程をより自然言語に近い形で示すことは今後の課題である(II)の説明は、エージェント同士の関係を視覚的に表すことによって実現する。エージェントが説明機構を持つことによって、どの程度ユーザが安心して仕事を依頼できるかという信頼性を増加させることが可能である。信頼性はインターフェースエージェントを実装するために重要な要因である。

3.4 評価

3.4.1 システムに関する評価

使用実験を行った結果、以下のような知見を得ることができた。グループの中のメンバーには、極端な評価を恣意的に行なう者が現れ、全体的な合意の妨げとなることが多い。このような場合の対処法として以下のような案が出された(1) AHPは、グループである共有する目標については前向に決定してゆこうという前提の元で行なわれるため、極端な評価を恣意的に行なうという行為自体を禁止する。(2) 極端な評価を恣意的に行なうということ自体が意見と認められる。その場合、そのユーザを除いた部分的な合意を得るだけでも価値がある。

説得機構については次のような知見が得られた。説得には、説得する側、説得される側が存在し、説得される側の納得が必要である。当初、ユーザがエージェントの交渉には関与しないエージェントのみのインタラクションによる説得機構を構築したが、ユーザはあら

かじめ説明があっても、自分のエージェントが説得されてしまうと不満を感じることが分かった。ユーザのエージェントに対する信頼度を増加させるには、ユーザがエージェントの行動に納得する必要がある。そこで、エージェントは最終的にユーザに確認を取るために、合意の経緯についての説明を行なう。この時、ユーザが納得のできる説明が不可欠である。本システムでは、3.3節で示したとおり、エージェントは説明機構を用いてユーザの納得を得るための説明を示す。

3.4.2 説得機構に関する評価

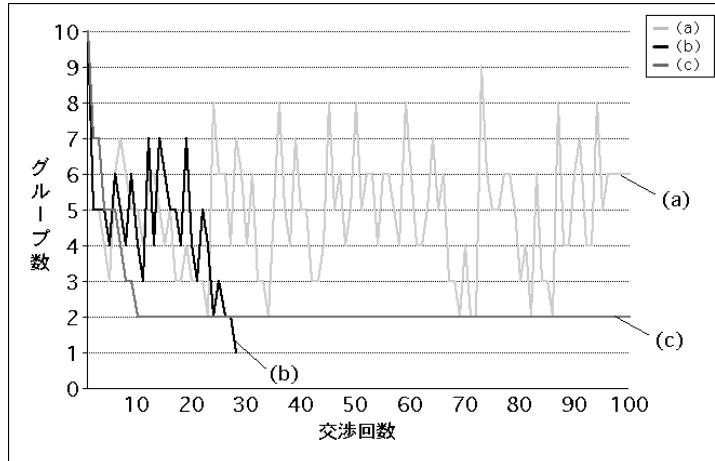


図 3.8: 説得機構に関する実験

図 3.8 は、説得機構に基づくエージェントの交渉における交渉回数と交渉におけるグループ数を示している。縦軸がグループ数、横軸が交渉回数を表す。交渉回数とはトーナメントにおける階層数に相当する。ユーザ数つまりエージェント数を 10 とし、エージェントの交渉過程におけるユーザへの変更許可の機能を用いない。つまりエージェントが自動的に一対比較行列の変更を行う。1 回の交渉において、第 3.2 節で示した 1 サイクルが行われる。図 3.8 では本システムで見られた 3 つのタイプ (a) (b) 及び (c) の交渉過程を示す (a) では交渉過程においてグループの数の増減が激しく変化し、合意を得ていない (b) では交渉回数が 28 回の時点でグループ数

が 1 となり合意に到達している (c) では、交渉回数 10 回という早い時期に 2 つのグループに収束しているものの、その 2 つのグループにおいて合意を得ていない (a) では様々な対立意見が存在すると考えられる。また (c) では、2 つの対立意見が存在すると考えられる。

以上から本システムの有効性について以下のことが言える。本システムでは (b) の場合のようにエージェントが人間に代わって合意を得ることが可能である。また (a) や (c) の場合のように、ユーザの間において、意見の異なるグループがいくつ存在するかが確認できる。また、個々のグループ内にどのエージェントが存在するかを知ることも可能である。従来の GDSS では、グループの意思決定過程を支援する。例えば、gIBIS[13] はグループによるソフトウェア設計における討論を支援する。gIBIS では、討論の流れや理由をコンピュータに蓄積し、それを設計の議論に役立たせる。本システムではエージェントがこの議論を代行し、議論に対するユーザの負担を軽減する。つまり、グループの意思決定過程そのものを代行する。エージェント同士の交渉によってたとえ合意が得られなくても、議論において異なる意見を持つグループがどのように存在するか、を確かめることができる。本アプローチの特筆すべき点は、ユーザ間の議論をエージェントが代行することによるユーザの負担が軽減できる点と、議論における意見の相違によるグループの分析が可能である点である。

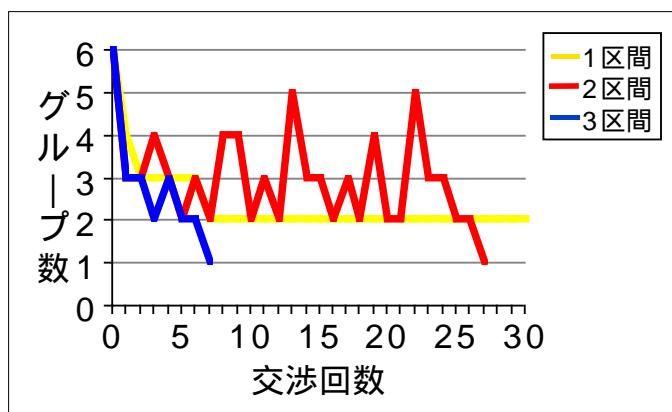


図 3.9: 調整範囲に関する実験

説得では、エージェントは一対比較値は2区間の範囲で調整した。調整範囲を2区間とした理由は、実際にGCDSSにおいてエージェント間で説得を行った場合、以下の結果が得られたからである。1区間の範囲で調整すると、エージェントの好みに変化が現れにくく、効果的でない。また、3区間の範囲で調整すると、エージェントはほぼ確実に妥協してしまうため、リーズナブルでない。一対比較値を調整する区間を変化させて説得を行った例を図3.9に示す。縦軸がグループ数、横軸が交渉回数を表す。調整範囲を1区間とした場合、合意は得られていない。3区間とした場合は、すぐに合意が得られてしまっている。2区間の場合はある程度のステップの後に合意が得られている。調整範囲を2区間とし、エージェント間の合意形成にある程度のステップ数を適度に費すことによって、各エージェントが適度に説得を行うことができるため、調整範囲を1区間および3区間とした場合よりもリーズナブルな合意が得られると考えられる。

3.5 結言

本章では、エージェント間の説得による合意形成に基づくグループ意思決定支援システムとしてグループ代替案選択支援システムを構築した。エージェント間の交渉において、説得による交渉方式を提案した。説得による交渉方式では、なぜ説得されたのか、どのように交渉が進んだのかについての説明機構をエージェントに持たせ、ユーザが交渉内容に納得ができるようなシステムを構築した。最後に、システムの使用実験で得られた有用な知見と説得機構に関する実験から説得機構の有効性を確認した。

第4章

エージェント間の説得のための 選好翻意機構

4.1 序言

第3章では、GCDSSを実装し、GCDSSにおけるエージェント間の交渉としてAHP[108]を用いてエージェント間の説得を実現した。ユーザの選好をAHPに基づく主観的意思決定木とした。意思決定木の各階層における要素間の相対的な重み付けを、エージェントが自ら経験則に従い調節することによって選好翻意(Preference Revision)を行い妥協を実現する。本章では、ユーザの選好を多属性効用理論に基づいて定義する。そして、ユーザの選好を効果的に翻意するための戦略、およびユーザの意思決定木に対する確信度を導入し、より柔軟な説得方式を提案する。

本章の構成を以下に示す。第4.2節で新たに提案する多属性効用理論に基づく選好翻意手法を示す。第4.3節では、ラベルの付け替えに基づく選好翻意手法を示す。第4.4節では、上の2つの選好翻意手法に基づくエージェント間の説得プロセスを示す。第4.5節で、本手法に関する実験と考察を示し、最後の第4.6節は、まとめとしての結論である。

4.2 多属性効用に基づく選好翻意機構

一般にMAUT(多属性効用理論:Multi Attribute Utility Theory)[67]は、結果が2つかそれ以上の属性によって特徴づけられるような問題

を扱う。例えば、新車を購入する場合には、価格、色、タイプ(スポーツカーかセダンかなど)などの属性を考慮する必要がある。MAUTでは、代替案 C_i に対して、その属性を X_1, X_2, \dots, X_n とし、それらの属性値を $x_1(C_i), x_2(C_i), \dots, x_n(C_i)$ とする。例えば、代替案 C_i の属性 X_1 に関する値は $x_1(C_i)$ である。そして、代替案 C_i に対する効用 $u(C_i)$ は以下の式(4.1)で与えられる。

$$u(C_i) = f(f_1(x_1(C_i)), \dots, f_n(x_n(C_i))) \quad (4.1)$$

ここで f は、なんらかの関数である。応用領域に適切な関数 f を選択できる。GCDSS では、効用を決定する関数 f の計算を AHP(付録B)によって行っている。この効用に基づいて、各エージェントは選好を持つ。エージェントの選好は以下のように定義できる。 $C_i \succ C_j \Leftrightarrow u(C_i) > u(C_j)$ かつ $C_i \sim C_j \Leftrightarrow u(C_i) = u(C_j)$ 。 $C_i \succ C_j$ は、そのエージェントが C_i を C_j より好むことを表している。 $C_i \sim C_j$ は、そのエージェントが C_i と C_j を同じように好むことを表している。

エージェント間の説得では、まず説得者が最も好ましい代替案を提案する。次に妥協者が選好翻意を試みて、提案された代替案を最も好ましい代替案に変更できるなら、この説得は成功する。最も好ましい代替案とは、最も高い効用を持つ代替案である。例えば、妥協者の選好が $A_1 \succ A_2 \succ A_3$ であり、説得者の最も好ましい代替案が A_2 ならば、妥協者は、選好を $A_1 \succ A_2 \succ A_3$ から $A_2 \succ A_1 \succ A_3$ へ変更することを試みる。このように選好順序を変更するためには、エージェントは代替案の属性値(AHPで言えば属性に対するすべての一対比較値)を調整する必要がある。上の例で言えば、妥協者は、代替案 A_2 の属性値を増やすことによって妥協が可能だろう。すなわち、属性値 $C_1(A_2)$ を調整することによって代替案 A_2 の効用 $u(A_2) = f(f_{C_1}(C_1(A_2)), \dots)$ を変化させることができる。この結果、選好順序が変更され、説得が成功する。GCDSS では、妥協者は「生成-検査」法に基づいて属性値を調整する。問題は、選好の翻意を行うための解空間がかなり大きくなってしまうことである。もし、3つの代替案、4つの属性、および5つの属性値があったとすると、エージェントは、 $5^{3 \times 4}$ の解空間から妥当な解(すなわち、説得が成功する属性値の組み合わせ)を探し出す必要がある。つまり、 p 個の代替案、 q 個の属性、および d 個の属性値があったとき、解空間の大きさは d^{pq} となり指数的に大きくなる。これは、エージェントが解を探すのに $O(d^n)$, $n = pq$ ステップかかる意味している。解空

間から効率的に解を搜し出すために、本章では2つの原理に基づくヒューリスティックを提案する。最小変更原理(MC原理: minimal change principle)および順序に基づく変更原理(OC原理: order-based change principle)である。以下にそれぞれの原理を述べる。

MC原理: エージェントがユーザの選好を変更する場合はできるだけ最小にするべきである。なぜなら、ユーザの選好が劇的に変更されたら、エージェントの信頼性は減少してしまうからである。MC原理に基づいて、エージェントは、ユーザのオリジナルな選好を最小限だけ変更する解を見つける。

OC原理: エージェントは選好順序に基づいてユーザの選好を調整すべきである。最も好ましくない代替案を最も好ましくするよりも、二番目に好ましい代替案を最も好ましくする方が、ユーザにとって受け入れやすい。そこで、エージェントは、ユーザの選好順序に基づいて代替案を選択し、その属性値を変更する。

MC原理とOC原理に基づいて、図4.1に示すアルゴリズムを提案する。

本アルゴリズムでは、まず妥協者は、説得者の最も好ましい代替案(PA)の属性値を調整する。次に、妥協者は、自分自身の最も好ましい代替案(MA)の属性値を調整する。妥協者の選好が $A_1 \succ A_2 \succ A_3$ であり、説得者の最も好ましい代替案が A_2 であるとする。この場合、妥協者は、まず代替案 A_2 の効用を増加させるために、代替案 A_2 の属性値を増加させる。もし妥協者の最も好ましい代替案が A_2 になつたら、この選好翻意は成功したとする。もし、妥協者の最も好ましい代替案が A_2 でなかつたら、妥協者は、代替案 A_1 の効用を減少させるために A_1 の属性値を減らす。具体的には、AHPでは、ある代替案のある属性(評価基準)の属性値を増加/減少させるために、エージェントは、一対比較行列におけるその代替案に関するすべての一対比較値を増加/減少させる。一対比較値の増加/減少は、第3章で述べた手法と同じで、2区間の範囲で増加/減少させる。

本アルゴリズムでは、どの属性を調整するかを決定するために、エージェントは、属性のすべての組合せを、幕集合(Power set)として求める。例えば、3つの属性 C_1, C_2 , および C_3 があるとき、エージェントは、幕集合

$$\{\{C_1\}\{C_2\}\{C_3\}\{C_1, C_2\}\{C_1, C_3\}\{C_2, C_3\}\{C_1, C_2, C_3\}\}$$

を求める。ここで、空集合は含めない。 C_1, C_2 の意味は、エージェン

```

INPUT : 説得者の最も好ましい代替案 ( $PA$ ) および ,
        妥協者のオリジナルの選好 ( $Pref$ )
OUTPUT: Success or Failure
Function MAUTbasedPreferenceRevision( $PA, Pref$ )
     $PATS :=$  代替案  $PA$  に対する属性の幕集合. ;
     $SortedPATS := sortBySize(PATS)$ ;
     $Candidates := \phi$ ;
     $Solutions := \phi$ ;
    // 説得者の最も好ましい代替案  $PA$  に基づく調整 .
    For each  $ATS$  in  $SortedPATS$ 
         $ATS' := IncreaseValues(ATS)$ ;
         $Pref' := ReCalculate(Pref, ATS')$ ;
         $Candidates := Candidates \cup Pref'$ ;
        If  $PA == theMostPreferableAlternative(Pref')$  Then
             $Solutions := Solutions \cup Pref'$ ;
        End If
    End For
    If  $Solutions$  is not empty Then
         $Pref := selectMinimalPref(Solutions)$ ;
        return Success
    End If
    // 妥協者自身の最も好ましい代替案  $MA$  に基づく調整 .
     $PATS :=$  代替案  $MA$  に対する属性の幕集合;
     $SortedPATS := sortBySize(PATS)$ ;
    For each  $CandidatePref$  in  $Candidates$ 
        For each  $ATS$  in  $SortedPATS$ 
             $ATS' := decreaseValue(ATS)$ ;
             $Pref' := ReCalculate(CandidatePref, ATS')$ ;
            If  $PA == theMostPreferableAlternative(Pref')$  Then
                 $Solutions := Solutions \cup Pref'$ ;
            End If
        End For
    End For
    If  $Solutions$  is not empty Then
         $Pref := selectMinimalPref(Solutions)$ ;
        return Success
    End if
    return Failure
End Function

```

図 4.1: 多属性効用に基づく選好翻意アルゴリズム

トが属性 C_1 と属性 C_2 の属性値を調整するということである。MC 原理に基づいて、エージェントは、これらの属性集合をサイズが小さい順に調整していく。

関数 *selectMinimalPref()* は、MC 原理に基づいて候補の中から最良の選好を選択する。オリジナルの選好と候補となっている選好の違いが最も小さいものが最良の選好となる。選好間の違いは、各代替案の選好順序における距離の総和とし、以下の式 (4.2) で定義する。

$$\sum_{0 \leq i \leq m} |OO(A_i) - NO(A_i)| \quad (4.2)$$

ここで $OO(A_i)$ は、代替案 A_i のオリジナルの選好順序における順番を示す。 $NO(A_i)$ は、代替案 A_i の新しい選好順序における順番を示す。仮に、妥協者の選好が $A_1 \succ A_2 \succ A_3$ から $A_2 \succ A_1 \succ A_3$ へ変更されたとしよう。この場合代替案 A_1 はオリジナルな選好順序では最も好まれていたが、新しい選好順序では二番目になっているので、 $OO(A_1) = 1$ かつ $NO(A_1) = 2$ となる。 $A_1 \succ A_2 \succ A_3$ と $A_2 \succ A_1 \succ A_3$ の違いの総和は、式 (4.2) より 2 となる。

4.3 ラベルの付け替えに基づく選好翻意

前節の多属性効用に基づく選好翻意に加えて、本節ではラベルの付け替えに基づく選好翻意を提案する。AHP では、評価基準(属性)は、各代替案が意思決定の目的をどれくらい良く満たしているかということを評価するために用いられる。AHP では、評価基準をユーザが生成することを前提としているが、一般的に評価基準を生成する作業はユーザにとって困難な作業である。なぜなら、AHP の意思決定木は以下のような条件を満たす必要があるからである(1)同一階層にある評価基準間(または代替案間)は互いに独立している。(2)各階層は互いに独立している。

そこで以上のような条件を満たさなければ成らない評価基準の生成を支援するために、評価基準のタイプとして以下の 2 つのタイプを提案する。確定的な(Certain)評価基準と不確定な(Uncertain)評価基準である。例えば、もし評価基準が確定的な評価基準として生成されたなら、この評価基準は信頼できるものであるということを意味している。一方、もし評価基準が不確定な評価基準として生成されたなら、この評価基準は信頼できないものであるということ

を意味している。

本章では、不確定な評価基準の状態を示すために、*ACCEPT*と*IGNORE*というラベルを提案する。不確定な評価基準が*ACCEPT*とラベル付けされていたら、エージェントは代替案の重要度を計算する時に、この評価基準を含めて計算を行う。不確定な評価基準が*IGNORE*とラベル付けされていたら、エージェントはこの評価基準を含めずに代替案の重要度を計算する。ラベルの付け替えの例を図4.2に示す。図4.2は、(a)で示すある意思決定木のラベルの付け替えを行った結果、(b)、(c)、および(d)で示す意思決定木が生成される可能性があることを示している。本例では「旅行先の選定」が意思決定木の総合的な目的となっており、代替案は「ロサンゼルス」、「ラスベガス」、および「ニューヨーク」である。ユーザは、評価基準として「興味深さ」、「費用」、および「安全性」を挙げ、「興味深さ」についてを「学問」「遊び」という評価基準に分けています。「費用」と「学問」を確定的な評価基準とし、「興味深さ」「遊び」、および「安全性」を不確定な評価基準としている。図4.2の(a)のように、不確定な評価基準に対する初期のラベル付けは*ACCEPT*とする。また図4.2の(c)の「興味深さ」のように副評価基準を持つ評価基準が、*IGNORE*とラベル付けされた場合、その副評価基準も代替案の重要度の計算には含まれない。選好の翻意において、エージェントは、まず、すべての不確定な評価基準（属性）を効用の計算に用いる。前節の属性値の調整が失敗したら、エージェントはランダムに一つの不確定な評価基準を*IGNORE*とラベル付けする。すなわち、図4.2ならば、(a)、(b)、および(c)のどれかを次の意思決定木としてランダムに選択する。以上のラベルの付け替えプロセスは、制約緩和プロセス[78]にヒントを得たプロセスである。

4.4 選好の翻意に基づく説得プロセス

本節では、2エージェント間の説得プロセスを示す。説得する側のエージェントを説得者と呼び、説得される側のエージェントを妥協者と呼ぶ。説得プロセスは以下の（ステップ1）～（ステップ4）にしたがって進む。

（ステップ1）説得者が妥協者に合意案を送信する。合意案は説得者が最も好ましい、つまり最も重要度の高い代替案である（要請）。

（ステップ2）妥協者が合意案を受信する。もし妥協者の最も好

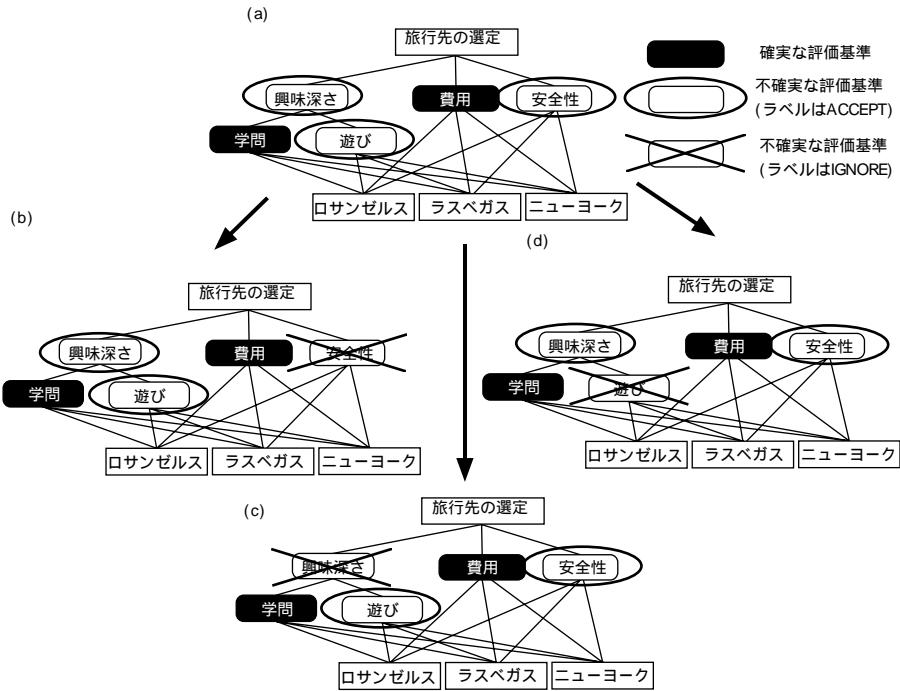


図 4.2: ラベルの更新の例

ましい代替案が合意案と同じ代替案であれば、妥協者は合意案を受理できるのでこの説得は成功する。もし妥協者が合意案を受理できなければ、妥協者は、合意案を受理するために意思決定木の状態にに対する選好の翻意を試みる。つまり妥協を試みる（妥協）。

選好翻意のプロセスは図 4.3 のように進む。選好翻意のプロセスの実行例は付録 A を参照されたい。最初にすべての評価基準（属性）は、*ACCEPT*とラベル付けされる。妥協者は、MC 原理および OC 原理に基づく選好翻意アルゴリズムによって、選好の翻意を試みる。その結果、もし妥協者の最も好ましい代替案が合意案と同じであれば、受理可能であるから、選好の翻意は成功とする。もし、妥協者の最も好ましい代替案が合意案と異なるならば、不確定な評価基準の中で *ACCEPT*とラベル付けされた評価基準があるかどうかを調べる。あるならば、妥協者はその評価基準のラベルを *ACCEPT*から *IGNORE*に付け替える。ないならば、この選好翻意は失敗する。すなわち、このプロセスは必ず終了する。選好の翻意が成功したなら（ステップ 3）に進む。選好の翻意が失敗したなら（ステップ 4）

に進む。

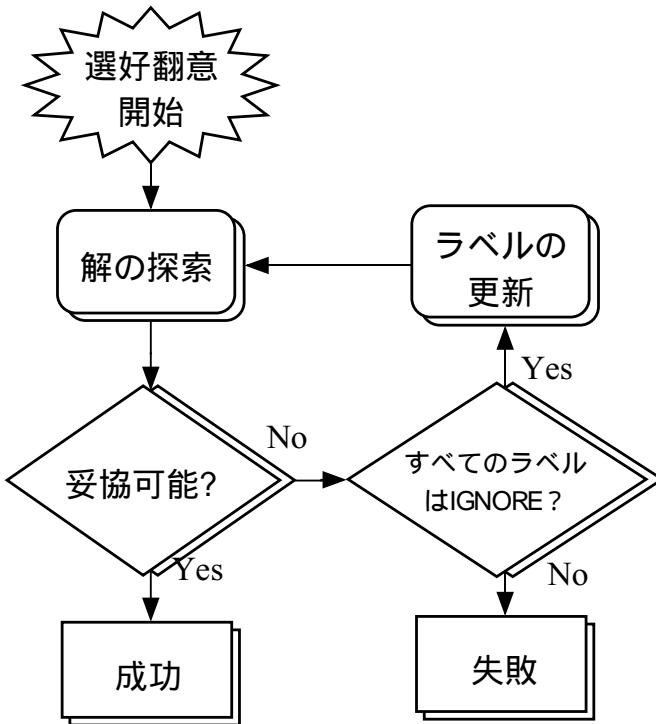


図 4.3: 選好翻意プロセス

(ステップ3) 妥協者はユーザに新しい意思決定木を受け入れるかどうかを尋ねる。ユーザが受け入れ可能だとするならば説得は成功とする。ユーザが受け入れ不可能とするなら、合意案は受理不可能であるとし(ステップ4)に進む(ステップ3)は、ユーザの代理人をつとめるようなエージェントを実装する際に重要な「ユーザがシステムに対して制御しているという感覚を与える」[94]という事項に基づいて導入したステップである。

(ステップ4) 妥協者が合意案を受理することが可能であるならば、妥協者は合意メッセージを返送する。もし、受理することが不可能であれば、拒否メッセージを返送する(返答)。説得者が合意メッセージを受け取れば、説得は成功である。もし説得者が、拒否メッセージを受け取れば、妥協者が説得者を説得することを試みる。つまり、説得者と妥協者の立場を入れ替えて説得を試みる。ステッ

プ1，ステップ2，およびステップ3がもう一度行われ，新しい説得者が，新しい妥協者から拒否メッセージを受け取れば，説得は失敗し，受理メッセージを受け取れば説得は成功する。

4.5 実験と考察

4.5.1 実験

図4.4に，旅行先の選択という問題に関するグループ代替案選択支援において，選好翻意機構を用いた実験結果を示す。ここでは，代替案はS.F. (San Francisco), L.V. (Las Vegas), およびL.A. (Los Angeles)である。図4.4の縦軸は，各代替案の効用を示す。横軸は，調整された属性が示されている「H」は属性「Hobby」「A」は属性「Academic」「C」は「Cost」，および「S」は「Safety」を表す。本例では，エージェントの初期の最も好ましい代替案は「L.V.」であり，このエージェントが「S.F.」で説得されたとする。つまり「S.F.」は説得者の最も好ましい代替案である。エージェントは，図4.1のアルゴリズムを用いて選好の翻意を試みる。エージェントはまず，属性の幕集合を生成する。そして，属性集合の中でサイズの小さいものから順にその属性値を調整していく。本例では，エージェントはまず，属性Hの属性値を調整し，次に，属性Aの属性値を調整している。最後に，属性H，属性A，および属性Sの属性値を調整した時に，このエージェントは選好の翻意に成功している。つまりこのエージェントの最も好ましい代替案が，説得者の最も好ましい代替案「S.F.」に変更されたということである。

4.5.2 選好翻意機構の長所

本選好翻意機構の長所は以下の2点である。

1. 図4.1は，解空間を効果的に絞り込むことができる。
2. ユーザの不確定さを用いることによって，エージェントの合意形成が促進される。

長所1の理由を以下に示す。 p 個の代替案， q 個の属性，および d 個の属性値があると仮定する。解空間は， d^{pq} となる。エージェント

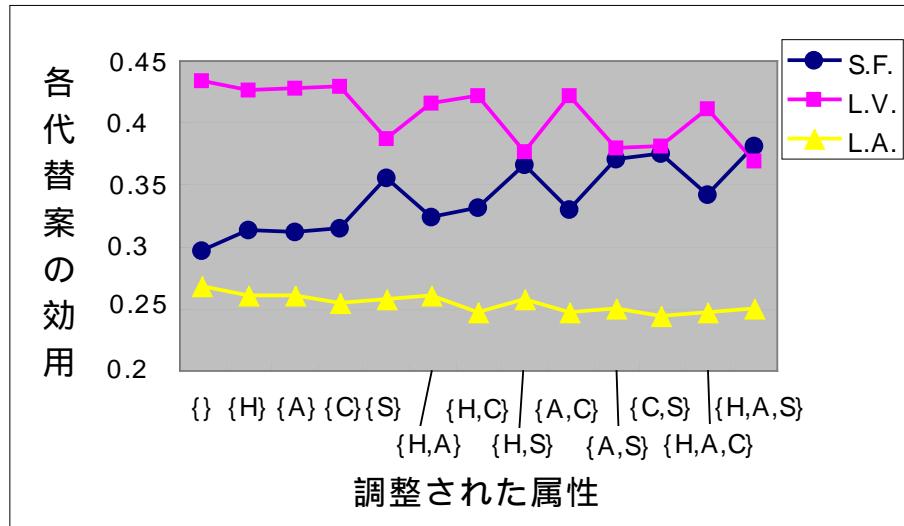


図 4.4: 実験結果

は解を探索するのに, $O(d^n)$ のステップが必要となる. ここで $n = pq$ である. 本章で提案した選好本意アルゴリズムは, 説得者の最も好みの代替案および, 妥協者の最も好みの代替案の 2 つの代替案だけにフォーカスを絞るので $p = 2$ となる. 解空間のサイズは d^{pq} から d^{2q} に絞りこまれる. すなわち, エージェントが解を探索するステップは $O(d^q)$ のステップに減少する. このステップ数の軽減は, 現実的なアプリケーションでは, エージェントが効率的に解を探索するために有効である.

長所 2 の理由を以下に示す. 代替案 A_1 と, 3 つの不確定な属性 C_1, C_2 , および C_3 があるとする. まずエージェントは, 以下の式 (4.3) を用いて代替案 A_1 の効用を計算する.

$$u(A_1) = f(f_{C1}(C1(A_1)), f_{C2}(C2(A_1)), f_{C3}(C3(A_1))) \quad (4.3)$$

式 4.3 はエージェントが, 3 つの代替案と 3 つの属性からなる解空間から解候補を探すことを意味している. この解空間の中に, 説得者の最も好みの代替案が, このエージェントの最も好みの代替案となるような(すなわち選好の翻意が成功するような)解が無ければ, 属性の中の一つのラベルを *ACCEPT* から *IGNORE* に付け替える. 例として, このエージェントは, C_1 のラベルを *IGNORE* に変更したとしよう. これによって A_1 の効用は以下の式 (4.4) で計算

されることになる。

$$u(A_1) = f'(f_{C2}(C2(A_1)), f_{C3}(C3(A_1))) \quad (4.4)$$

関数 f' は AHP によって自動的に計算される。すなわち、エージェントは新たに 3 つの代替案と 2 つの属性からなる解空間から解を探す機会を得たことになる。つまり、ユーザの不確定性を利用するこことによって、エージェントは、より大きな解空間から解を探すことができ、より選好の翻意が成功しやすくなる。選好の翻意が成功することによって説得が成功しやすくなるので、エージェント間の合意形成が促進されることになる。

第 4.3 で示した選好本意のためのアルゴリズムでは、意思決定木における不確定な評価基準のうちの一つだけのラベルを付け替える。なぜ一つのラベルだけを付け替えるかという理由は以下の通りである。もし、同時に複数の不確定な評価基準のラベルを付け替えたとすると、代替案の重要度は、ユーザ自身が構築した意思決定木のもとの代替案の重要度とは劇的に異なった値になる。エージェントが勝手に代替案の重要度を劇的に変化させてしまうと、ユーザがシステムに対して制御しているという感覚を持つのは困難である。そこで本システムでは、ユーザ自身が構築した意思決定木のもとの代替案の重要度との相違がなるべく少なくなるように、不確定な評価基準のうちの一つだけのラベルを付け替える。

4.6 結言

本章では、グループ代替案選択支援システム GCDSS におけるエージェント間の説得のための新たな選好翻意方式を提案した。本章ではエージェントが説得において選好を翻意するための新たな手法を提案した。まず、多属性効用理論に基づく選好翻意機構を提案した。ここでは、MC 原理、および OC 原理を提案した。次に、ラベルの付け替えに基づく選好翻意機構を提案した。最後に、選好翻意機構を用いた場合の効用の変化に関する実験を行い、本手法の特長として以下の 2 点をあげた。(1) 本選好翻意機構は、解空間を効果的に絞り込むことができる。(2) ユーザの不確定さを用いることによって、エージェントの合意形成が促進される。

第5章

多重交渉に基づく GCDSSの実装

5.1 序言

第3章では、エージェント間の合意形成機構としてエージェント間の説得機構を提案し、エージェント間の説得をグループ意思決定支援に導入する有用性を示した。本章では、GCDSSの実装方式として、モバイルエージェントの多重交渉に基づくGCDSSの実装を示す。第3章のGCDSSではエージェント間の交渉は2エージェント間の説得のトーナメント方式に基づいて行われた。エージェント間の説得においては、相手を説得できる機会を平等にエージェントに与えるために、説得する側と説得される側をランダムに選定した(第3章)。説得する側と説得される側をランダムに選定したためにエージェントの交渉結果は毎回必ずしも同じ結果ではなく、時にはユーザの納得が得られにくい交渉結果が得られた。

本章ではランダムに説得する側と説得される側を選定するのではなく、複数の交渉パターンを実行することによって、各エージェントに一度は説得する側になる機会を与える。エージェントは一度は説得する側になることができるので、説得できる機会を平等に与えられたことになる。本章では複数の交渉パターンを同時に実行することを多重交渉と呼ぶ。

GCDSSでは、個々のユーザの意思決定はAHP(付録B参照)によって支援される。GCDSSでは、エージェントがユーザの代理として説得に基づく交渉を行う。エージェントは説得された時、妥協を試みる

ために自分の選好の変更を行う。選好の変更アルゴリズムは第5.3.3節で示すが、選好の変更アルゴリズムを説明するためにはAHPに関する知識が不可欠であるから付録Bを参照されたい。前章ではエージェント間の説得のためのアイデアとエージェントの交渉方式に焦点を当てて論じた。本章ではエージェント間の説得の実装とAHPを用いたグループ意思決定支援にも焦点を当てる。そこで本章では具体的な説得アルゴリズムを示し、AHPを用いたグループ意思決定支援に関する考察を第5.4節で示す。

本章の構成は、第5.2節で、エージェント間の多重交渉について論じる。第5.3節で、GCDSSのモバイルエージェントに基づく実装方式、GCDSSにおけるエージェントの役割、および本実装方式の利点について述べる。第5.4節ではGCDSSの特長、実際に使用した経験から得られた知見、および考察をまとめる。第5.5節は本章のまとめとしての結論である。

5.2 エージェント間の多重交渉

多重交渉は、以下の4つ組で定義される。

$$< N, C, P, E >,$$

ここで、

- N はエージェントの集合である。
ここで、 $N = \{1, \dots, i, \dots, n\}$ である。
- C はエージェントのクローンの集合である。
ここで、 $C = \{C_1, \dots, C_i, \dots, C_n\}$ かつ $C_i = \{c_{i1}, \dots, c_{in}\}$ である（クローン c_{ik} は、 c_{ik} がエージェント i の k 番目のクローンであることを意味している）。
- P は交渉パターンの集合である。
ここで、 $P = \{p_1, \dots, p_i, \dots, p_n\}$ である。 p_i は、エージェント a_i およびクローンの集合 $\{c_{1i}, \dots, c_{ji}, \dots, c_{ni}\}$, $j \neq i$ から構成される。すなわち、パターン p_i は、エージェント i のクローンと、他のエージェントの i 番目のクローンから構成される。ある一つのパターンでは、エージェント a_i とクローンが交渉

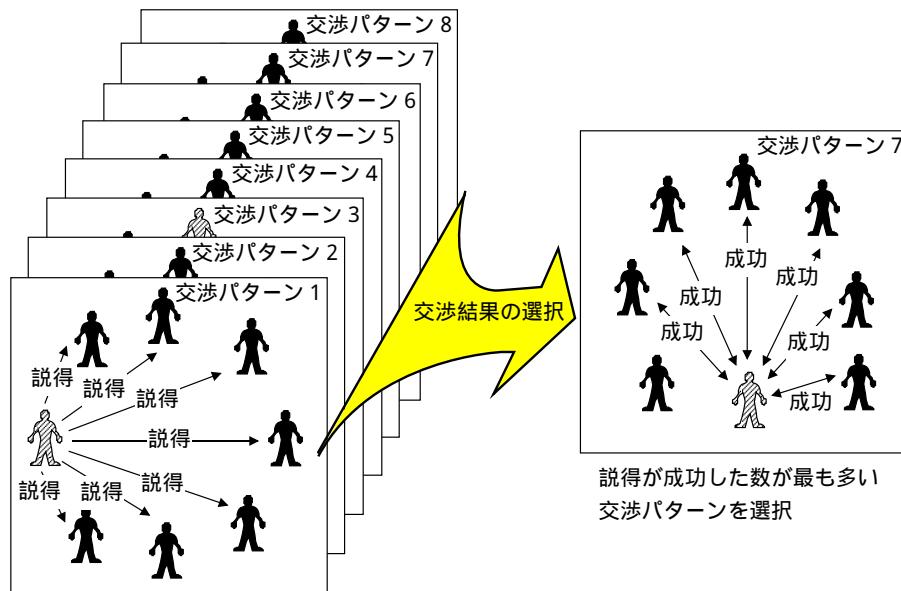


図 5.1: エージェント間の多重交渉

を行う。GCDSSでは、 a_i がそのパターンのクローンすべてを説得する。

- E は、あるパターンの交渉結果に関する評価関数である。ここで $E(p_i) = \mathcal{R}$ (実数) である。ユーザはこの評価関数に基づいて最良の結果を選択する。

具体的には、図5.1に示す通り、ある一つのエージェントが残りのエージェントを説得するという一つの交渉パターンをエージェントの数の分だけ実行する。従来のGCDSSのトーナメント方式とは異なり、各交渉パターンでは1対多の説得が行われる。つまり、ある一つの交渉パターンにおいて一つのエージェントが説得者、残りが被説得者となることによって、説得者になったエージェントを持つユーザの意見が尊重されることになる。そして、複数の交渉パターンを実行することにより複数の交渉結果を得ることが可能になる。複数の交渉結果から最もユーザの納得が得られやすい交渉結果として、説得が成功した数が最もが多い交渉結果を最終的な交渉結果として採用する。

複数の交渉パターンを実行する場合、逐次的に交渉パターンを実行するよりも、各交渉パターンを同時に実行することによって効率的に複数の交渉結果を得ることができる。複数の交渉パターンを同時に実行するために、エージェントをモバイルエージェントとして実装する。なぜなら、モバイルエージェントの複製技術を用いることによって、エージェントは交渉パターンの数だけ複製を生成し、同時に交渉パターンを実行すれば良いからである。また従来の実装方式のエージェント間の交渉では、エージェントは計算機ホスト（便宜上ホストと略す）から他のホストへ移動すること無しに、ホスト間でのメッセージ通信のみによって交渉を行った。メッセージ通信のみで複数の交渉を行う機構を実現すると、ネットワークの負荷が高い場合にメッセージの遅延が起こり、効率的に複数の交渉を行うことが困難になる。エージェントをモバイルエージェントとして実装することにより、エージェントは自分自身の複製を生成し他のホストに移動させた後に交渉を同時に行うことが可能となる。さらにモバイルエージェントを導入することによって、携帯型端末などを用いて遠隔地からグループの意思決定に参加することも可能となる。

5.3 モバイルエージェントに基づく GCDSS の実装方式

5.3.1 モバイルエージェントに基づく GCDSS の構成

GCDSS はグループの意思決定を支援するいくつかのエージェントから構成される。エージェントは、GCDSS 管理エージェント、AHP 管理エージェント、交渉エージェント、および仲介エージェントに分類できる。本システムは、プログラミング言語 Java[3] と、IBM の Aglets Software Development Kit[77] を利用して構築されている。Aglets Software Development Kit とは、モバイルエージェントをプログラミング言語 Java によって構築するためのプログラミング環境である。つまり本システムはすべて Java に基づいて実装されているため、Java が利用可能な環境では実行可能である。Aglets Software Development Kit ではモバイルエージェントを Aglet というインターネット上におかれたホストからホストへ移動することのできる Java のオブジェクトとして構築する。Aglets Software Development Kit

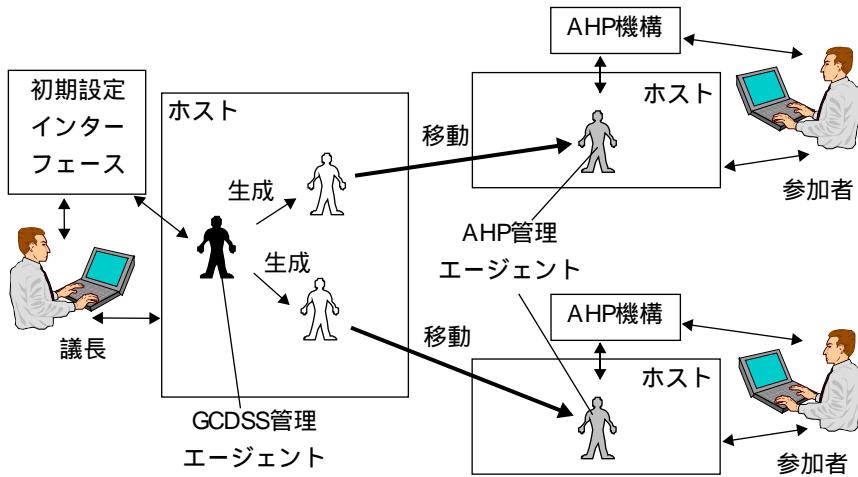


図 5.2: 起動時の構成

を用いることによって、セキュリティに対して頑健なエージェントを容易に構築することが可能となる。GCDSS エージェント、AHP 管理エージェント、交渉エージェント、および仲介エージェントは、Aglet として実装されている。Aglets Software Development Kit では、ホスト上で Aglet を管理するためにエージェントサーバを用いる。エージェントサーバも Java で実装されているので、Java が利用可能な環境ならどこでも実行可能である。

5.3.2 GCDSS の実行方式

GCDSS におけるグループ意思決定支援は以下のステップ 1 ~ ステップ 4 のステップにより実現される。起動時の構成を図 5.2 に示す。

(ステップ 1) 議長が GCDSS 管理工エージェントを生成することによって GCDSS は起動される。議長は初期設定インターフェースから、問題の総合的な目的、代替案、および参加者の情報を GCDSS 管理工エージェントに渡す。

(ステップ 2) GCDSS 管理工エージェントは、受け取った情報に基づいて AHP 管理工エージェントを生成し、各参加者のホストに AHP 管理工エージェントを移動させる。AHP 管理工エージェントは AHP 機

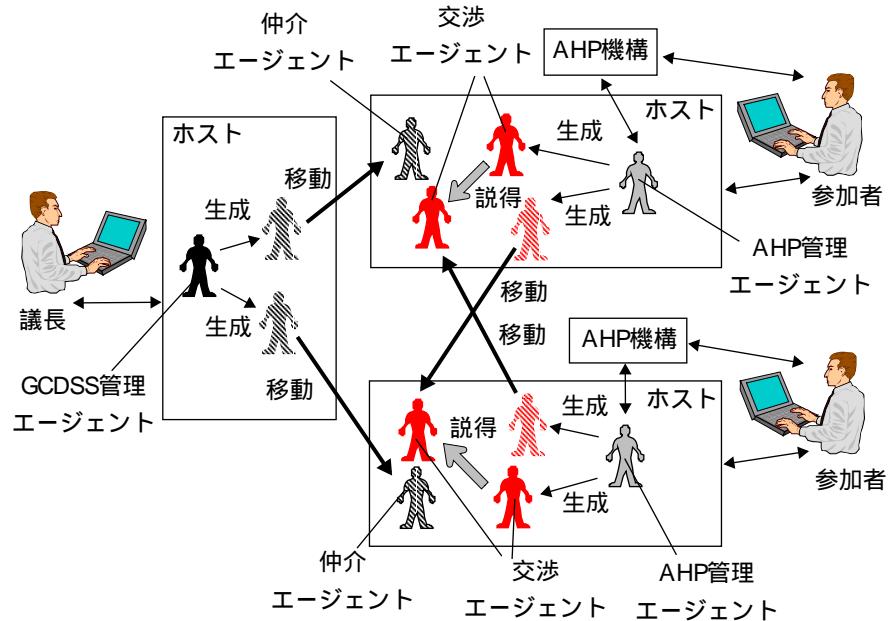


図 5.3: 多重交渉を同時実行する構成

構をユーザに提供する。

(ステップ3) AHP管理エージェントが交渉エージェントをモバイルエージェントの複製機能を用いて参加者の人数と同数生成する(図5.3)。各交渉エージェントは、AHP管理エージェントからユーザの主観的な好みであるAHPの意思決定木の情報を自分の選好として受け取る。各交渉エージェントは、各参加者のホストに移動して他の交渉エージェントと交渉を行う。各ホスト上で説得に基づく交渉が行われる。各ホスト上で元々そのホストに存在している交渉エージェントが説得する側になり、他のホストから移動してきた交渉エージェントが説得される側になる。各ホストにおいて行われる交渉が、各々のホストにおけるユーザの意見を尊重した交渉パターンを表す。すべての交渉エージェントを説得した結果、ある代替案について合意条件が満たされていればその代替案に合意できたとする。議長は参加者数と同数の仲介エージェントを各ホストに移動させ、各ホストでの交渉を仲介させる。

(ステップ4) 各仲介エージェントは交渉結果を持って議長のホストに戻る。議長は各仲介エージェントが持つ交渉結果か

らグループとしての決定をする。議長が複数の交渉結果から最終的に一つの決定を行う方法として本実装方式では、仲介エージェントが持つて帰った交渉結果の中で、成功した説得の数が最も多い交渉結果を最終的な決定として選択する。議長は、最終的な決定を各参加者に伝える。

(ステップ3)において、各交渉の合意条件をどのように定めるかはシステムの本質にかかわるが、社会的決定論では決定の仕方つまり合意条件をどのように決めても民主的な決定が保証されないことが Arrow の定理によって証明されている [110]。つまり、決定の仕方についての仮定をどのように変更しても民主的な決定は保証されないため、決定の仕方についての議論は本質的ではない。実社会では、実際に合意を得なければならない場合、参加者数の過半数の賛成によって合意としたり、3分の2の賛成によって合意とするなど、さまざまな合意条件が存在する。そこで、本実装方式では実社会において用いられる「過半数の賛成により合意とする」方式を用いる。つまり、個々の交渉パターンについての合意条件を、過半数の交渉エージェントが最も好ましいとする代替案が同じ時、その代替案について合意が達成されたとする。

「過半数の賛成により合意とする」方式を採用することによって Arrow の定理 [110] より個々の交渉パターンにおける合意は必ずしも民主的な決定とは言えない。そこで本システムでは(ステップ4)において、グループとしての最終的な結果として、各々のユーザの意思を尊重した複数の交渉結果の中から説得が最も多く成功した交渉結果を選択する。なぜなら、より多くの説得が成功している交渉結果の方がより多くのユーザが納得できる合意であると考えられるからである。

5.3.3 各エージェントの機能

GCDSS エージェント: GCDSS エージェントは、議長が GCDSS によってグループ意思決定を行う時に生成する。GCDSS エージェントは、議長から参加者についての情報と、グループ意思決定における問題の総合的な目的とその代替案を受け取る。問題の総合的な目的とその代替案を基に AHP 管理工エージェントを生成し、各参加者のホストに AHP 管理工エージェントを移動させる。

AHP 管理工エージェント: AHP 管理工エージェントのタスクは次の

(a) (b), および(c)の3つである (a) モバイルエージェントの移動に関する特長を活かして, 議長のホストから参加者のホストに移動する際に AHP 機構や交渉エージェントを記述したプログラムと一緒に運ぶ (b) ユーザに対して本システムにおけるグループ意思決定支援のプロセスがどこまで進んだかを提示し, ユーザに次に何をすべきかという説明を提示する (c) 交渉エージェントの管理を行う. 以上のタスクを AHP 管理工エージェントが担うことによる利点を以下に挙げる (i) 参加者は本システムのための AHP 機構等に関するプログラムを, 前もって自分のホスト上に持っている必要がない (ii) エージェントが参加者をリードすることによって, 参加者は本システムの操作方法について簡単に知っているだけで良い.

仲介エージェント: 仲介エージェントは, 交渉エージェント間の交渉を仲介するエージェントである. 本システムでは, 仲介エージェントは交渉エージェント間の交渉を仲介し, 交渉の結果を議長に持つて帰る.

交渉エージェント: 交渉エージェントはユーザの意思決定木を選好として持つことによって, 他の交渉エージェントと交渉を行う. 交渉は仲介エージェントによって仲介される. 交渉は2エージェント間の説得に基づいて行われる. 説得は説得されたエージェントが妥協することによって成功する. 妥協は, 説得されたエージェントが自分自身の選好, つまり意思決定木における一対比較行列の一対比較値を適度に調節することによって行われる. 図5.4に基本的な選好の変更アルゴリズムを示す.

交渉エージェントは説得において妥協を試みるために, 一対比較におけるユーザの主観的な一対比較値を整数値2の範囲で調整する. 整数値2の範囲で調整することが可能である理由は以下の通りである. ユーザが一対比較において言葉によるファジィな表現を用いているので, 一対比較において重み付けされた一対比較値は厳密な値ではなく「だいたいこれくらい」という曖昧な値であるから, 整数値2の範囲での調整なら妥当であると考える[57][58]. 例えば, ユーザが“重要”と重み付けした一対比較は, 一対比較値としては5が重み付けされるが, 4~6の範囲であれば調整可能であるとする.

図5.4は基本的な選好の変更アルゴリズムである. 選好の変更は, 説得において説得されたエージェントの最も重要度の高い代替案が, 提示された代替案と異なる場合に行われる. 入力の「目標となる代替案 a 」は, 説得された時に提示された代替案であり, エージェント

入力：目標となる代替案 a ，対象となる評価基準の集合 C
 出力：選好の変更の結果（*true* または *false*）
procedure *PreferenceRevision*(a, C)
begin
for each $c \in C$ **do**
 $m :=$ 評価基準 c の一対比較行列；
 $j :=$ 一対比較行列 m における代替案 a の行；
 $x := m$ の列数；
 for $i := 1$ to x **do**
 if $i \neq j$ **then**
 $BackUp := m$ ；
 m の j 行 i 列の一対比較値 a_{ji} を一つ増やす；
 i 行 j 列の一対比較値 $a_{ij} := \frac{1}{a_{ji}}$ ；
 m の固有ベクトルを計算；
 if m に一貫性なし **then**
 $m := BackUp$ ；
 else
 意思決定木全体の代替案 a の重要度を計算する；
 if 代替案 a の重要度が最大 **then**
 return *true*；
 endif
 endif
 endif
 endif
return *false*；
end.

図 5.4: 選好の変更アルゴリズム

はこの代替案 a に妥協することを試みる「対象となる評価基準の集合 C 」とは、一対比較行列を調整する評価基準の集合であり、AHP の意思決定木において代替案の階層の一つ上の階層の評価基準の集合である。

本アルゴリズムにおいて代替案の階層の一つ上の階層の評価基準の集合だけを調整の対象とする理由は以下の通りである。説得における選好の変更では、代替案の重要度の変更を目的とするので、代替案を要素として持つ一対比較行列のみを調整の対象とする。ユーザが、調整の対象とされた一対比較行列に対して、なぜその一対比較行列が調整の対象となったのかということが、代替案を実際に要素として持つ一対比較行列のみを調整の対象とすることによって、直感的に分かりやすくなる。つまり、階層の深さが 3 以上であっても調整の対象となるのは下から 2 つ目の階層のみとする。エージェン

トが自動的に調整するだけならば、2つ目の階層以外の階層も調整の対象とすることも可能である。しかし、ユーザの分かりやすさという観点から、本システムでは2つ目の階層のみを調整の対象とする。¹

選好の変更アルゴリズムは、対象となる評価基準における一対比較行列において、目標となる代替案 a に関する一対比較値を増加させていく² 一つの一対比較値を増加させるごとに意思決定木全体に対する代替案 a の重要度を計算し、代替案 a が最大になるまで繰り返す。図5.4において「 m の j 行 i 列の一対比較値を一つ増やす」の意味は、以下の通りである。一対比較行列では、特徴(2)行列の要素の値は $a_{ij} = 1/a_{ji}$ より、行列の要素の取り得る値は、 $1/9, 1/8, \dots, 1/2, 1, 2, \dots, 8, 9$ である。一対比較値 a を一つ増やすということは、 a をより9に近い一対比較値に一つ繰り上げるということである。例えば、一対比較値が $1/8$ であれば $1/7$ に、 2 であれば 3 にすることである。具体的には、一対比較値 a を一つ増やすとは、 $a < 1$ ならば、 $a := 1/(1/a - 1)$ とし、 $a \geq 1$ ならば $a := a + 1$ とすることを言う。さらに一対比較行列の特徴の一つである「(2) 行列の要素の値は $a_{ij} = 1/a_{ji}$ 」より、 i 行 j 列の一対比較値 $a_{ij} := 1/a_{ji}$ とする。「 m に一貫性なし」とは、一対比較行列 m の非整合度尺度 $I.R. > 0.1$ であるときを示す。

5.3.4 交渉ビューワー

交渉ビューワーは各参加者が自分のホスト上で行われている交渉エージェント間の交渉をリアルタイムに参照するための機構である。交渉ビューワーは仲介エージェントによって参加者に提示される。交渉ビューワーの機能として(1)交渉を一時停止させる(2)交渉

¹ 例えば、付録B図B.1では調整する一対比較行列として「海外旅行の行き先の選定」の一対比較行列は対象とせず、「面白さ」「治安」、および「費用」の一対比較行列のみを対象とする。なぜなら、代替案「Los Angeles」と代替案「San Francisco」の重要度を変更するために、「Los Angeles」と「San Francisco」を実際に要素として含む「費用」の一対比較行列を調整の対象とする理由は直感的に分かりやすいからである。一方「Los Angeles」と「San Francisco」を実際に要素として含まない「海外旅行の行き先選定」の一対比較行列を調整の対象とする理由は直感的には分かりにくい。

² 例えば、付録B表B.6で、目標となる代替案 a が「San Francisco」であったとすると、一対比較行列の「San Francisco」の行の「Los Angeles」の列の値、つまり「Los Angeles」に対する「San Francisco」の一対比較値を3から4に増加させてみる。さらに「San Francisco」と「Las Vegas」の一対比較値についても増加させてみる。

をステップバイステップで進める、および(3)各エージェントの詳細な情報を見る、機能が含まれる。交渉ビューワーは、交渉のある時点においてどのようなグループが存在するかを示すことによって、意見のばらつきを示すことが可能である。具体的な実装例は付録Aで示す。

5.3.5 本実装方式の利点

本実装方式の利点を以下の(1)(2)、および(3)にまとめる。

(1) 多重交渉によって複数の交渉結果を同時に得ることが可能である。一般に人間同士の交渉において、声の大きな者やステータスの高い者の意見が反映され易いことがあり、前提となる意見が同じ場合でも交渉結果が異なることがあり得る。すなわち交渉の結果は状況に応じて非決定的な側面を持つ。本システムでは、複数の交渉パターンを同時に実行することによって、各参加者の意見を尊重した場合の交渉結果をすべて得る機構を実現した。本機構によって、参加者の意見をより反映した結果を得ることができる。

(2) 本システムのAHP機構などの部分的な機構を持ったエージェントを転送することによりユーザがGCDSSに関する機構を持たなくても良い。AHP管理エージェントはAHP機構と交渉エージェントの生成機能を持つ。そこでAHP管理エージェントが、議長のホストから参加者のホストへ移動することによって、参加者にはAHP機構と交渉エージェントを提供することができる。

(3) 個人的な主観的評価に関するプライバシーの保持が可能である。エージェント間の交渉において、エージェントは意思決定木に基づいて説得を行い、意思決定木における一対比較行列の一対比較値を調節する。エージェントが意思決定木の調整をする場合もユーザの個性的な主観的評価のプライバシーは保持されている。説得では、妥協する側が、提示された代替案に対して自分が妥協できるかどうか確かめ、妥協できるなら自ら調整する。すなわち、他のユーザのエージェントが直接意思決定木を操作するのではなく、エージェントが自分自身で妥協可能かを判断し調整するため、ユーザの個性的な主観的評価のプライバシーは保持されていると言える。

5.4 考察

5.4.1 モバイルエージェントに基づく実装方式の特長

モバイルエージェント(付録C参照)を用いることによる本システムの特長は、以下の(a)(b)、および(c)の3点である(a)ネットワークの負荷が高い場合でも交渉を効率的に実行できる(b)複数の交渉パターンを同時に実行することができる(c)携帯型端末などを用いた遠隔地にいるユーザがAHP機構を用いて個人的に意思決定木を生成する時や、自分のホスト上の交渉エージェント間の交渉を見ることが可能である。

(b)は、モバイルエージェントを用いない既存のクライアント・サーバ方式では実現が困難な特長である。

(a)は、モバイルエージェントの基本的な利点の一つ[145]であり、2エージェント間のメッセージ交換において、ネットワークを通してメッセージ交換を行うより、片方が移動して同一ホスト内でメッセージ交換を行うことの方が効率良くメッセージ交換が行うことができる(a)についての定量的なデータとして、2つのエージェントが異なるホストでメッセージをやりとりした場合(パターンA)と2つのエージェントのうちの片方がもう一つのエージェントのホストに移動しメッセージをやりとりした後にもとのホストに戻る場合(パターンB)に費す時間を表5.1に示す。実験では10Mbpsのネットワークに継った二つのホスト(CPUはPentium 233MHz相当、OSはLinux)上で、Aglet Software Development Kitを用いて行った。2つのエージェントをエージェントおよびエージェントと呼ぶ。表5.1のパターンAでは、2つのホスト上のエージェントが表5.1のメッセージの交換回数だけメッセージを交換した場合に費した時間(単位はミリ秒)を示している。表5.1のパターンBでは、エージェントがエージェントのホスト上に移動し、移動したホスト上で2つのエージェントがメッセージの交換回数だけメッセージを交換した後に、再びエージェントが元のホストに戻るまでの時間を示している。パターンBでは各エージェントの移動に費された時間を除いた時間が括弧内に示されている。パターンAおよびパターンBにおいてメッセージとはJavaの4文字のStringオブジェクトを含んだMessageオブジェクトである。4文字のStringオブジェクトにした理由は、本実装方式のエージェント間の説得過程におけるメッセー

表 5.1: メッセージ交換に関する実験結果

メッセージの交換回数	パターン A	パターン B
100 回	8707 ms	1646 (203) ms
1000 回	76846 ms	3242 (1799) ms
10000 回	775077 ms	18902 (17459) ms

ジ通信は，String オブジェクト 4 文字程度のメッセージの交換によって行われるからである。Message オブジェクトとは，Aglets Software Development Kitにおいて Aglet 間のメッセージのために用意されたオブジェクトである。1 度のメッセージ交換とは次の(1)～(4)を一度行うことを言う(1)エージェント がエージェント にメッセージを送信(2)エージェント がメッセージを受信(3)エージェント がエージェント にメッセージを返信(4)エージェント がメッセージを受信。

表 5.1 に示す通り，2 つのエージェントが一つのホストに集まってメッセージを交換した場合の方が効率的にメッセージ交換ができるることは明白である。従来の実装方式 [58] ではパターン A 型であり，本章での実装方式はパターン B 型である。本システムではなく他の原因でネットワークの負荷が高い場合でも，パターン A 型と比較してパターン B 型の方が効率的にエージェント間の交渉を行うことができる。

5.4.2 試用評価

本節では，GCDSS の特長を GCDSS を試用した結果から得られた知見をまとめる。具体的には，5 人の大学院生と 6 人の大学学部生から構成されるゼミにおけるゼミ旅行の行き先の選定，コンピュータを購入する場合のコンピュータの選択等を行った。

試用実験に基づく議論を通して得られた知見として以下の 3 つを得た(1)エージェント間の交渉がどのように進んでいるかの情報が欲しいという要望(2)エージェント間の交渉過程に納得ができない場合に交渉を一時停止し，意思決定木を変更したいという要望，および(3)グループの意思決定がシステム全体としてどこまで進んでいるかを知りたいという要望があった。以上の 3 つの要望の原

因は、エージェントが勝手に交渉を進めた結果、グループの意思決定が勝手に進んでしまうため、つまりシステムが勝手に動作してしまうためである、と考えられる。本システムでは、システムに対して制御しているという感覚を実現するために以下の2つを実装した。

1. 交渉ビューワー：交渉エージェントが行った交渉過程をリアルタイムに交渉ビューワーを用いてユーザに表示することによって、交渉がどのように進んでいるかをユーザに説明する。ユーザへの説明は5節で示したように、同じグループのエージェントが同じ色、かつ、近くに表示されることによって視覚的に行われる。交渉ビューワーによって、ユーザは交渉途中でも意思決定木とその一対比較値の変更が可能になる。
 2. グループ意思決定プロセス表示機構：グループ意思決定のプロセスが進行している最中に、現在、システムがグループの意思決定のプロセスのどこを実行しているか、をAHP管理エージェントがテキスト情報としてユーザに知らせる。
 2.において、テキスト情報ではなく、グラフィックを使ってより分かりやすくユーザに示すことは今後の課題とする。

5.4.3 エージェントの設計に関する考察

HCI(Human Computer Interaction)[101]の立場から、エージェントの設計方法において重要なポイントの中に以下の(1)～(3)がある[81][94]。(1)ユーザにエージェントを制御しているという感覚を与える(2)エージェントは実行中のタスクを明かしながら複雑なものは隠すべきである(3)エージェントはユーザのプライバシーを保持するべきである(1)については、本システムでは、エージェントの行動をユーザに説明した上で、ユーザがエージェントに行動に対する許可を与えることが必要だと考えた。そこで、本システムでは、エージェントが意思決定木の変更において「どのように意思決定木を変更するのか」という点と「本当に妥協しても良いか」という点をユーザに尋ねる機構を実現した(2)については、AHPにおける一対比較行列や代替案の重要度に関する計算は付録Bで示した通り複雑な計算であるから、エージェントはAHPに関する計算過程をユーザには隠して実行しながら、ラベルの付け替えの結果等はユーザに提示する(3)については、GCDSSでのエージェント間の交渉は説得に基づいているため、ユーザの個人的な主観的評価の情報に関するプライバシーは保たれている。エージェント間

の説得では、説得のメッセージを受信した妥協者が自ら意思決定木の一対比較値や評価基準を調整することによって妥協を行う。つまり、あるエージェントが他のエージェントの意思決定木を直接操作することはない。意思決定木はユーザの個人的な主観的評価であるから、本システムでは、ユーザの個人的な主観的評価の情報に関するプライバシーは保たれる。

5.4.4 交渉結果に関する考察

グループとしての意思決定のための交渉結果の集計方法については、社会的決定論などの分野で古くから研究が行われている[110]。しかし、複数の交渉結果から一つの結果を導き出す手法についての研究は少ない。本実現方式では複数の交渉結果の中でも説得が最も多く成功した交渉結果を最終的な結果として選択した。本実現方式で得られる解、すなわち各交渉結果は必ずしもゲーム理論でいうナッシュの解[132]のように、パレート最適などの基準を満たすわけではない。つまり、本実現方式は、ナッシュの解のように数学的に厳密に解を与えるのではなく、むしろ人間の曖昧さによる好みの変化を利用して、とりあえずユーザの好みが許す範囲の結果を得ることを試みる。また、合意が得られなければ無理に合意を得ず、ユーザの好みを尊重する。

5.4.5 AHPによるグループ意思決定支援に関する考察

本研究に関連した論文[57][58]では、AHPを用いてエージェント間の説得をどのように行うかというアイデアに焦点を当てていた。本章ではエージェント間の説得の実装とAHPを用いたグループ意思決定支援にも焦点を当てる。以下では、AHPを用いたグループ意思決定支援に関する考察として、一般的にAHPをグループ意思決定支援に用いる方法と、本システムと本研究に関連した論文[57][58]でのAHPの利用の方法についてまとめる。

まずグループで一つの意思決定木を生成し、その意思決定木に対してグループで一対比較行列を生成していく方法がある[87]。この方法では、意思決定木と一対比較行列に関して人間同士が交渉することによって合意を得る。合意を得る方法としては、話し合いによる合意

や投票による合意などがある。一般にAHPでは、意思決定木における各階層で一つの評価基準に対してn個の要素がある時、 $n(n-1)/2$ 回の一対比較が必要となり、階層数や各階層の要素数が大きくなると非常に多くの一対比較が必要になる。評価も共有する場合、すべての一対比較に対してそれぞれ投票などをおこなってグループで合意を得るための労力は非常に大きくなる。

次にグループとしての意思決定木は一つ生成し、一対比較による評価は個々のユーザが個人的に行う手法がある。個々のユーザの各一対比較値を一つに集計してグループとしての一対比較値とする。一対比較ひとつひとつについて合意を得る必要がなくなり労力も減少できる。個々に行った一対比較による評価をグループとしての評価として集計するための方法として、各一対比較行列における一対比較値の幾何平均を取る方法が提案されている[109]。グループ内のユーザ間のステータスなどを最終的な評価に反映させることを可能とする手法として、意思決定木にグループのユーザを取り込む方法も提案されている[27]。

グループ内のユーザで話し合いをして合意を得ながら意思決定木を一つ構築することにより、問題を多面的に分析することが可能となる。しかしうーザ間での合意形成に多くの話し合いが必要となる。人間であるユーザ間での話し合いには、評価懸念、ただ乗り、および発話のブロッキングなどの生産性損失の問題と呼ばれる問題がある[22][23]。つまり、他のユーザからの評価を恐れて発言を消極的にしたり（評価懸念）、話し合いを他のユーザに任せてしまい自分は努力しなかったり（ただ乗り）する。さらに話し合いでは、ある時点で一人しか発言できず、自分の考えを発言するまで自分の考えを覚えていなければならず、その他の考えに関して考慮できなくなってしまったりする（発話のブロッキング）。また、投票によって合意形成を行ったとしても、一つの意思決定木を構築するために多く数回の投票が必要となり現実的ではない。

そこで、本実装方式と本研究に関連した論文[57][58]では意思決定木とその評価を非共有とする手法を採用した。各ユーザは個々に別々の意思決定木を構築し、評価も個々に行う。グループとして合意を得なければならないのは、代替案の選択のみである。意思決定木を個々に構築することによって、生産性損失の問題点を解消でき、ユーザの個人的な主観的評価をグループの決定に反映できる。そこで本システムでは、個人的な主観的評価である個々の意思決定木の

プライバシーを保持したまま，グループとして代替案についての合意を得る．代替案についての合意は，直接ユーザ同士が得るのではなく，エージェントがユーザの代理として，互いに交渉を行うことによって合意を得ることによって，合意をするためにユーザが議論したり交渉したりする負担を軽減する．

5.5 結言

本章では，エージェント間の交渉方式として新たに多重交渉方式を提案した．多重交渉方式では，エージェント間の交渉に関連してすべてのグループメンバーがそれぞれ説得者となるように複数の交渉パターンを設定し分散実行することによって，ユーザの納得がより得られやすい交渉結果を導き出すことが可能である．そして，多重交渉方式を用いて，モバイルエージェントに基づくグループ代替案選択支援システム GCDSS の実装方式を提案した．現在，ユーザに対してグループ意思決定がどこまで進んでいるかという進行状況を示すために，テキスト情報を用いている．グループ意思決定の進行状況をテキスト情報ではなく，より分かりやすい方法で示すことが今後の課題である．

第6章

協調的入札機構に基づく *BiddingBot*の実装

6.1 序言

近年のインターネットの普及により、ネットワーク上で商取引を行う電子商取引が注目を集めている。インターネット上の電子商取引の形態として、eBay[28]、Onsale[98]、Yahoo! Auctions[5]、Amazon.com Auctions[1]などのオンラインオークションが普及している。Yahooのオンラインオークションのディレクトリ[24]には米国で150サイト以上、および日本で30サイト弱のオークションサイトが存在している。このようなネットワーク上の多数のオークションサイトを同時に人手で対処することは困難である。以上のような背景の中、第2章でも示した通り、インターネットにおける電子商取引のエージェントによる支援が注目を集めている[41]。第2章の第2.4.1節、および第2.4.2節で紹介したシステムは、ユーザがオークションに実際に参加し入札することを支援するシステムではない。本章では、インターネット上の複数のオンラインオークションでの入札をマルチエージェントによって支援するシステム *BiddingBot* を提案する。

オークションは取り引きされる財の価値によって以下の3つに分類される[102][153]。

個人価値オークション: 財の価値は個々に異なっていて、その人の主観的な価値観によってのみ決定する。再販を前提としない骨董品など。

共通価値オークション: すべての人でその財の価値が共通である

場合である。価値が前もって分かっていればオークションをする必要はない。

相関価値オークション：個人価値と共通価値の中間のオークション。

共通価値な財の場合、特別に良い情報を持っていないかぎり、勝者とは最も楽観的な誤った推定値を持った入札者となる。これは勝者の災いと呼ばれる。

一般的なオークションにおいて、相場価格を知らない入札者にとって、そのオークションは、共通価値オークションとなると考えられる。例えば、パソコンや車のオークションにおいては、すべての人でその財の価値が相場価格という共通な価値として考えられる。共通価値オークションでは、その財の本来の評価値を知ることが有利であるといえる。なぜなら財の相場に関する情報を持っていることにより、勝者の災いを避けることが可能であるからである。すなわち、オークションされている財をコストを余分に支払うことなく落札することが可能になる。

例えば、コンピュータに関する初心者がパソコンを購入する場合に相場価格が分からない例を考える。初心者が何の情報もなしにパソコンを落札できた場合、その他の入札者がパソコンに関して良く知っているとすれば、その初心者が支払った落札額は相場価格よりも高くなっている場合が多い。以上が勝者の災いと呼ばれる現象である。この時、その他の入札者が入札をやめた時点での入札額が相場の金額であると考えられる。そこで、本論文では、複数のオークションサイトに対するモニタリングをマルチエージェントで行うことにより、財に対する相場に関する情報の収集を可能にする。

また、複数のオークションサイトが存在しているために、同じ財が異なるサイトで取り引きされていることがある。なるべく安く落札ができるように複数のオークションサイトへ入札することは、人間にとっては大きな負担であると考えられる。そこで本研究では、エージェントが人間の代理となって、協調的に複数のオークションで入札を支援するシステムを提案する。

本論文の構成は、第6.2節で本研究で実装した *BiddingBot* の概要として、本システムの構成および入札支援のプロセスを述べる。第6.3節では、エージェント間の協調的な入札支援機構を提案する。第6.4節では、議論として本システムの実装例と実行例を示し、特長をまとめると、第6.5節では、結論としてまとめと今後の課題を示す。

6.2 *BiddingBot*

6.2.1 システム構成

図 6.1 に *BiddingBot* のアーキテクチャを示す。本システムは、一つ

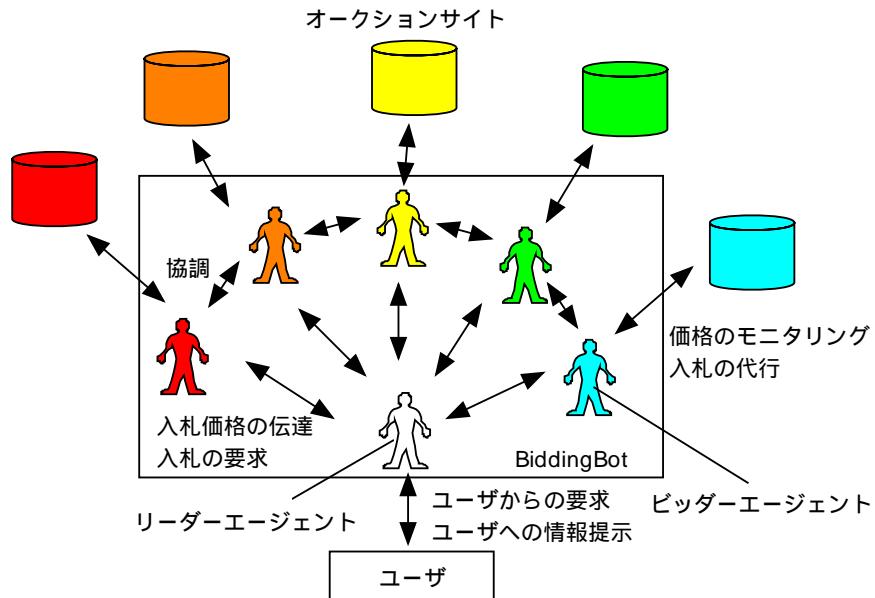


図 6.1: *BiddingBot* のシステム構成

のリーダーエージェント (leader agent) と複数のビッダーエージェント (bidder agent) からなる。各々のオークションサイトにビッダーエージェントが割り当てられる。ビッダーエージェントは、他のビッダーエージェントと協調しながら、オークションサイトに対して財に関する情報検索、モニタリング、および入札を行う。リーダーエージェントは、ビッダーエージェント間の交渉の仲介、ユーザからの要求のビッダーエージェントへの送信、および、ビッダーエージェントから送信された情報のユーザへの提示を行う。

各オークションサイトは、情報の提示方法、オークションプロトコル、入札方法、入札をキャンセルできるか否か、入札の締め切り時間の決定方法など各々独自の方法で運営されている。本システムでは、情報の提示方法に関して、ビッダーエージェントは各々のオークションサイトに特化されており、柔軟な Wrapper として振舞う機

能を持つ。ビッダーエージェントの Wrapper としての機能は、文献 [34] で論ずる。本論文では、ビッダーエージェント間の協調機構に焦点を置く。

6.2.2 入札支援プロセス

本システムの入札支援プロセスを図 6.2 に示す。本システムの入

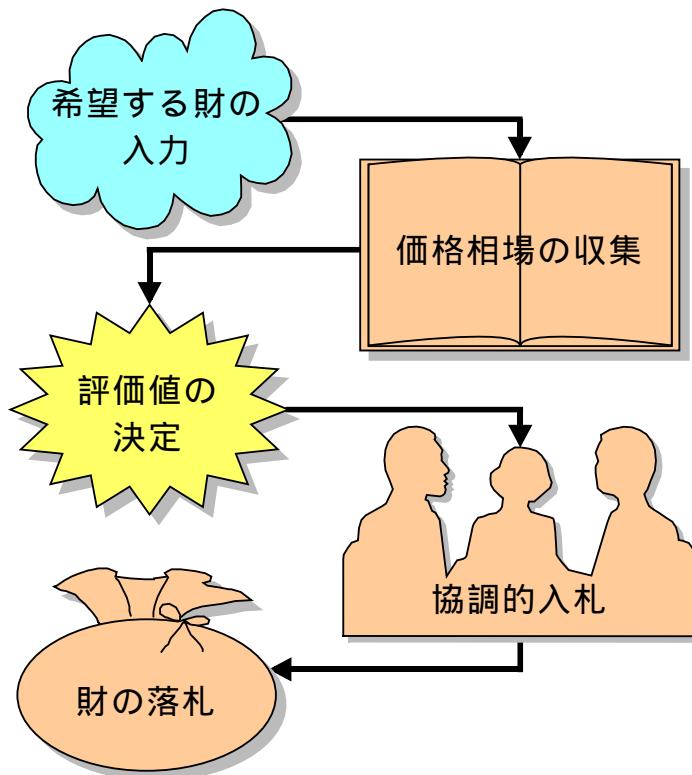


図 6.2: 入札支援プロセス

札支援プロセスは、(1) 希望する財に関する情報の入力、(2) 価格相場に関する情報収集、(3) 財に対する評価値の決定、(4) エージェントによる協調的入札支援、および (5) 財の落札、の 5 つのステップからなる。

(1) 希望する財に関する情報の入力のステップでは、ユーザは希

望する財に関するキーワードをリーダーエージェントに送信する。リーダーエージェントは、キーワードをビッダーエージェントに送信する。

(2) 価格相場に関する情報収集のステップでは、ビッダーエージェントがキーワードに基づく情報フィルタリングにより、財の価格相場を収集する。本ステップにおいては各ビッダーエージェントは、各オークションサイトの Wrapper として財に関する情報を収集する。ステップ (2) における Wrapper の機能に関する詳細な記述は、文献 [34] で述べる。

(3) 財に対する評価値の決定のステップでは、ステップ (2) で得られた財の価格相場からユーザが財に対する評価値を決定する。評価値は、ビッダーエージェントが入札を行う時の最高入札額である。すなわち、ビッダーエージェントは入札において評価値以上の入札額を提示することはできない。

(4) エージェントによる協調的入札支援のステップでは、ビッダーエージェント間で協調的に交渉を行いながら、適切な入札を行う。ステップ (4) についての詳細は次の章で示す。

(5) 財の落札のステップでは、財が落札できたならば、リーダーエージェントはユーザに落札されたことを知らせる。できなかったら、失敗したことをユーザに知らせる。

6.3 エージェント間の協調的入札機構

6.3.1 協調機構

エージェントの協調的入札のステップでは、複数のオークションサイト上でダイナミックに変更される価格を監視しながら、その時点で最も適切と考えられるオークションサイトへ入札する必要がある。本論文ではオークションの入札のためのエージェント間の協調機構を提案する。以下に協調機構を示す。

(ステップ 1) ビッダーエージェント a_i が、現在、あるオークションサイトで最高額を入札しているビッダーエージェントを探すために、メッセージ *propose* をリーダエージェントに送信。

(ステップ 2) リーダエージェントが新しい入札を行うことが可能か否かを調べる。

- もし、現在、あるオークションサイトで最高額を入札しているビッダーエージェントが存在しない時、すぐに入札を許可する。
- もし、現在、あるオークションサイトで最高額を入札しているビッダーエージェント ($a_{bidding}$ とする) が存在している時、 $a_{bidding}$ が割り当てられているオークションサイトで、
 - 入札のキャンセルができるならば、そのビッダーエージェント $a_{bidding}$ の ID を a_i に返す。そして、ステップ 3へ。
 - 入札のキャンセルができないのならば、 a_i には入札を不許可とし、 $Reject(new_bid)$ メッセージを送信。ステップ 5へ。

(ステップ 3) ビッダーエージェント a_i は、あるオークションサイトで最高額を入札している ID で指定されたビッダーエージェント $a_{bidding}$ に、入札 new_bid を提案するために、メッセージ $Propose(new_bid)$ を送信する。

(ステップ 4) ビッダーエージェント $a_{bidding}$ が $Propose(new_bid)$ を受信。

(ステップ 4.1) 受信した入札 new_bid 、および現在の自分の入札 now_bid を評価。

(ステップ 4.2) ステップ 4.1 の評価に基づいて、

- 受理ならば、 $Accept(new_bid)$ メッセージをビッダーエージェント a_i に送信。自分の入札をキャンセルする。
- 拒否ならば、 $Reject(new_bid)$ メッセージをビッダーエージェント a_i に送信。

評価方法と受理または反対の決定方法の詳細に関しては 3.3 節で述べる。

(ステップ 5) ビッダーエージェント a_i は、ビッダーエージェント a_{bidder} からの返信メッセージを受信。

- 返信メッセージが $Accept(new_bid)$ であれば、ユーザに許可を得た上で入札 new_bid を実行する。そして、自分が

入札していること，および，自分が割り当てられているオーフンションサイトがキャンセルが可能か否かをリーダエージェントに伝える．

- 返信メッセージが $Reject(new_bid)$ であれば，入札 new_bid は破棄する．

本協調プロトコルでは，リーダーエージェントは，MatchMaker[20]ライクな働きをする．リーダエージェントは，どのビッダーエージェントが入札を続行中であるか，および，そのオーフンションサイトは入札のキャンセルが可能か否かという情報のみを持っている．ビッダーエージェントは，入札する時に，リーダエージェントから，現在入札を続行中であるビッダーエージェントの ID を取得し，新たに入札を行えるか否かに関してメッセージ交換を行う．リーダーエージェントを MatchMaker ライクにすることによって，現在どのビッダーエージェントが入札を行っているかについてのデータをすべてのビッダーエージェントが持っている必要がないという利点がある．

(ステップ 5)において，ビッダーエージェントがユーザに許可を得た上で入札を行う理由は，以下の通りである．本システムは，ユーザの入札に関する意思決定を支援するという観点から意思決定支援システムであると言える．意思決定支援で重要なことはユーザが意思決定をすることを手助けすること [142] であり，自動的に決定を行うことではない．そこで，本システムでは，ビッダーエージェントは入札を行うごとにユーザに入札の許可を得る．

6.3.2 価格増加率に基づく入札の提案

本節では，ステップ 1 でビッダーエージェントが入札を提案するアルゴリズムを示す．本システムでは，ユーザの支払う金額をなるべく少なくするために，ビッダーエージェントは評価額より低い価格で，かつ，なるべく安い価格で落札することを目標とする．つまり，最初から財に対するユーザの評価額を入札額とするような入札は行わない．入札の提案アルゴリズムで重要なのは，ビッダーエージェントが入札を行う動機付けである．

オンラインオークションにおける入札額を観察した結果，入札額の増加率は落札に近付くほど小さくなることが分かる．そこで，本論文では，入札の動機付けのヒューリスティックスとして，以下の

価格増加率に基づく入札戦略を提案する。

価格増加率に基づく入札戦略: あるオーケーションにおいて、時間 t_{i+1} と時間 t_i における財に対する入札額をそれぞれ $p_{t_{i+1}}$ および p_{t_i} とする。ここで、単位時間価格増加率を $\frac{p_{t_{i+1}} - p_{t_i}}{t_{i+1} - t_i}$ とする。ある閾値を α として単位時間価格増加率が α 以下になった時、すなわち $\frac{p_{t_{i+1}} - p_{t_i}}{t_{i+1} - t_i} \leq \alpha$ が成り立つ時、ビッダーエージェントは入札をリーダエージェントに提案する。具体的にはメッセージ *Propose(new_bid)* をリーダエージェントに送信する。

メッセージ *Propose(new_bid)* には、入札 *new_bid* に関する入札額が含まれる。入札額は、現在の入札額を p_c とすると、 $p_c + p_d$ とする。 p_d は入札額の増加額である。 p_d は、ユーザによって指定される値である。すなわちビッダーエージェントは、価格 $p_c + p_d$ の入札を行うことを提案する。具体的には、現在の試作では、 $t_{i+1} - t_i$ を 30 分とし、閾値 α 、および入札額の増加額 p_d は、ユーザが設定する。

6.3.3 提案された入札の評価アルゴリズム

本節では、ステップ 4.1 で提案 *Propose(new_bid)* の *new_bid* を評価するためのアルゴリズムを示す。まず、提案を受け取ったビッダーエージェントは、その時点での自分の入札 *now_bid* を生成する。そして、受け取った *new_bid* と自分が生成した *now_bid* の期待効用を計算する。*new_bid* の方が期待効用が高いならば、*Accept(new_bid)* メッセージを返す。*now_bid* の方が期待効用が高いならば、*Reject(new_bid)* メッセージを送信する。

入札案 (*new_bid* や *now_bid*) の期待効用の計算方法について以下で述べる。入札案の期待効用を求める式を式 (6.1) に示す。

$$EU(bid) = (c_e - c_{bid}) \times p_{bid} \quad (6.1)$$

ユーザが決定した c_e は財に対する評価値を表す。 c_{bid} は入札案 *bid* で支払う入札額を表す。 p_{bid} は、入札案 *bid* で財を落札できる確率を表す。すなわち、 $c_e - c_{bid}$ はユーザが入札 *bid* を行って財を落札できた場合に得られる価格を表し、 $c_e - c_{bid}$ に p_{bid} を乗じることによって、入札案 *bid* によって財を落札できることに対する期待効用が得られる。 p_{bid} は、入札案 *bid* を現在の時間 t において入札した時、財を落札できる確率である。 p_{bid} は厳密に定義することは困難であるので、

本論文ではヒューリスティックな関数を用いる。エージェントの期待効用を決定付ける関数は、比較的単純なものである方がユーザに受け入れやすいと言われている[11]。そこで本論文では、楽観主義型関数とコスト回避型関数の2つを提案する。

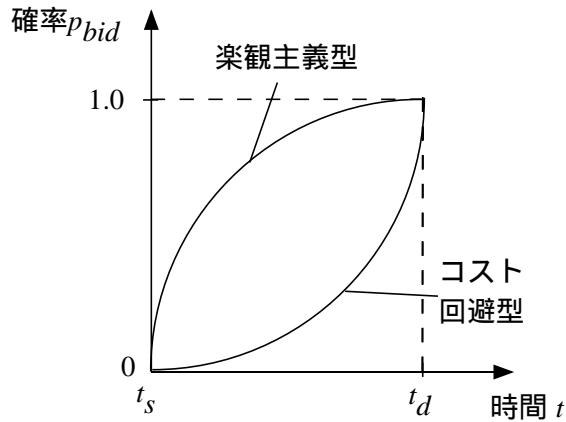


図 6.3: 楽観主義関数とコスト回避型関数

図 6.3 に楽観主義関数とコスト回避型関数を示す。図 6.3 の縦軸は、入札案 bid で財を落札できる確率 p_{bid} を示している。図 6.3 の横軸は、時間を示している。 t_d は締め切り時間、および t_s はオークションが始まった時間を表している。図 6.3 より、楽観主義型関数およびコスト回避型関数の両方の関数は、時間が経過すればするほど、落札できる可能性が高くなっていることが分かる。オークションが半分まで経過した時点で、楽観主義型は確率が 50% より上であり、コスト回避型は 50% より下である。

オークションサイトには、入札をキャンセルできるサイトとできないサイトがある。キャンセルが可能なオークションサイトに割り当てられたビッダーエージェントは楽観主義関数を用いて p_{bid} を計算する。なぜなら、多少楽観的な予想の基で入札を行っても、キャンセルすることが可能だからである。キャンセルが不可能なオークションサイトに割り当てられたビッダーエージェントにはコスト回避型関数が与えられる。なぜなら、一度行った入札がキャンセルできないために、なるべく慎重に入札する必要があるからである。例えば、締め切りまで残り時間 1 時間はキャンセルが不可能といったオークションサイトも存在する。この場合、ビッダーエージェント

にはコスト回避型関数が与えられる。

6.4 議論

6.4.1 Weblog に基づく試作と実行例

本システムはマルチエージェントプログラミング環境 Weblog[35] と Java[3] を用いて実装されている。Weblog は、本研究室で開発された Java に基づくマルチエージェント論理型言語であり、Web ページからの情報抽出の記述と、エージェント間の協調の仕組みの記述を統一的に扱うための言語処理系である。Weblog を用いることによって、マルチスレッドによるマルチエージェント環境の実現や Web アクセスの実現が容易となる。Weblog のその他の特徴として、次の点がある。Perl 等のスクリプト言語にくらべて推論機構を記述することが容易である。また、Java で実装されているため、プラットフォームに依存しない。

```

1:propose(Agent,NewBid) :-  

2: currentBid(CurrentBidder,_),  

3: request(Agent,doNegotiate(NewBid,CurrentBidder)).  

4:  

5:propose(Agent,NewBid) :-  

6: request(Agent,accept(NewBid)).  

7:  

8:announce(X) :-  

9: assert(X).

```

図 6.4: リーダーエージェントの実装例

図 6.4 にリーダーエージェントの実装例を示す。1~6 行目は、3.1 節のステップ 2 において、新しい入札 NewBid をビッダーエージェント Agent から受け取った場合の手続きを示している。2~3 行目は、現在の入札中のエージェントと交渉を行う手続きである。5~6 行目は、現在入札中のビッダーエージェントが存在しない場合に入札を許可する手続きである。8~9 行目は、(ステップ 5) でビッダーエージェントが新たに入札する場合にリーダーエージェントに伝えるための手続きである。

```

1:do :-
2: update,doPropose, sleep(10000).
3:
4:doPropose :-
5: biddable(NewBid),myname(MyName),
6: request(leader,propose(MyName,NewBid)).
7:
8:doNegotiate(Bid,CurrentBidder) :-
9: negotiate(CurrentBidder,Bid).
10:
11:negotiate(CurrentBidder,Bid) :-
12: myname(MyName),request(CurrentBidder,propose(MyName,Bid)).
13:
14:accept(propose(NewBid)) :-
15: doBid(NewBid), announce(NewBid).
16:
17:announce(Bid) :-
18: myname(MyName),request(leader,announce(MyName,Bid)).
19:
20:propose(Agent,ProposedBid) :-
21: currentBidder, betterThanCurrent(ProposedBid),
22: cancelCurrentBid,
23: request(Agent,accept(propose(ProposedBid))),!.
24:
25:propose(Agent,ProposedBid) :- !,fail.

```

図 6.5: ビッダーエージェントの実装例

図 6.5 にビッダーエージェントの実装例を示す。1 行目～2 行目は、ビッダーエージェントが常にオークションサイトを監視しながら、提案できるか否かをチェックする部分である。4 行目～6 行目は、3.3 節の（ステップ 1）の提案を行う部分である。8 行目～12 行目は、3.3 節の（ステップ 3）の現在入札中のビッダーエージェントとメッセージ交換を行う部分である。14～18 行目は、3.3 節の（ステップ 5）で入札が許可された場合に実際に入札する手続きである。20～25 行目は、ビッダーエージェントが現在入札中である場合を示した部分である。20～23 行目は 3.3 節の（ステップ 4）で、自分が現在行っている入札と新たな入札を比較し（21 行目）、受理ならば accept メッセージを送信（22 行目）、そうでないなら失敗することにより、拒否とす

る(25行目)。

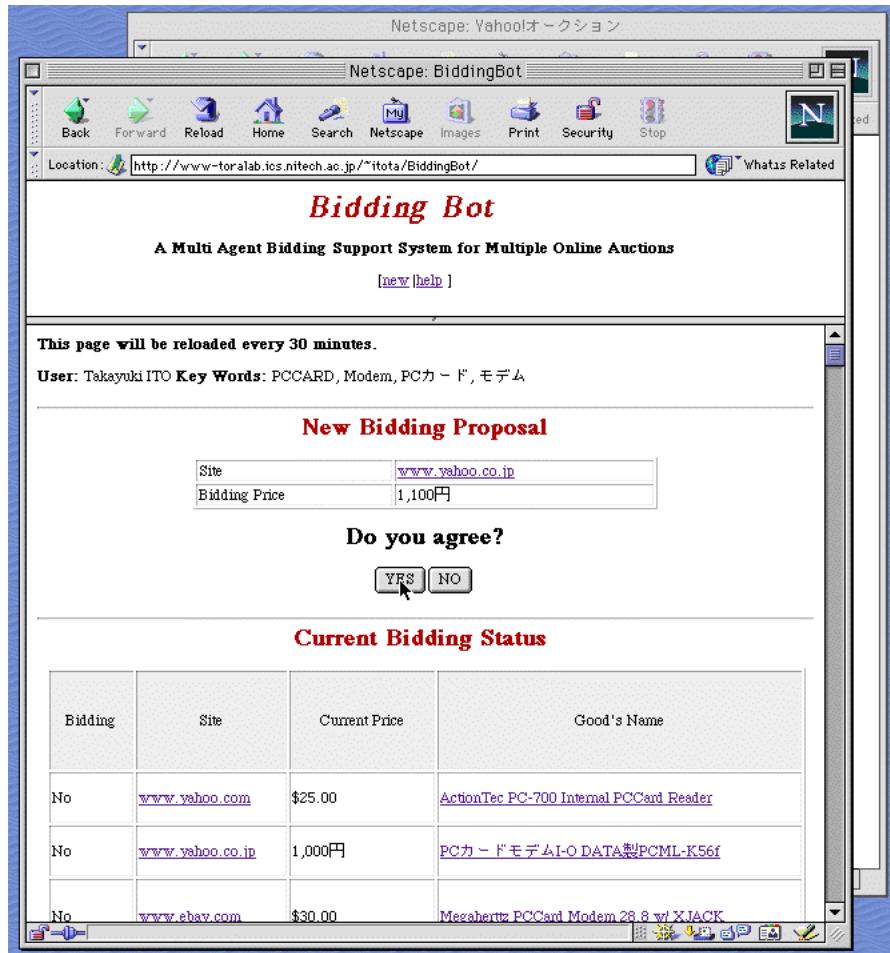


図 6.6: *BiddingBot* の実行例

実行例を図 6.6 に示す。本例は、ビッダーエージェントが新たな入札を行う時にユーザに許可を得ている例である。本システムでは、ユーザとのインタラクションは Web ページを用いて行われる。Web ページは、ユーザが指定した時間おきに更新される。標準的な設定では 10 分おきに更新される。図 6.6 の中心のウィンドウが、本システムのユーザインターフェースとなる Web ページである。図 6.6 のウィンドウの中心に示されているのがビッダーエージェントの提案する入札の内容である。ここでは www.yahoo.co.jp に 1,100 円の入札を行うことが示されている。図 6.6 の中心のウィンドウの下に示

されているのが，他のビッダーエージェントの入札状況である。

6.4.2 協調的入札機構に関する実験

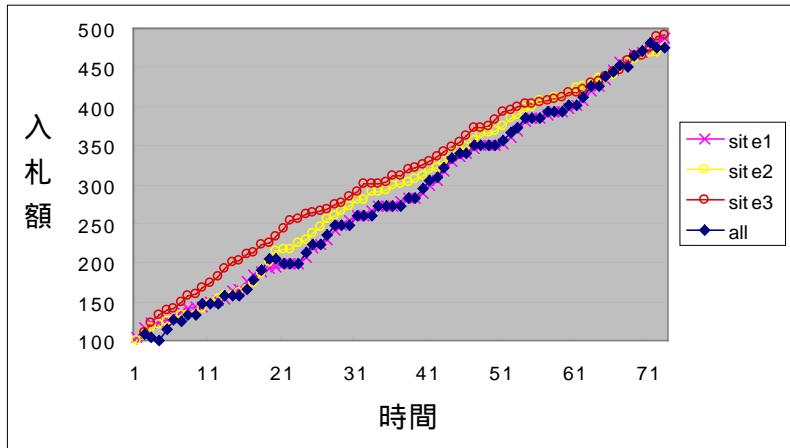


図 6.7: 協調的入札機構に関する実験

本章で提案した協調的入札機構の振舞いを示すために実験を行った。本実験では、3つのサイト (site1, site2, および size3) で English オークションが行われてあり、ランダムに価格が上昇していくという状況を仮定した。*BiddingBot*は、この3サイトに対して *BiddingBot* によって入札を行う。3つのサイトは同時にオークションを開始する。実験結果を図 6.7 に示す。縦軸は価格を示す。横軸は経過した単位時間を示す。site1, site2, および site3 で示される折れ線は、各サイトにおける価格の変動を表す。all で示される折れ線は、*BiddingBot* が行った入札価格を示す。図 6.7 より、*BiddingBot* が、すべてのサイトの中で最も低い入札額よりも少し高い値段で入札できていることが分かる。

6.4.3 入札の支配戦略に関する考察

オークションの理論によると、オークションに望まれる性質として、入札者にとって支配戦略(最適な入札値の決定方法)があるという性質がある [153]。例えば、支配戦略を持つオークションプロトコ

ルとしては、Englishオークションプロトコルがある。Englishオークションプロトコルは、多くのオンラインオークションサイトで採用されている。Englishオークションプロトコルでは、各入札者は自分の入札額を上方に自由に変更することができる。すべての入札者が自分の入札額を変更することを望まない時、最も入札額の高い入札者がその財を獲得し、財を獲得した入札者はその入札額を主催者に支払う[102]。Englishオークションの支配戦略は、自分の入札値が最高値でない場合、現時点での最高値から小額だけ競り上げ続け、自分の評価値に達したらオークションから降りることである[102]。ただし、この支配戦略は、財の価値が個人価値である場合の支配戦略である。

本システムで上記の支配戦略だけでなく、エージェント間の協調プロトコル、入札の提案アルゴリズム、および提案の評価アルゴリズムを新たに導入した理由は、以下の(A)と(B)の2つである。(A)現実的なオークションを想定しているために、財の価値は個人価値ではなく、相関価値の方が多いため。上で述べた支配戦略は個人価値である場合の支配戦略であるから、必ずしも現実的なオークションに適用可能とは言えない。(B)複数のオンラインオークションサイトで同時に入札を行うことを想定しているために、上で述べた戦略が必ずしも支配戦略となるとは言えない。例えば、あるオークションサイト a でのある時点での最高額 x から小額 α だけ競り上げた額を $x + \alpha$ とする。また、他のオークションサイト b での最高額を y とする。ここで、 $x + \alpha > y$ ならば、オークションサイト a に $x + \alpha$ で入札することが支配戦略であるとは言えない。

6.4.4 本システムの特長

本システムの特長として以下の(a)、(b)、および(c)の3つが挙げられる。(a)複数のエージェントによる協調プロトコルを用いることによって、多数のオークションサイトで協調的な入札を行うことができる。現在、多数のオークションサイトで、同じ財が出品されていることがある。なるべく安い価格で落札するために複数のオークションサイトへ入札することは、人間にとて大きな負担である。そこで本論文では、人間の代理でエージェントが協調的に入札を行うことにより複数のオークションサイトへの入札を支援する。(b)多数のオークションサイトから価格に関する情報を収集することにより

勝者の災いを回避するための情報を得ることができる。一般的オークションでは、相関価値オークションが多いと言われており、相関価値オークションでは、その財の本来の評価値を知ることにより勝者の災いを避けることができる。そこで本システムではエージェントが、多数のオークションサイトから価格に関する情報を収集することによって入札を支援する。(c)新たなオークションサイトに対応する場合に、エージェントを増やすという方法でインクリメンタルに対応することができる。現在オークションサイトは日々増加している。本システムでは、新たなサイトに対応するためにシステム全体を変更するのではなく、新たにそのサイトに対応したエージェントを作成するだけでシステムを拡張できる。

6.5 結言

本論文では、インターネット上の複数のオンラインオークションでの入札を支援するために、マルチエージェントに基づく入札支援システム *BiddingBot* を提案した。本章では、エージェント間の合意形成機構の応用例としてマルチエージェント入札支援システム *BiddingBot* を提案し実装した。*BiddingBot* は複数のオンラインオークションに対する同時的な入札を支援するための支援システムである。*BiddingBot* では、複数のオークションサイトに対するモニタリングをマルチエージェントで行い、財に対する相場に関する情報の収集することによって、勝者の災いと呼ばれる現象を回避した。本章では、*BiddingBot* の Weblog による実装例、協調的入札機構に関する実験、および、入札の支配戦略に関する考察を示した。

第7章

価値交換による説得機構の ゲーム理論に基づく形式化

7.1 序言

本章では、個々にスケジュールを持ったエージェントが、集団として一つのスケジュールを生成するために合意形成を行う状況を想定する。エージェントが協調的にスケジュールを生成することを協調スケジューリングと呼ぶ。スケジュールとはイベントの並びのことを言う。例えば、会議の議事のスケジューリングでは議事がイベントとなる。エージェントはスケジュールについて個々に異なる好みを持つ。スケジュールに関する好みとは、あるイベントをどこにスケジューリングするかという好みである。全体としてのスケジュールは、個々のスケジュールを反映しなければならない。本章では、協調スケジューリングを定式化し、協調スケジューリングにおいて、個々の好みをなるべく保ちながら全体としてのスケジューリングを生成する手法として、説得による方法を提案する。

文献 [55][56] では、ゲーム理論 [79] [130] [131] [132] [133] の提携ゲームを用い、特性関数を調整することによって信念の変更を実現している。また、第3章、第5章、および第4章では、AHP を用いてエージェント間の説得を提案している。AHP とは、ユーザのある問題とそのイベントに対する主観的な評価から、イベントの重要度を重み付けした意思決定木を構築することによって解析的に求める手法である。ここではユーザの好みを AHP による意思決定木とし、意思決定木をエージェントの信念と考える。そして意思決定木における

る重み付けをエージェントが自ら経験則に従い、調節することによって信念の変更を行い妥協を実現した。

以上のようにこれまで提案してきた説得はエージェントの選好の変更を行うことによって妥協を実現している。本論文では、これまでの実現方法とは異なり、互いに最も好ましい案を受け入れてもらうという交換条件の提示によって説得を実現する。特に応用分野として協調スケジューリングをゲーム理論の協力ゲームとして捉え、協力ゲームにおいて妥結点を探すための手法として説得を用いる。

協調スケジューリングは、ゲーム理論 [79] [130] [131] [132] [133] の n 人協力ゲームとして見ることができる。協力ゲームでは、非協力ゲームにおける囚人のジレンマの様な閉塞的な状況を脱するために各プレイヤが話し合いなどを行い、状況自体を变化させる。ゲーム理論ではプレイヤは人間であるから、プレイヤは「話し合い」などの協力のための交渉過程を遂行する能力を当然持ち合わせている。そのためゲーム理論では交渉過程についてはそれほど論じられていない。協調スケジューリングをゲーム理論の枠組で捉えた場合、プレイヤはソフトウェアであるエージェントであるから、交渉過程を遂行する能力を考えなければならない。本章ではエージェントが交渉過程を遂行するために、交換条件の提示による説得を提案する。

本章では、第 7.2 節で協調スケジューリングの定式化を行う。第 7.3 節で協調スケジューリングにおける交渉の手法として交換条件の提示による説得を論じる。第 7.4 節では、説得が協調スケジューリングの一例である議事スケジューリングにおいて有効であることを示す。第 7.5 節では本説得についてゲーム理論的な観点から考察を行う。本章のゲーム理論的な観点からのエージェント間交渉に関する関連研究を第 7.6 節で示し、第 7.7 節で本章をまとめる。

7.2 協調的なスケジューリングの定式化

本節では協調スケジューリングを形式的に定義する。エージェントの集合を $N = \{1, \dots, i, \dots, n\}$ で表す。イベントの集合を $E = \{e_1, \dots, e_j, \dots, e_m\}$ で表す。

定義 5 (スケジュール) エージェント i の持つスケジュールは、スロット y_k のベクトル $[y_k]_i (k = 1, 2, \dots, m)$ とする。スロットとはイベントを配置するための時間帯を意味する。

定義 6 (イベントの重要度) エージェント i のイベント e_j に対する正の価値を重要度と呼び, $Weight_i(e_j)$ とする. $Weight_i(e_j)$ が大きくなるほどイベント e_j の価値が大きくなる.

定義 7 (スロットのコスト) エージェント i のスロット y_k に対する負の価値をコストと呼び $Cost_i(y_k)$ とする. $Cost_i(y_k)$ が大きくなるほど, スロット y_k の価値は小さくなる.

スロットのコストは, そのスロットにイベントが配置された場合の都合の悪さを示す. 例えば, 議事をイベントとしスロットを時間帯とする議事スケジューリングでは, スロットのコストとは, 時間帯に存在する議事以外の個人的なイベントの重要度と考えられる.

定義 6 と定義 7 より重要度もコストも価値であるので比較可能かつ加減算などの計算も可能である.

定義 8 (イベントの配置に対する価値) あるエージェント i がイベント e_j をスロット y_k に配置することを $\langle e_j, y_k \rangle$ と表す. 配置 $\langle e_j, y_k \rangle$ の価値は, イベントの重要度 $Weight_i(e_j)$ とスロットのコスト $Cost_i(y_k)$ が与えられた時, $w_i(\langle e_j, y_k \rangle) = f(Weight_i(e_j), Cost_i(y_k))$ で求められる. 異なるエージェント間同士の価値の比較は不可能とする. すなわち, $w_i(\langle e_j, y_k \rangle)$ と $w_{i'}(\langle e_{j'}, y_{k'} \rangle)$ について $i \neq i'$ のときはこれらは比較不可能である.

定義 8 における関数 f は応用分野によって様々な定義の方法があると考えられる. 本章の実験では, 重要度の高いイベントをコストの低いスロットへ配置することが価値が高いと考え, $w_i(\langle e_j, y_k \rangle) = |Weight_i(e_j)| - |Cost_i(y_k)|$ とする.

定義 9 (スケジュールに対する効用) エージェント i の, スケジュール $[y_k]_i$ に対する効用を, $u_i([y_k]_i) = \sum_{1 \leq k \leq m} \{w_i(\langle EVENT_i(y_k), y_k \rangle)\}^2$ とする. $EVENT_i(y_k)$ は, エージェント i のスケジュール $[y_k]_i$ ($k = 1, 2, \dots, m$) において, y_k に配置されているイベントを示す.

定義 9 のスケジュールに対する効用の式において,

$$u_i([y_k]_i) = \sum_{1 \leq k \leq m} \{w_i(\langle EVENT_i(y_k), y_k \rangle)\}^2$$

のように, 価値の 2 乗を足し合わせた理由は, より価値の高い配置から成るスケジュールがより高い効用を持つようにするためである.

定義8で示した通り、価値はエージェント間で比較不可能であるから、効用についてもエージェント間での比較は不可能である。価値のエージェント間での比較を不可能とした理由は、価値は各エージェントの固有で主観的な評価であって、他エージェントの主観的な評価値と客観的に比較することはできないからである。

協調スケジューリングの流れを以下に示す。初期の時点において、エージェント i は各自にスケジューリングを行っており、スケジュール $[y_k]_i (k = 1, 2, \dots, m)$ を持っている。このスケジュールは、 $u_i([y_k]_i)$ を最大化するものである。この時点でエージェント間でスケジュールが同じである保証はない。そして、交渉を行い、交渉が終了した時点において、すべてのエージェントのスケジュールが同じになつていればスケジューリングは成功とする。エージェント i とエージェント i' のスケジュールが同じであるとは、すべての k において $EVENT_i(y_k)$ の示すイベントと $EVENT_{i'}(y_k)$ の示すイベントが同じイベントであることを言う。

協調スケジューリングは次の3要素のタプルで表される交渉問題となる。

$$\langle N, S, c \rangle$$

協調スケジューリングは $\langle N, S, c \rangle$ という3要素のタプルで表される交渉問題となる。 N はエージェントの集合で $N = \{1, \dots, i, \dots, n\}$ である。 S は実現可能集合であり、エージェントが共同戦略を取った時に実現すると期待される利得ベクトル

$$\begin{aligned} x &= (x_1, x_2, \dots, x_n) \\ &= (u_1([y_k]_1), u_2([y_k]_2), \dots, u_n([y_k]_n)) \end{aligned}$$

の集合である。 n 人のエージェントが協力し合意のうえでとる戦略を共同戦略と呼ぶ。つまり共同戦略とは話し合いを経て協力して取る戦略である。協調スケジューリングにおいて、戦略とは、ある1つのスケジュールを提示することである。すべてのエージェントの合意が得られる S に属するただ1つの点を妥結点と呼び $s \in S$ で表す。協調スケジューリングにおける妥結点は、すべてのエージェントの戦略すなわちスケジュールが同じになる点である。 c は基準点であり、交渉が不成立の場合に得られると予想される利得ベクトルである。交渉が不成立の場合とは話し合いがうまくいかず共同戦略がとれなかった場合である。協調スケジューリングにおいて交渉が不成立の場合とは、エージェント間のスケジュールは同じものでない場

合で， $c = (c_1, c_2, \dots, c_n) = (0, 0, \dots, 0)$ である。すなわち，協調スケジューリングにおいてエージェント間でスケジュールがすべて一致しなかった場合，利得ベクトルは $x = (0, 0, \dots, 0)$ となる。

7.3 交換条件の提示による説得

本節では，実現可能集合に含まれる利得行列を妥結点として得るためにエージェント間の説得に基づく交渉過程を示す。本章で提案する説得の基本的なアイデアは「互いに最も好ましい交換条件を提示し，互いに交換条件を受理できるなら成功とする」というアイデアである。説得では 2 エージェントによる交渉が基本となるので本節では $N = \{1, 2\}$ とする。イベントとスロットの数は簡単のために 3 とする。

図 7.1 に簡単な例を示す。図 7.1 の上の図では，エージェント 1 とエージェント 2 が説得に基づく交渉を行うとする。エージェントは各自に自分の効用を最大化するスケジュールを持っている。例えば，エージェント 1 は，スロット y_1 にイベント e_1 ，スロット y_2 にイベント e_2 ，およびスロット y_3 にイベント e_3 を配置している。エージェント 1 とエージェント 2 のスケジュールが一致しないために，エージェント 1 もエージェント 2 も利得を得ることができない。そこで，説得を行う。

イベントとスロットの組を配置と呼ぶ。説得では相手のスケジュールと異なる配置の中の一つを相手に交換条件として提示する。交換条件となる配置を選択する方法として，本章では，とりあえず経済的な合理性に従い，自分が最も価値の高い配置を相手に提示することとする。

図 7.1 では，エージェント 1 は e_1 を y_1 に配置する価値 $w_1(<e_1, y_1>)$ が最大であり，エージェント 2 は e_3 を y_2 に配置する価値 $w_2(<e_3, y_2>)$ が最大であるとする。そこでエージェント 1 は， e_1 を y_1 に配置することを交換条件として提示し，エージェント 2 は， e_3 を y_2 に配置することを交換条件として提示する。交換条件を互いに提示することが説得における要請である。すなわち，本章で提案する説得ではエージェント 1 の立場から見れば，エージェント 1 が説得者かつエージェント 2 が妥協者となる。エージェント 2 の立場から見ればエージェント 2 が説得者かつエージェント 1 が妥協者となる。エージェントは同じイベントを提示したり，同じスロットを提示し

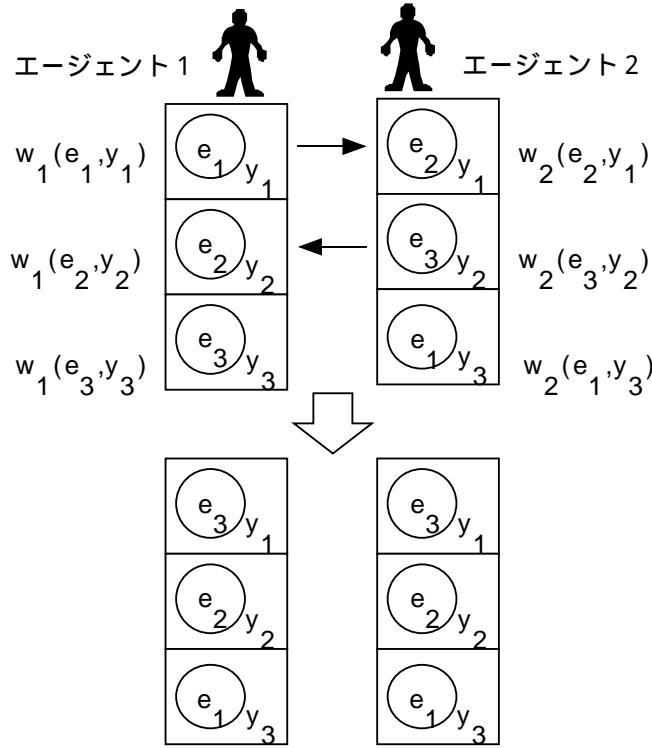


図 7.1: 説得の例

たりすることはしない。また、提示すべきイベントがない場合は、説得は行われず交渉は失敗とする。

次に説得における妥協に移る。提案を受けたエージェントは提案に対して妥協が可能かどうかを確かめる。妥協が可能かどうかを判定する方法は応用領域に合わせて定めるべきである。以下に本章で提案する方法を示す。

[妥協判定方法] エージェント 1 の提案した配置を $< e_j, y_k >$ とし、エージェント 2 の提案した配置を $< e_{j'}, y_{k'} >$ とする。もし、 $Cost_1(y_{k'}) \leq Weight_1(e_j)$ かつ $Cost_2(y_k) \leq Weight_2(e_{j'})$ ならば、妥協が成功したとする。すなわち、自分が提案したイベントが受理されるならば、相手のイベントも受理する。ただし、相手のイベントを配置するスロットに対する自分のコストが、自分の提案したイベントの重要度よりも低くなければならない。

例えば、議事スケジューリングでは以下のよう意味になる。互いに、相手の議事を配置する時間帯に存在する自分の個人的なイベ

ントの重要度が，自分の提案したイベントの重要度よりも低い時に妥協が行われる。

図 7.1 では，エージェント 1 にとって $Cost_1(y_2) \leq Weight_1(e_1)$ が成立し，かつ，エージェント 2 にとって $Cost_2(y_1) \leq Weight_2(e_3)$ が成立した時，説得が成功する。提案を受理したとき，元にあったイベントは提案されたイベントのあったスロットへ入れ替える。例えば，図 7.1 下で示すように，エージェント 1 は，スロット y_2 にイベント e_3 を受理した。そこでイベント e_3 が元にあったスロット y_3 にスロット y_2 にあったイベント e_2 を配置する。

以上の説得の特長は以下の点である（1）エージェント相互の個々のイベントの配置に対する価値の比較を直接行わない。ユーザの支援を目的とした領域では，エージェント相互の好みを比較するということは，ユーザ間の好みを比較することになる。ユーザ間の好みを数の大小関係によって比較することは，一般的に好ましくない（2）エージェントは互いに相手の効用に関する知識を必要としない。上で示した [妥協判定方法] において，各エージェントは自分の重要度とコストだけを比較している。つまり，スケジューリングにおいて相手の効用に関する情報を得られない場合でも説得による交渉は行うことができる。

7.4 具体例

7.4.1 議事スケジューリングの具体例

本節では，協調スケジューリングの具体例として議事スケジューリングを挙げ，議事スケジューリングにおける説得の具体例を示す。議事スケジューリングとは，区切られた時間（時間帯）にどのようにこれらの講演つまり議事を並べるかを決定することである。時間帯がスロットで，議事がイベントである協調スケジューリングである。議事を並べる場合にユーザの好みが反映される。すべての議事が区切られた時間に配置された時，議事スケジューリングが成功したと言う。

議事のスケジューリングに説得に基づく合意形成を導入した理由は以下の通りである。実際の人間が行う議事スケジューリングはそれほど主張がぶつかるものではなく，むしろ和やかに淡々と進む場合が多い。しかし，それはあくまで人間が行う場合である。本研究

では、人間の代理としてエージェントが交渉を行う。エージェントが人間の代理として議事をスケジューリングすることによって、議論の負担を軽減でき、人間が直接交渉に立ち会うことなしに議事スケジューリングを進めることができるとなる。本章ではソフトウェアとして実装されるエージェントが議事スケジューリングを行うための手法として説得を提案する。

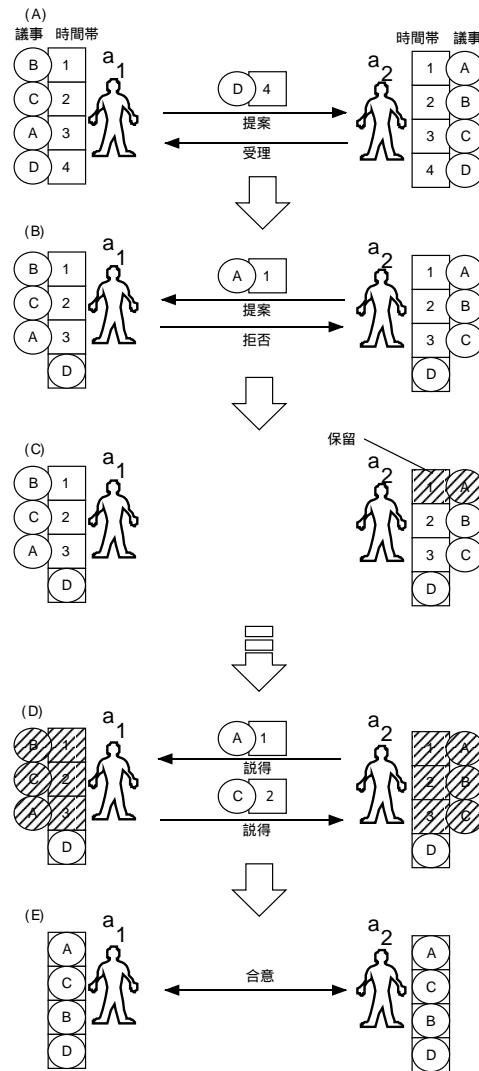


図 7.2: 合意形成の例

議事スケジューリングにおける説得を用いたエージェント間の合

意形成の流れを，最も簡単なエージェントが2人の場合の例を用いて示す（図7.2）。図7.2において，議事を丸，時間帯を四角で表す。例えば，図7.2(A)においてエージェント a_1 は議事Bを時間帯1，議事Cを時間帯2，議事Aを時間帯3，および議事Dを時間帯4にスケジューリングしているとする。議事 m を時間帯 t に配置するという案を \langle 議事 m , 時間帯 t \rangle と表す。つまり，エージェント a_1 は， \langle 議事B, 時間帯1 \rangle , \langle 議事C, 時間帯2 \rangle , \langle 議事A, 時間帯3 \rangle , および \langle 議事D, 時間帯4 \rangle という案を持っている。合意条件は2人とし，2人の案が合致すれば合意とする。

図7.2(A)でエージェント a_1 が議事Dを時間帯4にスケジューリングすること，つまり \langle 議事D, 時間帯4 \rangle を提案したとする。 \langle 議事D, 時間帯4 \rangle を受け取ったエージェント a_2 も議事Dを時間帯4にスケジューリングしているので， \langle 議事D, 時間帯4 \rangle を受理する。図7.2(B)において，議事Dを時間帯4にスケジューリングすることが合意となる。

そして，図7.2(B)でエージェント a_2 が議事Aを時間帯1にスケジューリングすること，つまり \langle 議事A, 時間帯1 \rangle を提案したとする。エージェント a_1 は時間帯1に議事Bをスケジューリングしているので，エージェント a_2 の提案を拒否する。エージェント a_2 が拒否したことによって，図7.2(C)で，エージェント a_2 は \langle 議事A, 時間帯1 \rangle ，つまり議事Aを時間帯1にスケジューリングするという案を保留とする。以上のようにすべてのエージェントが提案可能な議事と時間帯を提案するまで図7.2(A)から図7.2(C)を繰り返す。そして \langle 議事D, 時間帯4 \rangle 以外の案が保留となり図7.2(D)の状況になったとする。

図7.2(D)となった時点でエージェントは説得を始める。交換条件として，エージェント a_2 が \langle 議事A, 時間帯1 \rangle をエージェント a_1 に提示し，エージェント a_1 は \langle 議事C, 時間帯2 \rangle をエージェント a_2 に提示するとする。この説得が成功したとすると，議事Aは時間帯1にスケジューリングされ，議事Cは時間帯2にスケジューリングされる。結果として，エージェント a_1 もエージェント a_2 も時間帯3にスケジューリングすべき議事は議事Bのみとなるので，図7.2(E)に示すように議事がスケジューリングされ，合意となる。

エージェントが n 人の場合は，(A)において a_1 が他のすべてのエージェントに提案を行う。その提案がある合意人数以上のエージェントに受理されたら，その提案は受理されたものとする。合意人数以

上でなければ (C) のように保留する . (D)においては a_2 は , 保留を持ったすべてのエージェントに説得を試みる . 説得を行った結果 , ある配置について同じ配置を持つエージェントが合意人数以上存在すれば , その配置については合意が得られたものとする .

7.4.2 実験と評価

説得による合意形成の効果を確認するために実験を行った . 実験におけるエージェント数と議事の数を現実的なものとするためには , 実際の議事スケジューリングについて考察する必要がある . 規模の小さな議事スケジューリングとして研究会について考え , 規模の大きな議事スケジューリングとして国際会議について考える .

まず規模の小さな議事スケジューリングとして , 一般的な研究会では , 直接議事スケジューリングに関与する人数は 5 人程度であり , 議事の数は 10 ~ 20 である . これは , 具体的な研究会 [59] などの議事スケジューリングに実際に関与している一人から確認された .

国際会議などではプログラムコミュニティのメンバーは 20 人程度であり , 議事の数は 200 程度になる . 例えば , 比較的規模の大きい国際会議 IJCAI-97[57] では , プログラムコミュニティのメンバーは 27 人 , 議事の数は 216 (受理された論文数) である . 20 人以上のメンバーが 200 以上の議事をすべてスケジューリングするの是非現実的である . そこで , 議事はセッションごとに分類され , 各セッションごとに議事のスケジューリングが行われると考えるのが妥当である . メンバーについても 5 人程度ずつが各専門分野に近い分野についての議事をスケジューリングすると考えるのが妥当である . すなわち , 国際会議のように規模の大きな議事スケジューリングにおいても , 直接あるひとつの議事スケジューリングに関わる人数は 5 人程度であり , 議事の数も 10 程度であると考える .

以上の理由から , 議事を 10 , エージェント数を 5 として , 実験を行った . 実験では , 議事のスケジューリングの成功または失敗を確かめた (図 7.3) .

実験の設定としては , 「説得なし」では , 4 . 2 節で述べた (A) , (B) , および (C) で 1 ターンとした「説得あり」では , 4 . 2 節で述べた (A) , (B) , (C) , (D) , および (E) で 1 ターンとした「説得なし」と「説得あり」それぞれについて (C) および (E) で集計が行われるものとした . すべてのエージェント i について , あるイベント e_j

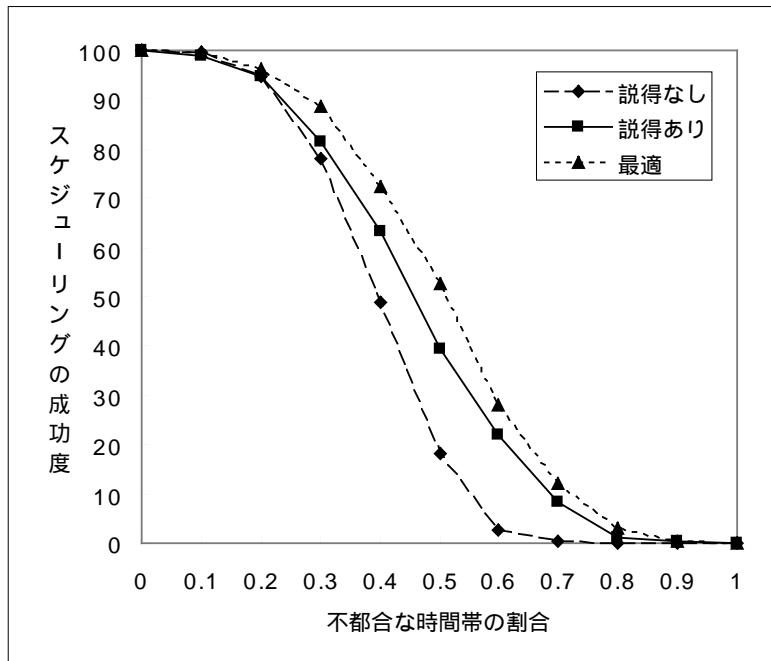


図 7.3: 実験結果

とあるスロット y_k の配置 $\langle e_j, y_k \rangle$ に対する価値 $w_i(\langle e_j, y_k \rangle)$ は、
 $w_i(\langle e_j, y_k \rangle) = |Weight_i(e_j)| - |Cost_i(y_k)|$ とした。合意条件は過半数とした。すなわち全エージェントのうちの半数以上が同じ配置を示せばその配置については合意が得られたこととした。(A) の提案や(D) の説得において、提案または説得が可能な案 $\langle e_j, y_k \rangle$ をすべて提案または説得するまで、各ターンを繰り返し、これを 1 試行とした。そしてこの試行を 100 回行った。各図において縦軸のスケジューリングの成功度とは、試行 100 回中何回スケジューリングが成功したかを示している。横軸は、各エージェントの不都合な時間帯の割合を示している。エージェント i の不都合な時間帯とは、 $Cost_i(y_k) > 0$ なるスロット y_k である。本実験は説得の効果を示すことが目的であるため、不都合な時間帯のコストおよび議事の重要度はランダムに与えた。不都合な時間帯に対しては 1 ~ 9 のコストをランダムに与えた。現実的な状況を想定したとき、これからスケジューリングする議事に対する重要度の方が、個人的なイベントよりも高くなる傾向があると考えられる。そこで、議事の重要度に関しては最小値を 5 とし、5 ~ 9 の重要度をランダムに与えた。

説得を用いた合意形成によって成功した議事スケジューリングの数を示す「説得あり」の場合では、説得を用いない合意形成によって成功した議事スケジューリングの数を示す「説得なし」の場合と比較して良好な結果が得られていることが図7.3より分かる。説得を用いることによって、不都合な時間帯の割合が4~6のときには、20%程度改善できている。

説得が必ず成功する最適な場合を図7.3に示すことによって、説得による合意形成の一般的な性質を示す。最適な場合とは説得が必ず成功する場合である。説得が必ず成功するには、(D)の説得において説得者の妥協の条件 $Cost_i(y_{k'}) \leq Weight_i(e_j)$ と妥協者の妥協の条件 $Cost_i(y_k) \leq Weight_i(e_j)$ が常に成立すれば良い。つまり、議事に対する重要度が常に時間帯に対するコスト以上であれば良い。そこで、すべてのエージェントの持つ議事の重要度を9とし、時間帯にコストが存在する時、そのコストを1~9とした。図7.3に示したとおり、最適な場合は説得なしの場合よりも30%程度改善できている。さらに最適な場合は説得ありの場合よりも5~10%程度改善できている。すなわち、議事に対する重要度が時間帯に対するコストよりも大きければ大きい程、議事のスケジューリングは成功しやすいことが分かる。これはユーザにとって大事だと思われる議事が集まった会議ほど説得による効果が得られやすいことを示す。以上の実験から、議事スケジューリングにおいて、本章で提案した交換条件の提示に基づく説得を用いた合意形成は、説得を用いない合意形成よりも議事スケジューリングの成功度を改善できることが分かった。

7.5 ゲーム理論に基づく考察

本章で提案した説得の方法についての考察を以下に示す。妥結点 s が満たすべき公準 [132] として、個人合理性、パレート最適がある。

個人合理性: 利得ベクトル $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ が次の条件を満たす時、 x は個人合理的であるという。すなわち、 $c = (c_1, c_2, \dots, c_n)$ を基準点とすると、 $x_1 \geq c_1, x_2 \geq c_2, \dots, x_n \geq c_n$ 。

パレート最適（共同合理性）: x が実現可能集合 S に含まれる要素の一つであり、 x の1つの成分を減少させることなしに、他の

成分を増加させることができないようなベクトルであるとき， x はパレート最適という。

まず説得による方法で，説得が成功した場合に得られる妥結点は個人合理性を満たす。説得が成功したとき得られる妥結点 s では各エージェント i の利得は必ず 0 以上である。ここで利得ベクトルは $x = (x_1 \geq 0, x_2 \geq 0, \dots, x_n \geq 0)$ である。交渉の基準点は $c = (c_1 = 0, c_2 = 0, \dots, c_n = 0)$ であるから， $x_1 \geq c_1, x_2 \geq c_2, \dots, x_n \geq c_n$ を満たすので個人合理性を満たす。

説得による合意形成によって得られる妥結点 s は，実現可能集合 S の中の一つの要素であるが，必ずしもパレート最適とは限らない。実際的な議事のスケジューリングにおいては，必ずしもパレート最適なスケジュールを得ようとしているわけではない。また，一般にパレート最適な解を見付けるためには非常に大きなオーダーの解空間を探索しなければならない。そこで，本章ではヒューリスティックな方法を導入することによって，すべての解空間の探索は行わず，無理にパレート最適なスケジュールを得ることを避けた。本章で提案した説得の手法では，エージェントはとりあえず最も価値の高い配置を交換条件として提示することによって最低限得られる効用の中で最も高いと期待できる効用を保持する。これは，相手がどのような交換条件を提示しても自分が最低限得られる効用を保持して交換条件を提示する，という経済的な合理性に基づいた手法である。

4.1 節で説明した説得を用いた合意形成手法について以下に述べる。本合意形成手法の (A)(B)(C) は，契約ネットプロトコル [128] における「公示」「入札」，および「落札」に相当する。本合意形成手法では，(A)(B)(C) で合意が得られない場合，(D)(E) において説得を行うことによってより多くの合意を得ることを試みる。4.2 節の実験で示した通り，説得を用いない場合 ((A)(B)(C) のみ) と比較して説得を用いた場合 ((A)(B)(C)(D)(E)) の方がより多くの合意が得られる。

7.6 関連研究

ゲーム理論を用いたエージェントに関する研究の一つとして文献 [84][83] は，有限繰り返し囚人のジレンマゲームを例として，行動選択による利得値の変化を繰り返しゲームに採り入れた。エージェン

トは、現時点での損得と将来の時点での損得を重み付け評価し行動を選択する。協調行動を生成できる単純な行動選択方法を提案している。つまり、協調行動は利得値の変化と行動選択方法によって生成される。本章では、協調行動を各エージェントが持つスケジュールと同じにすることとして捉え、各エージェントが持つスケジュールと同じスケジュールにするための手法としての説得を提案した。

文献[99]では、マルチエージェントに基づくプランニングについて、合理主義エージェント間の共同プランを整合的に生成する共同プランスキーマを提案している。共同プランを生成する際、エージェントは効用最良均等原理に基づき効用を均等にするように行動する。本章で提案した説得では、各々のエージェントは自分が最低限得られる効用を保持しながら行動する。

7.7 結言

本章では、エージェント間の協調的なスケジューリングをゲーム理論の協力ゲームにおける交渉問題として定式化した。そして協調的なスケジューリングを解決するための手法として説得による手法を提案した。実験を行うことにより、議事スケジューリングにおいて交換条件の提示に基づく説得を用いた合意形成によって、説得を用いない場合よりも議事スケジューリングの成功度を改善できることを示した。

第8章

結論

8.1 成果

本節では、本研究で得られた成果を各章ごとに述べる。

第3章では、エージェント間の合意形成のための説得機構を実現した。エージェント間の合意形成において、決定方式にさまざまなパラドックスを包含する投票方式ではなく、説得による合意形成方式を提案した。本章で提案した説得手法は、適度な範囲であればユーザの選好は調整可能と考え、これに基づいて選好の翻意機構を実現した。具体的には、ユーザの主観的な評価値をAHPを用いて数値化し、調整範囲を一対比較値の2区間とすることによって実現した。合意形成機構を構築する場合の重要な点として、(1)ユーザのプライバシーを守る必要がある点、(2)効用の個人間比較は行うべきではない点、および(3)ユーザの好みを反映させる必要がある点、などが挙げられる。本章で提案した説得機構は、上記の(1)、(2)、および(3)を満たしている。また、GCDSSでは、なぜ説得されたのか、どのように交渉が進んだのかについての説明機構をエージェントに持たせ、ユーザが交渉内容に納得ができるようなシステムを構築した。最後に、GCDSSの使用実験で得られた知見を示し、説得機構に関する実験から、説得機構の有効性、および、一対比較値の調整範囲を2区間が適当であることを確認した。

第4章では、エージェントが説得において、より柔軟に妥協するための選好翻意機構を提案した。本章では、多属性効用理論に基づいて選好をモデル化した。本選好翻意手法は、選好の最小変更原理や順序に基づく変更原理に従って選好を翻意する。さらに、ユーザの

不確定さを利用した代替案の属性に対するラベルの付け替えを行うことにより、選好の翻意を促進した。最後に、以下の(a)および(b)に示される本選好の翻意機構の長所を示した。(a)エージェントの探索空間が絞りこまれることにより、エージェントは効果的に選好を翻意できる。(b)解が見つからない場合に、新たな解空間を生成できるために、エージェントはより選好の翻意を成功しやすくなった。

第5章では、エージェント間の合意形成機構の具体的な応用例として、多重交渉方式に基づくGCDSSの実装した。本実装方式の利点は以下の3点である。エージェント間の多重交渉によって、複数の交渉結果を同時に得ることができる点。本システムの部分的な機構であるAHP機構や交渉エージェントのためのプログラムを持ったエージェントを転送することにより、ユーザはAHP機構や交渉エージェント等のプログラムをあらかじめ持たなくても良い点。ユーザの個人的な主観的評価に関するプライバシーを保ちながらグループ意思決定が行われる点。エージェント間の多重交渉の利点は、以下の通りである。まず、複数の交渉結果を同時に得ることによって、ユーザの納得がより得られやすい結果を得ることができる。なぜなら、本実装方式では、同時に実行される各交渉パターンは、各々一つのユーザの意見を尊重しており、さらに最終的に最も多く説得が成功した交渉パターンが最終結果として選択されるからである。次に、人間が実際に実行することが困難な多重交渉を、エージェントの多重交渉によって実現できる。人間によるグループ意思決定においては、本論文で示したような複数の交渉パターンを同時に実行することは、現実的には困難である。なぜなら、一つの交渉パターンを実行するだけでも、人間であるユーザ間での話し合いには、評価懸念、ただ乗り、および発話のブロッキングなどの生産性損失の問題と呼ばれる問題が存在するからである[23]。さらに、各々異なる複数の交渉パターンを同時にこなすことは人間が實際に行うのは非常に困難である。モバイルエージェントを導入したことによって、ネットワークの負荷が高くても効率的にエージェント間の交渉を実行でき、携帯型端末などを用いて遠隔地からグループの意思決定に参加することを可能とした。さらに、ユーザインターフェースを工夫することによって、インターフェースエージェントを構築する場合に重要とされる「ユーザがシステムに対して制御しているという感覚」を実現した。

第6章では、エージェント間の合意形成機構の電子商取引への具

体的な応用として、マルチエージェントに基づく入札支援システム *BiddingBot* を提案し、実装した。*BiddingBot* は、インターネット上の複数のオンラインオークションでの参加、監視、および入札を支援するシステムである。オークション理論において、共通価値オークションでは勝者の災いが起こることが指摘されている。そこで *BiddingBot* では、複数のオークションサイトに対するモニタリングをマルチエージェントで行うことにより、財に対する相場に関する情報の収集を可能にした。複数のオークションサイトで、同じ財が取り引きされている場合に、なるべく安く落札することは、人間にとっては大きな負担であると考えられる。そこで本システムでは、エージェントが人間の代理となって、協調的に複数のオークションで入札を支援するシステムを提案した。さらに複数のオークションに同時に参加し効果的に入札を行うためのエージェント間の協調機構を提案した。本システムの特長は、以下の (a), (b)、および (c) の 3 点である。(a) 複数のエージェントによる協調機構を用いることによって、多数のオークションサイトで協調的な入札を行うことができる。(b) 多数のオークションサイトから価格に関する情報を収集することによって勝者の災いを回避するための情報を得ることができること。(c) マルチエージェントによる設計により、新たなオークションサイトに対応する場合にエージェントを増やすという方法で、インクリメンタルに対応することができる。

第 7 章では、ゲーム理論に基づいて合理的なエージェント間の説得機構を形式化した。本章では、合理的なエージェント間の説得として、価値交換に基づく説得を提案した。そして、本説得手法の有効性を確認するために、エージェント間の協調的なスケジューリングをゲーム理論の協力ゲームにおける交渉問題として定式化した。そして協調的なスケジューリングを解決するための手法として説得による手法を提案した。実験を行うことにより、議事スケジューリングにおいて交換条件の提示に基づく説得を用いた合意形成によって、説得を用いない場合よりも議事スケジューリングの成功度を改善できることを示した。

8.2 本研究の貢献

本研究は、マルチエージェントシステム、Artificial Intelligence、グループウェア、意思決定支援、ゲーム理論、電子商取引、および

モバイルエージェント の分野に貢献している。本節では、本研究の各分野に対する貢献、および、各分野の研究者の参考となる点を、各分野に分けて挙げる。

マルチエージェントシステムの分野 マルチエージェントシステムの分野には、協調機構と応用分野に関して貢献している。まず、本研究ではユーザの代理としての自律的なエージェント間の新たな協調機構としての説得機構および多重交渉方式を提案した。エージェントはユーザの代理として、合意形成を行うことができる。マルチエージェントシステムの分野の既存の研究では、エージェントがユーザの代理として自動的にリーズナブルな合意を形成する、という枠組は少ない。

協調的なマルチエージェントシステムをグループウェアに応用する研究は多くある。例えば、オフィスのワークフロー支援[52]やビジネスプロセスマネジメント[125]などがある。これらの既存の応用分野では、エージェントを使うユーザ間の好みや意見の競合は想定されていなかった。本研究では、ユーザ間の好みや意見の競合を解消し合意を形成することによって、グループ意思決定支援にエージェント間協調機構を応用した。グループ意思決定支援というマルチエージェントシステムの新たな応用領域を切り開いたと言える。

Artificial Intelligence の分野 知的エージェントの選好や効用の翻意に関する新たな選好翻意機構を提案した。知的エージェントに、ユーザの選好や効用に関する情報を持たせる既存の方法としては、ユーザが数値をダイレクトに入力したり、独自の構造として持つておくという手法があった。本研究では、エージェントはユーザの選好を AHPに基づく意思決定木として持っている。数値をダイレクトに持つエージェントは、選好を翻意する理由付けが弱かった。ほとんどの場合閾値などを設けていたからである。独自の構造としてユーザの選好に関する情報を持つアプローチとしては PERSUADER[134][135][137] がある。PERSUADER では、選好順序を持つのではなく、属性間の関連に基づいて信念木の変更を実現している。例えば、ある属性の値を増加させるためには、その副属性の値を増加させる。一方、本研究では、エージェントは意思決定木を持つことによって代替案の間の選好順序を持つことができ、その結果選好順序の変更が可能である。すなわち、本研究は、エージェ

ントが、ユーザの選好順序と主観的評価に関する情報を持つために AHP の意思決定木を応用する、という新たなアプローチを示した。エージェントにユーザの選好順序を持たせる必要がある応用領域は、非常に多い。すなわち、本研究は知的エージェントの活躍する機会を増加させたという意味で、AI の分野で貢献できる。

意思決定支援やグループウェアの分野 意思決定支援やグループウェアの分野では、特にグループの意思決定をエージェントによって支援する方式に関して、貢献度が高い。既存のグループ意思決定支援は、投票や議論のための設備や機能を用意してユーザの意思決定を支援するアプローチが多かった。また、IBIS のような議論モデルに基づいて、グループの意思決定のための議論を支援するアプローチも多く見受けられる。例えば、QuestMap などである。これらのアプローチでは、議論を記録することが可能であった。すなわち既存の研究の多くは、グループの意思決定の過程を外側から支援するものであり、意思決定のための議論などはユーザ自身が行っていた。

本研究のアプローチでは、エージェントが実際に意思決定の過程を代行することができる。エージェントが意思決定の過程を代行することによる支援では、どのようにエージェントが合意を形成すれば、ユーザの納得が得られるか、という新たな問題も生まれた。本研究ではその問題に対して、第 3 章、第 5 章、および、第 4 章において、説得に基づくエージェント間の合意形成を提案し、その有効性を確かめた。

ゲーム理論の分野 協力ゲームの交渉問題における新たな合意形成プロセスを提案した。第 7 章で示した協調スケジューリングは、ゲーム理論 [79][130][131][132][133] の n 人協力ゲームとしてみることができる。協力ゲームでは、非協力ゲームにおける囚人のジレンマの様な閉塞的な状況を脱するために各プレイヤが話し合いなどを行い、状況自体を変化させる。ゲーム理論ではプレイヤは人間であるから、プレイヤは「話し合い」などの協力のための交渉過程を遂行する能力を当然持ち合わせている。すなわち、ゲーム理論では、交渉問題において、ナッシュ解などの得られるべき合意に関する概念の研究は、進んでいるが、合意形成過程の実現方法についてはほとんど論じられていない。ソフトウェアであるエージェントをプレイヤと考えた場合、「話し合い」などの能力は持ち合っていないため、交渉過程を

遂行する能力を考えなければならない。第7章ではエージェントが交渉過程を遂行する機構として、交換条件の提示による説得に基づく合意形式機構を提案した。

電子商取引の分野 第6章で実装した *BiddingBot* は、電子商取引の分野でのマルチエージェント協調機構の効果的な利用例である。第2章でも示した通り、インターネットの急激な普及に伴い、電子商取引のエージェントによる支援が注目を集めている [41]。また、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する。これらの複数のオークションサイトを対象として効果的な買い物をするためには、複数のオークションに対して、同時に参加、監視、および入札できるシステムが必要である。第2章の第2.4.1節、および第2.4.2節で紹介した既存の電子商取引関連のシステムは、ユーザがオークションに実際に参加し入札することを支援するシステムではない。本論文では、インターネット上の複数のオンラインオークションでの入札を支援するシステム *BiddingBot* を提案し、実装した。すなわち、電子商取引におけるエージェントの新たな応用領域を開拓したと言える。

モバイルエージェントの分野 モバイルエージェントの一つの応用例分野として、グループ意思決定支援におけるエージェント間の合意形成への応用を新たに提案した。第5章で提案した多重交渉方式は、モバイルエージェントを利用することにより、ネットワークの負荷が高くても効率的にエージェント間のユーザの好みを反映した合意形成を実行できる。

本研究の貢献分野は以上に限らない。例えば、本論文で提案した合意形成方式は、複数ロボットの合意形成にも適用可能である。今後の貢献分野の一つとなることが期待できる。本研究で提案した協調機構や実装方式は、ユーザの代理としてのエージェント間の合意形成手法の基礎になると信じる。

8.3 今後の課題

本節では今後の課題をあげる。今後の課題としては、議論に基づく合意形成方式の実現、電子商取引への応用、および高度ネットワーク

化社会への応用などが考えられる。以下、それぞれについて述べる。

エージェント間の組織的合意形成方式 既存のエージェント間の合意形成は、西洋的な考え方をもとにして研究されてきた。すなわちエージェントの個人的な合理性が前提となっている。日本の企業の国際的な躍進によって、日本の組織に基づく交渉方式も西洋の文化から見直されている。そこで、本研究では、西洋的な考え方だけではなく、東洋（日本）的な考え方に基づいた交渉方式もエージェント間の交渉に取り入れることも目的にしている。日本の組織[48]において特徴的な交渉方式として根回しや稟議がある[151]。本研究では特に根回しに注目している[43][56]。根回しや稟議という方式を取り入れることによって、エージェント間の交渉が簡略化され効率的に合意が得られることや、合意における意思決定の質[47]が高められることが期待できる。

電子商取引への応用 近年のインターネットの普及により、eBay[28]やOnsale[98]等のオンラインオークションをはじめとする電子商取引が注目を集めている。電子商取引をエージェントによって仲介する研究が盛ん[41]に行われていることは、第2章で述べた。エージェント間の協調機構を応用することによって、効果的なエージェントに基づく電子商取引支援システムが実現可能と考える。第6章で提案した*BiddingBot*では、エージェントが人間の代理となって、協調的に複数のオークションで入札を支援する。さらに複数のオークションに同時に参加し効果的に入札を行うためのエージェント間の協調機構を提案している。

以下の(I), (II), および(III)に今後の課題を示す。(I)*BiddingBot*のような複数のオークションを支援するシステムがインターネット上に普及した場合、どうなるかを考察することがある。現在、以下の問題点がある。例えば、理論的に最も理想的な状況を仮定して、すべての買い手が*BiddingBot*を使ったらどうなるか？そのような状況になった時、売り手を支援するエージェントはどのような支援ができるか？現実的なアプリケーションとしての*BiddingBot*を考えた時、なるべく最小の価格で財を落札するための協調機構はどのように設計するか？(II) オークションサイトの中には、Englishオークション以外のオークションプロトコルを使っているサイトもある。各エージェントを各々のサイトのオークションプロトコルに特化させるこ

とによって、さまざまなオークションプロトコルを使ったオークションサイトに対応できる。(III) *BiddingBot*では、入札案が落札できる可能性を表す関数として、楽観主義型関数とコスト回避型関数を提案した。実際には落札できる可能性を表す関数は単純なものではない。文献[38]では、関連研究で述べた FishMarket 上で過去の交渉のケースから現在の交渉に関する予測を行う手法を提案している。そこで、文献[38]のように過去のオークションのケースから、現在のオークションに関する予測を行うような手法を導入することが考えられる。

高度情報ネットワーク化社会への応用 一般家庭にある冷蔵庫や洗濯機がインターネットと接続され、家電やコンピュータが互いに通信、協調することによって、人間の支援をする社会が、近い未来に現実となり得る。あらゆる機器にコンピュータが組み込まれ、いつでもどこでも利用可能になるのである。このような状況をユービキタスコンピューティングとかパーセイシブコンピューティングと呼ばれることがあるが、統一した呼び名は定まっていない。本論文では、高度情報ネットワーク化社会と呼ぶ。Sun の Jini や日米家電メーカー 8 社が提唱する HAVi は、高度情報ネットワーク化社会を実現するための構成要素であり、研究開発が盛んに行われている。

高度情報ネットワーク社会では、あらゆる家電や電気機器にコンピュータが組み込まれ、現在以上にソフトウェアであるエージェントの活躍する場が広くなる。エージェントは、ユーザの代理として、家電やインターネットにアクセスし、他のユーザのエージェントと相互作用を行うようになるだろう。すなわち、本研究で提案した説得に基づく合意形成方式や多重交渉方式を応用できる。現在、Jini のバージョン 1.01[85] や、小型の Java virtual machine (KVM) の Early Access バージョン 0.2[86] が繰々と開発されており、エージェントがチャンネル争いを解決するために相互に説得する日も遠くない。

謝辞

本論文をまとめるにあたり，多くの方々の暖かい御支援，御協力をいただきました．ここに，その方々への感謝の気持ちを申し上げます．

本研究を進めるに当たり，指導教官である名古屋工業大学 工学部 知能情報システム学科 新谷虎松 教授に感謝致します．新谷教授には，学部生時代から 6 年間に渡り，本研究に関してはもちろん，生活面においても懇切丁寧な御指導・御鞭撻を賜りました．また，本論文の執筆にあたっても細部まで御指導頂きました．ここに感謝の意を表します．

本論文の審査員を務めていただいた名古屋工業大学 工学部 知能情報システム学科 伊藤英則 教授，同 石井直宏 教授，および 同 中野良平 教授に感謝致します．伊藤教授には，主査として，本論文の審査に関して多大な御尽力を承りました．また，石井教授，および中野教授には，副査として，本論文の審査に関して御尽力を承りました．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 新谷研究室所属の大園忠親君，福田直樹君，その他の新谷研所属の方々や新谷研卒業生のみなさまには，研究室でのゼミ，輪講会，合宿において貴重な御意見を頂きました．特に，同じ研究グループの服部宏充君（現新谷研究室博士前期課程 1 年）および柳野憲克君（現東京工業大学博士後期課程 1 年）には，議論のために多くの時間を割いて頂きました．また，研究グループ SIG-MADS（マルチエージェントと意思決定支援）の皆さんと福田直樹君には，本論文の推敲を手伝って頂きました．研究室のメンバーでの花見，飲み会，スキー合宿，アメ

リカ旅行などは大変，有意義で貴重な時間でした．ここに感謝の意を表します．

また，友人および知人のみなさんには，貴重な御時間とかけがえのない御意見を頂きました．みなさんとの触れ合いや議論は，大学院での生活や研究を行なっていく上での強い心の支えになりました．深く感謝の意を表します．

最後に，尊敬する父（伊藤恭一），敬愛する母（伊藤廣子），および弟（伊藤祐二）には，私の研究活動を認めて頂いた上に，日々の生活を堅牢に支えて頂きました．心より感謝の意を表します．

1900年代最後のクリスマスを迎える名古屋工業大学の研究室にて

1999年冬
伊藤 孝行

関連文献

- [1] Amazon.com. Web page. <http://www.amazon.com/> ,
オンラインのブックショップ . 有名なインターネットベンチャー企業 . 現在までに収益を一度もあげず , すべて投資に回す戦略を取っている . 現在は , 本だけではなく , CD , DVD , おもちゃなど幅広く取り扱っている上に , オークションも開催している . 筆者も 10 数回ここで本を購入した .
- [2] Apple. Web page. <http://www.apple.co.jp/> ,
Macintosh のアップル社のホームページ . AppleStore など 内容は充実している .
- [3] Ken Arnold and James Gosling. *The Java Programming Language*. Addison-Wesley, 1996.
Java の原著とも言える . ただし , 実際に Java のプログラミングを行う場合は , <http://www.java.sun.com> にあるチュートリアルや一般に販売されている図書を参考にするとよい .
- [4] Kenneth J. Arrow. *Social Choice and Individual Values*. Yale Univ. Press, 1970.
社会的決定論において , 民主的な決定方法は存在しない , という一般可能性定理を示した本 . この定理によって著者の K.J.Arrow は ノーベル経済学賞を受賞した .
- [5] Yahoo! Auctions. <http://auctions.yahoo.com> ,
検索サイトの老舗 Yahoo! によるオークションサイト .
- [6] Robert Axelrod. *The Complexity of Cooperation*. Princeton University Press, 1997.
繰り返し囚人ジレンマの実験で有名な Robert Axelrod の書いた最近の本 . 繰り返し囚人のジレンマに遺伝的アルゴリズ

ムを導入したり、メタな社会の制御機構を論じた本。複雑系関連の本。

- [7] Jeffrey M. Bradshaw. An introduction to software agents. In Jeffrey M. Bradshaw, editor, *Software Agents*, chapter 1, pp. 3–46. AAAI Press/The MIT Press, 1997.

初期のソフトウェアエージェントを概観できる論文集。インターフェース関連の著者らの論文が大変興味深い。

- [8] Michael E. Bratman. *Intentions, Plans, and Practical Reason*. Harvard University Press, 1987.

BDI アーキテクチャの基になった哲学書。主に意図に関して論じられている。

- [9] Rodney A. Brooks. Intelligence without representation. *Artificial Intelligence*, Vol. 47, pp. 139–159, 1991.

Subsumption Architecture を最初に提唱した Brooks の有名な論文。

- [10] Hung H. Bui, D. Kieronska, and S. Venkatesh. Learning other agents' preferences in multiagent negotiation. In *Proceedings of the Thirteenth National Conference on Artificial Intelligence(AAAI-96)*, pp. 115–119, August 1996.

繰り返し会議スケジューリングを例題として、エージェント間での選好の学習の有効性を主張した論文。実験では、利己主義的なエージェント、他のエージェントに選好情報を尋ねるエージェント（通信コストが大きくなる）、および他のエージェントの選好を学習するエージェントを比較し、学習が有効であることを示している。学習するエージェントは初期状態において他のエージェントの好みの知識を持たないが、統計的手法を用いて他のエージェントの好みを学習していく。

- [11] Anthony Chavez and Pattie Maes. Kasbah: An agent marketplace for buying and selling goods. In *Proceedings of First International Conference and Exhibition on The Practical Application of Intelligent Agents and Multi-Agents (PAAM-96)*, pp. 75–90, April 1996.

仮想的なマーケットプレースサーバを提供する Kasbah を提

案している。Kasbahでは、簡単な効用関数を持ったエージェントが、売り手および買い手としてユーザの代理として商取引を行う。

- [12] Anthony Chavez and Pattie Maes. A real-life experiment in creating an agent marketplace. In *Proceedings of Second International Conference and Exhibition on The Practical Application of Intelligent Agents and Multi-Agents (PAAM-97)*, 1997.

Kasbahを現実的な環境で用いた実験とその結果を述べた論文。実験は、Digital Lifeというシンポジウムで行われ、100人以上の人間が実験に参加した。論文では、実験結果が定性的および定量的に解析されている。

- [13] Jeffrey Conklin and Michael L. Begeman. gibis: A hypertext tool for exploratory policy discussion. In *ACM conference on computer supported cooperative work (CSCW88)*, pp. 140–152, September 1988.

議論モデルであるIBISモデルを用いたグループウェアgIBISを述べた有名な論文。

- [14] Susan E. Conry, Robert A. Meyer, and Victor R. Lesser. Multistage negotiation in distributed planning. In A. H. Bond and L. Gasser, editors, *Readings in Distributed Artificial Intelligence*, pp. 367–384. Morgan Kaufman, 1988.

契約ネットプロトコルを拡張した多段階交渉プロトコルの論文。

- [15] Cosmoz.com. itrack. <http://www.iTrack.com> ,
希望する商品とオークションサイトを指定することによって、その商品が指定したオークションサイトに出品されたら、e-mailで知らせてくれるサイト。

- [16] CSTaR. Cstar. Web page. <http://bf.cstar.ac.com> ,
BargainFinderのホームページ。

- [17] Johan de Kleer. An assumption-based tms. *Artificial Intelligence*, Vol. 28, pp. 127–162, 1986.

- ATMS を紹介した最初の論文 . Artificial Intelligence, vol.28 の ATMS 3部作のうちの一つ .
- [18] Johan de Kleer. Extending the atms. *Artificial Intelligence*, Vol. 28, pp. 163–196, 1986.
 default 推論に対応するため , および , 仮説の選言を扱えるようにするために , ATMS を拡張した論文 .
- [19] Johan de Kleer. Problem solving with the atms. *Artificial Intelligence*, Vol. 28, pp. 197–224, 1986.
 ATMS によって問題解決を行う事例を示した論文 . ATMS は推論システムと組み合わされることによって , 初めて問題解決が可能になる . そこで , この論文では , ATMS と制約言語を組み合わせる方法を示している . Comsumer と名付けられたルールを用いた問題解決方法は大変興味深い .
- [20] Keith Decker, Katia Sycara, and Mick Williamson. Middle-agents for the internet. In *Proceedings of the Fifteenth International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-97)*, pp. 578–583, 1997.
 インターネット上の仲介エージェントである MatchMaker や Broker に関して述べた論文 . 実験方法がユニークで興味深い .
- [21] Gerardine Desanctis and R. Brent Gallupe. A foundation for the study of group decision support systems. *Management Science*, Vol. 33, No. 5, pp. 589–609, May 1987.
 グループ意思決定支援システムの研究に関する概要を示した有名な論文 .
- [22] Michael Diehl and Wolfgang Stroebe. Productivity loss in brainstorming groups: Toward the solution of riddle. *Journal of Personality and Social Psychology*, Vol. 53, pp. 497–509, 1987.
 ブレインストーミングを行うグループにおける評価懸念 , ただ乗り , 発話のブロッキングによる生産性の損失について述べた論文 .
- [23] Michael Diehl and Wolfgang Stroebe. Productivity loss in idea-generating groups: Tracking down the blocking effect. *Journal*

of Personality and Social Psychology, Vol. 61, pp. 392–403, 1991.

アイデア生成におけるグループの生産性損失について，評価懸念，ただ乗り，発話のブロッキングという側面から，論じた論文。

- [24] Yahoo! Auctions Directory. dir.yahoo.com/Business_and_Economy/Companies/Auctions/Online_Auctions, 検索サイトの老舗 Yahoo! のオンラインオークションサイトディレクトリ。
- [25] Robert B. Doorenbos, Oren Etzioni, and Daniel S. Weld. A scalable comprison-shopping agent for the world-wide web. In *Proceedings of the First International Conference on Autonomous Agents (Agents-97)*, pp. 39–48, feb 1997.
ShopBot の原文。比較的単純な手法で ShopBot に有効な情報フィルタリングが可能であることを示している。最後の一文『Although the Web is less agent-friendly than we might hope, it is less random than we might fear.』が印象的。
- [26] Jon Doyle. A truth maintenance system. In George F. Luger, editor, *Computation & Intelligence*, chapter 22, pp. 529–554. AAAI Press / The MIT Press, 1995. (original: Artificial Intelligence 12 (3):231-272, 1979)
整合性管理システム (TMS:Truth Maintenance System) の原著。実装を考えながら読み進めると、非常に難解。筆者は、他の様々な入門書および、文献 [32] によって理解を深めた。
- [27] Robert F. Dyer and Ernest H. Forman. Group decision support with the analytic hierarchy process. *Decision Support Systems*, Vol. 8, pp. 99–124, 1992.
グループ意思決定のコンテキストを、共有目標コンテキスト、非共有目標コンテキスト、および競合コンテキストに分類し、それぞれのコンテキストにおける AHP によるグループの意思決定の方法を論じている。
- [28] eBay. ebay-your personal trading community. Web page. <http://www.ebay.com>, 現在のところ最も有名なオークションサイト。

- [29] Eithan Ephrati, Gilad Zlotkin, and Jeffrey S. Rosenschein. A non-manipulable meeting scheduling system. In *The Thirteenth International Distributed Artificial Intelligence Workshop*, pp. 105–125, July 1994.
 クラークタックスという概念をはじめてエージェント間の交渉に応用した論文。クラークタックスは公共経済学からのアイデアである。
- [30] Bernard Espinasse, Guy Picolet, and Eugene Chouraqui. Negotiation support systems: A multi-criteria and multi-agent approach. *European Journal of Operational Research*, Vol. 103, pp. 389–409, 1997.
 交渉およびマルチエージェントに関して、多属性フレームワークに基づいた交渉支援システム NegocIAD に関する論文。
- [31] Oren Etzioni. Moving up the information food chain: Deploying softbots on the world wide web. *AI magazine*, Vol. 18, No. 2, pp. 11–18, 1997.
 著者のインターネット上の情報フィルタリングに関する研究成果をまとめた論文。
- [32] Kenneth D. Forbus and Johan de Kleer. *Building problem solvers*. The MIT Press, 1993.
 JTMS, LTMS, および ATMS の詳細なメカニズムとその Lisp による実装方法が懇切丁寧に述べられている大著。TMS 関連の実装に基づく研究を行うならば、必須の本である。
- [33] Yuzo Fujishima, David McAdams, and Yoav Shoham. Speeding up ascending-bid auctions. In *Proceedings of the Sixteenth International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI99)*, pp. 554–559, 1999.
 上昇型オークションの情報が開示できるという特長と秘密入札オークションの必ず終了するという特長を組み合わせたサバイバルオークションを提案した論文。日本式オークションと $(n-1)$ ラウンドサバイバルオークションの戦略的同値性および 2 ラウンドサバイバルオークションのナッシュアウトカム均衡が証明される。ゲーム理論的な解析は興味深い。

- [34] 福田直樹, 伊藤孝行, 新谷虎松. Weblog: WWW における情報収集エージェントのための論理型記述言語の実現. 第 8 回マルチエージェントと協調計算国際ワークショップ (MACC-99), 1999.
 本研究室で開発された情報エージェント記述言語 Weblog に関する論文 . 応用例として BiddingBot におけるマルチエージェントの協調的入札機構を試作した .
- [35] 福田直樹, 新谷虎松. エージェント記述言語 Weblog におけるアプリケーション記述言語の試作. 第 13 回人工知能学会全国大会論文集, pp. 517–520, 1999.
 本研究室で開発された情報エージェント記述言語 Weblog に関する論文 . 特に Weblog のためのアプリケーション開発環境について述べられている .
- [36] Peter Gardenfors. Belief revision: An introduction. In Peter Gardenfors, editor, *Belief Revision*, pp. 1–28. Cambridge University Press, 1992.
 Belief Revision に関する有名な論文を集めた論文集 Belief Revision の中の導入部分の論文であり , Belief Revision の紹介が分かりやすく書かれている . Belief Revision の分野を調査するならば , まずこの論文を読むと良い .
- [37] Leonardo Garrido and Katia Sycara. Multi-agent meeting scheduling: Preliminary experimental results. In *Proceedings of Second International Conference on Multi-Agent Systems (ICMAS-96)*, pp. 95–102. AAAI Press, dec 1996.
 文献 [78] の分散制約充足アルゴリズムを用いた会議スケジューリングに関する論文 . 大域的な効用 (大域的なスケジュールの質) が定義され , 様々なパラメータを変更した場合の解析が行われている .
- [38] Eduard Gimenez-Funes, Lluis Godo, Juan A Rodriguez-Aguilar, and Pere Garcia-Calves. Designing bidding strategies for trading agents in electronic auctions. In *Proceedings of the Third International Conference on Multi-Agent Systems (ICMAS-98)*, pp. 136–143, jul 1998.

FishMarket 上でのエージェントの入札戦略を事例ベース推論に基づいて行うことを提案した論文 .

- [39] Amy R. Greenwald and Jeffrey O. Kephart. Shopbots and pricebots. In *Proceedings of the Sixteenth International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-99)*, pp. 506–511, 1999.

PriceBotに関する論文 . インターネット上がShopBotでいっぱいになってしまったら , どうするかという問題提起は大変興味深い . 今後の大きなテーマになるに違いない .

- [40] Robert H. Guttman and Pattie Maes. Agent-mediated integrative negotiation for retail electronic commerce. In *Proceedings of the Second International Workshop on Cooperative Information Agents (CIA-98)*, 1998.

Tete-A-Tete という仮想的マーケットサーバの論文 . Tete-A-Tete では , エージェントが協調的に多属性効用理論を用いた議論形式の交渉を行う . また , エージェントは事例ベース推論も行うことができる . しかし , 具体的な実装については触れていない .

- [41] Robert H. Guttman, Alexandros G. Moukas, and Pattie Maes. Agent-mediated electronic commerce: A survey. *The Knowledge Engineering Review*, Vol. 13, No. 2, pp. 147–159, 1998.

近年のエージェントに基づく電子商取引のサーベイ論文 . 消費者行動モデル (CBB モデル) に基づいて , 電子商取引の関連研究が整理されている . 大変興味深く読み進めることができる .

- [42] Patrick T. Harker. Incomplete pairwise comparisons in the analytic hierarchy process. *Mathematical Modelling*, Vol. 9, pp. 353–360, 1987.

AHP の一对比較行列が不完全な場合に , ウェイトを推定する Harker 法について説明した原著 .

- [43] Hiromitsu Hattori, Takayuki Ito, and Toramatsu Shintani. An approach to improving quality and facilitating consensus in negotiation among agents. In *Proceedings of IASTED Interna-*

tional Concference on Intelligent Systems and Control (ISC-99), 1999.

後輩の服部宏充の論文。根回しという手法をエージェント間交渉に採り入れた。筆者が指導して、初めて受理された国際会議の論文。

- [44] Thomas Haynes, Sandip Sen, Neeraj Arora, and Rajani Nadella. An automated meeting scheduling system that utilize user preferences. In *The First International Conference on Autonomous Agents (Agents'97)*, pp. 308–315, 1997.

Sen らのグループでのエージェントに基づく会議スケジューリングに関する最近の論文。会議スケジューリングにユーザの好みを導入した論文。基本的には閾値に基づいた妥協方式が採り入れられている。

- [45] 本位田真一, 大須賀昭彦. オブジェクト指向からエージェント指向へ. ソフトバンク株式会社, 1998.

エージェントに関する研究への入門のための入門書。イラスト入りで大変分かりやすく、情報科学に携わっていない人にお勧め。ただし、エージェントを研究している私の視点からは、やや異なる定義(マルチエージェントシステムの定義)があることは残念。

- [46] IBM. Kasparov vs. deep blue. <http://www.research.ibm.com/deepblue/>

カスパロフ対 Deep Blue のチェス対決に関するホームページ。

- [47] 印南一路. すぐれた意思決定: 判断と選択の心理学. 中央公論社, 1997.

意思決定論の先端の研究者による本。古典的な意思決定論から筆者の独自の診断論的意味決定論まで、やさしく丁寧に解説されている。良書である。

- [48] 印南一路. すぐれた組織の意思決定: 組織をいかす戦略と政策. 中央公論社, 1999.

文献 [47] の続編というよりは、むしろ組織論に関する本である。そして、組織における意思決定がわかりやすく丁寧に解説されている。良書である。

- [49] 石田亨. エージェントを考える. 人工知能学会誌, Vol. 10, No. 5, pp. 663–667, September 1995.
「エージェントとは何か？」という問い合わせに対する論文. 著者自身のエージェントの定義は示されていないが, 1995年当時の状況に基づいて, エージェントの定義が丁寧に分類されている.
- [50] 石田亨, 片桐恭弘, 桑原和宏. 分散人工知能. コロナ社, 1996.
分散人工知能のやや古典的な成果を集約した図書. 学部程度の分散人工知能の初心者向け.
- [51] 石田亨, 桑原和宏. 分散人工知能(1): 協調問題解決. 人工知能学会誌, Vol. 7, No. 6, pp. 945–954, November 1992.
分散人工知能における協調問題解決に関する解説論文. 当時の協調問題解決が概観できる. 概観なので, 概念に関しては原著を読むべき.
- [52] Yoshihide Ishiguro, Hiroyuki Tarumi, Takayoshi Asakura, Koji Kida, Dai Kusui, and Kenji Yoshifu. An agent architecture for personal and group work support. In *Proceedings of Second International Conference on Multi-Agent Systems(ICMAS-96)*, pp. 134–135. AAAI Press, December 1996.
マルチエージェントによるオフィスワークサポートシステムのアーキテクチャを提案している論文. このシステムは, 個人的な仕事とグループの仕事を並行に行わなければならないオフィスにおいて, 個人的な仕事とグループの仕事の両方をエージェントによって支援する.
- [53] 石井裕. グループウェアのデザイン. 共立出版, 1994.
現在 MIT Media ラボの石井裕教授によるグループウェアの読み物. グループウェアについての一般的な読み物になっているが, グループウェアの研究の基本的な流れがきちんと述べられており, 良書と言える.
- [54] 伊藤孝行, 福田直樹, 新谷虎松. マルチエージェント入札支援システム *BiddingBot* におけるエージェント間の協調的入札機構について. 第8回マルチエージェントと協調計算国際ワークショップ (MACC-99), 1999.

*BiddingBot*におけるマルチエージェントの協調的入札機構に関する論文 . MACC-99 の特別セッションで発表することができた論文 .

- [55] Takayuki Ito and Toramatsu Shintani. An approach to a multi-agent based scheduling system using a coalition formation. In *Proceedings of the Ninth International Conference on Industrial & Engineering Applications of Artificial Intelligence and Expert Systems (IEA/AIE-96)*, p. 780. Gordon and Breach Science Publishers, 1996.
ゲーム理論の提携ゲームにおける特性関数をマルチエージェントスケジューリングシステムに応用した筆者の論文 . 初めて国際会議に提出し , 初めて受理された記念すべき論文 .
- [56] Takayuki Ito and Toramatsu Shintani. Implementing an agent negotiation protocol based on persuasion. In *Proceedings of the Second International Conference on Multiagent Systems (ICMAS-96)*, p. 443. AAAI Press, 1996.
ゲーム理論の提携ゲームにおける特性関数によってエージェント間交渉を実現 . エージェントは説得のための特性関数を調整する . 応用として会議スケジューリングシステムを実現 .
- [57] Takayuki Ito and Toramatsu Shintani. Persuasion among agents : An approach to implementing a group decision support system based on multi-agent negotiation. In *Proceedings of the Fifteenth International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-97)*, pp. 592–597. Morgan Kaufmann, August 1997.
本論文の 3 章の基になった論文 . 名古屋で開催された IJCAI97 で発表した . 学生時代を通して , 最も想い出深い論文 .
- [58] 伊藤孝行, 新谷虎松. グループ代替案選択支援システムにおけるエージェント間の説得機構について. 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol. J80-D-II, No. 10, pp. 2780–2789, October 1997.
本論文の第 3 章の基になった論文 . 文献 [57] に実験および評価を加えた論文 . 筆者が生涯で初めて Publish した雑誌論文 .
- [59] 伊藤孝行, 新谷虎松. マルチエージェントにおける説得に基づく会議スケジューリングについて. Technical report, 第 2 8

- 回人工知能基礎論研究会 (SIG-FAI-9603), March 1997.
文献 [60] のもとになった論文 . 発表は名古屋工業大学で行われ , 新谷研究室が主催となった .
- [60] 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 D-I, Vol. J81-D-I, No. 9, pp. 1099–1106, September 1998.
エージェント間での交換というアイデアをゲーム理論を用いて主張した論文 .
- [61] Nicholas R. Jennings, Katia Sycara, and Mike Wooldridge. A roadmap of agent research and development. *Autonomous Agents and Multiagent Systems*, Vol. 1, pp. 7–38, 1998.
エージェント関連の研究のサーベイ論文 . エージェント関連の歴史的な背景が順序良く整理されている . 文献 [144] の第 1 章に近い内容である .
- [62] Hardeep Venkataramani Johar. Softcord: an intelligent agent for coordination in software development projects. *Decision Support Systems*, Vol. 20, pp. 65–81, 1997.
ソフトウェア開発における調整を支援する知的なエージェント SoftCord に関する論文 . SoftCord では整合性管理システム (TMS:Truth Maintenance System[26]) の 1 つである ATMS[17] [18] [19] で情報の競合を検知する .
- [63] 亀田達也. 合議の知を求めて -グループの意思決定-. 認知科学モノグラフ 3. 共立出版株式会社, 1997.
グループ意思決定に関する論文 . 社会的な決め方である合議におけるさまざまな原理を追求した本 . アローの一般可能性定理や決定の操作可能性など興味深い記述が豊富につまった良書である .
- [64] Nikos I. Karacapilidis and Costas P. Pappis. A framework for group decision support systems: Combining ai tools and or techniques. *European Journal of Operational Research*, Vol. 103, pp. 373–388, 1997.
Operations Research の分野の背景を述べた後に , 計算機に基づくグループ意思決定支援システムが提案される . 特に Web 上の AI テクニックによる議論支援システムが強調される .

- [65] Nikos Karacapilidis and Dimitriis Papadias. Hermes: Supporting argumentative discourse in multi-agent decision making. In *Proceedings of the Fifteenth National Conference on Artificial Intelligence (AAAI-98)*, pp. 827–832. AAAI Press, 1998.
gIBIS に似た議論モデルに従って、グループの議論を支援するシステム Hermes を提案している。Hermes は議論のサポート関係の一貫性を管理することができる。
- [66] Gunter Karjoth, Danny B. Lange, and Mitsuru Oshima. A security model for aglets. *IEEE Internet Computing*, Vol. 1, No. 4, pp. 68–77, 1997.
Aglets のセキュリティモデルに関する論文。
- [67] Ralph L. Keeney and Howard Raiffa. *Decisions with Multiple Objectives : Preference and Value Tradeoffs*. Cambridge Univ. Press, 1993.
多属性効用理論に関する本。
- [68] 金淵培. エージェント技術の現状と実用化. 人工知能学会誌, Vol. 12, No. 6, pp. 42–52, November 1997.
1997年当時におけるエージェントの構築やエージェント間通信の構築のための技術、および応用分野を広く概観した解説論文。
- [69] Joseph Kiniry and Daniel Zimmerman. A hands-on look at java mobile agents. *IEEE Internet Computing*, Vol. 1, No. 4, pp. 21–30, 1997.
Java によって実現されているモバイルエージェントをいくつか紹介している論文。
- [70] 木下栄蔵. 意思決定論入門. 啓学出版, 1992.
意思決定論の入門書。意思決定のさわりだけを概観。
- [71] 木下栄蔵. 孫子の兵法の数学モデル - 最適戦略を探る意思決定法 AHP - (ブルーバックス B-1203). 講談社, 1998.
Analytic Hierarchy Process (AHP) についての入門書。文献 [140] ほどやさしくはない。

- [72] 木下哲男, 菅原研次. エージェント指向コンピューティング～エージェントの基礎と応用～. ソフト・リサーチ・センター, 1995.
 エージェントの基礎を概観した本. 他の同類のエージェントの教科書に較べて, 比較的適切なサーベイが紹介されている.
- [73] Gerhard K. Kraetzschmar. *Distributed Reason Maintenance for Multiagent Systems*. Lecture Notes in Artificial Intelligence 1229, Subseries of Lecture Notes in Computer Science. Springer-Verlag, 1997.
 分散整合性管理をどうやって行おうかという論文. 独自の整合性管理システムが述べられる. 例題の「秘書たちの悪夢」は過去の Workshop で使われたものであるが, 面白い例題である.
- [74] 草野耕一. ゲームとしての交渉. 丸善ライブラリー 130. 丸善株式会社, July 1994.
 ゲーム理論や説得に関する読み物. 説得の種類に関する独自の分類方法が興味深い.
- [75] 草野耕一. 日本人が知らない説得の技法. 講談社, 1997.
 説得とは何か?についてを解説した読み物. 功利的説得, 論理的説得および感情的説得, という分類に基づいて説得を解説. また, 様々な事例を通して 3 つのタイプの説得を紹介している.
- [76] 桑原和宏, 石田亨. 分散人工知能(2): 交渉と均衡化. 人工知能学会誌, Vol. 8, No. 1, pp. 17–25, January 1993.
 分散人工知能における交渉や均衡に関する解説論文. ゲーム理論における均衡の概念等を先に予習しておくと, 内容が分かりやすい. ただ, 概観的な論文なので, 論文中の概念に関しては原著を読むべきである.
- [77] Danny B. Lange and Mitsuru Oshima. *Programming and Deploying Java Mobile Agents with Aglets*. Addison-Wesley, 1998.
 Aglets 本. Aglets プログラマー必須の本. Aglets の基本的なプログラミング手法および, Aglets の中身を詳しく解説してある. 内容がやや古いのが欠点.

- [78] Jyi Shane Liu and Katia Sycara. Distributed meeting scheduling. In *Proceedings of Sixteenth Annual Conference of the Cognitive Society*, pp. 583–588, 1994.
 文献[37]における会議スケジューリングのための分散制約充足アルゴリズムを示した論文。手に入り辛い論文であったが、後輩の鶴田に取り寄せてもらった。
- [79] Robert Duncan Luce and Howard Raiffa. *Games and Decisions*. Dover Publications, 1989.
 ゲーム理論および意思決定論に関する古典的な教科書。
- [80] Pattie Maes. Agents that reduce work and information overload. *Communications of the ACM*, Vol. 37, No. 7, pp. 31–40, July 1994.
 人間の日々の仕事を代理してくれるソフトウェアエージェントに関する有名な論文。スケジュール管理に関する実例が論じられている。
- [81] Thomas W. Malone, Kum-Yew lai, and Kenneth R. Grant. Agents for information sharing and coordination: A history and some reflections. In Jeffrey M. Bradshaw, editor, *Software Agents*, chapter 7, pp. 109–143. AAAI Press/The MIT Press, 1997.
 ユーザインターフェースの立場からソフトウェアエージェントによる支援システム Information Lens を論じた論文。論文の冒頭で述べられる semiformal system および radical tailorability は、複雑なことをエージェントにやらせようという知的エージェントのアプローチとは異なる UI 的な観点に基づいた原理であり、大変興味深い。
- [82] 松原望. 意思決定の基礎. 現代人の統計 4. 朝倉書店, 1977.
 意思決定論のためのきちんとした入門的な教科書で、良書である。
- [83] Shigeo Matsubara and Makoto Yokoo. Cooperative behavior in an iterated game with a change of the payoff value. In *Proceedings of Second International Conference on Multi-Agent Systems(ICMAS-96)*, pp. 204–211. AAAI Press, December 1996.

文献 [84] の基になった論文 . 有限繰り返し囚人のジレンマゲームに関して , 複数の行動戦略を提案し , 現時点での損得と将来の時点での損得を重み付け評価する手法を用いることによって , 人間の直観にあう協調行動が生成されることを示した .

- [84] 松原繁夫, 横尾真. 繰り返しゲームにおいて協調行動を生成する先読み型行動 選択方法. 人工知能学会誌, Vol. 12, No. 6, pp. 881–890, 1997.

有限繰り返し囚人のジレンマゲームに関して , 複数の行動戦略を提案し , 現時点での損得と将来の時点での損得を重み付け評価する手法を用いることによって , 人間の直観にあう協調行動が生成されることを示した .

- [85] Sun Microsystems. Jini(tm) connection technology. <http://www.sun.com/jini/>

Sun の Jini のホームページ . 今後の発展が期待される .

- [86] Sun Microsystems. K virtual machine (kvm) home page. <http://www.java.sun.com/products/kvm/>

Sun の KVM のホームページ . PDA(Personal Digital Assistant) である IBM WorkPad c3 (PalmPilot) に載せられる Java のバーチャルマシンに関するページ .

- [87] Kenneth H. Mitchell and Edward A. Wasil. Ahp in practice: Applications and observations from a management consulting perspective. In B.L. Golden, E.A. Wasil, and P.T. Harker, editors, *The analytic hierarchy process applications and studies*, pp. 192–212. Springer-Verlag, 1989.

AHP を現実的な世界で用いた事例を示した論文 . AHP の一般的な使用方法は , グループで一つの意思決定木を作成するということを示すために , この論文を引用した .

- [88] Jorg P. Muller. *The Design of Intelligent Agents, A Layered Approach*. Springer, 1996. Lecture Notes in Artificial Intelligence 1177.

- [89] 村上国男. 機械エージェント間の合意形成システム. 人工知能学会誌, Vol. 8, No. 6, pp. 697–700, November 1993.

文献 [152] を基にした解説論文 . エージェントによる合意形成の概要が示されている .

- [90] 村上国男. マルチエージェントシステムとその応用. 電子情報通信学会誌, Vol. 78, No. 6, pp. 570–577, June 1995.
文献 [152] を基にした解説論文 . エージェントによる合意形成における問題点やその概要が示されている .
- [91] 中山弘隆. 多目的意思決定 - 理論と応用 - i - 多目的意思決定と ahp -. システムと制御, Vol. 30, No. 7, pp. 430–438, 1986.
AHP に関する紹介論文 . AHP の問題点が明確に示されている点が評価できる .
- [92] NASA. Mars pathfinder home. <http://www.ksc.nasa.gov/mars/default.html>
NASA の Mars Pathfinder のホームページ .
- [93] 西田豊明. ソフトウェアエージェント. 人工知能学会誌, Vol. 10, No. 5, pp. 44–51, 1995.
当時 (1995 年) のソフトウェアエージェントの動向を解説した論文 . やや内容が古くなってしまっている . 協調のための仲介機構等は , 現在は Sycara らが提案している Matchmaker や Broker を参考にすべきである .
- [94] Donald A. Norman. How might people interact with agents. In Jeffrey M. Bradshaw, editor, *Software Agents*, chapter 2, pp. 49–55. The AAAI Press/The MIT Press, 1997.
Apple コンピュータの Norman によるソフトウェアエージェントを構築する際に重要となる , 大変興味深い 6 つのポイントを論じた論文 .
- [95] 沼岡千里, 大沢英一, 長尾確. マルチエージェントシステム. 分散強調メディアシリーズ 11. 共立出版株式会社, 1998.
マルチエージェントシステムに関して , 著者らの研究の成果をまとめた本 .
- [96] ObjectSpace. Voyager overview. Web page. <http://www.objectspace.com/products/vgrOverview.htm> ,
Voyager のホームページ .

- [97] Akihiko Ohsuga, Yasuo Nagai, and Yutaka Irie. Plangent: An approach to making mobile agents intelligent. *IEEE Internet Computing*, Vol. 1, No. 4, pp. 50–57, 1997.
 東芝が開発したモバイルエージェント PLANGENT に関する論文 . PLANGENT は , モバイルエージェントにプランニングの機能が付加されている .
- [98] Onsale. Web page. <http://www.onsale.com/> ,
 オークションサイト . 日本語版は <http://www.onsale.co.jp/> .
- [99] 大沢英一. 合理的エージェントによる共同プランスキーマ. コンピュータソフトウェア, Vol. 12, No. 1, pp. 52–63, 1994.
 マルチエージェントに基づくプランニングに関して , 合理主義エージェント間の共同プランを整合的に生成する共同プランスキーマを提案している . 共同プランを生成する際 , エージェントは効用最良均等原理に基づき効用を均等にするよう行動する .
- [100] Simon Parsons, Carles Sierra, and Nick R. Jennings. Agents that reason and negotiate by arguing. *Journal of Logic and Computation*, Vol. 8, No. 3, pp. 261–292, 1998.
 エージェント間の交渉を議論として定式化した論文 . 説得や妥協など様々な交渉形式を記述できる . 議論において主張が競合する状況として , 主張そのものが衝突する rebut , および , ある主張が推論の途中の命題と衝突する undercut を提唱しており , 大変興味深い .
- [101] Jenny Preece. *Human-Computer Interaction*. Addison-wesley, 1994.
 HCI の図書 . 修士時代に新谷研の輪講のための図書として選ばれた .
- [102] Eric Rasmusen. *Games and information, an introduction to Game Theory*. Blackwell Publishers, Inc., second edition, 1989.
 ゲーム理論的にミクロ経済を紹介した本 . オークションについて 1 章を割いて紹介されている . 他の本ではオークションがなかなか紹介されないだけに貴重な情報源 .

- [103] Juan A. Rodriguez, Pablo Noriega, Carles Sierra, and Julian Padget. Fm96.5:a java-based electronic auction house. In *Proceedings of Second International Conference on the Practical Application of Intelligent Agents and Multi-Agent Technology (PAAM-97)*, 1997.
- FishMarket というオークションサーバを提案した論文 . オークションのためのサーバを提供するシステム . AuctionBot と同じように FishMarket では , ユーザはエージェントの入札に 関する戦略を構築することが可能 . FishMarket は実験的なシステムであり , 実世界のシステムとしては現在のところ使われていないが , さまざまな入札戦略を持ったエージェントによるトーナメントが開催されている .
- [104] Jeffrey S. Rosenschein. Consenting agents: Negotiation mechanisms for multi-agent systems. In *Proceedings of the 13th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-93)*, pp. 792–779, 1993.
- 文献 [105] の基になった論文 . タスク指向ドメイン , SubAditive なタスク指向ドメイン , Concave なタスク指向ドメイン , および Modular なタスク指向ドメインにおけるエージェント 間のインタラクションプロトコルについて論じている .
- [105] Jeffrey S. Rosenschein and Gilad Zlotkin. *Rules of Encounter*. The MIT Press, 1995.
- エージェント間の相互作用をゲーム理論を用いて解析した 筆者らの研究成果をまとめた本 . 前知識としてゲーム理論は 必修である .
- [106] Stuart J. Russell and Peter Norvig. *Artificial Intelligence : A Modern Approach*. Prentice-Hall, Inc., 1995.
- 近年で最も良くまとめた Artificial Intelligence の本 . TMS 関連の記述がやや少ないが , 私は TMS 関連は文献 [32] で補つた . 良い演習問題や参考文献も豊富 . 良書である .
- [107] Stuart J. Russell and Peter Norvig. エージェントアプローチ 人工知能. 共立出版, 1997. 古川康一 (監訳)
(原著 : Artificial Intelligence: A Modern Approach) 名著

Stuart Russell による Artificial Intelligence : A Modern Approach の日本語訳 . 日本の Artificial Intelligence 関連の著明な研究者らによって丁寧に翻訳されている .

- [108] Thomas L. Saaty. *The analytic hierarchy process*. McGraw Hill, 1980.
Analytic Hierarchy Process の原著 .
- [109] Thomas L. Saaty. Group decision making and the ahp. In B.L. Golden, E.A. Wasil, and P.T. Harker, editors, *The analytic hierarchy process applications and studies*, pp. 59–67. Springer-Verlag, 1989.
AHP(Analytic Hierarchy Procee) の創始者 Saaty による , AHP をグループ意思決定支援で用いる場合の幾何平均法を提案した論文 .
- [110] 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.
良書 . 私が読んだのは修士時代であったが , 感動すら覚えた . 社会的決定論に関して , 歴史とその意味を大変やさしく解説しているにもかかわらず , 他に例がみられないほど内容は高度である .
- [111] Tuomas Sandholm. Limitations of the vickrey auction in computational multiagent systems. In *Proceedings of Second International Conference on Multi-Agent Systems(ICMAS-96)*, pp. 299–305. AAAI Press, December 1996.
Vicrey Auction を計算機上のエージェント間のタスク割り当てなどの協調機構としてもちいる場合の限界を示している .
- [112] Tuomas Sandholm. emediator: A next generation electronic commerce server. In *Proceedings of the Sixteenth National Conference on Artificial Intelligence(AAAI-99) At the Intelligent Systems Demonstration Program*. AAAI Press, 1999.
Sandholm らが開発している電子商取引サーバー eMediator を AAAI-99 のデモセッションのための論文 .

- [113] 佐藤一郎. モバイルエージェントの動向. 人工知能学会誌, Vol. 14, No. 4, pp. 598–605, 1999.
最近のモバイルエージェント関連の研究のサーベイ論文 .
- [114] Sandip Sen. Developing an automated distributed meeting scheduler. *IEEE Expert*, Vol. 12, No. 4, pp. 41–45, 1997.
会議のスケジュールを自動的に行う分散会議スケジューラが提案されている . ユーザの選好は考慮されていない .
- [115] Sandip Sen and Edmund H. Durfee. On the design of an adaptive meeting scheduler. In *The Tenth IEEE Conference on Artificial Intelligence for Applications*, pp. 40–46, March 1994.
エージェントによる分散会議スケジューラに関する論文 . エージェント間の交渉方式としては , 契約ネットプロトコルを拡張した多段階交渉プロトコルが採用されている . エージェントは複数の戦略を持ち , 戦略の組み合わせに関する期待値(確率)を計算できる .
- [116] Sandip Sen and Edmund H. Durfee. The role of commitment in cooperative negotiation. *International Journal on Intelligent and Cooperative Information Systems*, Vol. 3, No. 1, pp. 67–81, 1994.
エージェント間の協調において commitment が重要であることを論じた論文 . タスクスケジューリングを例として , commitment の有効性を述べている .
- [117] Sandip Sen and Edmund H. Durfee. A formal study of distributed meeting scheduling. *Group Decision and Negotiation*, pp. 265–289, 1998.
会議スケジューリングを形式的に分析した論文 . ただし , ここではユーザの好みは考慮に入れられていない .
- [118] 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.
ユーザの選好を基に会議スケジュールを設定するシステムを提案している . ここでは , エージェントは , 投票に基づいて会議のスケジューリングを行っている .

- [119] Toramatsu Shintani. A rule based consistency maintenance for subjective judgements. In *Proceedings of International Conference on Information Technology, Commemorating the 30th Anniversary of The Information Processing Society of Japan, Part:2*, pp. 179–186, 1990.
 新谷先生の論文 . CDSS において , ルールに基づいて主観的評価の一貫性を管理する手法を示した論文 . 第 3 章における選好の翻意手法の基になった論文 .
- [120] Toramatsu Shintani. A consistency maintenance mechanism for subjective judgments and its application. *Lecture Notes in Artificial Intelligence 485*, pp. pp.163–173, 1991.
 新谷先生の論文 . CDSS における主観的評価の整合性管理とその応用に関する論文 .
- [121] 新谷虎松. デフォルト制約に基づく主観的評価の一貫性保持機構について. ソフトウェア科学会論文誌, Vol. 8, No. 4, pp. 45–55, 1991.
 新谷先生の論文 . 主観的評価の一貫性保持機構を論じた論文 . 第 3 章の , GCDSS における , エージェント間の説得において , AHP における主観的評価の調整において , 一対比較値を 2 区間の範囲で調整する手法の基になった論文 .
- [122] 新谷虎松. ルールに基づく代替案選択支援機構の実現. 人工知能学会論文誌, Vol. 7, No. 3, pp. 463–474, 1992.
 本研究の GCDSS の基になった CDSS の論文 . CDSS では KORE/IE を用いて , AHP における一対比較の整合性が管理されている . 会議スケジューリングのためのエージェント間の交渉にゲーム理論を適用するという研究を行っている時に , 本論文を頂いた . この論文に基づいた新たな方向性として , グループで CDSS を使う場合に , エージェント間の合意形成を導入するというアイデアを実現したのが文献 [57] である .
- [123] Toramatsu Shintani. Implementing a distributed knowledge programming environment for developing intelligent decision support systems. In *Proceedings of Third International Conference on Automation, Robotics and Computer Vision (ICARCV-94)*, pp. 1364–1368, 1994.

新谷先生の論文 . Simon の意思決定プロセス [126][127] を分析することにより , 知的な意思決定支援システムを構築するために必要となる知識プログラミング開発支援環境について論じている .

- [124] Toramatsu Shintani and Takayuki Ito. An architecture for multi-agent negotiation using private preferences in a meeting scheduler. In *Proceedings of the 5th Pacific Rim International Conferences on Artificial Intelligence (PRICAI-98)(Lecture Notes in Artificial Intelligence 1531 PRICAI'98: Topics in Artificial Intelligence)*, pp. 47–58. Springer, August 1998.

PRICAI98 で新谷先生が発表された論文 . 新谷先生がファーストオーサーである論文に初めて共著とさせていただいた記念すべき論文 .

- [125] Carles Sierra, Nick R. Jennings, Pablo Noriega, and Michael Wooldridge. A framewok for argumentation-based negotiation. In Munindar P. Sigh, Anand Rao, and Michael J. Wooldridge, editors, *Proceedings of the fourth International Workshop on Agent Theories, Architectures and Languages (ATAL-97)*, Lecture Notes in Artificial Intelligence 1365, pp. 177–192, 1997.

エージェント間の説得的な交渉を会話理論に基づく討論 (argument) として定義した論文 . 発話内行為として appeal , threaten , および reward などを用意し , これらの発話内行為を基に説得的な議論を生成する .

- [126] Herbert Alexander Simon. *The New Science of Management Decisions*. Prentice hall, 1977.

Herbart A. Simon の意思決定の 3 フェーズが述べられた代表的な著書 . 第 4 フェーズは後に加えられた .

- [127] Herbert Alexander Simon. 意思決定の科学. 産業能率大学出版部, 1979. (稲葉 , 他訳)
文献 [126] の日本語訳 .

- [128] Reid G. Smith. The contract net protocol: High-level communication and control in a distributed problem solver. In *IEEE*

- Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, pp. 1104–1113, December 1980.
契約ネットプロトコルの原著.
- [129] Venkat Srinivasan and Bharat Rupapeli. Cgx: An expert support system for credit granting. *European Journal of Operational Research*, Vol. 45, pp. 293–308, 1990.
銀行の融資を支援する AHP に基づく知的意思決定支援システム CGX を提案した論文 . CGX は , ルールベースを持ち , そのルールベースは各顧客の評価に関するルールからなる . CGX は , これらのルールを用いて AHP の各一対比較値を推測する .
- [130] 鈴木光男. 社会システム - ゲーム論的アプローチ -, エンジニアリング・サイエンス講座, 第 32 卷. 共立出版, 1976.
ゲーム理論における n 人協調ゲームに焦点が当てられている本 . 特に特性関数の作り方の例が興味深い .
- [131] 鈴木光男. ゲーム理論入門. 共立出版, 1981.
ゲーム理論の数学的な教科書 . 筆者は修士時代にこの本を数式と格闘しながら読んだ .
- [132] 鈴木光男. 新ゲーム理論. 効草書房, 1994.
ゲーム理論を学ぶならこの本が最適 . 非協力ゲーム , 協力ゲーム , およびゲーム理論の歴史などが , 懇切丁寧に解説されている .
- [133] 鈴木光男. ゲーム理論の世界. 効草書房, 1999.
ゲーム理論の歴史を , フォンノイマン・モルゲンシュテルンの著書「*Theory of Games and Economic Behavior*」, および , 著者のゲーム理論との深く長い関わりを通して , 明快に書き上げられた本 . ゲーム理論の歴史を知ることができる良書である .
- [134] Katia P. Sycara. Resolving goal conflicts via negotiation. In *Proceedings of Fifth National Conference on Artificial Intelligence*, pp. 245–250, 1988.
マルチエージェントシステムしての PERSUADER を述べた論文 .

- [135] Katia P. Sycara. Argumentation : Planning other agents' plans. In *Proceedings on International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-89)*, pp. 517–523, 1989.
 PERSUADERの説得的議論モデルとその生成メカニズムを述べた論文 .
- [136] Katia P. Sycara. Multiagent systems. *AI Magazine*, Vol. 19, No. 2, pp. 79–92, 1998.
 マルチエージェントシステムの総括的なサーベイ論文 .
- [137] Katia Sycara-Cyranski. Arguments of persuasion in labor mediation. In *Proceedings of International Joint Conference on Artificial Intelligence(IJCAI-85)*, pp. 294–296, 1985.
 PERSUADERの最初の論文 . 労働組合と企業間の労働争議における , 議論生成プロセスを提案した論文 .
- [138] Group Decision Support Systems. About questmap(tm) software. Web page. <http://www.gdss.com/> Questmap/aboutQP.htm ,
 gIBIS および QuestMap の会社 . IBIS モデルの解説が分かりやすい .
- [139] 竹田英二. 不完全一対比較行列における ahp ウェイトの計算法. オペレーションズ・リサーチ, Vol. 34, No. 4, pp. pp.169–172, 1989.
 AHP の一対比較行列が不完全な場合に , ウェイトを推定する Harker 法について説明した論文 . これは AHP では一対比較の数が膨大になるので , その数を減らすために考案された方法である .
- [140] 刀根薰. ゲーム感覚意思決定法 - AHP 入門 - . 日科技連出版社, 1986.
 Analytic Hierarchy Process (AHP) に関しての入門書 . AHP の概要を知るためにまずは本書を読むと良い . 良書である .
- [141] 東芝 S&S 研究所. Plangent. Web page.
<http://www2.toshiba.co.jp/plangent/> ,
 Plangent のホームページ .

- [142] Efraim Turban and Jay E. Aronson. *Decision Support Systems and Intelligent Systems*. Prentice-Hall, Inc., fifth edition, 1998.

意思決定支援と Artificial Intelligence を総括的に述べた本。意思決定支援に関しては大変良くまとまっている。意思決定支援と Artificial Intelligence の関連する事項に関する記述がやや少ない。本書は、ロングセラーとなっている。また、値段がまちまちであり \$30 のところもあれば 10000 円で売っているところもある。微妙にバージョンの違いがあるようで（International version とかそうでないものとか）海外で買うと安い。

- [143] 宇井徹雄. 意思決定支援とグループウェア. 共立出版, 1995.

意思決定支援というよりは、グループウェアについて的一般的な入門書。グループウェアについて初心者は良い導入にはなるが、細部に曖昧な記述があるため、各参考文献の原著を読むことをすすめる。またゲーム理論に関しては、本書はおすすめできない。

- [144] Gerhard Weiss, editor. *Multiagent systems: a modern approach to distributed artificial intelligence*. The MIT Press, 1999.

マルチエージェントシステムに関する始めての統一的な本。前半はマルチエージェントの基本であり、初心者に最適。内容が古い箇所がある点や、エージェントという言葉の定義が全体としては一貫していない点を除けば、良書と言える。マルチエージェントに関する研究者必須の本。筆者が初めて情報処理学会から書評を依頼されたのがこの本であった。筆者のグループ (SIG-MADS) で分担してほぼ 2/3 の全訳を作成した。

- [145] James E. White. Mobile agents. In Jeffrey M. Bradshaw, editor, *Software Agents*, chapter 19, pp. 437–472. AAAI Press/The MIT Press, 1997.

モバイルエージェントの初期の論文。General Magic 社の Telescript の紹介のような論文のために、その影響が大きい。

- [146] Mike Wooldridge and Nicholas R. Jennings. Intelligent agents: Theory and practice. *The Knowledge Engineering Review*, Vol. 10, No. 2, pp. 115–152, 1995.

エージェントの理論、アーキテクチャ、および言語に関する

総括的なサーベイ論文 . 国際ワークショップ ATAL の成果が多く含まれている .

- [147] Peter R. Wurman, William E. Walsh, and Michael P. Wellman. Flexible double auctions for electronic commerce: theory and implementation. In *Decision Support Systems*, Vol. 24, pp. 17–27, 1998.

複数の売り手と複数の買い手から成るダブルオークションにおいて効果のあるオークションルールを論じた論文 . 第 $(M+1)$ 値格秘密入札オークションが , 買い手にとって Incentive compatible(エージェントが本当の評価値を申告することが支配戦略となること)であり , 第 M 値格秘密入札オークションが売り手にとって Incentive compatible であることを示した . さらに入札アルゴリズムについても論じている .

- [148] 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 Second International Conference on Autonomous Agents (Agents-98)*, 1998.

AuctionBot の論文 . AuctionBot の利用者は , 品物を売るためにオークションを生成する . そのオークションにおいて , 代理となるエージェントが売り手および買い手となり , 前もって定義されたオークションプロトコルに従って取り引きを行う . AuctionBot の特長は , 利用者が自分自身のエージェントを作成できるような API を提供している点である . Kasbah とオークションを掛け合せたような論文 . ICMAS2000 では , AuctionBot を使った competition が行われる予定 .

- [149] 山田善靖. 集団意思決定支援システム. オペレーションズ・リサーチ, pp. 124–128, March 1988.

グループ意思決定の概観と , それを支援するための情報技術としての GDSS について論じられた論文 .

- [150] 山田善靖. 情報技術を用いる集団意思決定の支援-集団意思決定支援システムを中心として-. オペレーションズ・リサーチ, pp. 531–537, 11 1991.

GDSS と GDSS がグループの意思決定活動にどのような影響を与えるかを論じた論文。

- [151] 山田雄一. 稟議と根回し. 講談社, 1985.
稟議と根回しに関する読み物。会社のなかでどのように生き抜いていくか、というテーマで、稟議や根回しの重要性が述べられる。読み物なので、明確な定義はないが、面白い。
- [152] 柳沢洋, 村上国男. マルチエージェントシステムの合意形成方式. 情報処理学会論文誌, Vol. 36, No. 6, pp. 1387–1395, June 1995.
人間の代理としてエージェントが合意形成をするシステムを提案した論文。本研究の内容に非常に近いが、具体的な内容があまり触れられていない。
- [153] 横尾真. インターネットオークションの理論と応用. Technical report, 人工知能学会研究会資料 (SIG-KBS-9803-5), 1999.
オークション理論の紹介とオンラインオークションの紹介。オークション理論の部分は文献 [102] を日本語で解説してあり読みやすめ易い。
- [154] Dajun Zeng and Katia Sycara. Benefits of learning in negotiation. In *Fourteenth National Conference on Artificial Intelligence (AAAI-97)*, pp. 36–41, July 1997.
逐次的な意思決定プロセスにおける交渉プロセスを定式化し、その上で学習メカニズムを提案している論文。2エージェント間の交渉において、提案と提案に対する受理または拒否が繰り返される。
- [155] Gilad Zlotkin and Jeffrey S. Rosenschein. A domain theory for task oriented negotiation. In *Proceedings of the Thirteenth International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-93)*, pp. 416–422, 1993.
エージェント間の相互作用をゲーム理論で解析した論文。特にタスク指向領域におけるエージェント間の合意形成機構に関する解析が示されている。
- [156] Gilad Zlotkin and Jeffrey S. Rosenschein. Coalition, cryptography, and stability: Mechanisms for coalition formation in

task oriented domains. In *Proceedings of the National Conference on Artificial Intelligence (AAAI-94)*, pp. 432–437, August 1994.

凸なタスク指向領域においてエージェント間の交渉をゲーム理論の提携ゲームとして定式化した論文。最初に提携に加わるエージェントをどのように決定するかという問題に対して、ランダムな順列に基づく合意形成方式を提案している点が興味深い。私の初期のゲーム理論を用いたエージェント間の交渉のアイデアはこの論文を読んだ時に浮かんだ。

- [157] Constantin Zopounidis, Michael Doumpos, and Nikolaos F. Matsatsinis. On the use of knowledge-based decision support systems in financial management: A survey. *Decision Support Systems*, Vol. 20, pp. 259–277, 1997.

Artificial Intelligence のテクニックが用いられている意思決定支援システムのサーベイ論文。

- [158] 三菱電機. Conrordia - java mobile agent technology. Web page. <http://www.meitca.com/> HSL/ Projects/ Concordia/ , Concordia のホームページ。

各関連文献に、その文献の内容や想い出に関するコメントを付した。また行頭の記号は、その文献に対する筆者の主観的評価であり、本研究の関連性や筆者の興味などに基づいたものである。各記号の意味は以下の通りである。

= 秀逸な文献である。必ず読んで頂きたい。

= 興味深い文献である。是非読んで頂きたい。

= 良い文献である。読んで頂きたい。

原著となった発表論文一覧

International Journal

1. Takayuki Ito and Toramatsu Shintani.: “An Utility Revision Mechanism based on User’s Subjective Decision Hierarchy for Multi-agent based Group Decision Support Systems,” Journal of Advanced Computational Intelligence, Fuji Technology Press Ltd., 2000 (to appear).
2. Takayuki Ito and Toramatsu Shintani.: “Persuasion based on Exchangins for Cooperative Scheduling,” Systems and Computers in Japan, John Wiley & Sons, Inc., May, 1999 Vol.30, No.7, pp.1-8, June 30, 1999.
3. Takayuki Ito and Toramatsu Shintani.: “On a Mechanism of Persuasion Among Agents for Group Choice Design Supprt Systems,” Systems and Computers in Japan, pp.20-28, Vol. 29, No. 5, John Wiley & Sons, Inc., May, 1998.
4. Takayuki Ito and Toramatsu Shintani.: “An Agenda-scheduling System Based on Persuasion Among Agents,” In the Proceedings of the IPSJ International Symposium on Information Systems and Technologies for Network Society (Book), pp.287-294, World Scientific, Fukuoka, JAPAN, September 1997.

論文誌（国内）

1. 伊藤孝行, 新谷虎松: “モバイルエージェント間の多重交渉に基づくグループ代替案選択支援システムについて”, 情報処理学会論文誌, Vol.39 , No.12, pp.3165-3176, 情報処理学会, 1998.
2. 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, D-I, Vol. J81-D-I, No.9, pp.1099-1106, 電子情報通信学会, 1998.

3. 伊藤孝行, 新谷虎松: “グループ代替案選択支援システムにおけるエージェント間の説得機構について”, 電子情報通信学会論文誌, D-II, Vol. J80-D-II, No.10, pp.2780-2789, 電子情報通信学会, 1997 .

International Conference

1. Takayuki Ito and Toramatsu Shintani.: “Persuasion among Agents : An Approach to Implementing a Group Decision Support System Based on Multi-Agent Negotiation,” In the Proceedings of the 15th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-97), pp.592-597, Morgan Kaufmann, Nagoya, Japan, August 1997.
2. Takayuki Ito and Toramatsu Shintani.: “Implementing an agent negotiation protocol based on persuasion,” In the Proceedings of the Second International Conference on Multiagent Systems (ICMAS-96), p.443, AAAI Press, Kyoto, Japan, December 1996.
3. Takayuki Ito and Toramatsu Shintani.: “An Approach to a Multi-agent Based Scheduling System Using a Coalition Formation,” In the Proceedings of the Ninth International Conference on Industrial & Engineering Applications of Artificial Intelligence and Expert Systems (IEA/AIE-96), p.780. Gordon and Breach Science Publishers, Fukuoka, Japan, June 1996.
4. Toramatsu Shintani and Takayuki Ito.: “Architecture for Multi-Agent Negotiation Using Private Preferences in a Meeting Scheduler,” In the Proceedings of the 5th Pacific Rim International Conferences on Artificial Intelligence (PRICAI-98) , pp.47-58,1998.
5. Takayuki Ito and Toramatsu Shintani.: “Utility Revision in A Java-based Group Decision Support System,” In the Proceedings of the 5th Pacific Rim International Conferences on Artificial Intelligence (PRICAI-98) Workshop on Java-based Intelligent Systems, pp.61-72, 1998.
6. Takayuki Ito and Toramatsu Shintani,: “A Utility Revision Mechanism Among Agents Based on User’s Uncertain Judgements,”

- In the Proceedings of International Conference, Intelligent Systems and Control(ISC-99), pp.258–263, 1999.
7. Hiromitsu Hattori, Takayuki Ito and Toramatsu Shintani,: “An Approach to Improving Quality and Facilitating Consensus in Negotiation Among Agents,” In the Proceedings of International Conference, Intelligent Systems and Control(ISC-99), pp.252–257, 1999.
 8. Takayuki Ito, Naoki Fukuta, Toramatsu Shintani, and Katia Sycara, “*BiddingBot*: A Multiagent Support System for Cooperative Bidding in Multiple Auctions,” submitted to the Fourth International Conference on Multi Agent Systems (ICMAS-2000), 2000.
 9. Toramatsu Shintani, Takayuki Ito, and Katia Sycara, “Multiple Negotiations among Agents for a Distributed Meeting Scheduler,” submitted to the Fourth International Conference on Multi Agent Systems (ICMAS-2000), 2000.
 10. Naoki Fukuta, Takayuki Ito, Toramatsu Shintani, and Katia Sycara, “Weblog: A Logic Based Description Language for Information Gathering Agents in WWW,” submitted to the Fourth International Conference on Multi Agent Systems (ICMAS-2000), 2000.

修士論文

1. 伊藤孝行: “グループ意思決定支援システムのためのエージェント間の合意形成機構に関する研究”, 名古屋工業大学, 1997.

卒業論文

1. 伊藤孝行: “事例ベース推論に基づくグループ意思決定支援システムの試作 - コンピュータ購入決定支援システムの実現 - ”, 名古屋工業大学, 1995.

全国大会，研究会の論文

1. 伊藤孝行, 新谷虎松: “分散 ATMS に基づくスケジュール管理システムの実現”, 第 8 回人工知能学会全国大会論文集, 人工知能学会, pp. 273-276, 1994.
2. 伊藤孝行, 新谷虎松: “事例ベース推論に基づくコンピュータ購入決定支援システムの実現”, 第 50 回情報処理学会全国大会論文集 (2), 情報処理学会, pp. 137-138, 1995.
3. 伊藤孝行, 新谷虎松: “エージェント間の提携形成に基づくスケジューリングシステムの実現”, 第 52 回情報処理学会全国大会論文集, 情報処理学会, pp. 3-4, 1996.
4. 伊藤孝行, 新谷虎松: “説得と根回しに基づくエージェント間の交渉とその応用について”, 第 10 回人工知能学会全国大会論文集, 人工知能学会, pp. 151-154, 1996.
5. 伊藤孝行, 新谷虎松: “エージェント間の説得に基づくグループ意思決定支援システムの試作”, 平成 8 年度電気関係学会東海支部連合大会論文集, p.305, 1996.
6. 伊藤孝行, 新谷虎松: “AHP を用いたエージェント間の説得による合意形成について”, 第 54 回情報処理学会全国大会論文集, 情報処理学会, pp. 111-112, 1997.
7. 伊藤孝行, 新谷虎松: “マルチエージェントにおける説得に基づく会議スケジューリングについて”, 人工知能基礎論研究会 (第 28 回), 人工知能学会, pp.80-85, 1997.
8. 伊藤孝行, 新谷虎松: “エージェント間の合意形成のための保留に基づく会議スケジューリングについて”, 第 11 回人工知能学会全国大会論文集, 人工知能学会, pp. 127-128, 1997.
9. 伊藤孝行, 新谷虎松: “モバイルエージェント間の交渉に基づくグループ意思決定支援システムの試作”, 平成 9 年度電気関係学会東海支部連合大会論文集, p.308, 1997.
10. 伊藤孝行, 新谷虎松: “エージェント間の説得に基づく議事スケジューリングについて”, 1997 年電子情報通信学界ソサエティ大会併設特集シンポジウム「ソフトウェアエージェントとその応用」論文集, pp.120-125, 1997.
11. 伊藤孝行, 新谷虎松: “モバイルエージェントの知的な移動に基づく交渉方式について”, 第 56 回情報処理学会全国大会論文集 (2), 情報処理学会, pp.412-413, 1998.

12. 伊藤孝行, 新谷虎松: “マルチエージェント環境におけるユーザの好みに基づく ATMS とその応用について”, 第 12 回人工知能学会全国大会論文集, 人工知能学会, pp. 542-543, 1998.
13. 伊藤孝行, 新谷虎松: “マルチエージェントスケジューリングシステムにおける好みに基づく分散 ATMS について”, 第 57 回情報処理学会全国大会論文集, 情報処理学会, pp.392-393, 1998.
14. 伊藤孝行, 新谷虎松: “好みに基づく分散 ATMS を用いたグループスケジュール管理システムについて”, 人工知能基礎論研究会(第 34 回), 人工知能学会, pp.75-80, 1998.
15. 伊藤孝行, 新谷虎松: “エージェント間の多重交渉に基づくグループ意思決定支援システムについて”, 第 58 回情報処理学会全国大会論文集 (2), 情報処理学会, pp.211-212, 1999.
16. 伊藤孝行, 新谷虎松: “エージェント間交渉に基づくグループ意思決定支援システム GCDSS の実験的評価”, 第 13 回人工知能学会全国大会論文集, 人工知能学会, pp. 417-420, 1999.
17. 伊藤孝行, 福田直樹, 新谷虎松: “マルチエージェント入札支援システム BiddingBot におけるエージェント間の協調的入札機構について”, 第 8 回マルチエージェントと協調計算国際ワークショップ (MACC-99), 1999 .

その他の論文

1. 川上義雄, 伊藤孝行, 新谷虎松: “分散 ATMS に基づくスケジュール管理システムの実現”, 第 9 回人工知能学会全国大会論文集, pp.273-276 , 1994.
2. 植野憲克, 伊藤孝行, 新谷虎松: “提携ゲ - ムに基づく旅行計画支援システムの実現”, 人工知能学会第 10 回全国大会論文集, pp.147-150 , 1996.
3. 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, 人工知能学会, pp.564-565 , 1998.
4. 水口卓也, 伊藤孝行, 新谷虎松: “情報検索エージェントを用いたグループ発想支援システムの試作について”, 第 56 回情報処理学会全国大会論文集 (4), 情報処理学会, 1998.
5. 水谷篤志, 伊藤孝行, 新谷虎松: “モバイルエージェント間の説得を用いたスケジュール競合の回避について”, 第 56 回情報処

- 理学会全国大会論文集(2), 情報処理学会, pp.414-415, 1998.
6. 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), 情報処理学会, pp.402-403, 1998.
 7. 服部宏充, 伊藤孝行, 新谷虎松: “根回しに基づいた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論文集, p.287, 1998.
 8. 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), 情報処理学会, pp.209-210, 1999.
 9. 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, 人工知能学会, pp.421-424, 1999.
 10. 福田直樹, 伊藤孝行, 新谷虎松: “Weblog: WWWにおける情報収集エージェントのための論理型記述言語の実現”, 第8回マルチエージェントと協調計算国際ワークショップ(MACC-99), 1999.

付 錄 A

GCDSSの実行例

A.1 グループ意思決定支援過程の例

本章では、3人のグループでスキーに行く時にスキー場を選択するというケースを例題としてグループ代替案選択支援システム GCDSS の実行例を示す。

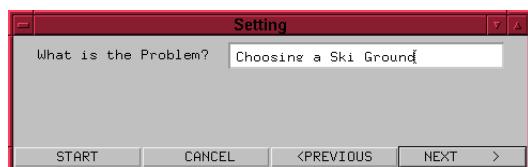


図 A.1: 意思決定問題の入力

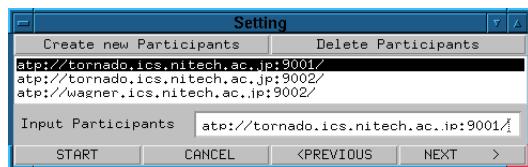


図 A.2: 参加者の指定

図 A.1 は、ホストユーザが、グループとしての意思決定問題を入力するウィンドウである。ここでは問題として「Choosing a Ski

Ground」と入力している。図 A.2 は、ホストユーザが参加者の端末を指定するウィンドウである。リスト中の各要素は、それぞれ端末上の Aglets Server を示している。

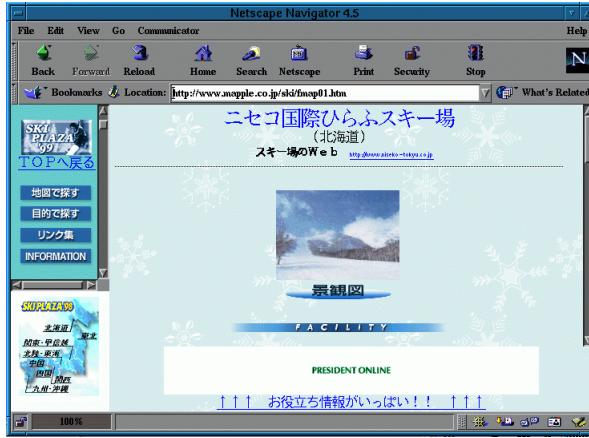


図 A.3: Web ブラウザによる情報取得

図 A.3, 図 A.4, および図 A.5 では、各参加者は、ブレインストーミングに基づいて代替案であるスキー場を選択する。まず、各参加者は図 A.3 のように、Web ブラウザを用いてスキー場の情報を取得することができる。ここでは、日本全国のスキー場の情報を集めたページ (www.mapple.co.jp) を用いている。

図 A.4 のウィンドウで代替案となり得るスキー場を選択する。右側のリストから代替案とすべきスキー場を選択すると、左側のリストへ挿入される。左側のリストに挿入されたスキー場名はすべてのユーザの共有の代替案となる。

すべてのユーザの共有の代替案は、図 A.5 の右のウィンドウのように全体としての代替案として登録される。代替案が決定したら、ホストユーザは各ユーザに、AHP 管理エージェントを送信する。

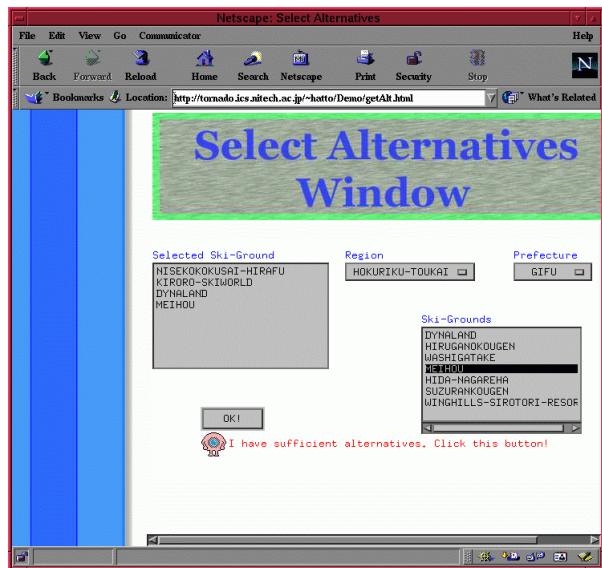


図 A.4: 代替案の作成

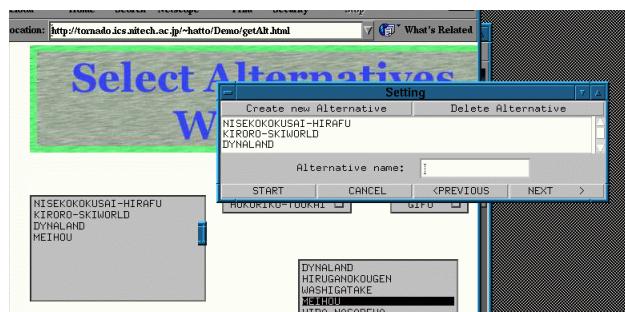


図 A.5: 代替案の登録

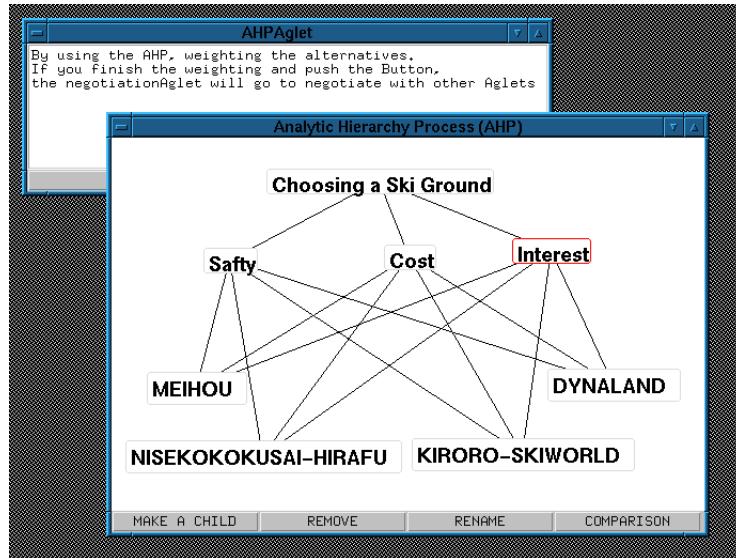


図 A.6: AHP 機構と AHP 管理工エージェント

各参加者にはそれぞれ AHP 機構が割り当てる。図 A.6 の下のウィンドウは AHP の意思決定木構築機構であり、上のウィンドウはこの意思決定木構築機構を管理するエージェントである AHP 管理工エージェントを表している。

ユーザはそれぞれ、図 A.7 のように AHP 機構を用いて、意思決定木を生成し、一対比較を行う。図 A.7 の右上のウィンドウが一対比較機構である。図 A.7 の下のウィンドウは一対比較行列を表すウィンドウを表す。図 A.7 の左上のウィンドウは意思決定木構築機構である。

図 A.8 はエージェントが実際に交渉している状況を示す。右下のウィンドウに、エージェントの交渉過程が示される。図 A.8 の左上や左下のウィンドウは、他の参加者の意思決定木が示され、どの一対比較がエージェントによって変更されているかが示されている。

図 A.9 は、エージェントの多重交渉の様子を視覚化しているウィンドウである。一つのウィンドウが多重交渉における一つのパートナーと一致する。一つ一つのウィンドウを交渉ビューワと呼ぶ。交渉ビューワの詳細は次節で述べる。

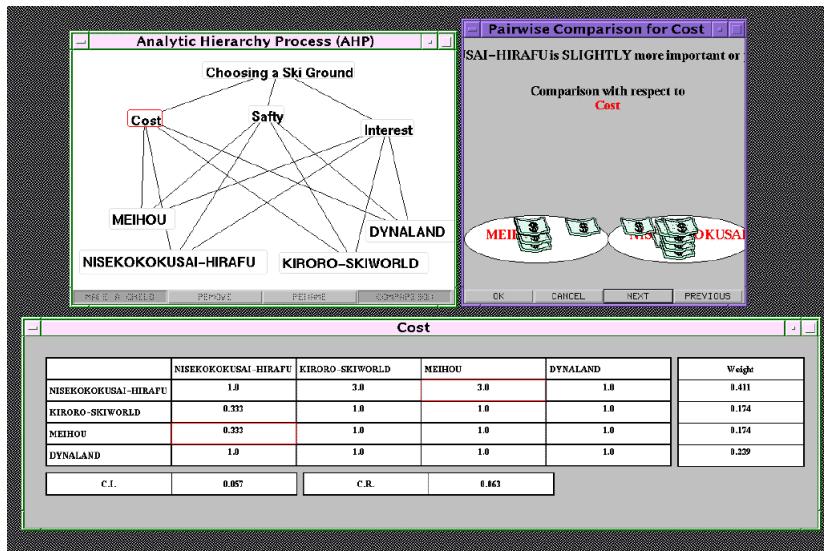


図 A.7: AHP 機構に基づく意思決定

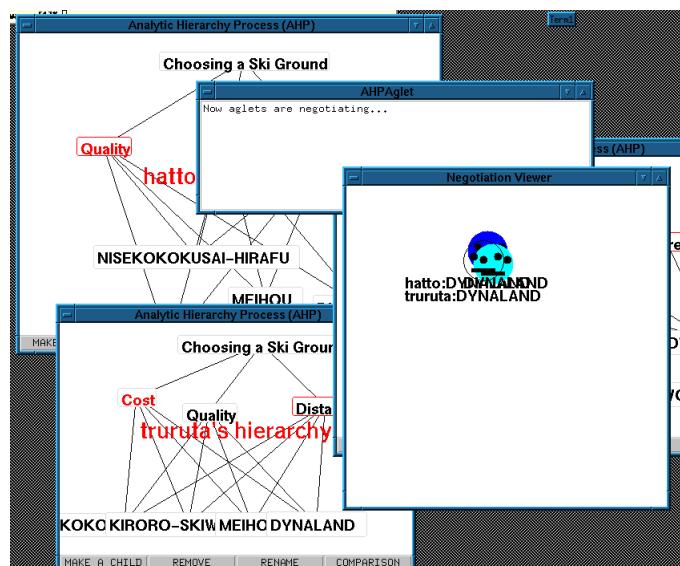


図 A.8: 意思決定木の変更点の視覚化

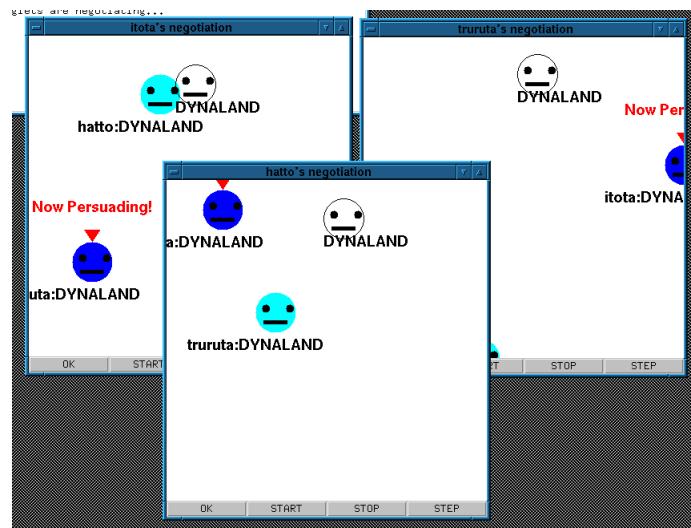


図 A.9: 多重交渉の視覚化

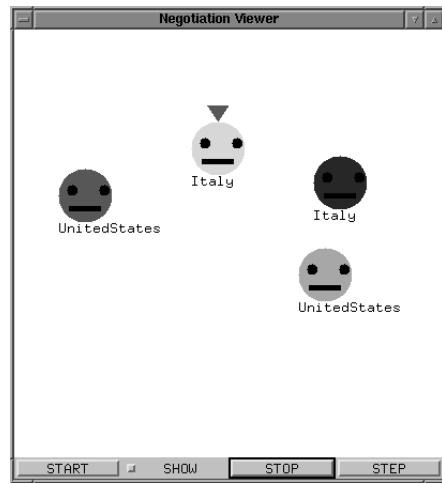


図 A.10: 交渉ビューウー

A.2 交渉ビューウー

図 A.10 に交渉過程をリアルタイムにユーザに伝える交渉ビューウーを示す。丸い図形が各参加者の交渉エージェントを示しており、グループ毎に色分けされて表示されている。交渉エージェントの下には、各交渉エージェントの参加者の最も好む代替案が表示されている。丸い図形の上に赤い逆三角形が付いている交渉エージェントがこの交渉ビューウーを見ている参加者の交渉エージェントである。参加者は『START』ボタンによって交渉をスタートさせることができる。『SHOW』ボタンを押すことによって、各交渉エージェントの情報の詳細が表示される。『STOP』ボタンによって交渉を一時停止したり、『STEP』ボタンによってステップバイステップで交渉を進めることができる。

ユーザへの交渉過程の説明は以下のように視覚的に行われる。交渉エージェントは説得されると、説得した交渉エージェントと同じ色になり、かつ、説得した交渉エージェントと位置を近付けることによって説得されたことを表す。最終的にすべてのエージェントが同じ色になればすべての説得が成功したことを示し、同じ色にならなければ説得が成功していないことを示す。エージェントの色の数によって異なる意見が幾つ存在するかが分かる。ユーザは交渉中に、『STOP』ボタンによって交渉を一時停止し、自分のエージェントを

クリックすることによって、意思決定木とその中の一対比較値の変更が可能である。変更された意思決定木や一対比較値は、他のホスト上で他の交渉パターンを実行しているその交渉エージェントの複製にも伝えられる。ユーザは、何度も意思決定木やその一対比較値を変更することによって交渉結果を恣意的に変化させることができるのである。

ユーザの代理人をつとめるようなエージェントを実装する際に重要な事項は、「ユーザがシステムに対して制御しているという感覚を与えること」[94]である。そこで本システムでは、交渉結果を変えようと思えば変えられるという、システムを制御しているという感覚を与えるために、交渉結果を変化させることもそのユーザの意見であるとする。例えば、あるユーザが誰の説得も受け入れないというような恣意的な意思決定木やその一対比較値の変更をするならば、そのユーザを除いた部分的な合意でも価値があるとする。

A.3 ラベルの付け替えの例

図 A.11 に、第 4 章で示したラベルの付け替えの例を示す。図 A.11 の上に示す (a) は初期の意思決定木を示し、図 A.11 の下に示す (b) はラベルの付け替えを行った後の意思決定木を示す。ここでの問題は「Choosing a Destination (旅行の行き先の選択)」である。代替案は「Los Angeles」、「San Francisco」、および「Las Vegas」である。確定的な評価基準か不確定な評価基準かは色によって視覚的に区別できるようにする。図 A.11 で、白い四角で示した「Interest」と「Safety」は、不確定な評価基準であり「Casino」「Sightseeing」、および「Cost」という名前の黒い四角は、確定的な評価基準を表している。評価基準に対するラベル *ACCEPT* は、各評価基準の上に示されている。本例では、初期の状態で、代替案「San Francisco」で説得されたとする。初期の状態で最も好ましい代替案が「Los Angeles」であるが、評価基準「Hobby」のラベルを *ACCEPT* から *IGNORE* に付け替えることによって、図 A.11 の下の (b) で示すとおり、代替案「Los Angeles」よりも代替案「San Francisco」の方が、重みが大きくなっている。すなわち、最も好ましい代替案が「San Francisco」に変更され、かつ説得が成功したことが分かる。

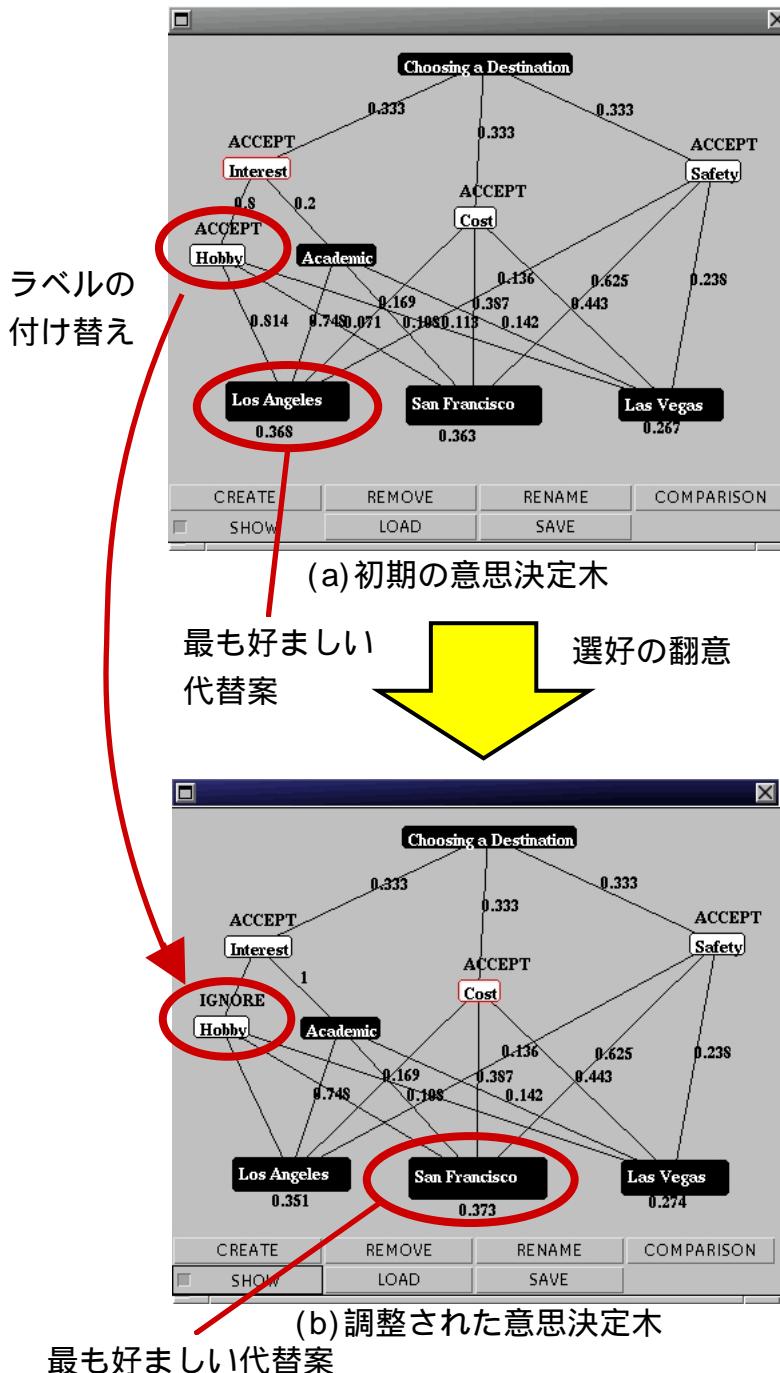


図 A.11: ラベル付け替えの例

付 錄B

AHPの概要

意思決定プロセスにおいて、第一に問題を明確に定義する。第二に明確に定義された問題を解決するためのいくつかの解決策や計画案を作成する。作成された解決策や計画案をここでは代替案と呼ぶ。第三に、いくつかの代替案のなかからリーズナブルな代替案を選択する必要がある。この時、代替案の客観的に比較評価が可能である場合と主観的な評価に頼らざるを得ない場合がある。AHP (Analytic Hierarchy Process) [108] は、問題構造の明確化と選択問題に威力を発揮する伝統的な手法であり、主観的評価に頼らざるを得ない問題をも扱うことを可能とする手法である。AHP に関する入門文献としては文献 [71][91][140] がある。

AHP では、問題構造を明確化するために、意思決定における問題 (Problem) または目的 (Goal) を分解し、評価基準 (Criteria) または目標 (Objectives)、代替案 (Alternatives) の関係でとらえて階層構造を構築する。例として、海外旅行における行き先の選択問題に AHP を用いた場合を示す。階層構造は図 B.1 のようになつたと仮定する¹。

問題 (Problem) または目的 (Goal) : 総合的な目標を総括したもの。

図 B.1 の例では”海外旅行の行き先の選定”となる。

評価基準 (Criteria) または目標 (Objectives) : 目的は目標を満たす

¹ 図 B.1 と図 B.2 は、筆者がプログラミング言語 Java で実装した AHP 機構プログラムのスナップショットである。ウィンドウの下にあるボタンは、階層構造を生成するため、および、データの保存・読み込み、そのためのボタンである。ユーザは問題や評価基準をダブルクリックすることによって一対比較を行うことができる。

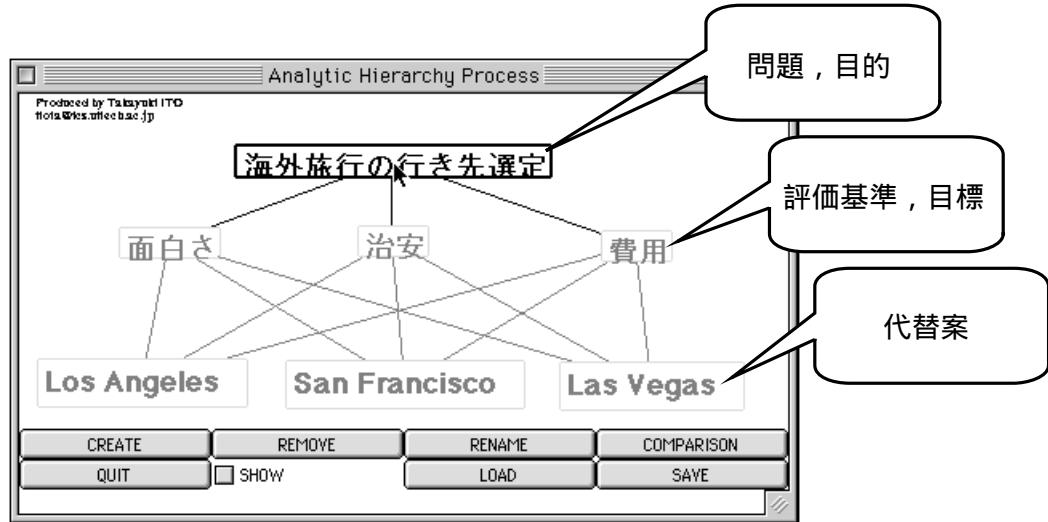


図 B.1: 海外旅行の行き先選択問題の階層構造

ことによって達成される。評価基準は、どの代替案がどれくらい目標を満たしているかを評価するために使う。評価基準と目標という言葉は、語彙論的には類義語ではないが、AHPによる解析では類義語として扱われることが多い。図 B.1 の例では”面白さ”，“治安”，“費用”である。

代替案 (Alternatives): 最終的な目的を達成するための選択肢。図 B.1 の例では，“Los Angeles”，“San Francisco”，“Las Vegas”である。

AHPはより複雑な階層構造もサポートできる。評価基準をさらに分解し、副評価基準、さらに分解し、副副評価基準、…、と細かく問題を分割することが可能である。細かく階層的に分析することによって、複雑でかつ構造の不明確な問題を整理することができる。例えば、図 B.1において、評価基準“費用”を，“移動費用”に関する費用と“宿泊費用”に関する費用のように副評価基準に分解することができる(図 B.2)。

AHPでは階層構造のあるレベルの要素を一つ上のレベルの要素を評価基準として一対比較を行ない、その相対的なウェイトを決定する。例えば、図 B.1では、”海外旅行の行き先の選定”を評価基準として、”面白さ”，“治安”，“費用”に関して一対比較を行ない、ウェ

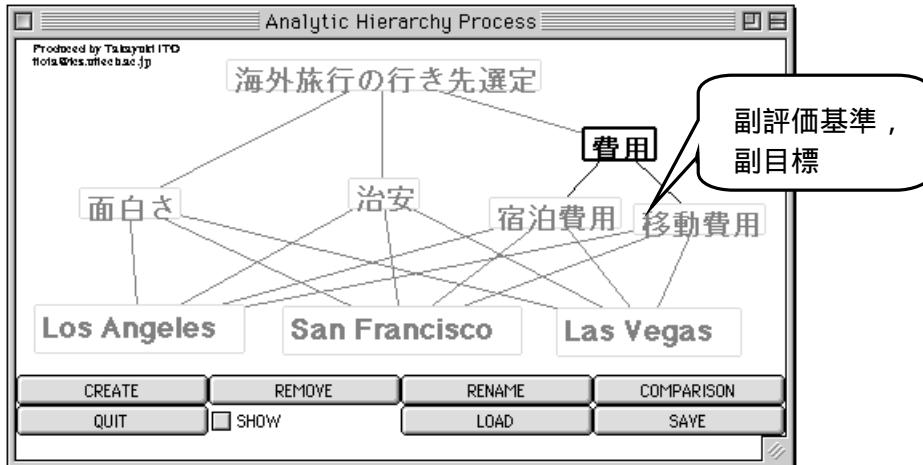


図 B.2: より複雑な階層構造

表 B.1: “海外旅行の行き先の選定” について

評価基準	ウェイト
面白さ	0.614411
治安	0.117221
費用	0.268369

イトを決定する。同様に代替案についても，“面白さ”，“治安”，“費用”をそれぞれ評価基準としてウェイトを決定する。一对比較の方法は後に述べる。例えば、図B.1のウェイトがそれぞれ表B.1、表B.2、表B.3、表B.4のように決定されたとする。

以上のように決定したら、最後に“海外旅行の行き先の選定”に関する各代替案の総合的なウェイトを求める。まず表B.1から、

$$\begin{array}{ll} \text{面白さ} & [0.614411] \\ \text{治安} & [0.117221] \\ \text{費用} & [0.268369] \end{array} \quad (B.1)$$

とできる。

そして、表B.2、表B.3、表B.4より、

表 B.2: “面白さ” について

評価基準	ウェイト
Los Angeles	0.075200
San Francisco	0.182955
Las Vegas	0.748184

表 B.3: “治安” について

評価基準	ウェイト
Los Angeles	0.310814
San Francisco	0.493386
Las Vegas	0.195800

表 B.4: “費用” について

評価基準	ウェイト
Los Angeles	0.217166
San Francisco	0.717065
Las Vegas	0.065769

$$\begin{array}{c}
 \text{面白さ} & \text{治安} & \text{費用} \\
 \text{LosAngeles} & \left[\begin{array}{ccc} 0.075200 & 0.310814 & 0.217166 \\ 0.182955 & 0.493386 & 0.717065 \\ 0.748184 & 0.195800 & 0.065769 \end{array} \right] & (B.2) \\
 \text{SanFrancisco} \\
 \text{LasVegas}
 \end{array}$$

そして、行列 (B.1) と行列 (B.2) を掛け合わせる (式 (B.3)) .

$$\left[\begin{array}{ccc} 0.075200 & 0.310814 & 0.217166 \\ 0.182955 & 0.493386 & 0.717065 \\ 0.748184 & 0.195800 & 0.065769 \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} 0.614411 \\ 0.117221 \\ 0.268369 \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} 0.140918 \\ 0.362682 \\ 0.496400 \end{array} \right]$$
(B.3)

式 (B.3) によって、結果として、代替案 “Los Angeles” のウェイトが 0.140918 , 代替案 ”San Francisco” のウェイトが 0.362682 , 代替案 ”Las Vegas” のウェイトが 0.496400 であることが分かり、代替案 ”Las Vegas” が最も好ましい代替案であることが分かる .

一対比較はある評価基準を基にして 2 つの要素を比較する . 要素 i は要素 j に比べて、「どのくらい好ましいですか？」や「どのくらい重要ですか？」などの問い合わせに答える形式で行なう . 2 つの要素のみに関して比較するために、たくさんの要素の順序付けをする必要がなく、ユーザの負担を減らし、ユーザのより的確な判断を得ることが可能となる . 一対比較において 2 つの要素を比較する際に、表 B.5 の尺度を用いる . 表 B.5 において要素 i と要素 j を入れ換えて比較した場合は逆数をとる . 2 つの要素 i と j を比較した値を a_{ij} とする . 例えば、評価基準”海外旅行の行き先の選定” について、要素”治安” は要素” 費用” より、かなり重要とすれば、AHP ではその判断を値 7 として扱う .

ここで AHP について重要な点は、比較を行なう場合、ユーザは具体的な値でなく言葉によって表現すればよいということである . 一般的に、明確な尺度を持たない要素間の比率をユーザが厳密に答えるのは不可能である . そこで AHP では、一対比較値を獲得するために，“非常に重要”，“かなり重要”，“重要”，“やや重要”，“同じように重要” といった言葉による (verbal な) ファジィな表現を用いることによってつかみどころのない要因を含む問題に関する主観的な分析を可能にし、ユーザの負担を軽くする . つまり、AHP における一対比較値は人間の意思を厳密に表すのではなく、だいたいこれぐらいという人間の主観的評価値を表す .

表 B.5: 一対比較の尺度

要素 i は要素 j と比較して	a_{ij}
同じように重要	1
やや重要	3
重要	5
かなり重要	7
非常に重要	9
補間的に用いる	2,4,6,8

表 B.6: ”面白さ” に関する一対比較行列

	Los Angeles	San Francisco	Las Vegas
Los Angeles	1	1/3	1/8
San Francisco	3	1	1/5
Las Vegas	8	5	1

評価基準 “面白さ” について，各代替案について一対比較を行ない，表 B.6 のように一対比較行列 $A = [a_{ij}]$ を作成する．一対比較行列では， $a_{ij} = 1, a_{ji} = 1/a_{ij}$ である．評価対象が n であるとき， $n(n - 1)/2$ 回の一対比較が必要となる．これは n が大きくなった場合に AHP の欠点となる．表 B.6 からウェイトを求める．求める手法は後で説明する．結果は，表 B.2 である．

一対比較行列からウェイトを求める方法を説明する．いま n 個の項目 I_1, \dots, I_n があり，その本来のウェイトが w_1, w_2, \dots, w_n であるとする．そのとき，項目 I_i と I_j の一対比較値 a_{ij} は，理想的には，

$$a_{ij} = \frac{w_i}{w_j} \quad (\text{B.4})$$

という関係を満たすはずである．ここで一対比較行列 $A = [a_{ij}]$ は式

(B.5) のようになる .

$$A = \begin{bmatrix} w_1/w_1 & w_1/w_2 & \cdots & w_1/w_n \\ w_2/w_1 & w_2/w_2 & \cdots & w_2/w_n \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ w_n/w_1 & w_n/w_2 & \cdots & w_n/w_n \end{bmatrix} \quad (\text{B.5})$$

そして , A の右側からウェイトベクトルを乗じると式 (B.6) のようになる . 式 (B.6) から , ウェイトベクトルは A の固有ベクトルであることが分かる .

$$Aw = \begin{bmatrix} w_1/w_1 & w_1/w_2 & \cdots & w_1/w_n \\ w_2/w_1 & w_2/w_2 & \cdots & w_2/w_n \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ w_n/w_1 & w_n/w_2 & \cdots & w_n/w_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} = n \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} \quad (\text{B.6})$$

行列 A の 2 行目以下は第 1 行列の定数倍であるから , 行列 A の階数 (ランク) は 1 となる . つまり行列 A の n 個の固有値のうち , 1 つだけが非零で , 他はすべて零である . 一般に , 固有値の和 = 行列の対角要素の和 ($= n$) となるので , 非零の固有値は n のみであり , 理想的な行列 A の最大固有値となる .

現実の一対比較行列 A は式 (B.5) の形をしていることは期待できない . もし , ほぼ式 (B.5) の形に近いのなら , A の最大固有値と固有ベクトルを求め , その固有ベクトルが各評価項目のウェイトとして採用できる . つまり , 生成した一対比較行列が理想的な一対比較行列との程度違うかという整合性の指標が必要となる .

AHP では整合性の指標 (Consistency Index) が用意されており , 式 (B.7) で表される . λ_{max} を現実の一対比較行列の最大固有値とする .

$$C.I. = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (\text{B.7})$$

行列 A が完全な整合性を持つ場合はこの値は 0 であり , それが大きくなるほど非整合性が高いとみることができる . C.I. の値は 0.1(0.15 の場合もある) 以下であれば整合性ありとされる . しかし , それを超える場合は , 一対比較の判断を見直してみる必要があるといわれている .

式(B.7)の意味を説明する。行列Aにはn個の固有値があり、その和はnとなることが分かっている。そこで、

$$\lambda_{max} - n \quad (B.8)$$

は、 λ_{max} 外の固有値の大きさを示す指標とみることができる。ここで一般に $\lambda_{max} - n \geq 0$ であるから [140]，

$$\lambda_{max} - n \geq 0 \quad (B.9)$$

である。 $(n-1)$ 個の固有値でこの指標を持つので1個当たりの平均が式(B.7)となる。

C.I.に加えて、さらにもう1つ整合度を表す指標が用意されている。1/9, 1/8, …, 1/2, 1, 2, …, 8, 9の値をランダムに入れた行列A(ただし対角要素は1で、対称要素の逆関係は成立しているものとする)のC.I.を各nに対して500回計算し、その平均R.I.を求めた(表B.7)。この値をランダム整合度と呼ぶ。

表 B.7: ランダム整合度

n	1	2	3	4	5	6
R.I.	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24
n	7	8	9	10	11	12
R.I.	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51	1.53

C.I.の値をR.I.で割った値を整合比(Consistency Ratio)と呼び、C.R.で表す(式(B.10))。

$$C.R. = \frac{C.I.}{R.I.} \quad (B.10)$$

C.I.とC.R.の値が0.1以下(場合によっては0.15以下)ならば、整合性がありと判断できるとされる。しかし、それを超えたら一対比較のやり直しが必要とされる。

AHPの注意点を簡単に説明する。

- 階層構造における同一レベルに取り入れる要素(項目)は互いに独立性の高いものを採用すること。

- 一対比較の対象となる要素数は 7 個まで , 多くても 9 以下にする .
- 総合的なウェイトは , 通常選好度を示しており , この値の大きい順に好ましいことを表すが , この値の差にはあまり意味がないので , 注意を要する .

付 錄C

モバイルエージェント

C.1 モバイルエージェントの紹介

近年のネットワーク環境の急速な普及に伴い、ネットワーク上で人間の行動をサポートするエージェントが注目を集めている。エージェントは自律的かつ協調的に振舞うソフトウェアである。エージェントの一つの実現方式としてモバイルエージェント[69][113]が現在注目されている。モバイルエージェントの特長の一つは、ネットワーク上のどの計算機においても実行可能なコード（モバイルコード）によって実現される点である。この特長によって、モバイルエージェントはネットワーク上を動的に移動することが可能となる。

モバイルエージェントの特長は、モバイルエージェントのパラダイム以前のアプローチと比較することによって明確になる。モバイルエージェントのパラダイム以前のアプローチは、RPC(Remote Procedure Call)に基づいている。RPCに基づく2エージェント間の通信は、図C.1に示す通り、すべての要求がネットワークを通して行われるためにネットワークに対する負荷が大きくなる。

一方、モバイルエージェントによる通信では、モバイルエージェントは実際に他の計算機に移動し通信を行う。図C.2に示す通り、モバイルエージェント間の通信ではネットワークに対する負荷を、RPCに基づく通信に比べて減少させることが可能となる。

以上はモバイルエージェントのパフォーマンスに関する長所であり戦略的な長所と言われる。文献[145]では戦術的な長所として、カスタマイゼーションと呼ばれる長所も挙げられている。

モバイルエージェントの実現手法としては、IBMのAglets[77]、

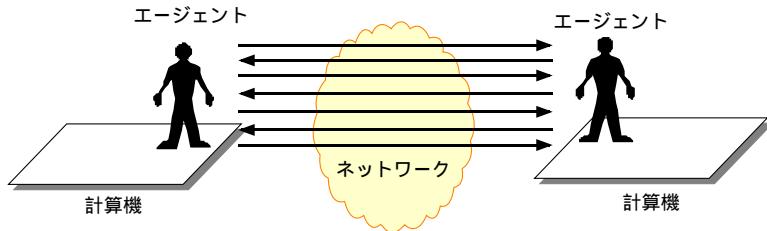


図 C.1: RPC に基づく 2 エージェント間通信

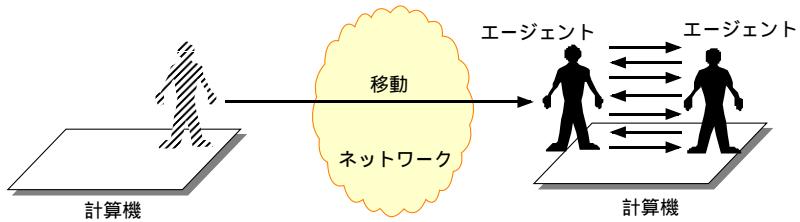


図 C.2: モバイルエージェント間の通信

General Magic 社の Telescript/Odyssey[145]、三菱の Concordia[158]、東芝 S&S 研究所の Plangent[45][97][141]、ObjectSpace の Voyager[96]などの手法が存在し、現在これらのツールを用いた応用システムの実現が望まれている。以上の実現手法の中でも、本研究で主に用いた IBM の Aglets Software Development Kit について以下で説明する。

C.2 Aglets Software Development Kit

モバイルエージェントを実現するためのフレームワークとして IBM の Aglets Software Development Kit (ASDK)[77] がある。ASDK は、プログラミング言語 Java を用いたプラットフォーム非依存なモバイルエージェントを容易に構築するためのフレームワークである。Aglet とは、ASDKにおいて Java で記述されたモバイルエージェントを指す。

Aglet が移動する際に用いられるプロトコルは ATP (Agent Transfer Protocol) である。ATP はモバイルエージェントをネットワーク

上で移動させるために使われるプロトコルである。将来的にモバイルエージェントが様々な言語で実現されることを想定して、ATPはエージェントの移動に関して、一般的かつ一様的な方法を扱うことができるように実現されている。ASDKでは、ATP daemonの生成などの機能を含んだAPIがユーザに提供される。

ASDKに含まれるエージェントマネージャとしては、Tahitiがある。Tahitiは、ASDKにおいて構築されたモバイルエージェントを視覚的にモニタリングできるデスクトップツールである。一般的にASDKを用いる場合、tahitiを立ち上げることにより、ATP daemonなどAgletを扱うことが可能となる。

エージェントマネージャをWebで用いるためのツールとしてFijiがある。FijiはJava Appletとして実現されており、agletの生成などをを行うagletをWebブラウザに取り込むことができる。Fijiによって、ATP daemonと組になったWebサイトにユーザ側からagletを送り込み、モニタリングを行わせるなど、Web pageの強化が期待できる。

ユーザがモバイルエージェントを構築したり、使用する場合に最も重要視されるのは、モバイルエージェントの安全性である。ASDKの安全性は3階層のセキュリティモデル[66]によって保証されている。1階層目はJava言語自身によるセキュリティシステムである。2階層目は、セキュリティマネージャであり、IBM側でTahitiの機能として構築されたものである。3階層目は、ユーザ側で組込み可能なJava Security APIによって実現されている。Java Security APIでは、デジタル署名、暗号化、認証などの機能をもつ暗号関連のパッケージが提供されている。

ASDKによって、実際のモバイルエージェント構築は非常に容易になる。特に、Agletに関する文書の充実が評価できる。例えば、文献[77]などのAgletのプログラミングの入門書は、基本的なAgletを構築するには十分な内容となっている。また、API関連の文書も整理され、Javaプログラマにとっては、他のJavaのコアAPIと同じ感覚で用いることができる。つまり、Javaに親しんだプログラマであれば、障壁を感じることなくエージェントプログラミングを行うことができる。