

大規模交渉問題におけるグループ数の調整に基づいた合意形成手法

A Consensus Mechanism based on Adjustment of Issue-Groups for Multi-issue Negotiation

藤田 桂英*¹
Katsuhide Fujita伊藤 孝行*^{1*2*3}
Takayuki Ito水谷 信泰*¹
Nobuyasu MizutaniMark Klein*²*¹名古屋工業大学大学院 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

*³科学技術振興機構 (JST) さきがけ 研究員

Researcher, JST PREST

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 issue interdependencies. We expand our mechanism to be multi-round as adjusting the number of issue-groups. This multi-round protocol can find high quality solutions with high scalability.

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 [Kraus 01]。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 ([Faratin 02] 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 [Klein 03]。

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 [Ito 07] 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 [Marsa-Maestre 09a, Marsa-Maestre 09b]。

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ラブルな合意形成を行なう手法を提案している [藤田 09]。論点グループに基づく交渉手法において、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。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、論点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。

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調整し、最適率および合意形成失敗率のトレードオフを調整する必要がある。本論文では、論点グループに基づく交渉手法を論点グループ数を変更しながらの複数ラウンド交渉へ拡張する。複数ラウンドへの拡張によりスケラビリティの高さを維持しながら、良質な合意案を発見できる。また、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最適率およびスケラビリティを調整しながら合意形成が可能であることを示す。

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もつ非線形の効用空間について述べる。3. では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。4. 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。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. 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

連絡先: 藤田 桂英, 名古屋工業大学 情報工学専攻, 愛知県名古屋市昭和区御器所町, Tel: 052-735-7968, Fax: 052-735-7407, fujita@itolab.mta.nitech.ac.jp

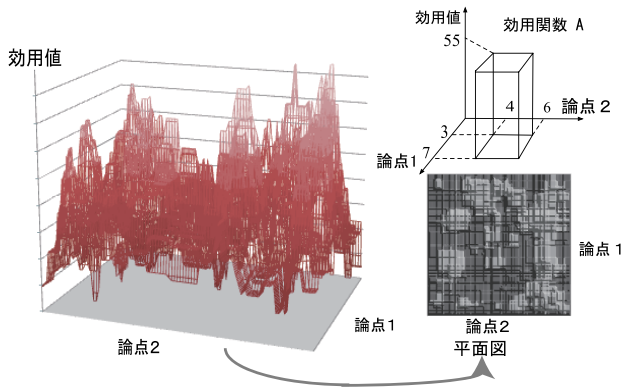


図 1: 効用関数と効用空間の例

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。 $\delta_a(c_k, i_j)$ 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 $u_a(\vec{s}) = \sum_{c_k \in C, \vec{s} \in x_a(c_k)} w_a(c_k, \vec{s})$ 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。

3. 論点グループに基づく交渉プロトコル

3.1 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考えられる。例えば、あるエージェントが、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 を得る制約を持つとする。

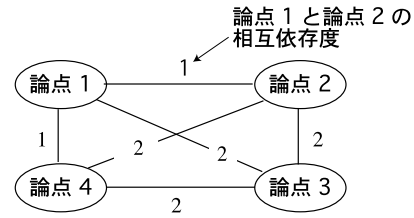


図 2: 相互依存関係グラフ

すると、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、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。

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

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。

3.2 論点間の依存関係に基づく合意形成モデル

[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。

[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最適な論点グループを決定する。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 a における論点 i_j と論点 i_{jj} 間の相互依存度)。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を決定する。本論文では、論点グループ数の決定後、近傍探索手法 [Russell 02] で評価値を最大化する手法を採用する。近傍探索手法で採用する評価値は論点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。

[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)[Russell 02]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バーするように生成される。このような入札は、合意案 s 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論点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。

[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、論点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、論点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、各論点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、論点グループ外の論点に関して相互依存関係が全くなければ、最終的に組み合わせられた最終的な合意案は、各論点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。

4. 複数ラウンド交渉プロトコルへの拡張

3. で提案した論点グループに基づく手法は論点グループ数の決定がスケラビリティおよび合意案の最適率に大きな影響を与える。なぜなら、論点グループ数の変化に対して、最適率、合意形成失敗率がトレードオフになっているからである。つまり、論点グループ数が増加するごとに最適率が減少する一方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。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。

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拡張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。具体的には、まず、3. の Step1 を実行する。次に論点グループ数を1に初期値を設定し、3. の Step2 - Step4 を実行する。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。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3. の Step2 - Step 4 を実行する。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。本拡張により必ず合意できかつ最適率の高い論点グループ数を決定できる。Algorithm1 に詳細を示す。

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。効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： $100 \times (\text{論点数})$ 。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

Algorithm 1 Multi-Round_IssueGroup()

```

 $\bar{I} = \{i_1, i_2, \dots, i_N\}, Ag = \{a_1, a_2, \dots, a_M\}$ 
Generate_Graph(Ag): Genrating 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  $i \leq \text{number of issues do}$ 
4:    $maxSolution = Find\_Solution(i)$ 
5:   if find  $maxSolution$  then
6:     break loop
7:   else
8:      $i := i + 1$ 
9:   end if
10: end while
11: return  $maxSolution$ 

```

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) 論点グループ”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。“(B) Basic Bidding”は[Ito 07]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”[Marsa-Maestre 09a]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。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。

各手法で用いる入札の生成に関するパラメータは以下のようになる。サンプリング数:(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ト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)。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高々 $Number\ of\ issues \times C_{Number\ of\ groups}$ 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。

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アータに公開し、SA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。最適率として(各手法で求めた解の効用値) / (近似最適解)を用いる。また、最適率を求める際は合意形成失敗つまり合意案が発見できない場合は解の効用値を0とする。

実験はJAVA2(1.5)で記述し、Mac OS 10.6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3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) 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

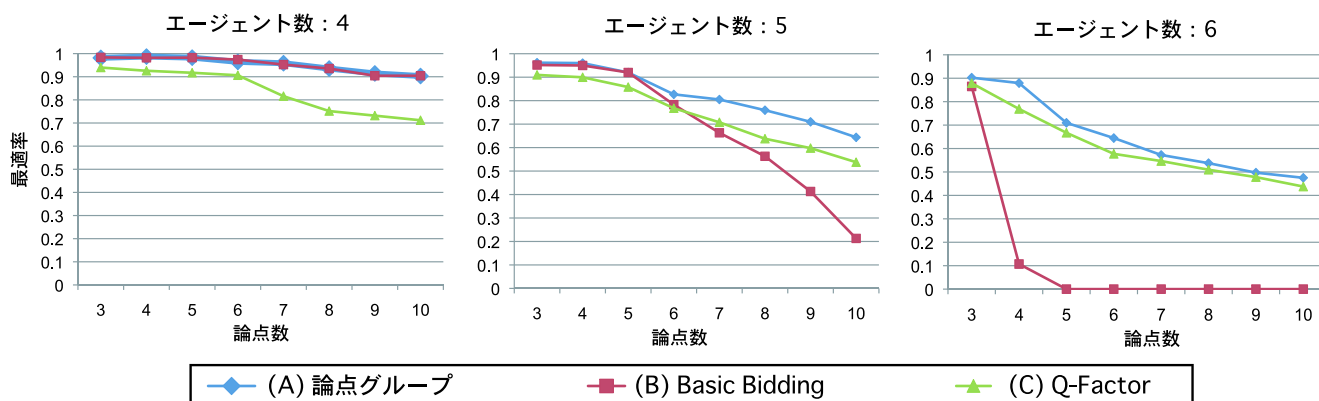


図 3: 最適率の比較

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、合意案を全く発見できていない。一方、提案手法 (A) 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) と“(C) Q-Factor”を比較した場合、(A) の方が高い最適率を示している。(A) 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。また、(A) のグラフにおいて、エージェント数 6 の論点 4 と論点 5 間など急激に最適率が減少する場面がある。急激な減少の理由は、合意案を発見した論点グループ数が増加し最適率が減少したためである。

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 [藤田 08] 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、メディア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。[Klein 03] 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ア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。[Robu 05] 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、[Fatima 07] 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。[Hindriks 06] 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。また、論点グループに基づく交渉手法を論点グループ数を増加しながらの複数ラウンドの交渉プロトコルへ拡張を行った。シミュレーション実験を用いて、既存の手法と比較して提案手法が良解を発見できて

いることを示した。今後の課題として、本論文で扱っている効用関数や交渉手法が基数的効用だけでなく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

- [Faratin 02] Faratin, P., Sierra, C., and Jennings, N. R.: Using Similarity Criteria to Make Issue Trade-offs in Automated Negotiations, in *Artificial Intelligence*, pp. 142:205–237 (2002)
- [Fatima 07] Fatima, S. S., Wooldridge, M., and Jennings, N. R.: Approximate and online multi-issue negotiation, in *Proc. of AAMAS-2007*, pp. 947–954 (2007)
- [Hindriks 06] 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)
- [Ito 07] Ito, T., Hattori, H., and Klein, M.: Multi-issue Negotiation Protocol for Agents: Exploring Nonlinear Utility Spaces, in *Proc. of IJCAI-2007*, pp. 1347–1352 (2007)
- [Klein 03] 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)
- [Kraus 01] Kraus, S.: *Strategic Negotiation in Multiagent Environments.*, Cambridge University Press (2001)
- [Marsa-Maestre 09a] Marsa-Maestre, I., Lopez-Carmona, M. A., Velasco, J. R., and Hoz, de la E.: Effective bidding and deal identification for negotiations in highly nonlinear scenarios, in *Proc. of AAMAS-2009*, pp. 1057–1064 (2009)
- [Marsa-Maestre 09b] 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, in *Proc. of IJCAI-2009*, pp. 214–219 (2009)
- [Robu 05] Robu, V., Somefun, D. J. A., and Poutre, J. L.: Modeling complex multi-issue negotiations using utility graphs, in *Proc. of AAMAS 2005*, pp. 280–287 (2005)
- [Russell 02] Russell, S. J. and Norvig, P.: *Artificial Intelligence: A Modern Approach*, Prentice Hall (2002)
- [藤田 08] 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)
- [藤田 09] 藤田 桂英, 伊藤 孝行, Klein, M.: 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, in *Proc. of JAWS-2009* (2009)