

# 複数論点交渉問題における Risk Attitude を考慮した効用モデルの検証

A Utility Model based on Risk Attitude for Multiple interdependent Issues Negotiations

藤田 桂英\*1 伊藤 孝行\*1\*2 Mark Klein\*2  
Katsuhide Fujita Takayuki Ito

\*1名古屋工業大学大学院 産業戦略工学専攻  
Techno-Business Administration, 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

Multiple issue negotiation represents an important field of study. While there has been a lot of previous work in this area, most of it deals exclusively with simple negotiations involving multiple independent issues, where the agent's utility functions are modeled as being linear, with single optima. Our work focuses on negotiations with multiple interdependent issues in which agent utility functions are highly nonlinear. Basically, in existing works, a utility space is represented by accumulation of "cube"-shaped utility units, which is called a "cube"-constraint. In this paper, we define utility function based on "cone"-constraints. This utility function is more realistic than existing works and configures the risk attitudes to the cone-constraint. If the utility function has cone-constraint features, the utility space becomes extremely nonlinear, making it difficult to find the optimal agreement point. Protocols well-suited for small negotiations, unfortunately, work poorly when applied to cone-based utility spaces.

## 1. はじめに

マルチエージェント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。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。

マルチエージェントにおける複数論点交渉問題に関して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、各論点が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]。

筆者らは、各論点が相互依存関係の複雑な交渉問題を想定した制約に基づく効用関数を提案している ([Ito 07] etc.)。文献 [Ito 07] で定義されている制約は、車の黒度合いが 1 - 4、車の大きさ度合いが 2 - 5 の時に効用値 2.0 をもつ制約のように表現され、制約は形状から cube-constraint と定義される。本論文では一般制約と定義する。また、一般制約を集積し、状態空間にプロットした空間として効用空間を作成した。一般制約を用いた効用空間では凹凸の激しい複雑な効用空間となる。

しかし、現実世界の効用はある中心となる理想的な状態が決められ、理想状態から差異が応じるにしたがって徐々に効用

が減少していき、ある程度差異が応じると効用が 0、つまり価値がないものと判断される場合が多い。本論文では、以上の条件を現時点まで行ってきた効用関数の定義を取り入れ、新たにコーン制約 (cone-constraint) を定義する。また、コーン制約は合意形成に失敗するリスクに対する態度 (Risk Attitude) を定義することができる。Risk Attitude の導入により効用関数がより現実的になるだけでなく、エージェントの態度を効用関数に反映することができる。

コーン制約を用いた場合、一般制約と比べて合意案となる範囲がより狭くなるため、良質な合意案の発見が困難となる。本論文では、コーン制約に対して近傍探索 [Russell 02] に基づいた手法やオークションに基づく交渉問題 [Ito 07] を用いた場合、最適な合意案発見にどのような影響を与えるかをシミュレーション実験により解析する。また、Risk Attitude が合意形成に対して与える影響について解析を行う。

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の設定を示す。次に、3. ではコーン制約の定義を行い、4. においてシミュレーション実験をもとにコーン制約の解析を行う。最後に、5. に、コーン制約に対する交渉手法の適用について議論を行い、6. に本論文のまとめを示す。

## 2. 非線形効用関数に基づく交渉

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。論点が  $I$  個存在し、個々の論点を  $i_j \in I$  と表す。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コーン制約を用いて表現する。詳細は 3. に示す。 $l$  個の制約が存在するとし、個々の制約は  $c_k \in C$  と表す。制約  $c_k$  は、合意  $\vec{s}$  によって充足される場合のみ、 $w_i(c_k, \vec{s})$  を効用値として持つことができる ( $1 \leq k \leq l$ )。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。

連絡先: 藤田 桂英, 名古屋工業大学産業戦略工学専攻, 愛知県名古屋市中昭和区御器所町, fujita@itolab.mta.nitech.ac.jp

合意  $\vec{s}$  に関するエージェント  $i$  の効用を  $u_i(\vec{s}) = \sum_{c_k \in C, \vec{s} \in x(c_k)} w_i(c_k, \vec{s})$  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。この効用表現により、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。

線形の効用関数を前提とする既存のプロトコルでは、合意案の効用は個々の論点に関する効用の加重和であるため、平坦な超平面上での単一最適化により、良質な合意案を得ることができる。しかし、効用空間に不規則な凹凸がある非線形の効用空間では、既存のプロトコルを適用して、良い解を得ることは難しい。したがって、本論文では、エージェントは合意案の効用を正確に評価するための完全な知識(効用関数)は持っているが、自身の効用関数に対して最適な合意案を事前に把握することが困難であることが前提となる。

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。

$$\arg \max_{\vec{s}} \sum_{i \in Ag} u_i(\vec{s})$$

言い換えると、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. コーン制約に基づく効用空間

実世界の効用はある中心となる理想的な状態が決められ、理想状態から差異が応じるにしたがって徐々に効用が減少していき、ある程度差異が応じると効用が0、つまり価値がないものと判断される場合が多い。本論文では、以上の条件を文献 [Ito 07] における効用関数の定義を取り入れ、新たにコーン制約 (cone-constraint) を定義する。

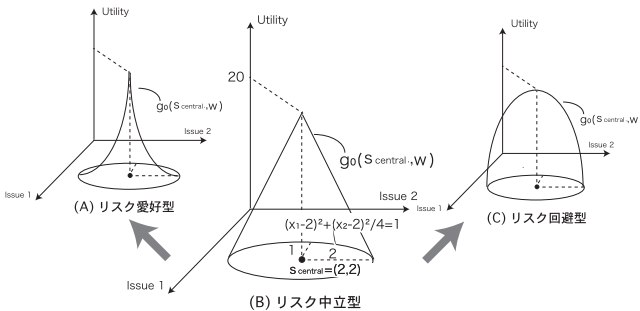


図 1: コーン制約の例

コーン制約  $c_k$  は、制約における中心ベクトル (central vector)  $\vec{s}_{central}$  と中心ベクトルにおける効用値  $u_i(\vec{s}_{central})$ 、影響範囲 (impact region)  $\vec{w}$  そして傾斜関数 (gradient function)  $g_k(\vec{s}_{central}, \vec{w})$  から定義される。中心ベクトル (central vector)  $\vec{s}_{central}$  はコーン制約において最大の値を示す状態ベクトルであり、理想的な状態である。したがって、中心ベクトルにおける効用値は必ずコーン制約における最大値となる。図 1 は論点 1 と論点 2 における二項コーン制約の例を示している。図 1 では中心ベクトル  $\vec{s}_{central} = [2, 2]$  のとき、最大の効用値 20 を示

す。また、影響範囲 (impact region)  $\vec{w}$  は中心から差異が応じてても 0 にならない範囲つまり影響を及ぼす範囲を示す。図 1 では影響範囲  $\vec{w} = [1, 2]$  となり、論点 1 の影響範囲が 1、論点 2 の影響範囲が 2 と表現される。図 1 の底面は短径 1、長径 2 の楕円形を示し、底面の弧を表す式は  $(x_1 - 2)^2 + (x_2 - 2)^2 / 4 = 1$  と表現される\*1。

また、コーン制約における傾斜関数  $g_k(\vec{s}_{central}, \vec{w})$  は中心ベクトル  $\vec{s}_{central}$  と影響範囲  $\vec{w}$  から決定される。傾斜関数  $g_k(\vec{s}_{central}, \vec{w})$  の設定により各効用関数の制約における Risk Attitude を定義することができる。本論文ではこの Risk Attitude を合意形成が失敗する危険性 (Risk) に対してエージェントが示す態度と定義する。具体的には、もしエージェントがリスク中立型であれば図 1 の (B) が示すようなコーン制約となる。また、エージェントがもしリスク愛好型ならば合意形成しにくい図 1 の (A) の形で表現される。エージェントがもしリスク回避型ならば合意形成しやすい図 1 の (C) の形で表現される。

本論文では傾斜関数は合意形成に関するリスクを示すが、一方、個々の制約の理想状態 (中心ベクトル) から外れた部分での合意を回避するかどうかの嗜好とも考えられる。個人合理性の面からみると合意形成の際に理想状態から外れた状態で合意を形成するのは、自身の効用が低い部分で合意形成がされるため個人合理性が満たされているとはいえない。一方、社会的合理性の面からみると、合意が形成される可能性が高いため合理的である。現実世界では理想状態に近い部分で合意できることと合意形成ができることはトレードオフの関係にある。したがって、コーン制約における傾斜関数は合意形成が失敗するリスクと理想状態から外れた状態での合意を回避するか否かの両面を示している。

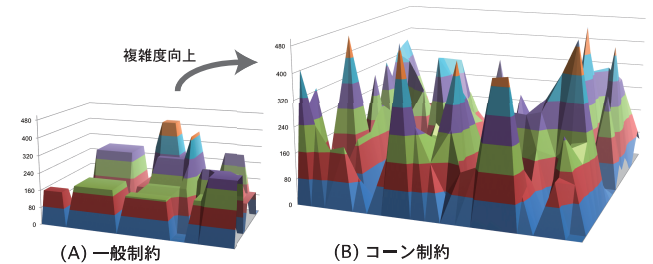


図 2: 非線形効用空間の例

図 2 は論点数 2 の場合における、一般制約 [Ito 07] とコーン制約を用いた非線形効用空間を示している。効用関数 (A), (B) とも山と谷が入り組んだ複雑な効用空間を示している。一般制約 [Ito 07] とコーン制約を用いた効用空間を比較した場合、コーン制約の方が一般制約より最大点となる範囲が狭くなっている。進化的計算法の評価値ランドスケープの複雑さとして Correlation length [Weinberger 90] が一般的に用いられている。Correlation length は相関関係が存在する効用空間におけるサンプル間の最小距離と定義されており、本効用空間の設定では一般制約における幅の最小値として定義される。一般制約では Correlation length は 1 以上の値を示す。しかし、コーン制約においてサンプル間の最小距離は中心ベクトルつまり頂点を示すため、コーン制約の Correlation length は

\*1 一般的な底面の弧の式は  $\sum_{i=1}^m x_i^2 / w_i^2 = 1$

必ず1となる．したがって，コーン制約は一般制約と比較して非線形性つまり複雑度が増している．

## 4. 実験結果

### 4.1 実験設定

本実験では，ランダムに生成された効用関数をもつエージェント間の交渉を100回試行し平均値を取る．全エージェント数は6である．効用関数の設定：各エージェントにおける効用関数の制約数は10(単項制約)，5(単項制約を除く各次元)である．中心ベクトルにおける効用値は100\*(論点数)で，制約の影響範囲の最大値を4とし<sup>\*2</sup>，中心ベクトルも含めてすべてランダムに生成される．傾斜関数は $u(\vec{s}) = (\text{中心ベクトルの効用値}) * (1 - (\text{distance}) / (\text{影響範囲}))$ (distance:  $\vec{s}$ と中心ベクトルの距離)とする．本実験では6つの手法の比較を行う．まず，“(A) SA”，“(B) HC”，“(C) GA”，“(D) Exhaustive Search”は効用関数をすべて中心に集めてシミュレーテッドアニーリング(A)，山登り法(B)，遺伝的アルゴリズム(C)[Russell 02]および全探索(D)で探索を行う手法である．“(E) Bidding based Protocol”は文献[Ito 07]において提案されているオークションに基づく交渉プロトコルである．以下に各探索手法とオークションに基づく交渉プロトコル[Ito 07]の設定を示す．山登り法(HC)の設定：HCはランダム再スタート山登り法[Russell 02]を用いる．繰り返し回数を $20 + (\text{論点数}) \times 5$ 回とする．シミュレーテッドアニーリング(SA)の設定：分散メディエータに基づく交渉プロトコルでは初期温度を50度として，500回の繰り返し処理で温度を0まで下げることとする．さらに，初期状態をランダムに変化させながら $20 + (\text{論点数}) \times 5$ 回探索を行う．全探索の設定：全探索は，効用空間に存在するすべて状態における効用値の和を求め，最大の状態を探索する．全探索は必ず最適な合意案が求まるが，論点数の増加にしたがって計算時間が指数関数的に増加する．本実験では現実時間内で交渉を終了させるため， $10^5$ ミリ秒以内に探索が終了しなければ合意形成に失敗したと判定する．オークションに基づく交渉プロトコルの設定：サンプリングはランダムに $200 * (\text{論点数})$ 行い，閾値は200とする．また，各エージェントの入札数制限は $\sqrt[3]{6,400,000}$ (エージェント数:  $N$ )とする．本入札数制限は，現実時間内で交渉を終了させるために採用している[Ito 07]．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．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．

### 4.2 実験結果

図3は論点数の変化に対する最適率の比較を示している．本実験の目的は複雑で合意案発見が困難な状況において，どれほど良質な合意案が発見出来ているかを比較する．したがって，本問題の効用空間は各論点の値域を0~9とし，合意案発見を困難にしている．また，図3の縦軸は(各手法で求めた最適合意案)/(A) SAとする．また，“(D) Exhaustive Search”と“(E) Bidding based Protocol”は合意形成失敗回数の急増により論点数6および7までしか求められなかった．

図3が示すように，“(C) GA”は“(D) Exhaustive Search”に次いで高い値を示している．GAがコーン制約においても有効な理由として，非線形性の複雑度が高い状態でも近辺の子孫を作り出せるため，複雑度の影響を大きく受けることなく合意

\*2 例えば，(論点1, 論点2, 論点3) = ([2,6],[2,4],[1,3])の影響範囲が妥当なものとして生成される．

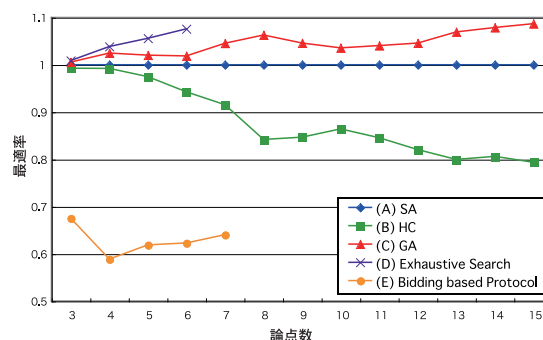


図3: 最適率の比較

案を探索できるためである．“(A) SA”は論点数が増加しても大きく減少することはない．SAが論点数が増加しても高い値を示す理由は，SAは温度が高い状態で大胆に移動する性質から他の手法と比較して局所的最大に陥る可能性が低いからである．しかし，SA，GAともコーン制約の複雑性により，局所的最大に陥る可能性が増加しているため，必ずしも最適な合意案を発見できていない．一方，“(B) HC”は論点数の増加にしたがって急激に減少している．HCの減少の理由としては論点数の増加にともない効用空間の広さが急激に増加するため，単純に効用が高い状態へ進む山登り法は局所的最大に陥る可能性が増加するからである．“(E) Bidding based Protocol”と他の手法を比較した場合，(E)があまり良質な合意案を発見できていない．(E)が良質な合意案が発見できない理由は，入札数制限により，本来得られるはずの良質な合意案を見逃してしまうからである．

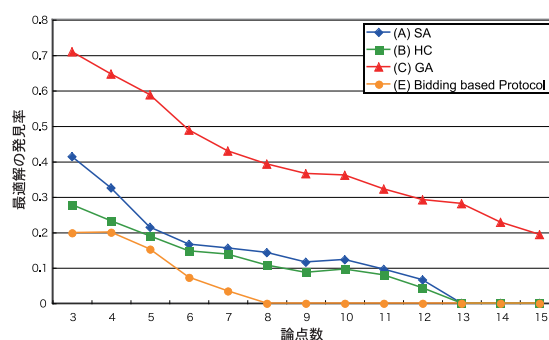


図4: 最適合意案の発見率

図4は交渉問題に存在する複数の社会的効用最大な合意案のうち，どれだけの割合で発見できるかを示している．本実験により，各手法が合意案集合の発見に対して有効かを比較できる．本実験における各論点の値域を0~4とし，各手法が最適な合意案を発見しやすい設定とする．

図4が示すように，“(C) GA”は最適合意案の発見率に対して最も高い値を示している．GAが合意案集合を発見するのに優れている理由として，(1) 遺伝的アルゴリズムが社会的効用最大の合意案を発見するのに優れている．(2) 合意案集合のうち合意案を1つ発見すると，その発見した合意案を親として近傍に存在する合意案集合を発見できる．という2点が考えられる．“(A) SA”と“(B) HC”は論点数の増加にしたがって，急激に減少している．SA, HCが急激に減少する理由

は、(1) SA, HC が合意案集合を発見することに優れていない。(2) コーン制約による複雑度の増加により、論点数が増加することによる合意案発見の困難性が急激に増加している。2点と考えられる。“(E) Bidding based Protocol” と他の手法を比較した場合、(E) があまり良質な合意案を発見できていない。(E) が良質な合意案が発見できない理由は、入札数制限により、本来得られるはずの合意案をいくつか見逃してしまうからである。しかし、すべての手法において論点数が大きくなると発見率は低い値となる。発見率の急激な減少の理由は、コーン制約の導入による効用空間の複雑さが増加していることが考えられる。

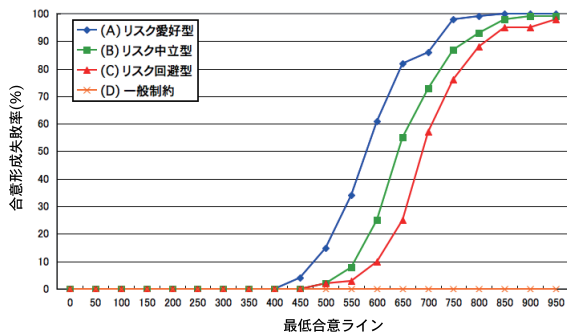


図 5: 合意形成失敗率

図 5 では、コーン制約に導入した Risk Attitude が反映していること示している。本実験では、各エージェントが得られる効用値が最低合意ライン以上でなければ合意を形成しないものとし、最低合意ラインを変化させたときの、合意形成失敗率の変化を示している。本実験における論点数は 6、各論点の値域は 0~9 であり、リスク愛好型の傾斜関数を  $u(\vec{s}) = (\text{中心ベクトルの効用値}) * \log(e - (\text{distance}) / (\text{影響範囲})) * (e - 1)$ 、リスク中立型の傾斜関数を  $u(\vec{s}) = (\text{中心ベクトルの効用値}) * (1 - (\text{distance}) / (\text{影響範囲}))$ 、リスク回避型の傾斜関数を  $u(\vec{s}) = (1 - (\text{中心ベクトルの効用値}))^{(\text{distance}) / (\text{影響範囲})} + (\text{中心ベクトルの効用値}) - 1$  (distance:  $\vec{s}$  と中心ベクトルの距離) と定義する。また、合意形成手法としては SA に基づく交渉手法を採用した。

グラフが示すように、リスク愛好型、リスク中立型、リスク回避型の順で合意形成失敗率が高くなっている。以上から、傾斜関数が合意形成失敗のリスクを正しく反映できていることがわかる。また、一般制約はコーン制約と比較して、低い値を示している。以上から、一般制約はコーン制約において最大リスク回避型であると考えられる。

## 5. 議論

一般制約を対象とした手法として、いくつかのオークションに基づく交渉メカニズム基にした交渉手法が提案されている [藤田 08, Ivan Marsa-Maestre 09]。しかし、これらの手法はすべて文献 [Ito 07] を基盤とした手法であり、コーン制約を用いた場合は良質な合意案が発見できない。文献 [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エータが準最適な合意案を得る手法が提案されている。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おり、文献 [Klein 03] の手法が

コーン制約に対して有効どうか不明である。文献 [Shew 08] はメディエータを導入し交渉を行うフレームワークを提案している。さらに、agenda(議題) 別に交渉を行っていく手法も導入されている。本文のアプローチがは効用関数の複雑性が高い場合も対応可能であり、コーン制約に対し有効な可能性がある。また、分散制約最適化問題 (DCOP) において、セキュリティを考慮した交渉手法に関する論文が存在する [Maheswaran 08]。しかし、多くの分散制約充足問題における設定はエージェントが必ず協力することを前提としており、エージェントの個人合理性が十分に仮定されていない。以上から本論文の問題に対して単純に DCOP の手法を導入するのは困難である。

## 6. まとめ

本論文では各論点が相互に依存する複雑な交渉問題における新たな非線形効用関数を提案した。本論文で提案したコーン制約は現実世界において理想状態から差異が応じるにしたがって徐々に効用が減少していく性質を反映している。さらに、コーン制約に対して交渉失敗のリスクに対する態度 (Risk Attitude) の導入した。また、シミュレーション実験により、コーン制約における近傍探索に基づく交渉手法のもつ性質、および、オークションに基づく交渉手法がコーン制約に対して良質な合意案を発見するのが困難であることを示した。

今後の課題として、コーン制約を導入した複雑な効用空間でも良質な合意が発見できる手法の開発が挙げられる。また、交渉手法のスケラビリティ性向上および高速化も必要である。

## 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, *Artificial Intelligence*, Vol. 142, pp. 205–237 (2002)
- [Ito 07] Ito, T., Hattori, H., and Klein, M.: Multi-issue Negotiation Protocol for Agents: Exploring Nonlinear Utility Spaces, in *Proc. of 20th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-2007)*, pp. 1347–1352 (2007)
- [Ivan Marsa-Maestre 09] Ivan Marsa-Maestre, J. R. V., Miguel A. Lopez-Carmona and Hoz, de la E.: Effective bidding and deal identification for negotiations in highly nonlinear scenarios, in *Proc. of The 8th International Joint Conference on Autonomous Agents and Multi-agent Systems (AAMAS-2009)* (2009)
- [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)
- [Maheswaran 08] Maheswaran, R. T., Pearce, J. P., Varakantham, P., Bowring, E., and Tambe, M.: Privacy Loss in Distributed Constraint Reasoning: A Quantitative Framework for Analysis and its Applications, *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, Vol. 13, pp. 27–60 (2008)
- [Russell 02] Russell, S. J. and Norvig, P.: *Artificial Intelligence: A Modern Approach*, Prentice Hall (2002)
- [Shew 08] Shew, J. and Larson, K.: The Blind Leading the Blind: A Third-Party Model for Bilateral Multi-issue Negotiations under Incomplete Information, in *Proc. of The 1st International Workshop on Agent-based Complex Automated Negotiations (ACAN-2008)* (2008)
- [Weinberger 90] Weinberger, E.: *Correlated and uncorrelated fitness landscapes and how to tell the difference*, Vol. 63, Springer (1990)
- [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*, Vol. 25, No. 4, pp. 167–180 (2008)