

経時的に変化する制約に基づいた効用を持つエージェント間の自動交渉の提案

奥原 俊^{1,a)} 伊藤孝行¹

概要：マルチエージェントシステムの分野では、複数論点交渉問題が盛んに研究されている。実際の交渉問題では、複数の論点が相互依存関係にある場合が多い。そのため、本研究は複数の論点が依存関係を非線形の効用関数で表現した交渉問題に焦点をあてる。特に効用空間の経時的変化を自動交渉で表現する手法に着目する。経済学の分野では動的に変化する効用関数が仮定されることが多く、多様なモデルが提案されている。それに対して、自動交渉の既存の研究では、主に論点に基づいた効用空間の経時的変化のみに注目している。しかし、論点に基づいた効用空間の経時的変化では実際の交渉問題である制約による変化を表すことができない。そこで、本研究では制約緩和に基づいた SL モデルを用いることで、効用空間の時間的変化を制約から実現することを試みる。評価実験では、制約に基づいた効用空間の経時的変化について調査、分析を行い、その特徴を示す。

キーワード：制約緩和、ハイパーグラフ、自動交渉

Constraint-based Agent Negotiation Protocol for Utilities that Change with Time

Abstract: In the area of multi-agent systems, the multi-issue negotiation problem is actively studied. In actual negotiation problems, multiple issues are often interdependent. For this reason, this study focuses on a negotiation problem in which multiple issues express dependency relationships with nonlinear utility functions. In particular, we focus on the method of expressing the change in the utility space over time by auto-negotiation. In the field of economics, utility functions that change dynamically are often assumed, and various models have been proposed. On the other hand, the existing research on auto-negotiation focuses only on the temporal change of the utility space—based mainly on the issues. However, changes in the utility space over time—based on the points of argument—cannot represent changes due to constraints, which are actual negotiation problems. In this study, we aim to realize the temporal change of the utility space from constraints by using a compromising strategy based on constraint relaxation for shared issues and a local issue model. In the evaluation experiment, we investigate and analyze the temporal change of the utility space based on the constraints and show the characteristics.

Keywords: Constrained relaxation, hypergraph, auto-negotiation

1. はじめに

マルチエージェントシステムの研究分野では、自動交渉エージェントに関する研究が注目されている。自動交渉エージェントは、人間の代理として、数値化した選考情報

から高度な情報処理を持つエージェントが合理的な判断によって交渉を行う。そのため、人間には解決困難な複雑で大規模な交渉問題においても、自動交渉エージェントを用いることで適切な合意形成が行われることが期待できる。自動交渉エージェントに関する研究は、論点間に依存関係が存在する効用関数を持つ複数論点交渉問題が重要な研究課題である。複数論点交渉問題に関する研究としては、自動交渉エージェントの国際競技会 (Automated Negotiating Agents Competition: ANAC) [1], [2], [3] が

¹ 名古屋工業大学
名古屋市昭和区御器所町 名古屋工業大学 4 号館 701, 702, 705

^{†1} 現在、情報処理大学
Presently with Johoshori University

^{a)} okuhara@itolab.nitech.ac.jp

2010 年から開催されている。ANAC では、より現実に近い問題設定をするために時間経過によって取得できる効用値が減少する割引効用などが設けられている。ANAC で導入されている割引効用は、経済学で仮定している動的に変化する効用空間を踏まえ、異時点間による選考逆転現象が起こる。選考逆転現象は、Gul ら [4] が誘惑の特定下で現在バイアスを用いて時間の経過によって効用空間の変化を説明している。自動交渉の研究では、時間の経過によって効用空間の変化を原ら [5] が論点に依存した割引率を用いる事で実現している。車の購入を例に挙げると、原らの研究は、車の車種、色などの論点毎に効用空間を変化させる仕組みを提案している。実際の議論でも、対話の中で論点の重要度が変化することは頻繁にある。しかし、議論では車の車種である軽、ワンボックスや色の赤、青などの論点を持つ制約の重要度が変化することがあり、原らの研究では論点の時間による変化にのみ着目しており、制約による効用空間の変化を考慮できているとは言い難い。そこで、本論文では、文献 [6] の自動交渉における制約を緩和するモデル (Shear and Local issue model : SL モデル) の仕組みを用いて、経過時間毎に制約に基づいた効用空間の変化を調査、及び分析を行う。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述べた後に SL モデルについて示す。第 3 章では、本論文で提案する制約に基づいた経時的に変化する効用空間を示す。第 4 章では評価実験とその結果を述べる。第 5 章で関連研究を述べ、最後に本論文のまとめを示す。

2. SL モデル

2.1 自動交渉と SL モデル

自動交渉における効用空間の表現方法は様々な方法が提案されている [7], [8], [9]。本論文では、Hadfi が提案した論点間の依存関係をハイパーグラフから表現するモデル [10], [11] を用いる。ハイパーグラフとはグラフを一般化した数式から表現し、エッジを複数のノードとして連結できる。ハイパーグラフを用いた効用空間は、効用ハイパーグラフと呼び、ノードを論点、エッジを制約とする。エージェント i の効用空間 U_i はハイパーグラフ (I, C) で表現され、 I は論点集合 (ノード)、 C は制約集合 (エッジ) である。各論点 $I_i \in I$ は、ある範囲 D_i 内の論点値 (Issue Value) を持っている。例えば、車を購入する場合を考えると、論点の一つ「色」は、「赤、青、緑」という範囲の論点値がある。制約 $C_j \in C$ は $(v_{C_j}, \phi_{C_j}, \delta_{C_j})$ で表される。 v_{C_j} は制約 C_j の価値を示す。 ϕ_{C_j} は制約 C_j が連結している論点集合である。そのため、 $\phi_{C_j} \subset I$ である。 δ_{C_j} は、範囲 (range) の集合であり、 $\delta_{C_j} = \{range_{C_j}(I_i) : I_i \in \phi_{C_j}\}$ 。ここで、制約 C_j が満たされる条件は下で示した通りである。論点 I_i がとる値を x_{I_i} とする。 C_j を持つエージェントは C_j が満たされると価値 v_{C_j} を得る。

$$C_j = \begin{cases} satisfy & \text{if } x_{I_i} \in range_{C_j}(I_i) \quad \forall I_i \in \phi_{C_j} \\ unsatisfy & \text{otherwise} \end{cases}$$

図 1 は、エージェントの効用グラフと論点の共有についての例である。2つのエージェントが、効用グラフを持つと同時に1つの論点を共有している。それぞれのエージェントは、各論点を結ぶ制約を持つ状況を示している。論点は値を取り、制約は結んでいる論点の値が制約としての範囲 (range) に含まれると充足する。制約が充足すると、エージェントはその制約から価値を取得することができる。

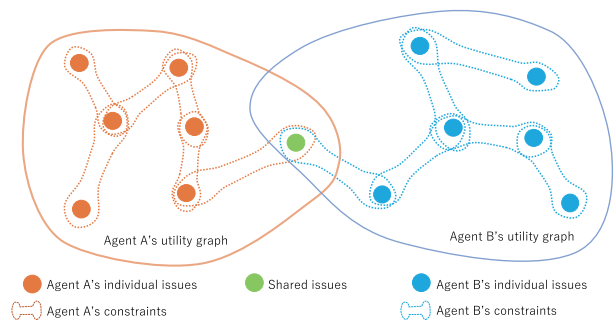


図 1 SL モデルの概念図

仮定 制約は充足しにくい制約ほど価値が高い

本論文の実験では仮定に従い、以下の2つを設定している。より広い値域 ($range_{C_j}$) を持っている制約の方が充足しやすいため、価値は低い。一方で、より狭い値域を持っている制約は充足しにくいので、価値は高い。さらに、個人制約より、相手との合意が必要な共有制約が合意することを目的とした交渉であるため、価値が高いとする。本論文では、制約に基づいた時間経過による合意形成に焦点を置くため、交渉プロトコルは出来るだけ単純なものを採用する。本稿では繰り返し同時提案プロトコルを用いる。繰り返し同時提案プロトコルは各エージェントが毎回同時に提案を提出し、提案が互いに受け入れられるならば合意する。そうでなければ、次の提案を実施する。自動交渉の研究分野では交互提案プロトコル [12] も用いられているが、提案を出す順序によって、妥協の戦略が変わってしまう。そのため、本研究は単純な繰り返し同時提案プロトコルを採用する。交互提案プロトコルへの拡張は今後の課題とする。

2.2 SL モデルの交渉プロトコル

本章では、SL モデルのプロセスを示す。SL モデルの特徴として、制約緩和がある。制約緩和とは、満たすべき制約の数を少なくすることである。つまり、エージェントは

自身の取り得る効用（価値）の総和を少なくすることをいう。ANACなどで用いられているプロトコルでは、アドホックに閾値を調整することで、妥協を行う場合、なぜその値で合意したのか、を説明することができない。

本研究では、SLモデルの設定に合わせ、満たすべき制約を少なくする。SLモデルではどの制約を考慮に入れ、どの制約を考慮に入れないかを把握することで、合意形成における妥協の説明を可能としている。まず、基本的には、信じている（IN）制約と信じていない（OUT）制約に分ける。本研究では全ての制約を最初にINとしており、緩和した制約をOUTにする。図2と図3にはSLモデルのプロセスの簡単な例を示す。

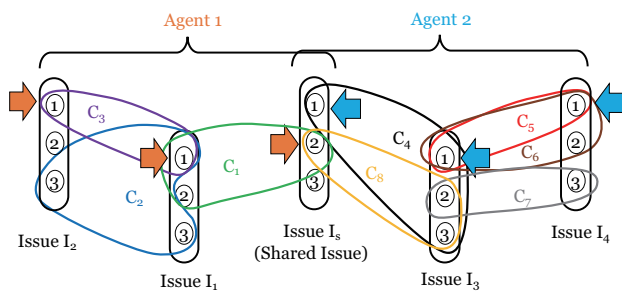


図2 SLモデルの初期状態

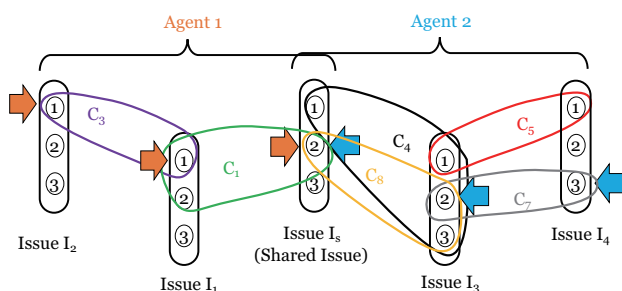


図3 SLモデルの合意状態

図2で示すように、全ての論点は値域[0,3]である。Agent1はIssue I1, Issue I2とIssue Isを持っている。Issue Isは、共有論点である。Agent 2はIssue I3, Issue I4とIssue Isを持つ。各IssueはC1, C2, C3, C4, C5, C6, C7のいずれかの制約を持つ。Agent 1は、制約C1, C2, C3を持っている。本研究では、仮定として、充足しにくい制約ほど価値が高いとしている。制約の値域がC3よりも、C2の方が広いため、効用値が低いとする。そのため、初期の最適解はIssue I1についてC1、とIssue I2についてC3となる。一方Agent 2は、制約C4, C5, C6, C7、およびC8を持っており、同様に最適解はIssue I3についてC4、Issue I4についてC5、C6となる。図2の状態では、共有論点Isについて解が異なっているため、合意ではない。そこで、各エージェントは制約の一つ減らす（INからOUTに変える）ことで妥協プロセスを実現する。例え

ば、Agent1は制約C2をOUTにする。Agent 2は制約C6をOUTにする。図3で示した通りにAgent 1のIssue Isの値は2のままであるが、Agent 2のIssue Isの値も2に変化する。これによって、Agent 1とAgent 2は合意となる。妥協においてどの制約をOUTにしたかということがわかる。そのため、単純に閾値を下げるのではなく、どのような制約を外したかという説明が可能となる。次に合意形成ができないプロセスを図4、図5、図6、図7、図8に示す。図4では、Agent1はIssue I1, Issue I2, とIssue Isを持っている。Agent 2はIssue I3, Issue I4とIssue Isを保持している。

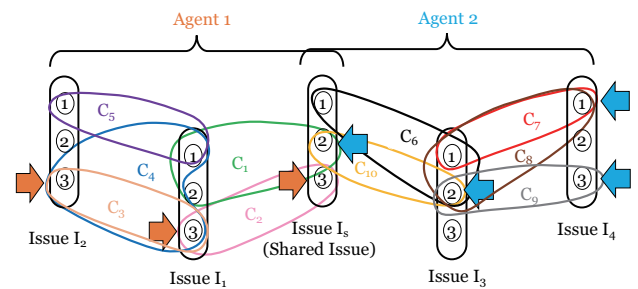


図4 step1:SLモデルの合意できなかった状態

各IssueはC1, C2, C3, C4, C5, C6, C7, C8, C9, C10のいずれかの制約を持つ。Agent 1は、制約C1, C2, C3, C4, C5を持っている。仮定の設定に従って、Issue Isから最も遠く制約の値域が広いC4を効用値が低いとして削除する。初期の最適解はIssue I1についてC1よりも面積が狭いC2, Issue I2についてC3となる。

一方Agent 2は、C6, C7, C8, C9, 制約C10を持っており、同様に最適解はIssue I3についてC6, Issue I4についてC7, C8, C9となる。図4で示した通りで、Agent1はIssue Isが3, Agent2はIssue Isが2であるため、合意しない。そのため、Agent1は制約C4, Agent2は制約C8をそれぞれOUTにする。図5では、Agent1の制約C4, Agent2の制約C8を図4からそれぞれOUTにしたものである。

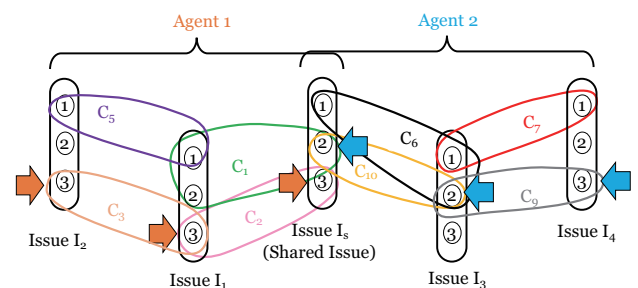


図5 step2:SLモデルの合意できなかった状態

Agent1のIssue I2は同様の広さであるC3, C5であるが、C2の方がC1よりも狭いため、Issue Isの値が3にな

る。Agent2 は Issue I_4 は同様の広さである C_7 , C_9 であるが、Issue I_3 は C_{10} の方が C_6 よりも狭いため、Issue I_s の値が 2 になる。図 5 で示した通りで、Agent1 は Issue I_s が 3、Agent2 は Issue I_s が 2 であるため、合意しない。そのため、Agent1 は制約 C_5 、Agent2 は制約 C_7 をそれぞれ OUT にする。図 6 では、Agent1 の制約 C_5 、Agent2 の制約 C_7 を図 5 からそれぞれ OUT にしたものである。

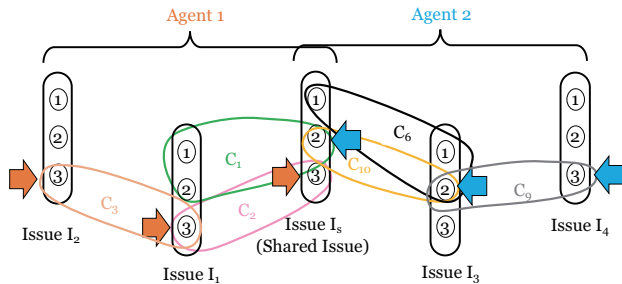


図 6 step3:SL モデルの合意できなかった状態

Agent1 は Issue I_s の C_2 と C_3 の組み合わせが C_1 よりも効用値が高いため、3 となる。Agent2 は Issue I_s は C_9 と C_{10} の組み合わせが C_6 よりも効用値が高いため、2 となる。図 6 で示した通りで、Agent1 は Issue I_s が 3、Agent2 は Issue I_s が 2 であるため、合意しない。そのため、Agent1 は制約 C_3 、Agent2 は制約 C_9 をそれぞれ OUT にする。図 7 では、Agent1 の制約 C_3 、Agent2 の制約 C_9 を図 6 からそれぞれ OUT にしたものである。

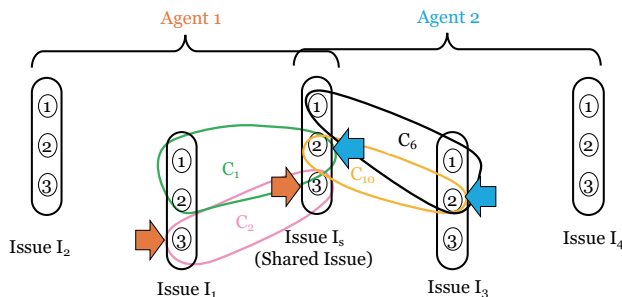


図 7 step4:SL モデルの合意できなかった状態

Agent1 の Issue I_s は、 C_2 が C_1 よりも効用値が高いため、3 となる。Agent2 の Issue I_s は C_{10} が C_6 よりも効用値が高いため、2 となる。図 7 で示した通りで、Agent1 は Issue I_s が 3、Agent2 は Issue I_s が 2 であるため、合意しない。そのため、Agent1 は制約 C_1 、Agent2 は制約 C_6 をそれぞれ OUT にする。図 8 では、Agent1 の制約 C_1 、Agent2 の制約 C_6 を図 7 からそれぞれ OUT にしたものである。

図 8 から合意する制約の組み合わせが Agent 間にないため、交渉は終了である。以上で説明した SL モデルを用いて本研究では時間経過によって制約から効用空間を変化させる。

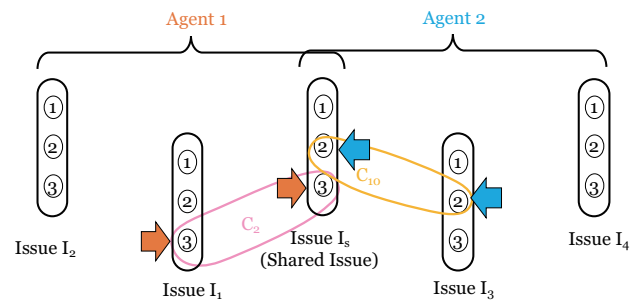


図 8 step5:SL モデルの合意できなかった状態

3. 経時的に変化する効用空間

本節では、2 節で説明した SL モデルを用いて、時間経過による効用空間の変化について述べる。エージェント間における合意形成では、交渉問題において論点同士が相互依存関係にある場合が多く、効用の経時的変化は制約に依存する。本論文は、前節で示した効用グラフに基づいて、各制約に変化率（割引率または割増率）を導入することで、制約に基づいた効用の経時的変化を考える [13],[14],[15]。変化させる制約数、及び変化率を適切に設定することで、様々な交渉問題を取り扱うことが可能である。例えば、「期限」という論点に割増率を設定することで、時間が経過するほど、「期限」に対する重要性が高まるという状況の表現が可能になる。本研究では、多様な効用空間を表現するために効用空間を全体が変化する場合、偏って変化する場合について述べる。

(1) 効用空間全体が変化する場合

効用空間全体が変化する場合というのは、全ての論点に含まれる制約を同じ割引率で割引する場合である。交渉に参加するエージェントの効用値が一様に下がる場合とは、交渉そのものに対する重要度が低下していることを示している。以下の図 9 を用いて説明を行う。論点の効用値が 1 つ、論点の値域 $[0,1]$ を 10 段階でエージェント 1 体の効用空間の変化の様子を示している。この例では、全ての論点の持つ制約に対して、割引をしている。図 9 の左から右に行くにつれ、時間が経過し、効用値が減少している。しかし、効用値は減少しても、全体で減少しているため、効用空間の形は変化していない。効用空間全体の形状が変化したとは、各エージェントの選考情報が交渉を開始時と、効用空間が変化した後の合意案は同じである。

(2) 効用空間が偏って変化する場合

本研究では、効用空間が偏って変化する場合とは、全ての論点に関する効用値を変化させるのではなく、いくつかの論点を持つ制約に関する効用を変化させることである。図 10 は、既存の原案が提案した論点に基づいた効用空間の経過時変化と、図 11 は本研究で提案する制約に基づいた効用空間の経過時変化を左側の開始

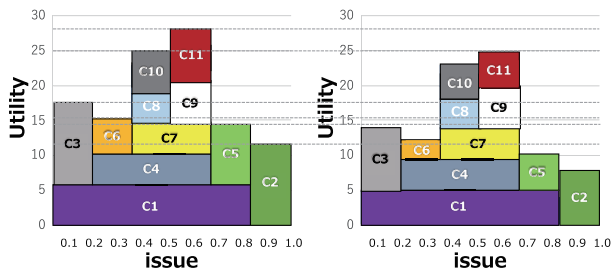


図 9 効用空間全体が変化する例

時、右側変化後について表している。図 10、図 11 は値域 $[0.5, 0.7]$ を変化させたものである。図 10 は、論点に基づいた変化を示しており、論点の値域 $[0.5, 0.7]$ を変化させる。論点の値域 $[0.5, 0.7]$ は、他の値域に関わる制約がある。そのため、論点の値域 $[0.5, 0.7]$ 以外の効用値に変化がある。本研究で提案している経過時変化では、個々の制約の効用値を変える。つまり、論点に基づいた変化では、制約が他の論点の値域に効用値がある場合、論点以外の値域も変化する。しかし、特定の制約の効用値を変化させることができる提案手法を用いれば、他の値域に範囲がない制約を変化させることで、他の論点の値域に影響を与えることを防ぐことができる。

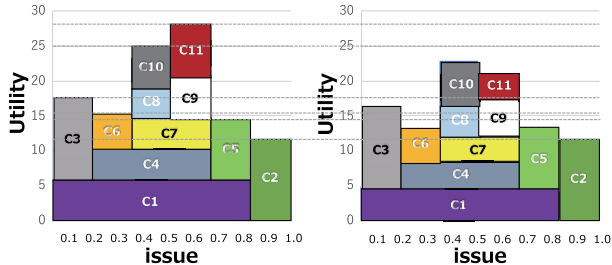


図 10 効用空間全体が論点に基づいて変化する場合

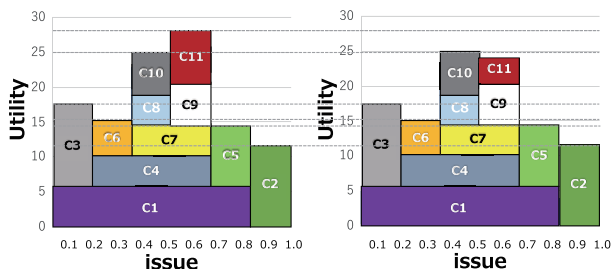


図 11 効用空間全体が制約に基づいて変化する場合

以上より、効用空間全体が変化する場合と、いくつかの制約のみを割引した効用空間が偏って変化する場合の最大の違いは効用空間の形状の変化の違いである。

4. 実験

4.1 実験設定

本評価実験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、その結果の平均を取る。効用空間が経時的に変化していることを表現するために、1 回の施行につき 20 回の割引、または割増を実施する。以下に実験設定を示す。

- エージェント数：2
- 論点数：5
- 共有論点数：1
- 論点の値域： $[0, 9]$
- 各論点を包含する制約：1 つ以上
- グラフ構造：ランダム
- 探索手法：多スタート局所探索

以上の設定は、多論点かつ論点間の依存があるエージェント間交渉の設定であり、複数の論点が少ない制約で連結しているような場合を想定している。また、本研究では、メディエータが各エージェントの選好に基づいたランキング情報を受け取り交渉を進め、なるべく効用値の高い合意点を得ることを試みる。なお、割引率は 0.8 とする。

4.2 実験結果

図 12 は、メディエータなしの合意点を示しており、縦軸が Agent1 の効用値、横軸が Agent2 の効用値である。

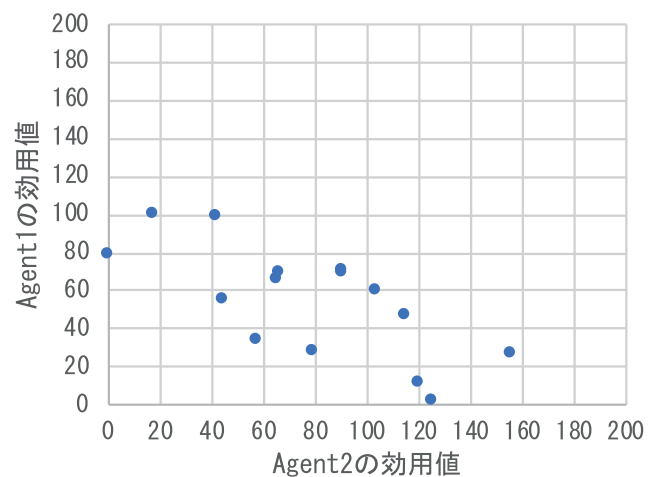


図 12 メディエータなしの合意点

図 13 は、メディエータありの合意点を示しており、縦軸が Agent1 の効用値、横軸が Agent2 の効用値である。

図 14 は、メディエータなし、メディエータありの合意した回数を示したものである。

図 15 は、メディエータなし、メディエータありの合意した効用値の平均を示したものである。

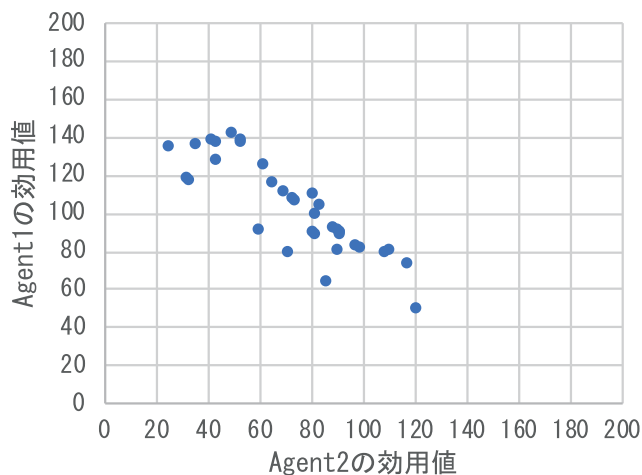


図 13 効用空間全体が論点に基づいて変化する場合

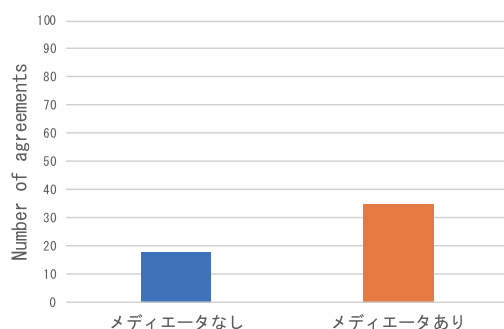


図 14 合意した回数

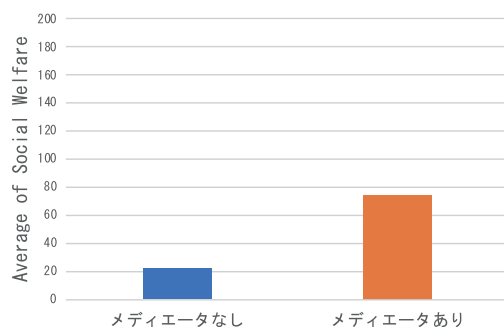


図 15 効用値の平均

4.3 評価

メディエータなしとありを比較した結果として、メディエータありの手法が高いことが確認できた。また、メディエータありは Social Welfare の平均値も高いことが確認が取れた。

5. おわりに

本論文では、制約に依存した経時的に変化する複雑な効用空間を自動交渉において表現する方法を提案した。提案手法は、制約緩和が可能な SL モデルを用いることで、時間毎に異なる制約の値にすることで効用空間が変わる手法である。実験では、効用空間が経時的に複雑に変化しても

合意ができることが確認できた。

参考文献

- [1] Jonker, C., Kraus, S., Hindriks, K. and Lin, R.: The First Automated Negotiating Agents Competition (ANAC2010), <http://mmi.tudelft.nl/negotiation/tournament> (2010).
- [2] Ito, T., Jonker, C., Kraus, S., Hindriks, K., Fujita, K., Lin, R. and Baarslag, T.: The Second International Automated Negotiating Agents Competition (ANAC2011), <http://www.anac2011.com/> (2011).
- [3] Williams, C. R., Robu, V., Gerding, E., Jennings, N. R., Ito, T., Jonker, C., Kraus, S., Hindriks, K., Lin, R. and Baarslag, T.: The Third International Automated Negotiating Agents Competition (ANAC2012), <http://anac2012.ecs.soton.ac.uk/> (2012).
- [4] Gul, F. and Pesendorfer, W.: Temptation and Self-Control, *Econometrica*, Vol. 69, No. 6, pp. 1403–1435 (2001).
- [5] 原主佑, 伊藤孝行: 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メカニズムの提案, 電子情報通信学会論文誌 D, Vol. 96, No. 12, pp. 2900–2907 (2013).
- [6] Okuhara, S. and Ito, T.: A Negotiation Strategy based on Compromising Degree, *the 20th IEEE/ACIS International Conference on Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking and Parallel/Distributed Computing (SNPD 2019)* (2019).
- [7] Robu, V., Somefun, D. and La Poutré, J. A.: Modeling complex multi-issue negotiations using utility graphs, *Proceedings of the fourth international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems*, ACM, pp. 280–287 (2005).
- [8] Robu, V. and La Poutré, H.: Constructing the Structure of Utility Graphs Used in Multi-Item Negotiation through Collaborative Filtering of Aggregate Buyer Preferences, *Rational, Robust, and Secure Negotiations in Multi-Agent Systems*, Springer, pp. 147–168 (2008).
- [9] Aydogan, R., Baarslag, T., Hindriks, K., Jonker, C. and Yolum, P.: Heuristics for using CP-nets in utility-based negotiation without knowing utilities, *Knowledge and Information Systems*, Vol. 45, pp. 357–388 (online), DOI: 10.1007/s10115-014-0798-z (2015).
- [10] Hadfi, R. and Ito, T.: On the Complexity of Utility Hypergraphs, *Proceedings of the Seventh International Workshop on Agent-based Complex Automated Negotiations (ACAN2014)* (2014).
- [11] Hadfi, R. and Ito, T.: Modeling Complex Nonlinear Utility Spaces Using Utility Hyper-Graphs, *Modeling Decisions for Artificial Intelligence*, Springer, pp. 14–25 (2014).
- [12] Rubinstein, A.: Perfect equilibrium in a bargaining model, *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, pp. 97–109 (1982).
- [13] Gul, F. and Pesendorfer, W.: Self-Control and the Theory of Consumption, *Econometrica*, Vol. 72, No. 1, pp. 119–158 (2004).
- [14] Laibson, D.: Golden eggs and hyperbolic discounting, *The Quarterly Journal of Economics*, Vol. 112, No. 2, pp. 443–478 (1997).
- [15] Loewenstein, G. F., Weber, E. U., Hsee, C. K. and Welch, N.: Risk as feelings., *Psychological bulletin*, Vol. 127, No. 2, p. 267 (2001).