

複数論点交渉問題における相互依存関係指標および スケーラブルな交渉メカニズムの提案

藤田 桂 英^{†1} 伊藤 孝 行^{†1,†2} Mark Klein^{†2}

マルチエージェントシステムの分野で各論点が相互依存関係にある交渉問題が注目されている。しかし、既存の手法では交渉問題に対するスケーラビリティが不十分であった。本論文では、論点間の依存関係に基づいて論点グループを生成し合意形成を行う手法を提案する。また、論点グループ生成に有効な相互依存関係指標を提案する。シミュレーション実験により提案手法が既存の手法と比較して高いスケーラビリティであることを示す。

Interdependency Rate and Scalable Protocol for Multiple Interdependent Issues Negotiation

KATSUhide FUJITA,^{†1} TAKAYUKI ITO^{†1,†2}
and MARK KLEIN^{†2}

Most real-world negotiation involves multiple interdependent issues, which makes an agent's utility functions nonlinear. Traditional negotiation mechanisms, which were designed for linear utilities, do not fare well in nonlinear contexts. One of the main challenges in developing effective nonlinear negotiation protocols is scalability; they can produce excessively high failure rates, when there are many issues, due to computational intractability. One reasonable approach to reducing computational cost, while maintaining good quality outcomes, is to decompose the utility space into several largely independent sub-spaces. In this paper, we propose a method for decomposing a utility space based on four types of issue inter-dependencies. This method allows good outcomes with greater scalability than previous efforts. We also analyze how the types of issue interdependency influence the solution optimality and failure rate.

1. はじめに

マルチエージェントシステムの研究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きた。特に、電子商取引などの分野において、自動交渉の枠組みやメカニズムを開発することで、人の代理として働くソフトウェアエージェントが交渉を行い、電子商取引の自動化が促進される¹⁾。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提案、プライバシーの公開に対する危険性、合意を求める際の計算量爆発など現実の人間同士の交渉とは異なる問題が多数存在する。

複数論点交渉問題に関する多数の既存研究が存在している (2) etc.)。しかし、既存の研究では論点の独立性が仮定されており、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全て独立していることは稀であり、複数の論点が相互依存関係にある場合が多い。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必ずしも良質な合意案を発見できないことが示されている³⁾。

近年、論点が相互依存関係の場合に対応可能な手法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。例えば、入札に基づく交渉手法⁴⁾はエージェントの選好情報を過剰に開示することなく、個々のエージェントが個人効用の最適化を試み、かつ社会的にも効用の高い合意を得ることが可能である。しかし、エージェント数や論点数に関するスケーラビリティが低く、計算量を減らすことが重要な課題の一つとなっている^{5),6)}。

本論文では、各論点の相互依存度に基づく論点グループを決定し、論点グループごとにスケーラブルな合意形成を行なう手法を提案する。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する。生成する際に、正確に相互依存関係グラフを作成するためにすべての制約情報を調査する。次に、メタデータはエージェントの相互依存関係グラフに基づいて存在する相互依存度が最大になるように、全論点をグループごとに分割する。その後、エージェントはグループごとに入札を生成し、それぞれの入札

^{†1} 名古屋工業大学
Nagoya Institute of Technology

^{†2} マサチューセッツ工科大学
Massachusetts Institute of Technology

に評価値を設定する。さいごに、メディエータは入札情報をもとに組み合わせ最適解を求め、グループごとに生成された合意案を組み合わせ最終合意案を求める。本論文ではシミュレーション実験を用いて提案する論点グループに基づく交渉手法が既存の手法と比較して高いスケーラビリティであり、また、合意案の最適性に関して、高い最適率を保つことが可能であることを示す。

論点グループに基づく交渉手法では相互依存度の定義が重要となる。交渉問題における論点間の相互依存度に関する既存研究は存在するが、適切な論点グループを決定することを対象にしていない⁷⁾。本論文では、相互依存度が制約の項数や効用値を考慮した場合に合意案の最適性や合意形成失敗率に対して与える影響を解析する。

本論文の構成を以下に示す。まず、2. 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る。3. では交渉における論点間の相互依存関係と相互依存度の定義に関して述べる。4. では論点グループに関する交渉プロトコルを提案する。5. において評価実験の結果を示す。最後に、6. において関連研究について示し、7. に本論文のまとめを示す。

2. 論点に依存関係が存在する交渉問題

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 $[0, X]$ の範囲の整数を値として持つ ($1 \leq j \leq |I|$)。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 ($1 \leq k \leq |C|$)。制約は、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。制約 c_k は $w_a(c_k)$ の効用値を持ち、 $\epsilon_a(c_k)$ は c_k における項数を示す。 $\delta_a(c_k, i_j)$ 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) である。制約充足条件が存在しない場合は \emptyset となる。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。交渉に参加する全てのエージェントは、全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 $u_a(\vec{s}) = \sum_{c_k \in C, \vec{s} \in x(c_k)} w_a(c_k, \vec{s})$ と定義する。 $x(c_k)$ 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、各論点を取り得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

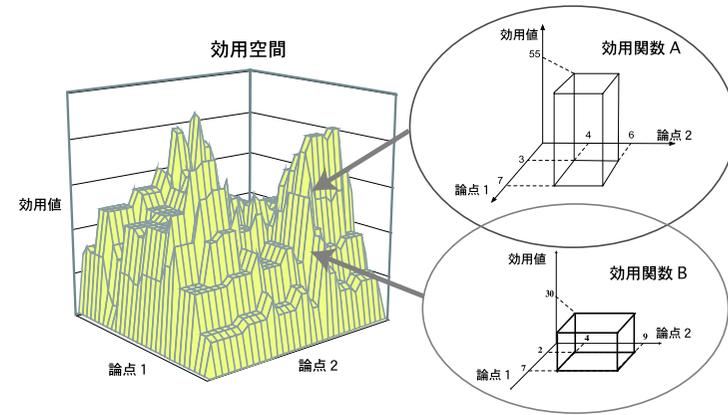


図 1 効用関数と効用空間の例
Fig. 1 An example of a nonlinear utility space

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 と効用関数 B 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。図が示す通り、効用空間は各論点の取りうる値の全組み合わ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。

本論文で提案する交渉プロトコルの目的関数は、以下のように表現できる。 Ag はエージェントの集合を表し、 $|Ag| = N$ である。 $\arg \max_{\vec{s}} \sum_{a \in Ag} u_a(\vec{s})$ 。提案プロトコルは社会的効用、すなわち全てのエージェントの効用の総和を最大化する合意の発見を試みる。

本論文では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を採用しない。なぜならば、交渉の場での効用に関する情報の公開は、実世界のユーザにとって好ましくないからである。具体的な例として、車など商品の売買に対する交渉が挙げられる。売買交渉のようにプレイヤー間で、得られる解に関する効用が相反する場合、売

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

表 1 エージェントがもつ制約情報
Table 1 Utility function for single agent

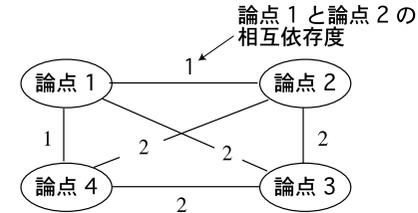


図 2 相互依存関係グラフ
Fig. 2 Interdependency Graph

り手の最低販売価格が明かされてしまうと、買い手は当然その価格での購入を望む。逆に、買い手の最高購入価格が明かされてしまうと、売り手はその価格での売却を希望する。

3. 交渉における論点の相互依存度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 は相互依存関係であるとする。例えば、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、論点 1 と論点 3 に関する二項制約を持っているため論点 1 と論点 3 は相互依存関係となる。

次に、エージェントがも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、以下の 4 種類のエージェント a の論点 j と論点 jj 間の相互依存度を示す。(A) 制約数のみ: $D_a^{(A)}(i_j, i_{jj}) = \#\{c_k | \delta_a(c_k, i_j) \neq \emptyset \cap \delta_a(c_k, i_{jj}) \neq \emptyset\}$. 二論点間の制約数のみを考慮して相互依存度を決定している。(B) 制約における項数を考慮: $D_a^{(B)}(i_j, i_{jj}) = \sum_{c_k \in C} \epsilon_a(c_k)$ if c_k is $\delta_a(c_k, i_j) \neq \emptyset \cap \delta_a(c_k, i_{jj}) \neq \emptyset$. 多数の論点に関する制約が増えるほど相互依存度が高くなる。(C) 制約の効用値を考慮: $D_a^{(C)}(i_j, i_{jj}) = \sum_{c_k \in C} w_a(c_k)$ if c_k is $\delta_a(c_k, i_j) \neq \emptyset \cap \delta_a(c_k, i_{jj}) \neq \emptyset$. 効用値が高い制約が多いほど相互依存度が高くなる。(D) 制約の項数と効用値を考慮: $D_a^{(D)}(i_j, i_{jj}) = D_a^{(B)}(i_j, i_{jj}) * D_a^{(C)}(i_j, i_{jj})$. (B) と (C) の要素を考慮している。

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。

$$G(P, E, w) : P = \{1, 2, \dots, |I|\} (\text{finite set}), E \subset \{\{x, y\} | x, y \in P\}, w : E \rightarrow R$$

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、重みを相互依存係数とした、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。

4. 論点間の依存関係に基づく合意形成モデル

本章では、相互依存関係グラフに基づいて論点グループごと交渉論点を分割し、入札に基づく交渉手法⁴⁾を基に合意形成を行なう手法を提案する。本手法は分割しない場合と比較して、高いスケーラビリティが期待できる。以下に論点グループに基づく交渉手法の詳細を示す。

[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、エージェントがも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。本手法を用いた場合、すべての依存関係が調査できるため誤りがない相互依存関係グラフを作成できる。また、計算時間は制約数に対して線形時間となる。その後、エージェントはメディアータに相互依存関係グラフを公開する。

[Step2: 論点グループの決定] 本ステップではメディア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最適な論点グループを決定する。本手法では、論点グループ数はあらかじめ決められているものとする。まず、メディア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以下の社会的相互依存度に変更したグラフである： $\sum_{a \in N} D_a(i_j, i_{jj})$ ($D_a(i_j, i_{jj})$ エージェント n における論点 i_j と論点 i_{jj} 間の相互依存度)。

論点グループ数は少ないほど、最終的に見つかる解の最適性が高いが 1 グループが考慮する論点数が増えるため、合意形成失敗率が增加する。一方、論点グループ数が多いほど、最終的に見つかる最適性が下がるが、1 グループが考慮する論点数が減るため、合意形成失敗

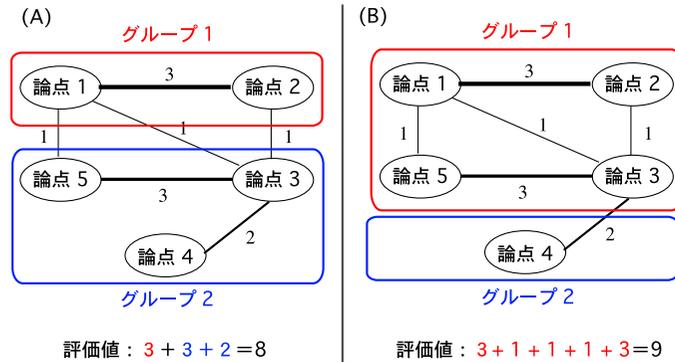


図3 グループ分割における評価値
Fig. 3 Evaluation value in identifying issue-groups

率が減少する。

次に、社会的相互依存関係グラフを用いて、交渉問題を論点グループ別に分割する。本論文では、グループ数をあらかじめ決めておき、シミュレーテッドアニーリング (SA)⁸⁾ で評価値を最大化する手法を採用する。シミュレーテッドアニーリング (SA) で採用する評価値はグループに分割した場合に存在するエッジの重みの和である。図3は二つのグループに分割する際に用いる評価値の具体例を示している。(A)のようにグループ分けした場合の評価値は、グループ1には論点1と論点2間におけるエッジの評価値3、グループ2には論点3、論点4と論点5間におけるエッジの評価値3および2の和の8となる。また、(B)のようにグループ分けした場合、評価値は論点1、論点2、論点3および論点5間のエッジの重みの和の9となる。

[Step3: 入札の生成] まず、エージェントは全ての論点を対象にして入札を生成する。具体的には、まず効用の高い合意案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められ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)⁸⁾ 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。エージェントは、サンプルを調整して得られた各合意案に関して効用を計算する。ここでの効用とは合意案を充足する制約の効用の総和である。効用が閾値を越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と同一の効用が得られる周辺全てをカ

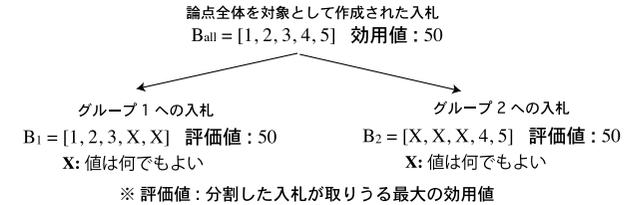


図4 エージェントによる入札の分割
Fig. 4 Division for the bid by agents

バーするように生成される。このような入札は、合意案に充足される全ての制約の共通範囲を取ることで容易に生成できる。

次に、全ての論点を対象にして生成した入札をグループ別に分割し、分割した入札に対して評価値を決定する。評価値は、分割した入札が取りうる最大の効用値とする。例えば図4が示すようにすべての論点数が5であり、全論点対象に生成した入札 ($B_{all} = [1, 2, 3, 4, 5]$ でそのときの効用値 50) を論点 1-3 が対象のグループ 1 の入札 (B_1) と論点 4,5 が対象のグループ 2 の入札 (B_2) の 2 つに分割する場合を考える。以上の設定のとき、 $B_1 = [1, 2, 3, X, X]$, $B_2 = [X, X, X, 4, 5]$ (X : 値は何でも良いことを示す) と分割される。また、 B_1, B_2 とも評価値として 50 が設定される。全範囲の入札を行なう際に SA によるサンプリングポイントの最適化を行なうため、 B_1, B_2 とも分割した入札の取りうる最大値は $B_{all} = [1, 2, 3, 4, 5]$ となることが保証される。本論文では、分割された入札における評価値として、分割された入札が取りうる最大値としている。本論文の評価値の設定により存在する合意案候補のうち最適な合意案を発見することが可能となる。

[Step4: 合意案の発見] 各エージェントの全ての入札の組み合わせを考慮し、グループ内で関係する論点間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、グループに関係する論点間で互いに無矛盾で、最も評価値の高い入札の組み合わせを決定する。具体的には、まず、入札が持つ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評価値が高いものを、合意案として選択する。各入札がもつ社会的効用を最大化する入札の組み合わ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、各グループから生成された合意案を組み合わせ、最終的な合意案を作成する。もし、グループ外の論点に関して相互依存関係がなくなれば、最終的に組み合わせられた最終的な合意案は、各グループで作成された合意案の評価値と一致するため、最適な合意案を発見できる。

5. 評価実験

5.1 実験設定

本実験では、エージェント間の交渉を100回試行し平均値を取る。效用空間作成のパラメータは以下の通りである。論点の値域：[0,9]，制約数：10（単項制約），5（二項制約），5（三項制約）。制約の最大効用：100 × (論点数)。従って、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。制約の最大範囲：7。この設定の下では、例えば、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)-(d)は本論文で提案した論点グループに基づく交渉手法である。論点グループに基づく手法の相互依存度は第3章で定義したものを採用しており、(a)は $D_a^{(A)}$ ，(b)は $D_a^{(B)}$ ，(c)は $D_a^{(C)}$ ，そして(d)は $D_a^{(D)}$ とする。“(e) Basic Bidding”は4)で提案されている入札に基づく交渉手法であり、本論文で提案した論点グループを生成しない手法である。“(f) Q-Factor”文献5), 6)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。以下は、(a)-(f)で共通して用いる、入札の生成に関するパラメータ⁴⁾である。サンプリング数：(論点数) × 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エージェント当りの入札数の上限： $\sqrt[3]{6400000}$ (N : エージェント数)。本設定により、勝者決定において、6,400,000以上の入札の組合せは計算されないため、実用的な計算時間内で解が得られる。(a)-(d)で用いる論点グループに基づく交渉プロトコルにおいて、グループ分割の際に用いる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10回繰り返す。本設定は、グループ分割における計算コストは高々 $Number\ of\ issues \times C \times Number\ of\ groups$ 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。また、論点グループ数は3に設定した。(f)で用いるQ-Factorの式は $Q = u^\alpha * v^\beta$ (u : 効用値, v : 入札がもつ範囲)を採用し、 $\alpha = 0.5$, $\beta = 0.5$ とする。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の困難が生じる。そこで、全エージェントの効用関数をすべてメディアータに公開し、シミュレーテッドアニーリング(SA)⁸⁾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まで下げることで初期解はランダムに選択する。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。

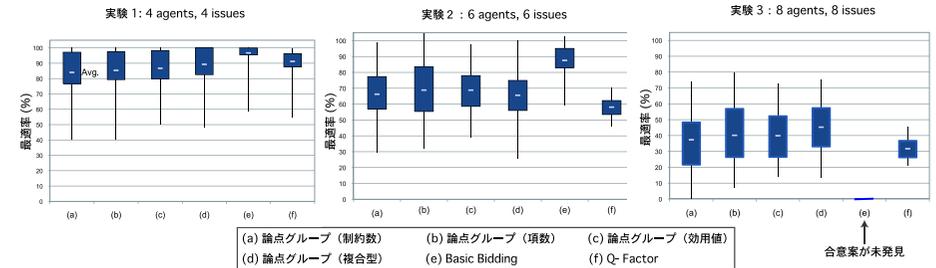


図5 ボックスプロット図 (最適率)
 Fig. 5 Box-plots of the optimality rate

また、最適率を求める際は合意形成失敗の交渉は結果に考慮せず、すべて合意形成に成功した場合のみ考えることとする。実験は JAVA2(1.5) で記述し、Mac OS 10.5 が動作している iMac (Core2Duo 2.33GHz メモリ 1.5GB) で行った。

5.2 実験結果

図5は各手法の最適率の比較を示している。線は最大もしくは最小を示しており、箱は標準偏差の ± 1 ，中央のラインは平均値を示している。(a)-(d)と(f)を比較した場合、論点数が大きくなるにつれて論点グループに基づく手法の方がQ-Factorに基づく手法と比較して高い最適率になってきている。論点グループに基づく手法の最適率が高くなる理由は、グループに基づく手法の方が交渉空間を分割して合意形成を行うため論点数が大きくなっても効率よく良解を発見できるためである。また、(d)の効用値や関係する制約の項数を考慮した方が他の論点グループに基づく手法と比較して高い最適率になっている。t分析を行った場合でも実験3の(a)と(d)に優位差が見られた($t(198) = 0.003, P < 0.05$, one-sided testing)。したがって、効用値が高く、関係する項数が高い制約の比重を高くすることで、最適率を向上することが可能である。

図6は合意形成失敗率の比較を示している。(a)-(d)と(e)を比較すると、(a)-(d)の方が低い合意形成失敗率になっている。(a)-(d)が合意形成失敗の回避に有効な理由は、入札の組み合わせ最適解を求める際の計算コストが削減されているためである。また、(a)と(f)を比較した場合、合意形成失敗率に大きな差は見られなかった。(a), (f)とも、グループ数やQ-Factorなどの値の調整により合意形成失敗率を大きく改善することが可能である。

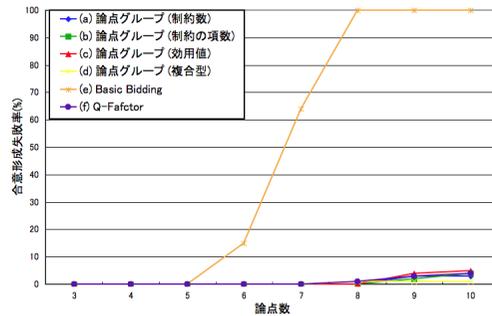


図 6 合意形成失敗率
Fig. 6 Failure rate

6. 関連研究

本研究の先行研究として閾値調整メカニズム⁹⁾が存在する。閾値調整メカニズムは入札に関する閾値を調整しながら交渉を行なうことで、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 3) では、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。文献 10) で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。さらに、文献 11) は時間制約が存在する二者間交渉を提案している。これらの研究は興味深い観点から様々な手法が提案されているが、どれも二者間に限った設定である。文献 12) 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もと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。

7. おわりに

本論文では、論点グループに基づく合意形成手法を提案した。論点グループに基づく交渉手法では、エージェントが作成した相互依存関係グラフに基づいて、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。シミュレーション実験を用いて、既存の手法と比較して低い合意形成失敗率であることを示した。また、相互依存度の定義が最適率や合意

形成失敗率に与える影響を解析した。今後の課題として、基数的効用だけでなく序数的効用の方が現実的な場合も存在する。特に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。

謝辞 本研究は JST 戦略的創造研究推進事業（さきがけ）より支援を受けている。

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) 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).
- 4) Ito, T., Hattori, H. and Klein, M.: Multi-issue Negotiation Protocol for Agents : Exploring Nonlinear Utility Spaces, *Proc. of IJCAI-2007*, pp.1347–1352 (2007).
- 5) 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. of AAMAS-2009*, pp.1057–1064 (2009).
- 6) 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 Nonlinear Utility Spaces, *Proc. of IJCAI-2009*, pp.214–219 (2009).
- 7) Tamura, H. and Nakamura, Y.: Decompositions of Multiattribute Utility Functions Based on Convex Dependence, *Operations Research*, Vol.31, No.3, pp.488–506 (1983).
- 8) Russell, S.J. and Norvig, P.: *Artificial Intelligence : A Modern Approach*, Prentice Hall (2002).
- 9) 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), Vol.25, No.4, pp.167–180 (2008).
- 10) Robu, V., Somefun, D. J.A. and Poutre, J.L.: Modeling complex multi-issue negotiations using utility graphs, *Proc. of AAMAS 2005*, pp.280–287 (2005).
- 11) Fatima, S.S., Wooldridge, M. and Jennings, N.R.: Approximate and online multi-issue negotiation, *Proc. of AAMAS-2007*, pp.947–954 (2007).
- 12) Hindriks, K., Jonker, C. and Tykhonov, D.: Eliminating Interdependencies Between Issues for Multi-issue Negotiation, *Cooperative Information Agents X, Lecture Notes in Computer Science*, Vol.4149, pp.301–316 (2006).