

## 1. はじめに

マルチエージェントシステムの分野において複数論点交渉問題が重要な研究課題となっている。特に、電子商取引などの応用分野において、自動交渉の枠組みやメカニズムを開発することで、自動化が促進されることが期待されている<sup>1)</sup>。しかし、エージェント同士の交渉において現実的な効用モデルの提案、プライバシー情報の公開に対する危険性の解決、合意を求める際の計算量爆発に対する対応などの課題が存在する。

複数論点交渉問題に関する多数の既存研究がある<sup>2)-6)</sup>。しかし、既存の研究では論点の独立性と、線形の効用関数が仮定されている。実世界の問題では複数の論点がすべて独立していることは稀であり、複数の論点が相互に依存する関係（相互依存関係）にある場合が多い。そこで、本論文では各論点が相互依存関係にある複雑な交渉問題を対象とする。各論点が相互依存関係にある場合、各エージェントの効用関数は非線形の効用関数で表現される。また、各論点に独立性が仮定された交渉問題において良質な合意案が発見できる手法でも、各論点が相互依存関係にある場合には、効用空間が複雑になるため必ずしも良質な合意案を発見できないことが指摘されている<sup>7)</sup>。

近年、論点が相互依存関係にある場合に対応可能な手法が提案されている。たとえば、文献 7) では、論点に相互依存関係がある問題に対して、非線形最適化手法を用いて合意案を発見している。特に、シミュレーテッドアニーリングと山登り法<sup>8)</sup>を基にした交渉手法を解析し、シミュレーテッドアニーリングを基にした手法が各論点が相互依存関係にある場合の合意案の発見に有効であることを示している。文献 9), 10) では本論文でも用いている制約を基にした効用関数を提案し、より現実的かつ複雑な効用空間を設定している。さらに、エージェントの選好情報を過剰に開示することなく社会的にも効用の高い合意を得ることが可能である、入札に基づく交渉手法を提案している。

以上のように各論点に相互依存関係がある交渉問題に対するプロトコルが提案されているが、交渉手法のスケーラビリティが重要な課題となっている。たとえば、入札に基づく交渉手法ではエージェント数や論点数が多い場合に合意案を発見することが困難であり、計算量を減らすことが重要である<sup>11)-13)</sup>。そこで筆者らは、各論点の相互依存度に基づき論点グ

---

†1 名古屋工業大学情報工学専攻

Department of Computer Science and Engineering, Nagoya Institute of Technology

†2 マサチューセッツ工科大学スローン経営大学院

Sloan School of Management, Massachusetts Institute of Technology

グループを決定し、論点グループごとに合意形成を行う手法を提案している<sup>14)</sup>。現実世界の交渉において論点グループは以下の場合を想定している。自動車の内燃機関の共同設計において、エンジン部分とキャブレター部分それぞれの合意案を決定してから、最終的に内燃機関全体の合意案を決定した方が効率的に交渉が行える。以上のエンジン部分とキャブレター部分が現実世界の論点グループに相当する。論点グループに基づく交渉手法では、まず、エージェントは相互依存関係グラフを生成し、存在する相互依存度が最大になるように、論点グループを決定する。その後、エージェントは論点グループごとに入札を生成し、それぞれの入札に評価値を設定する。最後に、メディエータは入札情報を基に組合せ最適解を求め、論点グループごとに生成された合意案を組み合わせて最終合意案を求める。

しかし、論文 14) における論点グループに基づく交渉手法では論点グループ数を適切に決定することが困難であった。実際に論文 14) のシミュレーション実験の結果から、論点グループ数が多くなると最適性の高い合意案を発見することが困難であり、また、論点グループ数が少くなると合意形成に失敗する可能性が高くなることが分かっている。なぜなら、論点グループ数が多いと、各論点グループが扱う論点数が少なくなるため合意案を発見しやすくなるが、論点グループごとに存在する相互依存関係を無視せざるえないからであり、論点グループ数が少ないと逆の状況になるからである。

本論文では、論文 14) の論点グループに基づく交渉手法を複数ラウンド交渉プロトコルに拡張し、論点グループ数を調整を行う手法を提案する。本提案手法では、以下の 3 つの場合を考える。(1) すべての論点グループ数を調査して、最適性が一番高い場合を採用する。(2) 論点グループ数が少ない状況で合意案形成を行い、もし合意案を発見できなければ論点グループ数を増やして、再び論点グループに基づく交渉手法を実行する。(3) 論点グループ数が多い状況で合意案形成を行い、もし合意案を発見できなければ論点グループ数を減らして、再び論点グループに基づく交渉手法を実行する。(1)-(3) の手法に関して、合意案の最適性および計算時間に関して議論を行う。さらに、シミュレーション実験により、複数ラウンドに拡張することで解の最適性およびスケーラビリティを調整しながら合意形成が可能なることを示す。シミュレーション実験では論点グループの生成を行わない Basic Bidding<sup>9)</sup> と Q-Factor に基づく手法<sup>12), 13)</sup> と比較する。Q-Factor は基本的に Basic Bidding と同様である。異なる点は、エージェントの入札生成およびメディエータの勝者決定に用いる評価値を入札が持つ効用値ではなく Q-Factor という独自の値を使用する手法である。また、本論文で提案している (1)-(3) の論点グループ数の調整手法に関して、シミュレーション実験により合意案の最適率、計算時間に関して比較、解析を行う。

本論文の構成を以下に示す。まず、2章では本論文で扱う交渉問題の定式化と各エージェントが持つ非線形の効用空間について述べ、論点間の相互依存関係と相互依存度の定義および、論点グループに関する交渉プロトコルを提案する。3章では論点グループに基づく交渉手法の複数ラウンドへの拡張に関して述べる。4章において評価実験の結果を示す。最後に、5章において関連研究について示し、6章に本論文のまとめを示す。

## 2. 複数論点交渉問題と論点グループに基づいた合意形成手法

### 2.1 複数論点交渉問題と複雑な効用空間

本論文では、 $N$  個のエージェントが合意形成を試みる交渉の状況を考える。個々の論点を  $i_j \in I$  と表し、論点が  $|I|$  個存在する。論点  $i_j$  は  $[0, X]$  の範囲 ( $X$ : 各論点がとりうる任意の最大値) の整数を値として持つ ( $1 \leq j \leq |I|$ )。本論文では計算機上でモデル化する際に連続値でも離散化するため、論点を離散値として考える。

交渉の結果得られる合意案は、各論点の値のベクトル  $\vec{s} = (s_1, \dots, s_{|I|})$  と表現される。エージェントの効用関数は制約を用いて表現する。個々の制約は  $c_k \in C$  と表し、 $|C|$  個の制約が存在する ( $1 \leq k \leq |C|$ )。本論文では、制約を、単一、もしくは複数の次元 (論点) に関して、制約充足条件となる値の範囲、および効用値を持つものと定義する。ここでいう効用は基数的効用を前提としている。 $\delta_a(c_k, i_j)$  は制約  $c_k$  が論点  $i_j$  に関して制約充足条件となる値の集合 (範囲) と定義する。制約充足条件が存在しない場合は  $\emptyset$  を返す。エージェントは制約  $c_k$  に対して、合意  $\vec{s}$  によって充足される場合にのみ、 $w_a(c_k, \vec{s})$  を効用値として持つことができる。交渉に参加するすべてのエージェントは、まったく共有されていない独自の制約集合を持つ。

合意  $\vec{s}$  に関するエージェント  $a$  の効用を  $u_a(\vec{s}) = \sum_{c_k \in C, \vec{s} \in x_a(c_k)} w_a(c_k, \vec{s})$  と定義する。 $x_a(c_k)$  は、制約  $c_k$  を充足可能な合意案の集合である。本効用表現により、凹凸のある非線形の効用空間が形成される。本論文における効用空間とは、各論点がとりうる値のあらゆる組合せについて、効用関数によって得られる効用値を空間状にプロットして得られるグラフを意味し、空間の次元数は、論点数+1となる。この効用空間では、多くの制約を充足可能な地点は効用が高くなり、逆に充足する制約数が少ない地点では、効用が低くなる。これにより、空間内に効用値による高低が生じる。

図1に、非線形の効用関数と効用空間の例を示す。図の効用関数  $A$  は、論点1および論点2に関連する二項制約の例を図示したものである。効用関数  $A$  では、論点1に関しては  $[3, 7]$ 、論点2に関しては  $[4, 6]$  の範囲で合意が得られた場合に制約が充足可能であり、その

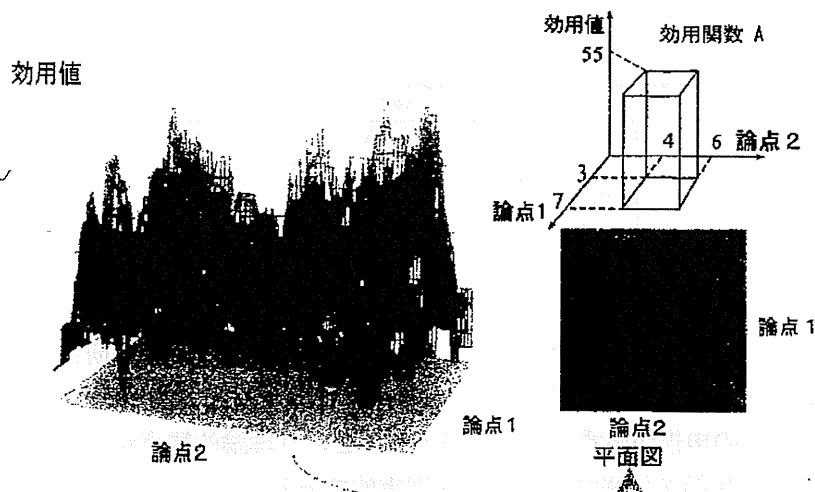


図 1 効用関数と効用空間の例  
Fig. 1 Utility function and utility space.

場合得られる効用は 55 であることを示している。図が示すとおり、効用空間は各論点のとりうる値の全組合せを網羅した状態空間に、各エージェントが持つ全効用関数をプロットして得られるグラフである。現実世界の問題における非線形の効用空間は図が示す以上に山と谷が入り組んだ複雑な効用空間を想定している。個々の制約を表す効用関数が図 1 に示すような箱状の形を持つため、これを足し合わせた効用空間全体の中でも山の頂上や谷の底は点ではなく一定の面積を持つ面となる。

本論文における交渉プロトコルに目的関数は全エージェントの効用の総和とする。すなわち、提案プロトコルは社会的効用を最大化する合意案の発見を試みる。

各論点が相互依存関係にない場合、主に線形の関数として表現可能であるが、各論点が相互依存関係にある場合、非線形の関数として表現される場合が多い。文献 7), 9), 14) で示されているように、各論点が独立している場合に有効な既存の手法を本論文で扱う各論点が相互依存関係の交渉問題に適用して良解を得ることが困難である。

本論文では、文献 9), 10) と同様に全エージェントがすべての効用情報を公開して非線形最適化手法を利用する手法は採用しない。なぜならば効用に関する完全な情報の公開、すなわち真の選好情報を明らかにすることは、通常、実世界のユーザにとって好ましくないからである。また、エージェントは、利己的な効用最大化者であるため、真の選好情報の申告が必ずしも期待できない。実際に、制度設計に関する研究では、虚偽の申告が有効であるケー

表 1 エージェントが持つ制約情報  
Table 1 Utility function for an agent.

ID	論点 1	論点 2	論点 3	論点 4	効用
1	[2, 4]	—	[4, 6]	—	20
2	—	5	[3, 7]	[1, 6]	40
3	[3, 8]	—	—	—	25
4	4	[2, 7]	9	[4, 5]	50

スが存在しうることを認識し、そのうえで、虚偽申告をいかに防ぐかが研究されている。したがって、実際にエージェントを利用するユーザのプライバシーの観点、および効用最大化を目的とした場合に真の申告が必ずしも期待できないという理論的観点から、エージェントが効用に関する完全な情報を公開することは非現実的である。

## 2.2 論点間の相互依存関係と相互依存関係グラフ

本論文では、もし、論点  $X$  と論点  $Y$  に関する制約が存在するならば、論点  $X$  と論点  $Y$  は相互依存関係にあると考える。たとえば、あるエージェントが表 1 のような制約情報を保持する場合を考える。表 1 の制約 1 では、論点 1 が 2 ~ 4、論点 3 が 4 ~ 6 の範囲内に存在する場合に効用値 20 を得る。エージェントは制約 1 を持っているため、論点 1 と論点 3 に関する二項制約を持っている。以上の場合、エージェントにとって論点 1 と論点 3 は相互依存関係にある。

次に、エージェントが持つ論点の相互依存関係の強さを示す指標として相互依存度 (interdependency rate) を定義する。本論文では、エージェント  $a$  の論点  $j$  と論点  $jj$  間の相互依存度を以下のように定義する。

$$D_a(i_j, i_{jj}) = \#\{c_k | \delta_a(c_k, i_j) \neq \emptyset \wedge \delta_a(c_k, i_{jj}) \neq \emptyset\}.$$

上記の式において、 $\delta_a(c_k, i_j)$  はエージェント  $a$  における制約  $c_k$  が論点  $i_j$  に関して制約充足条件となる値の集合 (範囲) を示し、制約充足条件が存在しない場合は  $\emptyset$  を返すものとする (前節における定義と同様)。また、本式での  $\#\{A\}$  は集合  $A$  の個数 ( $|A|$ ,  $card(A)$  と同記述) を示す。

また、エージェントは論点間の相互依存関係を相互依存関係グラフ (interdependency graph) により保持している。以下に相互依存関係グラフの定義を示す。

$$G(P, E, w) : P = \{1, 2, \dots, |I|\} (P : \text{Finite set}),$$

$$E \subset \{\{x, y\} | x, y \in P\}, w : E \rightarrow R$$

相互依存関係グラフはノードを各論点、エッジを相互依存関係の有無、重みを相互依存

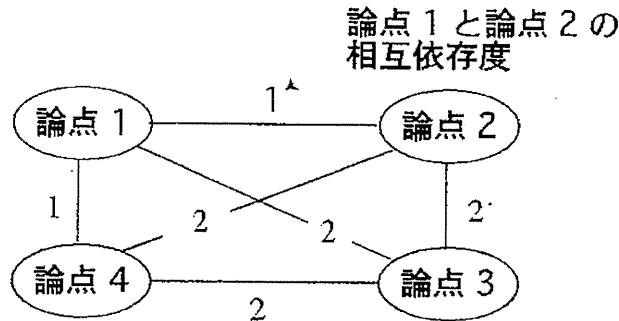


図2 相互依存関係グラフ  
Fig.2 Interdependency graph.

関係度とした、重み付き無向グラフである。図2は相互依存関係グラフの例を示している。図2が示すように、頂点が各論点、エッジが相互依存関係の有無、各エッジの重みは相互依存度を示している。また、エッジの有無で依存関係が存在するかを判断する。相互依存関係グラフを用いることで、エージェントは各論点間の相互依存関係を容易に管理することができる。

### 2.3 論点間の依存関係に基づく合意形成モデル

以下に、論点グループに基づく交渉プロトコルを示す。本節で説明した論点グループに基づく交渉プロトコルは文献14)において提案された手法である。

[Step1: 相互依存関係の抽出] エージェントは自身の効用情報を探索し、相互依存関係グラフを作成する。本論文では、エージェントが持つすべての制約を調査し、各論点の相互依存関係を調査する手法を採用する。

[Step2: 論点グループの決定] 本ステップではメディエータがエージェントからの相互依存関係グラフから、論点間における相互依存関係の損失が少ない論点グループを決定する。損失が少ない論点グループとは具体的に、論点グループを作成した際に考慮されない相互依存度の和が最も少ない論点グループの構成を示す。まず、メディエータは社会的相互依存関係グラフを作成する。社会的相互依存関係グラフとは相互依存関係グラフの重みを社会的相互依存度 ( $D(i_j, i_{jj}) = \sum_{a \in N} D_a(i_j, i_{jj})$ ) に変更したグラフである。次に、社会的相互依存関係グラフを用いて論点グループを決定する。本論文では、近傍探索手法<sup>8)</sup>を用いて最適な論点グループを決定する。近傍探索手法において用いられる評価値は論点グループに分割した場合に存在しているエッジの重みの和である。

[Step3: 入札の生成] まず、エージェントはすべての論点を対象にして入札を生成する。

具体的には、まず高い効用を持つ合意案候補が存在する範囲を特定するために、エージェントがそれぞれの効用空間でサンプリングを行う。エージェントは一様分布に従う乱数に基づいてあらかじめ決まった数のサンプリングポイントを取得する。

次に、効用空間のサンプリングの調整を行う。各エージェントはシミュレーテッドアニーリング (SA)<sup>8)</sup> に基づく最適化を行い、サンプリングポイント周辺の合意案候補の発見を試みる。

最後に、入札の生成を行う。入札とは、各論点における制約が包含する範囲および制約の持つ効用からなる集合である。エージェントは、サンプリングポイントを調整して得られた各合意案候補に関して効用を計算する。ここでの効用とは合意案候補を充足する制約の効用の総和である。効用が閾値を超えている場合に限りエージェントは入札を生成する。生成する入札は合意案候補と同一の効用が得られる周辺すべてをカバーするように生成される。このような入札は、合意案候補  $s$  に充足されるすべての制約の共通範囲をとることで容易に生成できる。次に、すべての論点を対象にして生成した入札を論点グループ別に分割し、分割した入札に対して効用値を決定する。分割した入札の効用値は、分割した入札がとらうる最大の効用値とする。

[Step4: 合意案の発見] 各エージェントのすべての入札の組合せを考慮し、論点グループ内で関係する論点グループ内の合意案を決定する。ここでは、各エージェントにつき1つの入札を採用し、論点グループに関係する論点間で互いに無矛盾で、最も社会的効用の高い入札の組合せを決定する。具体的には、まず、入札が持つ論点グループ内の論点に関する値の範囲の共通部分が存在するかどうか判定する。その後、共通部分の中で最も社会的効用が高いものを、合意案として選択する。各入札が持つ社会的効用を最大化する入札の組合せを見つけるために、枝刈り付きの幅優先探索を行う。そして、各論点グループから生成された合意案を組み合わせて、最終的な合意を形成する。

本手法は、論点グループの生成によりスケーラビリティが大幅に向上していることが文献 14) において示されている。特に、本手法は論点間の相互依存度と論点間の相互依存関係の存在が指数分布になる場合に、より適切な合意を発見することが可能である。

また、本手法は論点グループ数がスケーラビリティおよび解の最適性に大きな影響を与える。なぜなら、論点グループ数が増加するごとに解の最適性が減少する一方で、論点グループ数が増加するごとに合意形成失敗率が減少しているからである。図 3 は論点グループに基づく交渉手法においてグループ数が最適率、合意形成失敗率に与える影響を示している。本実験において、論点数 7、エージェント数 4 であり、効用空間は一様分布に基づく乱数に

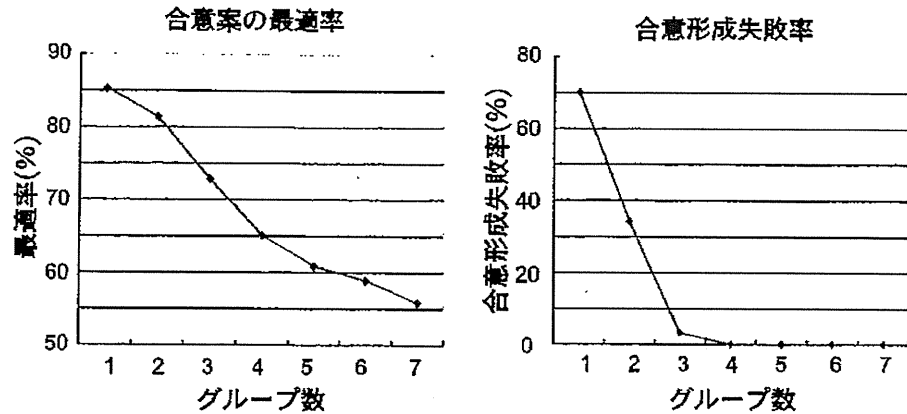


図 3 論点グループ数の影響

Fig. 3 The effectiveness of the number of agents.

従って作成した。図が示すように、論点グループ数が増加するごとに最適率が減少しており、一方、論点グループ数が減少するごとに合意形成失敗率が増加している。

しかし、現実的に適切な論点グループ数を決定するのは大変困難であり、経験的な知識に頼らざるをえない。したがって、論点グループに基づく交渉手法では適切な論点グループ数を決定しながら、最適性の高い合意案を発見することが重要となる。

### 3. 論点グループ数の調整に基づいた複数ラウンド交渉プロトコル

本論文では、論点グループに基づく交渉手法を複数ラウンドにすることで適切な論点グループ数を決定しながら合意形成を行う。本論文では以下の3つの論点グループ数の調整手法を扱う。表2は本論文で提案する3つの手法をまとめたものである。

**全探索型：**すべての論点グループ数を調査して、発見された合意案の社会的効用が一番高い場合を採用する。アルゴリズムの詳細を図4に示す。まず、2.3節の[Step1]を実行する(図4の1行目)。次に論点グループ数を1に初期値を設定し(図4の2行目)、2.3節の[Step2]–[Step4]を実行する(図4の4行目)。もし、発見した解が今までの論点グループ数の中で最大ならば、解を保存する(図4の5–6行目)。以上の動作を論点数と論点グループ数が一致するまで繰り返す。本拡張により必ず合意できかつ解の最適性が最良な論点グループ数を確実に決定できる。

**増加型：**増加型では論点グループ数を増やしながら論点グループに基づく交渉手法を実行し、合意案を発見したら終了する。アルゴリズムの詳細を図5に示す。まず、2.3節の



表 2 論点グループ探索手法の特徴

Table 2 Features of the search methods for issue-groups.

調整手法	合意案の社会的効用	計算時間
全探索型	3 つの中で最大	3 つの中で最大
増加型	高い	全探索型より少ない
減少型	低い	3 つの中で最小

$I = \{i_1, i_2, \dots, i_M\}, Ag = \{a_1, a_2, \dots, a_N\}$

Generate Graph(Ag): Generating Interdependent Graph (Step1)

Find Solution(i): Finding Solutions when the Number of Issue-Groups is  $i$   
(Step2 - Step4)

- 1: Generate Graph(Ag)
- 2:  $i := 1$
- 3: while  $i \leq \text{number of issues}$
- 4: Solution = Find Solution(i)
- 5: if Solution is maximum
- 6: maxSolution := Solution
- 7: endif
- 8: endwhile
- 9: return maxSolution

図 4 複数ラウンド交渉アルゴリズム (全探索)

Fig. 4 Multi-round negotiation algorithm (Exhaustive search).

$I = \{i_1, i_2, \dots, i_M\}, Ag = \{a_1, a_2, \dots, a_N\}$

Generate Graph (Ag): Generating Interdependent Graph (Step1)

Find Solution(i): Finding Solutions when the Number of Issue-Groups is  $i$   
(Step2 - Step4)

- 1: Generate Graph(Ag)
- 2:  $i := 1$
- 3: while  $i \leq \text{number of issues}$
- 4: Solution = Find Solution(i)
- 5: if find Solution
- 6: break loop
- 7: else
- 8:  $i := i + 1$
- 9: endif
- 10: endwhile
- 11: return Solution

図 5 複数ラウンド交渉アルゴリズム (増加型)

Fig. 5 Multi-round negotiation algorithm (Increment search).

[Step1] を実行する (図 5 の 1 行目). 次に論点グループ数を 1 に初期値を設定し (図 5 の 2 行目), 2.3 節の [Step2]-[Step4] を実行する (図 5 の 4 行目). もし, 合意案を発見できれば最終的な合意案として解を出力する (図 5 の 6 行目). もし, 解を発見できなければ論点グループ数を 1 増やして 2.3 節の [Step2]-[Step4] を実行する (図 5 の 3-10 行目). 以上の動作を解が発見されるもしくは論点数と論点グループ数が一致するまで繰り返す.

増加型は, 論点グループ数が多くなるほど発見される合意案の社会的効用が下がることを仮定すれば, 必ず社会的効用が最大となる合意案を発見できる論点グループ数を探索することができる. 論点グループ数が  $l$  のときの発見できる合意案の社会的効用を  $U_l$  とする. 論点グループ数が多くなるほど合意案の社会的効用が下がるので,  $U_l \geq U_{l+1}$ . しかし, 合意案が発見できないと得られる社会的効用は 0 である. したがって, 論点数  $l$  以上の場合に合意案を発見でき,  $l$  より小さければ合意案が発見できない状況では  $U_l \geq U_{l+1} \cdots \geq U_{|I|} \geq U_{l-1} = \cdots = U_0 = 0$  ( $|I|$ : 論点数) となる. したがって, 本プロトコルでは社会的効用が 0 でない部分を論点グループ数を増やしながらか探索しているため, 最も社会的効用が高い合意案が発見可能な論点グループ数  $l$  を発見している. しかし, 論点グループ数が多くなるほど合意案の社会的効用が下がる傾向があるという仮定は必ず成り立つものではなく, 近似的なものである.

減少型: 減少型では論点グループ数を減らしながらか論点グループに基づく交渉手法を実行し, 合意案を発見したら終了する. アルゴリズムの詳細を図 6 に示す. まず, 2.3 節の [Step1] を実行する (図 6 の 1 行目). 次に論点グループ数を論点グループ数に初期値を

```

 $I = \{i_1, i_2, \dots, i_M\}, Ag = \{a_1, a_2, \dots, a_N\}$ 
Generate Graph(Ag): Generating Interdependent Graph (Step1)
Find Solution(i): Finding Solutions when the Number of Issue-Groups is  $i$ 
                    (Step2 - Step4)
1: Generate Graph(Ag)
2:  $i := \text{number of issues}$ 
3: while  $i \geq 1$ 
4:   Solution = Find Solution(i)
5:   if find Solution
6:     break loop
7:   else
8:      $i := i - 1$ 
9:   endif
10: endwhile
11: return Solution

```

図 6 複数ラウンド交渉アルゴリズム・減少型

Fig. 6 Multi-round negotiation algorithm (Decrement search).

設定し (図 6 の 2 行目), 2.3 節の [Step2]–[Step4] を実行する (図 6 の 4 行目). もし, 合意案を発見できれば最終的な合意案として解を出力する (図 6 の 6 行目). もし, 解を発見できなければ論点グループ数を 1 減らして 2.3 節の [Step2]–[Step4] を実行する (図 6 の 3–10 行目). 以上の動作を解が発見されるもしくは論点グループ数が 1 になるまで繰り返す. 減少型では, 論点グループ数が小さい場合に合意形成しやすく, 計算時間が短いことから, アルゴリズム全体の計算時間が少ない.

本論文では, 増加型, 減少型とも論点グループ数の増加量を最小量の 1 を用いている. 最小増加量を用いることで, 確実に適切な論点グループ数を決定する. 一方で, 適切な解を発見するまでの計算時間が最悪の場合かなり悪くなることが考えられる. 今後, 現実的な時間で確実に合意案を発見するためには, 論点グループ数の増加量を適切に調整する必要がある.

## 4. 評価実験

### 4.1 実験設定

本実験では, エージェント間の交渉を 100 回試行し平均値をとる. 本実験における設定は, 文献 14) と同様とする. 効用空間作成のパラメータは以下のとおりである.

- 論点数: 3–10
- 論点の値域:  $[0, 9]$
- 制約数 (非線形効用空間): 10 (単項制約), 5 (二項制約), 5 (三項制約).
- 制約の最大効用:  $100 \times (\text{論点数})$ . したがって, 多くの論点に関して条件を満たす制約は, 平均して, 効用がより高くなる. 本設定は, 多くの問題領域において妥当であると考えられる. たとえば, ミーティングスケジューリングにおいて, 各論点を, 個々の参加者のスケジューリングの可否として定義した場合, より多くの参加者に関する制約が, より少数の参加者に関する制約より重要とするのは, 自然な設定である.
- 制約の最大範囲: 7. この設定の下では, たとえば, 以下の制約が妥当なものとして生成される. (論点 1, 論点 2, 論点 3) =  $([2, 6], [2, 9], [1, 3])$ .

本実験では主に 3 つの手法の比較を行う. (A-1)~(A-3) は本論文で提案している複数ラウンドの論点グループに基づく合意形成手法である. また, “(A-1) 論点グループ (全探索)” は複数ラウンドの論点グループに基づく交渉手法で, 論点グループの探索は全探索型である. “(A-2) 論点グループ (増加型)” は複数ラウンドの論点グループに基づく交渉手法で, 論点グループの探索は増加型である. “(A-3) 論点グループ (減少型)” は複数ラウンドの論点

グループに基づく交渉手法で、論点グループの探索は減少型である。“(B) Basic Bidding”は文献 9) で提案されている論点グループを作成しない手法である。“(C) Q-Factor”は文献 12) において提案されている Maximum Weight Interdependent Set (MWIS) に基づく手法である。Maximum Weight Interdependent Set (MWIS) は基本的に Basic Bidding と同様である。異なる点は、エージェントの入札生成およびメディエータの勝者決定に用いる評価値を入札が持つ効用値ではなく Q-Factor という独自の値を使用する。Q-Factor の式は  $Q = u^\alpha * v^\beta$  ( $u$ : 効用値,  $v$ : 入札が持つ範囲) であり、入札が持つ評価値と合意形成のしやすさを考慮している。本実験では、 $\alpha = 0.5$ ,  $\beta = 0.5$  とパラメータを設定する。

以下は、(A)-(C) で共通して用いる、入札の生成に関するパラメータ<sup>9)</sup> である。

- サンプル数: (論点数)  $\times$  200
- 個々のエージェントがサンプリングの際に行うシミュレーテッドアニーリングでは初期の温度を 30 とし、処理を 30 回繰り返す。
- 入札生成時の閾値: 100
- 1 エージェントあたりの入札数の上限:  $\sqrt[3]{6400000}$  ( $N$ : エージェント数)。本設定は文献 9) において、勝者決定において、実用的な計算時間内で解が得られる値として使用されている。本論文でも、文献 9) と同様の値を使用するものとする。

論点グループに基づく交渉プロトコルにおいて、論点グループ分割の際に用いる近傍探索手法として SA を採用する。SA では初期の温度を 30 とし、処理を 10 回繰り返す。本設定は、論点グループ分割における計算コストはたかだか  $iC_l$  ( $i$ : 論点数,  $l$ : 論点グループ数) である。以上から、繰り返し回数が少なくなるように抑えている。

最適率を求める実験において、網羅的な探索を行った場合、問題がスケールアップするにつれて計算量的困難が生じる。そこで、全エージェントの効用関数をすべてメディエータに公開し、シミュレーテッドアニーリング (SA)<sup>8)</sup> を用いた探索により、発見した解を近似最適解とする。近似最適解を求めるための SA は初期の温度を 50 度として、500 回の繰り返し処理を経て温度を 0 まで下げることとし初期解はランダムに選択する。シミュレーテッドアニーリングに基づく手法は、エージェントが効用に関する完全な情報をメディエータに公開し、集中処理による求解を行うことになる。以上から、プライバシー情報の公開についてまったく考慮しておらず、実際にエージェントが効用に関する完全な情報を公開することは非現実的な設定である。本実験では、提案プロトコルの性能評価の際に、厳密解に近似した解が必要であるために、比較対象としてのみ本手法を採用する。最適性に関する実験における比較指標として (各手法で求めた最適解)/(近似最適解) を用いる。また、すべての手法のうち

どれか1つでも合意形成に失敗した場合は考慮しない。

実験に用いたプログラムは JAVA 言語で記述し、実行環境には J2SE 1.5 を用いた。また、実験は Mac OS 10.6 が動作している iMac (Core2Duo 2.33 GHz, メモリ 1.5 GB) 上で行った。

#### 4.2 実験結果

図7は提案手法および既存手法の合意案の最適率の比較を示している。(A-1)~(A-3)の論点グループと“(B) Basic Bidding”を比較した場合、エージェント数が4など比較的合意形成が容易な問題は同様の値を示しているが、論点数が増えると(B)の最適率が急激に減少している。(B)の急激な減少の理由は、合意形成失敗の回数が増加しているからである。特に、エージェント数6で論点5以上の場合、合意案をまったく発見できていない。一方、提案手法(A-1)~(A-3)は論点数が大きくなっても合意案を確実に発見できており、高い最適率を示している。(A-1)、(A-2)と“(C) Q-Factor”を比較した場合、(A-1)、(A-2)の方が高い最適率を示している。(A-1)、(A-2)の方が有効な理由としては複数ラウンドで論点グループ数の調整を行いながら合意形成しているからである。

“(A-1) 論点グループ (全探索)”と“(A-2) 論点グループ (増加型)”を比較した場合、エージェント数4など比較的合意案を発見しやすい問題は同様の値を示している。同様の値を示す理由としては、論点グループを形成する前に“(A-2) 論点グループ (増加型)”が合意案を発見できるからである。一方、エージェント数6など、合意案を発見しにくい状況では、“(A-1) 論点グループ (全探索)”より“(A-2) 論点グループ (増加型)”の方が低い値を示している。(A-2)が低い値になる理由は、論点グループが少ないと最適率が高いことは確実性が保証されておらず、ごくたまにグループ数が少ない場合に最適性の高い合意案を発見できるからである。しかし、近似的にとはいえ論点グループが少ないと最適率が高いため、大きく最適率が減少していない。一方、“(A-3) 論点グループ (減少型)”は他の手法と比較して、最適率が低い。(A-3)の最適率の低さの理由として、論点グループ数が多い状況で合意案を発見し、論点グループ数が多い状況では最適率が低い傾向があるためである。

図8は(A-1)~(A-3)の計算時間の比較を示している。すべての場合において“(A-1) 論点グループ (全探索)”が最大の計算時間を示している。(A-1)が最大になる理由としては、すべての論点グループ数を調査する必要があるからである。一方、“(A-3) 論点グループ (減少型)”は最小の計算時間を示している。(A-3)が最小の計算時間となる理由は、計算時間が少ない多くの論点グループを作成した状態で合意案の発見が行えるからである。また、“(A-2) 論点グループ (増加型)”はエージェント数が増えるほど、急激に計算時間が増加している。

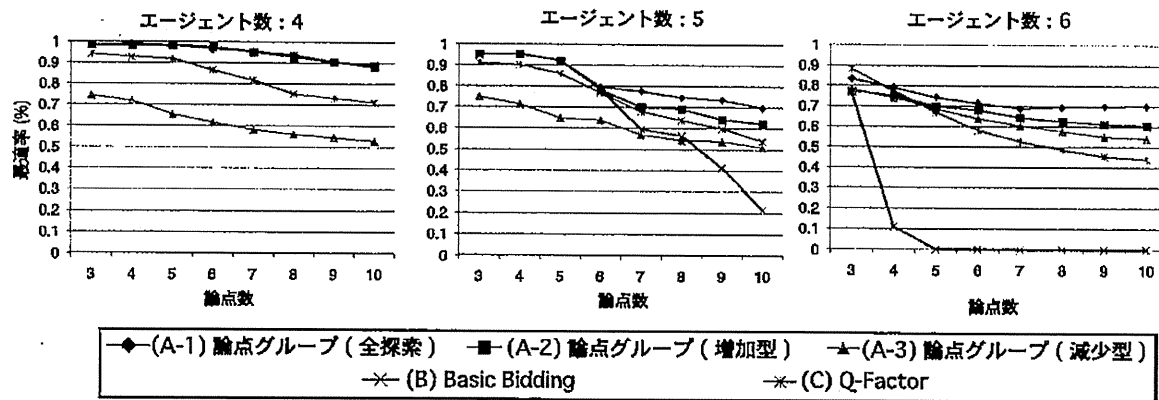


図7 最適率の比較  
Fig.7 Optimality rate.

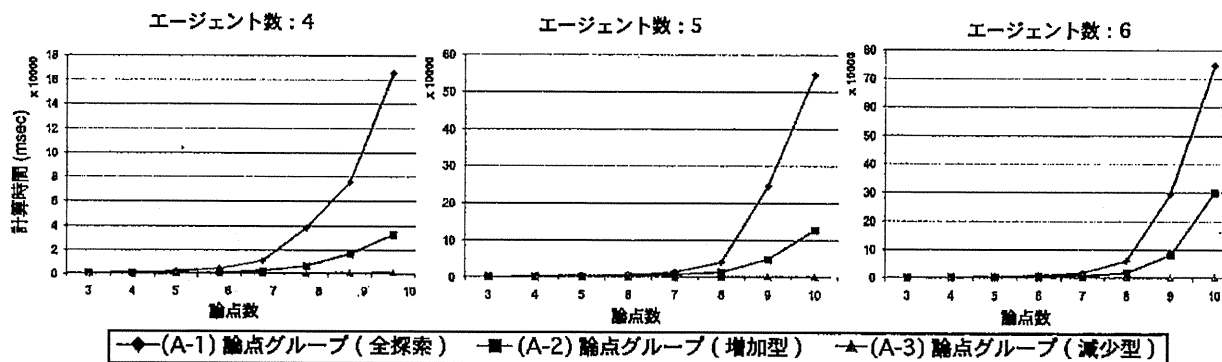


図8 計算時間の比較  
Fig. 8 Computational time.

この計算時間の増加の理由は、論点グループが少ない状況で合意案を発見できないため、複数ラウンドの交渉を行うためである。

最後に、3つの論点グループの調整手法に関する考察を以下に示す。

**全探索型** 3つの論点グループ調整手法において最も良質の合意案を発見できる。しかし、

計算時間が論点数の増加に従って急激に増加していく。現実世界の交渉問題では論点数が少なく信頼性の高い合意案を発見する場合に適用しやすい手法と考えられる。  
**増加型** 3つの論点グループ数において計算時間、合意案の最適性の両方を兼ねた効率的な手法である。現実世界の交渉問題では、交渉問題が論点数が多くなり大規模な場合で

も良質な合意案を発見できる可能性が高いと考えられる。特に、本論文では論点グループ数の増加量を1つまり最小量としていたが、交渉問題が大規模化すれば、増加量を調整することで合意案の質を保ちながら計算時間を削減することが可能である。

**減少型** 3つの論点グループ数において計算時間が最も少ない。しかし、合意案の質が低いという問題がある。現実世界での交渉問題では、論点数が多い大規模な交渉問題に対して、短時間で合意案の候補を発見する際に適用可能な手法である。

特に、増加型を用いた論点グループ数の調整手法は論点グループ数の増加量を適切に調整することで、最適性が高い合意案を短時間で発見することが期待できる。しかし、増加量の決定は現実的に困難な場合も存在する。

## 5. 関連研究

本研究の先行研究として効用空間の絞り込みに基づく交渉手法<sup>11)</sup>と閾値調整交渉メカニズム<sup>15)</sup>が提案されている。効用空間の絞り込みに基づく交渉手法<sup>11)</sup>において、メディエータは、クラスタ入札、最大制約入札そしてピーク入札を行うことで、ラウンドごとに合意形成を探索する範囲を絞り込みながら交渉を行っていく。この文献で提案されているメカニズムが論点数10を超える大規模な交渉問題においても実行可能であり高い解の最適性と低い合意形成失敗率であることが示されている。しかし、本研究のような論点を分割することで計算量を削減するのではなく、合意案が発見できそうな箇所を絞り込みながら複数ラウンドの合意形成を行っており、アプローチが大きく異なっている。また、閾値調整メカニズム<sup>15)</sup>は入札に関する閾値を調整しながら交渉を行うことで、メディエータに公開する範囲を最低限にすることに成功している。文献15)では、主にエージェントの効用情報公開の削減を目的にしており、本論文とは研究の目的が異なる。

Kleinら<sup>7)</sup>は、二項制約を含む中規模の双方向型の交渉問題を対象とし、シミュレーテッドアニーリングに基づくメディエータが準最適な解を得る手法が提案されている。一方、本論文では、さらに高次の依存関係と多数のエージェントが存在するより複雑な交渉問題に関して、高い最適性を議論している。

Robuら<sup>16), 17)</sup>は、電子商取引における二者間の複数の商品取引や複数論点の交渉問題に対してUtility Graphを用いて取り組んでいる。この文献では効用が各属性のクラスタに分割できることを仮定することで、Keeneyらの理論<sup>6)</sup>を拡張している。形式化では、クラスタ $C_i$ の大きさが1の場合(すなわち $|C_i| = 1$ )は、その商品の価値を表し、クラスタ $C_i$ の大きさが1より大きい場合(すなわち $|C_i| > 1$ )は、その2つ以上の商品を買った場合のシ

ナジー効果 (synergy effect) を表し、補完財の場合は正をとり、代替財の場合は負の値になる。本効用グラフは本論文と同様に論点間の相互依存関係を考慮しているが、二者間に限定された設定になっており、本論文の多人数の合意形成とは異なる問題設定になっている。

さらに、Fatima ら<sup>18)-20)</sup> は、時間制約がある場合の多属性交渉アルゴリズムを提案している。基本的には、Fatima らの多属性効用は、属性ごとに効用が分割できる多属性効用を用いており、属性間の依存関係は仮定していない。時間制約があり、時間がたてばたつほど、価値に対する割引 (Discount factor) が働く。文献 18) では、逐次的に属性ごとに交渉を続けることで、ナッシュ均衡が得られる戦略を導き出している。また、文献 20) では、PDP (Package Deal Procedure) という全部の属性をひとまとめにして交渉をするという方式を提案している。しかし、PDP では、均衡点を求めるのに計算量がかかりすぎるため、線形近似の方法と、並列実行をする方法を提案しており、実験で比較している。結果として、計算量に関しても、経済的な効率性に関しても、並列実行を行う方法がベターであるという結果を示している。これらの研究は主に二者間の交渉を対象にしており、本論文の多人数の合意形成とは異なる問題設定になっている。

Wu ら<sup>21)</sup> は、エージェント間のリソース配分のためのマルチエージェントによる多論点交渉アルゴリズムを提案している。彼らのフォーカスは完全情報をまず仮定しているが、時間制限を加えたうえで、パレート最適な合意案を得るためのプロトコルを理論的な証明をベースに提案している。本論文とは完全情報の公開を前提としているかに関して大きな違いがある。

Ren ら<sup>22)</sup> は、動的に状況が変化する場での多論点交渉問題を定式化し、そのための交渉プロトコルを提案している。たとえば、電子商取引の場などでは、状況が変化することによって、参加者の結果に対する期待値が変化してゆく。このため、効用空間自体にも変化が現れるため、参加者はそれに合わせて戦略を調整する必要がある。また、動的に戦略を調整しながら、望ましい解を得るための提案と逆提案に基づく交渉フレームワークを提案している。本論文は静的な場合を想定している点が文献 22) とは異なる。

Jonker ら<sup>23)-25)</sup> は、不完全情報という状況でのエージェント間交渉のアーキテクチャを提案している。ここでは、相手の提案の履歴に基づいて相手のプリファレンス情報を予測するためのヒューリスティクスとして、「guessing」ヒューリスティクスを提案している。Hindriks ら<sup>26)</sup> は非線形効用関数を単純な効用関数へ重み付き近似を行い、合意形成の計算量を削減している。本手法は共通の知識を持っている前提を基に近似しているが本論文で提案している手法は共通の知識を持っていない場合でも計算量を削減しながら合意できる。



Liら<sup>27)</sup>は Equal Directional Derivative Approach に基づいて、パレート最適解探索の方向を改善する手法を提案している。この文献では合意案の公平性を考慮しながら、合意案候補を調整している。この文献は2者間の複数論点交渉問題のみを対象としており、本論文の多人数の合意形成とは異なる問題設定になっている。

Zhang<sup>28)</sup>はタスク指向ドメイン (TOD) を含む交渉問題の分析を扱っている。この文献では古典的交渉解 (Nash solution, Egalitarian solution, Kalai-Smorodinsky solution) は混合戦略が存在するタスク指向ドメインでは、適用困難なことを示している。文献 28) では task-oriented domain を扱っており、効用を基本としている本論文とは交渉の前提が異なっている。

## 6. おわりに

本論文では、論点グループに基づく交渉手法を複数ラウンドの交渉プロトコルへ拡張を行った。特に、(1) すべての論点グループ数を調査して、合意案の最適性が一番高い場合を採用する。(2) 論点グループ数が少ない状況で合意案形成を行い、もし合意案を発見できなければ論点グループ数を増やして、再び論点グループに基づく交渉手法を実行する。(3) 論点グループ数が多い状況で合意案形成を行い、もし合意案を発見できなければ論点グループ数を減らして、再び論点グループに基づく交渉手法を実行する。以上の3つのアプローチをそれぞれ採用した場合における、交渉プロトコルの複数ラウンドへの拡張方法を提案した。また、シミュレーション実験を用いて、既存の手法と比較して複数ラウンドの提案手法が良解を発見できていることを示した。さらに、上記の(1)~(3)に関して、合意案の最適性および計算時間に関して比較を行った。特に、(2)の手法が合意案の最適性と計算時間の両方の観点から効率的であると考えられる。

今後の課題として、論点グループの変化量を適切に調整する機構が考えられる。また、本論文では基数的効用に基づいているが序数的効用の方が現実的な場合も存在する。今後、本論文で扱っている効用関数や交渉手法が序数的効用でも適用できるか解析する必要がある。

## 参考文献

- 1) Kraus, S.: *Strategic Negotiation in Multiagent Environments*, Cambridge University Press (2001).
- 2) Faratin, P., Sierra, C. and Jennings, N.R.: Using Similarity Criteria to Make Issue Trade-offs in Automated Negotiations. *Artificial Intelligence*, pp.142:205-237 (2002).

- 3) Soh, L.-K. and Li, X.: Adaptive, Confidence-Based Multiagent Negotiation Strategy, *Proc. 3rd International Joint Conference on Autonomous Agent and Multi-Agent Systems (AAMAS-2004)*, pp.1048-1055 (2004).
- 4) Fatima, S.S., Wooldridge, M. and Jennings, N.R.: Optimal Negotiation of Multiple Issues in Incomplete Information Settings, *Proc. 3rd International Joint Conference on Autonomous Agent and Multi-Agent Systems (AAMAS-2004)*, pp.1080-1087 (2004).
- 5) Lau, R.K.: Towards Genetically Optimised Multi-Agent Multi-Issue Negotiations, *Proc. 38th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS-2005)* (2005).
- 6) Keeney, R.L. and Raiffa, H.: *Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Trade-Offs*, Cambridge University Press (1993).
- 7) Klein, M., Faratin, P., Sayama, H. and Bar-Yam, Y.: Negotiating Complex Contracts, *Group Decision and Negotiation*, Vol.12, No.2, pp.58-73 (2003).
- 8) Russell, S.J. and Norvig, P.: *Artificial Intelligence: A Modern Approach*, Prentice Hall (2002).
- 9) Ito, T., Hattori, H. and Klein, M.: Multi-issue Negotiation Protocol for Agents: Exploring Nonlinear Utility Spaces, *Proc. 20th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-2007)*, pp.1347-1352 (2007).
- 10) 服部宏充, 伊藤孝行, Klein, M.: 非線形効用関数を持つエージェントのためのオークションに基づく交渉プロトコル, 電子情報通信学会論文誌 D-I, Vol.J89-D, No.12, pp.2648-2660 (2006).
- 11) 服部宏充, 伊藤孝行, Klein, M.: 複数論点交渉問題のための効用空間の絞り込みに基づくマルチエージェント交渉手法, 電子情報通信学会論文誌 D-I, 「ソフトウェアエージェントとその応用特集号」, Vol.J90-D, No.9, pp.2336-2348 (2007).
- 12) Marsa-Maestre, I., Lopez-Carmona, M.A., Velasco, J.R. and dela Hoz, E.: Effective bidding and deal identification for negotiations in highly nonlinear scenarios, *Proc. 8th International Joint Conference on Autonomous Agents and Multi-agent Systems (AAMAS-2009)*, pp.1057-1064 (2009).
- 13) Marsa-Maestre, I., Lopez-Carmona, M.A., Velasco, J.R., Ito, T., Fujita, K. and Klein, M.: Balancing Utility and Deal Probability for Negotiations in Highly Non-linear Utility Spaces, *Proc. 21st International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-09)*, pp.214-219 (2009).
- 14) 藤田桂英, 伊藤孝行, Klein, M.: 複数論点交渉問題における論点グループに基づくスケーラブルな合意形成手法の提案, 人工知能学会論文誌, Vol.26, No.1, pp.147-155 (2011).
- 15) 藤田桂英, 伊藤孝行, 服部宏充: 複数論点交渉問題におけるエージェントの効用空間の公開範囲に基づく交渉手段の実現, コンピュータソフトウェア (日本ソフトウェア科学

会論文誌)「ソフトウェアエージェントとその応用特集号」, Vol.25, No.4, pp.167-180 (2008).

- 16) Robu, V., Somefun, D.J.A. and Poutre, J.L.: Modeling complex multi-issue negotiations using utility graphs, *Proc. 4th International Joint Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems (AAMAS 2005)*, pp.280-287 (2005).
- 17) Robu, V. and Poutre, H.L.: Retrieving the Structure of Utility Graphs Used in Multi-Item Negotiation through Collaborative Filtering of Aggregate Buyer Preferences, *Proc. 2nd International Workshop on Rational, Robust and Secure Negotiations in Multi-Agent Systems (RRS-2006)* (2006).
- 18) Fatima, S.S., Wooldridge, M. and Jennings, N.R.: Multi-Issue Negotiation with Deadlines, *J. Artif. Intell. Res. (JAIR)*, Vol.27, pp.381-417 (2006).
- 19) Fatima, S.S., Wooldridge, M. and Jennings, N.R.: Approximate and online multi-issue negotiation, *Proc. 6th International Joint Conference on Autonomous Agents and Multi-agent Systems (AAMAS-2007)*, pp.947-954 (2007).
- 20) Fatima, S.S., Wooldridge, M. and Jennings, N.R.: An Analysis of Feasible Solutions for Multi-Issue Negotiation Involving Nonlinear Utility Functions, *Proc. 8th International Joint Conference on Autonomous Agents and Multi-agent Systems (AAMAS-2009)*, pp.1041-1048 (2007).
- 21) Wu, M., Weerdt, M. and Poutre, H.: Efficient Methods for Multi-agent Multi-issue Negotiation: Allocating Resources, *Proc. 12th International Conference on Principles of Practice in Multi-Agent Systems (PRIMA2009)*, Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, pp.97-112 (2009).
- 22) Ren, F., Zhang, M., Miao, C. and Shen, Z.: A Market-Based Multi-Issue Negotiation Model Considering Multiple Preferences in Dynamic E-Marketplaces, *Proc. 12th International Conference on Principles of Practice in Multi-Agent Systems (PRIMA2009)*, Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, pp.1-16 (2009).
- 23) Jonker, C.M. and Treur, J.: An Agent Architecture for Multi-Attribute Negotiation, *Proc. 17th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-2001)*, pp.1195-1201 (2001).
- 24) Jonker, C. and Robu, V.: Automated Multi-Attribute Negotiation with Efficient Use of Incomplete Preference Information, *Proc. 3rd International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS2004)*, Washington, DC, USA, IEEE Computer Society, pp.1054-1061 (2004).
- 25) Jonker, C.M., Robu, V. and Treur, J.: An agent architecture for multi-attribute negotiation using incomplete preference information, *Journal of Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, Vol.15, pp.221-252 (2007).
- 26) Hindriks, K., Jonker, C. and Tykhonov, D.: Interdependencies between Issues for Multi-Issue Negotiation. *Cooperative Information Agents X*, Lecture Notes in Com-

- puter Science, Vol.4149, pp.301–316 (2006).
- 27) Li, M., Vo, Q.B. and Kowalczyk, R.: Searching for Fair Joint Gains in Agent-based Negotiation, *Proc. 8th International Joint Conference on Autonomous Agents and Multi-agent Systems (AAMAS-2009)*, pp.1049–1056 (2009).
- 28) Zhang, D.: Axiomatic Characterization of Task Oriented Negotiation, *Proc. 21st International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-2009)*, pp.367–372 (2009).

(平成 22 年 7 月 1 日受付)

(平成 23 年 1 月 14 日採録)



藤田 桂英 (学生会員)

2008 年名古屋工業大学情報工学科卒業。2010 年同大学院産業戦略工学専攻博士前期課程修了。現在、同大学院情報工学専攻博士後期課程在学中。2010 年 6 月より米国マサチューセッツ工科大学 Sloan School of Management, Visiting Student。現在に至る。マルチエージェントシステムに興味を持つ。2009 年第 24 回電気通信普及財団賞 (テレコムシステム技術学生賞) 受賞ほか。IEEE, 電子情報通信学会各学生会員。