

経時的に変化する効用に基づく エージェント間自動交渉の仲介機構の提案

Mediator-based Agent Negotiation for Utility Functions that Change over Time

原 圭佑*¹ 伊藤 孝行*²
Keisuke Hara Takayuki Ito

名古屋工業大学
Nagoya Institute of Technology

Multi-issue negotiation protocols are an important field of study because real-world negotiation problems are often complex and involve multiple issues. Although much previous work has only addressed linear utility function, that is, simple negotiations involving independent issues, recently, non-linear utility functions for complex negotiations involving interdependent issues have gained attention. Most studies, however, do not focus on the changes in utility space over time. In economic theory, it is often assumed that the utility function changes dynamically over time. It is important to seek the Pareto front, which refers to the set of Pareto optimal points, in negotiation problems. Therefore, we propose a complex utility space that changes over time and negotiation mechanism in which the mediator takes the lead in negotiation based on the GA. The experimental results show that our approach is suitable for utility that dynamically changes over time, and finds and follows the Pareto front effectively.

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の論点が存在する交渉問題(複数論点交渉問題: Multi-issue negotiation problem)が注目されている。ソフトウェアエージェントによる合意形成の開発が進むことにより、将来的にはソフトウェアエージェントが人の代理として交渉を行い、交渉の自動化が促進されると期待できる。これまでに複数論点交渉問題に関して多くの研究が行われている。[P. Faratin 02, Fatima 04]。既存の研究の多くは論点同士が互いに独立している問題を対象としている。しかし、実世界における交渉問題は複雑であり、複数の論点が相互に依存関係にあるケースが多い。例えば、複数の設計者が共同で車の設計を行う場合、キャブレターの選択と、採用するエンジンには高い依存関係が存在する。設計者はこの依存関係を考慮しながら、部品の選択を決定する必要がある。本研究では、以上のような複数の論点が相互依存関係にある複雑な交渉を対象とする。

本研究と同様に、複雑な効用空間を対象とする交渉問題に関する研究 [Barbuceanu 00, Klein 02, Robu 05, Ito 06] が行われているが、既存の研究は全て効用空間の経時変化を考慮していない。

経済学では、動的に変化する効用関数が仮定される事が多い。例えば、[Strotz 55] に代表される動学的非整合性モデルでは、個人の選好が時間を通じて変化すると考え、現在の個人は、将来の自分の選好変化を予想した上で現在の意思決定をするというのが基本的な考え方である。[Gul 04] は誘惑の特定化の下で現在バイアスとして知られている異時点間の選好逆転現象を説明している。[Savitsky 98] では、時間によるリスク態度の変化を報告している。

そこで本論文では、経時的に変化する複雑な効用空間と、効用の経時変化を考慮したメディエータ主導の交渉手法を提案する。本論文では、いくつかの論点のみを割引または割増しすることで、一様な効用空間の変化だけではなく、効用空間の形

状の変化にも着目して議論する。

また交渉問題において、パレートフロントを求めることが重要である。パレートフロントとは、パレート最適な合意点集合のことを言う。パレートフロントを求めるには、単一解を求める Simulated Annealing などの最適化手法よりも、複数解を同時に扱う GA の方が親和性が良い。多目的最適化の分野でも、各目的関数に対するパレートフロントを求める際に GA が用いられる。

本論文では、パレートフロントの探索の精度および効用空間の形状が複雑に変化する場合における最適率に関して提案モデルの評価実験を行う。また実験により、提案モデルでは効用空間が経時的に変化しても効用の高い解が得られることを示し、またエージェント数が 100 という大規模な交渉問題の場合でも、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。第 2 章では、多論点交渉問題について示す。第 3 章では本論文で提案する経時的に変化する効用空間を示す。第 4 章では、GA に基づくメディエータ主導の交渉メカニズムを提案し、第 5 章で評価実験とその結果を示す。第 6 章で関連研究を述べ、第 7 章で本論文をまとめる。

2. 多論点交渉問題

まず、 N エージェントが合意形成を試みる状況を考える。論点が M 個存在し、個々の論点を $s_j \in S$ と表す。効用空間の次元数は、論点数+1 である。例えば、論点が 2 個ある交渉問題では、効用空間は 3 次元となる。論点 s_j は $[0, X]$ の範囲の整数を値として持つ (すなわち、 $s_j \in [0, X]$)。交渉の結果得られる合意点は、各論点の値のベクトル $\vec{s} = (s_1, \dots, s_M)$ として表現される。

本論文では、エージェントの効用関数は制約を用いて表現する。1 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、合意 \vec{s} によって充足される場合にのみ、 $w_i(c_k, \vec{s})$ を効用値としてもつことができる。交渉に参加する全てのエージェントは、個々にユニークな制約集合を持つ。

連絡先: 連絡先: 原 圭佑, 名古屋工業大学 産業戦略工学専攻,
愛知県名古屋市昭和区御器所町, Tel: 052-735-7968, Fax:
052-735-7407, hara.keisuke@itolab.nitech.ac.jp

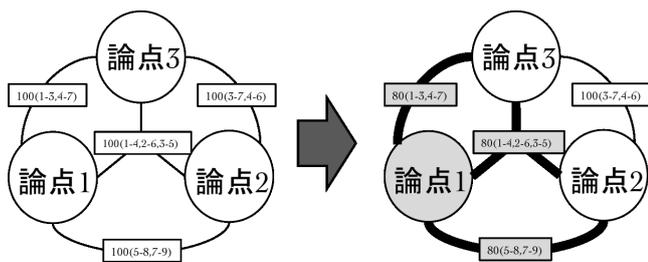


図 1: 経時的に変化する効用関数

本論文では、車の設計問題のような、基本的な意思決定問題の形式を想定しており、具体的な例として、学会や会議などのために手配する会場仕様の決定といった問題も挙げられる。本例では、コストやキャパシティなどが具体的な論点として考えられ、それぞれに関して、“50-70 万円”又は“70-90 万円”，及び“50-100 人”又は“100-150 人”といった形式で選択肢が与えられるケースが考えられる。各選択肢に対して、個々の論点、および他の論点との関係を考慮して評価値を決め（例えば、「より大きな会場が確保できるならば、コストが多少大きくなって良い」など）、各論点に関する解を決定する。ここで、エージェントが持つべき選好情報は、各論点に関して希望する代替案、および他の論点に関する希望代替案との組合せと、その評価値である。本論文で用いる制約表現では、これらの情報を表現するために十分であり、想定する問題を扱うことが可能である。

合意 \vec{s} に関するエージェントの効用を以下の式 (1) のように定義する。

$$u_i(\vec{s}) = \sum_{c_k \in C, \vec{s} \in x(c_k)} w_i(c_k, \vec{s}) \quad (1)$$

ここで、 $x(c_k)$ は、制約 c_k を充足可能な合意点の集合である。

3. 経時的に変化する効用空間

本章では、変化率（割引率または割増率）を導入することで、効用空間を経時的に変化させることを考える。本例では割引率についてのみ考える。一般的に、人間の交渉における効用の経時変化は論点に依存する [Strotz 55, Gul 04, Savitsky 98]。例えば、車の設計を考えた際に、交渉開始時にはデザインを重要視していた人が、交渉を重ねることでデザインの重要性が低下していくというのは、現実的に起こりうる現象である。よって、本論文では論点に依存する効用空間の経時変化を考える。

論点が相互に依存する効用グラフを図 1(左) に示す。効用グラフとは各エージェントの効用空間をグラフを用いて表現したものである。ノードが論点を示し、エッジが制約を表現している。本グラフ表現により論点 1、論点 2 及び論点 3 に関連する単項制約、2 項制約及び 3 項制約を表現することが可能である。本例において、論点 2 に関しては [3,7]、論点 3 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、その場合に得られる効用は 100 であることを示している。同様にして、論点 1 に関しては [1,4]、論点 2 に関しては [2,6]、論点 3 に関しては [3,5] の範囲で合意が得られた場合に制約が充足可能であり、その場合に得られる効用は 100 であることを示している。

図 1(右) に図 1(左) の論点 1 を割引したものを示す。論点 1 を割引すると、論点 1 に関する制約（太い線）から得られる効

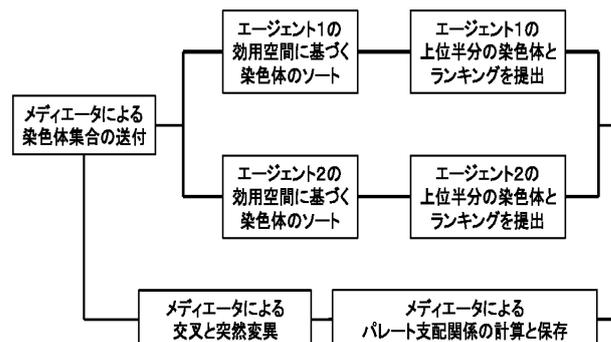


図 2: アルゴリズムの概要

用が減少する。本例では、割引率を 0.8 とし、割引回数を 1 回としている。図 1(左) と図 1(右) を比較すると、論点 1 に関する制約から得られる効用は、100 から 80 に減少している。一方で、論点 1 が関わらない制約から得られる効用は 100 のままで変化していない。このモデルにより、論点毎の効用の経時変化を表現する。

4. GA に基づくメディエータ主導の交渉メカニズムの提案

GA を用いたエージェント間の合意形成手法は、[Ito 09] により示されている。表 1 に示すように、エージェント間の交渉に GA を適用する場合、交渉における合意点を染色体、合意点の論点を遺伝子座、論点の値を遺伝子とすることが可能である。

表 1: 交渉問題と GA のマッピング

交渉	合意点	論点	論点の値
GA	染色体	遺伝子座	遺伝子

提案アルゴリズムでは、メディエータが各エージェントの選好をランキング情報として受け取り交渉を進め、なるべく効用の高い合意点を得ることを試みる。図 2 にアルゴリズムの概要を示す。図 2 は、2 エージェントの場合を記述しているが、n エージェントに容易に拡張可能である。まずメディエータが染色体集合を各エージェントに分配する。各エージェントは染色体を、自分自身の効用空間に基づいてソートする。すなわち、合意点が各エージェントの効用値の大きい順でソートされることになる。そして、各エージェントは、メディエータに上位半分の染色体集合と、各染色体のランキング情報を提出する。メディエータはパレート支配関係を計算し、パレート支配されていない染色体（より良い染色体）のコピーを作成し、必ず次の世代に残すように保存する。そして、メディエータによって交叉と突然変異が行われる。以上が、最初に定義した回数だけ、繰り返される。

特徴は、各エージェントが染色体にランキング情報を付加情報としてメディエータに送付することで、パレート支配している合意点（染色体）を、後の世代に引き継ぐ（優性遺伝）ことを可能にしている点である。これにより、メディエータは各染色体の具体的な効用値を知ることなしに、染色体同士のパレート支配関係を判定することが可能となる。

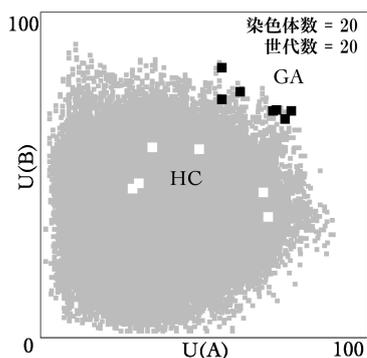


図 3: パレートフロントの探索

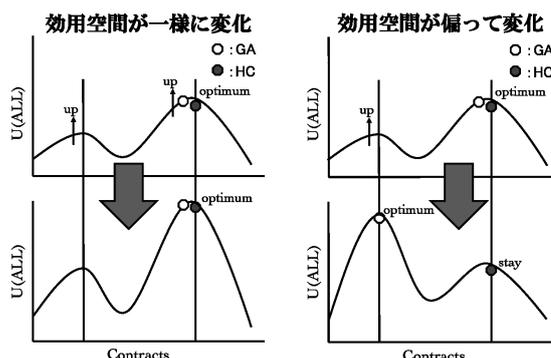


図 4: 最適率が減少する理由

5. 実験

5.1 設定

本実験では、ランダムに生成された効用関数を持つエージェント間の交渉を 100 回試行した結果の平均値を取る。1 つの試行につき 20 回の割引または割増しを実施することで、効用空間が経時的に変化していることを表現している。本実験では提案手法の性能評価のために、合意案の厳密解を網羅的に探索を行うことで算出した。実験ではメディエータが GA を用いない手法 HC (Hill climbing) と比較する。

本実験におけるパラメータは以下の通りである。

- エージェント数：2, 20 および 100
- 論点数：5
- 論点の値域：[0,9]
- 制約数：30 (単項制約), 30 (二項制約), 30 (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。
- 制約の最大範囲：7。本設定の下では、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])。
- 染色体数：10 - 100
- 世代数：5 - 100
- 変化率：0.8 - 1.1

5.2 パレートフロントの探索

図 3 に GA 及び HC のパレートフロントの探索精度の結果を示す。黒い点が GA で得られた上位の合意点であり、白い点が HC で得られた上位の合意点を示している。濃い灰色の領域は、全ての合意案候補 (10 の 5 乗個) を網羅的に描写した交渉可能領域である。

図 3 を見ると、GA ではパレートフロント近傍を探索可能なことに対し、HC ではパレートフロントを探索不可能なことが分かる。理由は、GA ではメディエータが染色体を更新させることでよりパレートフロントの探索が可能となる。一方で、HC では初期解から解が更新されないため、パレートフロントの探索が不可能となる。

5.3 経時的に変化する効用空間

本節では、効用空間が論点に依存して経時的に変化した場合、すなわち全ての論点ではなく、いくつかの論点のみを割増しした場合について述べる。図 5 にいくつかの論点のみを割増しして効用空間を偏って変化させた場合の最適率の変化の様子を示す。横軸が割増し回数、縦軸が最適率である。最適率は、全ての合意案候補の中から網羅的に探索して得られた最大社会的効用値と、GA 及び HC で得られた最大社会的効用値の比較と定義した。社会的効用値とは交渉に参加する全てのエージェントの効用の和である。

まず、エージェント数が 2 の場合について述べる。図 5(左) から分かるように、GA では平均して 0.9 程度の最適率が期待できる。一方で、HC では割増しするたびに、すなわちエージェントの効用が経時的に変化するたびに減少しており、20 回の割増しにより最適率が 0.8 から 0.6 程度へ減少している。原因を図 4 を用いて以下に述べる。

図 4 は、複雑な効用空間の変化の様子を 2 次元で簡潔に表現したものである。左の図が効用空間全体が変化する場合で右の図が効用空間全体が偏って変化する場合である。横軸は効用空間の軸を足し合わせたものであり、縦軸は社会的効用値である。白丸が GA の最適解、黒丸が HC の最適解である。

図 4(左) のように効用空間全体が変化する場合、社会的効用値は上昇するが効用空間の形状は変化しない。すなわち GA と HC ともに合意点の位置はほとんど変化しない。従って、エージェントの効用が経時的に変化しても最適率に影響はほとんど無い。一方で、図 4(右) のように効用空間全体が偏って変化する場合、効用空間の形状は変化し、すなわち GA では合意点の位置が変化する。GA では交渉を繰り返す中で各エージェントにとって、望ましい染色体が後の世代に残り進化しながら、社会的にも望ましい染色体が残る傾向が高まるためである。以上が HC の最適率が減少する理由である。

次にエージェント数が 20 および 100 の場合における交渉結果について述べる。図 5 よりエージェント数が増えるほど、GA の最適率が減少することが分かる。この理由を述べる。本研究では、各エージェントは各論点に対して依存度が異なるそれぞれの効用関数を持っている。従って、いくつかの論点のみを割増しまたは割増しした場合、各エージェントの効用空間はそれぞれ変化の仕方が異なる。すなわち、エージェント数が増えれば増えるほど、効用空間全体では変化の仕方が複雑になり、最適な合意点を探索するのが困難となる。ゆえに、エージェント数が 2 の場合よりも 20 および 100 の場合の方が、GA では交渉結果のばらつきが大きくなる。

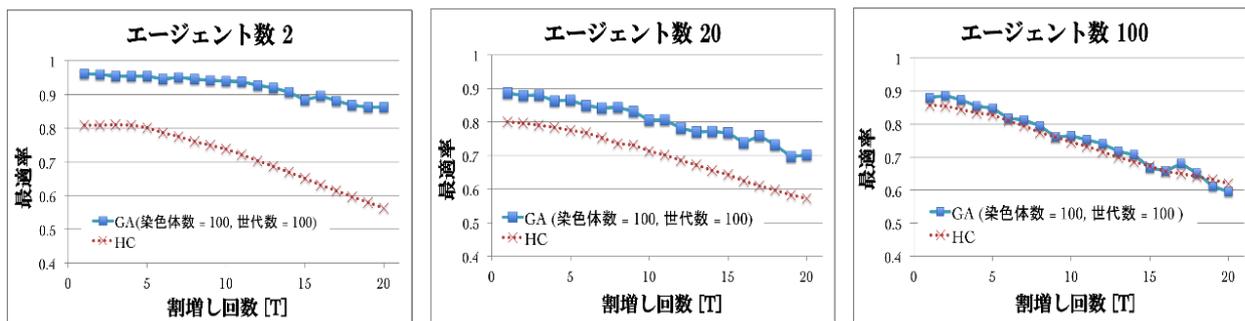


図 5: 経時的に変化する効用の影響

メディアータ主導の交渉メカニズムの重要な点は、エージェント数が 100 という大規模な交渉問題においても、合意形成が可能である点である。既存手法 [Ito 06] では、エージェント数が 5 程度で合意形成失敗率が高まっていたが、本提案手法では、最適率は低下するが、エージェント数が 100 という大規模な交渉問題においても合意形成が可能である。

6. 関連研究

文献 [Klein 02] 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。本論文では、各エージェントの効用空間が複雑に変化し、交渉可能領域が変化しても最適合意点を探索できることを示している。さらに、本論文では、2 者間交渉だけでなく、エージェント数が 100 体という大規模な交渉問題においても、合意形成が可能であることを示した。

7. まとめ

本論文では、論点に依存して経時的に変化する複雑な効用空間と、効用の経時的変化を考慮したメディアータ主導の交渉メカニズムを提案した。実験により、提案手法では、効用空間が経時的に複雑に変化しても効用の高い解が得られることを示した。また、エージェント数 100 という大規模な交渉問題の場合でも、合意形成が可能であることを示した。

謝辞

本研究の一部は、内閣府の先端研究助成基金助成金（最先端・次世代研究開発プログラム）により助成を受けている。

参考文献

[Barbuceanu 00] Barbuceanu, M. and Lo, W.-K.: Multi-attribute utility theoretic negotiation for electronic commerce, in *Proc. of AMEC 2000* (2000)

[Fatima 04] Fatima, S., Wooldridge, M., and Jennings, N. R.: Optimal negotiation of multiple issues in incomplete information settings, in *Proc. of AAMAS 2004* (2004)

[Fatima 07] Fatima, S. S.: Approximate and online multi-issue negotiation, in *Proc. of AAMAS 2007* (2007)

[Gul 04] Gul, F. and W. Pesendorfer, : Self-Control and the Theory of Consumption, *Econometrica*, Vol. 72, pp. 119–158 (2004)

[Ito 06] Ito, T., Klein, M., and Hattori, H.: An Auction-Based Negotiation Protocol for Agents with Nonlinear Utility Functions, *Center for Coordination Science, Sloan School of Management, Massachusetts Institute of Technology* (2006)

[Ito 09] Ito, T. and Klein, M.: A Consensus Optimization Mechanism among Agents based on Genetic Algorithm for Multi-issue Negotiation Problems, *JAWS-2009*, pp. 286–293 (2009)

[Klein 02] Klein, M., Faratin, P., Sayama, H., and Baryam, Y.: Negotiating Complex Contracts, *IEEE Intelligent Systems Journal, Special Issue on Agents and Markets*, Vol. 18, pp. 32–38 (2002)

[P. Faratin 02] P. Faratin, C., C. Sierra and Jennings, N. R.: Using Similarity Criteria to Make Issue Trade-Offs in Automated Negotiations, *Artificial Intelligence*, Vol. 142, pp. 205–237 (2002)

[Robu 05] Robu, V., Somefun, D., A., J., and L., P. J.: Modeling Complex Multi-issue Negotiations Using Utility Graphs, in *Proc. of AAMAS 2005*, pp. 280–287 (2005)

[Savitsky 98] Savitsky, K., Medvec, V., Charlton, A., and Gilovich, T.: 'What, me worry?': Arousal, Misattribution and the Effect of Temporal Distance on Confidence, *Personality and Social Psychology Bulletin*, Vol. 24, pp. 529–536 (1998)

[Strotz 55] Strotz, R. H.: Myopia and Inconsistency in Dynamic Utility Maximization, *Proceedings of the 10th International Conference on Cooperative Information Agents*, Vol. 23, (1955)