# 自動交渉エージェントのための 制約緩和を用いた説明可能な妥協アルゴリズム Explainable Compromising Algorithm based on Constraint Relaxation for Automated Negotiating Agents

奥原 俊<sup>\*1</sup>,<sup>\*2</sup> 伊藤 孝行<sup>\*1</sup> Shun Okuahra Takayuki Ito

\*<sup>1</sup>名古屋工業大学大学院情報工学専攻 Dept. of Computer Science, Nagoya Institute of Technology \*<sup>2</sup> 藤田医科大学医療科学部 School of Health Sciences, Fujita Health University

This paper presents an explainable concession process based on constraint relaxation in multi-agent negotiation. Automated negotiation has been studied widely and is the promising technology for the future smart city where multiple heterogeneous agents, like driver-less cars, are conflicting and collaborating. There are a lot of studies on negotiating agents including international competitions. The problem is that most of the proposed negotiating agents employ ad-hoc conceding process, where basically they are adjusting threshold to accept their opponents offers. Because it is just adjusting a threshold, it is very difficult to show how and what the agent conceded even after agreement. In this paper, we propose an explainable concession process by using a constraint relaxation process. Here, an agent changes its belief not to believe some constraint so that he/she can accept its opponent offer. Our experimental results demonstrate that our method can work effectively.

## 1. はじめに

自動交渉エージェント [Ito 07, Jennings 01] の重要性が高 まっており広く研究が進められている [Bai 17, Fukuta 16, Fujita 15, Marsa-Maestre 14, Ito 13, Ito 11, Ito 10, Ito 09, Ito 08]. 社会において知的な処理を自律的に行う異種のシス テム (エージェント)が現実に実現されつつある. 複数のエー ジェント間の競合が発生し,自動交渉によって合意を自動的に 得るような仕組みが現実に必要とされ得る. 自動交渉エージェ ントの研究は,マルチエージェントシステムの分野で広く行わ れており,特に 2010 年前後から国際ワークショップや国際競 技会が開催され,次世代の重要な技術である.

自動交渉エージェントの研究では、エージェントは自分の好 みを秘匿したまま、交渉プロトコルに基づき交渉し、合意を得 る.エージェントの好みは、多論点の効用関数(多属性効用関 数)で表される.交渉プロトコルは、様々なプロトコルが提案 されているが、仲介型のプロトコル、繰り返し型のプロトコ ル、提案交換型プロトコルが一般的である.

自動交渉エージェントの研究のテストベットとして,自動 交渉競技会 ANAC(Automated Negotiating Agents Competition)が 2010 年から開催されている. ANAC では多論点の 効用関数と提案交換型プロトコルが採用されており,毎年様々 なルールの拡張や修正を行い,様々な環境でのエージェントの 交渉戦略が提案されている.

課題は、妥協プロセスの説明可能性である.交渉において、 エージェントは自分の利益ばかりを考えていると合意に到達で きないため、いかに妥協するかという妥協戦略が重要である. 既存の自動交渉エージェントのほとんどが、閾値の上げ下げの みを用いたアドホックなプロセスであった.そのため、どのよ うに妥協したかという説明が難しいという課題があった.

連絡先: 奥原俊, 豊明市沓掛町田楽ヶ窪 1 番地 98 藤 田医科大学 大学 6 号館 507 室, 0562-93-2628, okuhara@itolab.nitech.ac.jp

連絡先:伊藤孝行,名古屋工業大学大学院情報工学専攻,名古屋 市昭和区御器所町名古屋工業大学4号館702,052-735-7968,ito.takayuki@nitech.ac.jp 本研究では、本課題を解決するために、妥協プロセスを制約 の緩和プロセスとして提案する。制約とは効用の基本単位を表 すものである。つまり、本研究では、エージェントの効用空間 を、論点とその論点を満たす制約の集合とする。制約は満たさ れれば価値がある。例えば、車を買うときの論点(Issue)は、 価格、色、タイプなどがある。これらの論点は制約によって結 び付けられる。つまり、タイプがスポーツカーであれば、色は 赤という制約や、タイプがセダンであれば、色は白という制約 である。制約は満たされることで価値を生み出すが、満たされ ない場合は価値を生み出さない。

また,本研究では,共有論点と個人論点を仮定する.つま り,合意は,共有論点についてエージェント同士が同じ値を持 つことである.個人論点については,ここのエージェントが なるべく自分の効用が高くなるように選択することができる. エージェントは,共有論点について相手のエージェントと同じ 値になるようにしながら,個人論点については,制約をなるべ く多く満たすように値を決めていくというトレードオフを解決 する必要がある.

このトレードオフを解決するため,エージェントは妥協プロ セスを行う.妥協プロセスにおいて,エージェントは,制約の 集合の中から,制約を一つずつ取り除いていくことで,共有論 点についての値の取れる範囲を調整する.制約を取り除くこと を制約緩和と呼ぶ.

本稿は、2章で自動交渉エージェントと交渉プロトコルにつ いて述べる、3章で、新たに提案する制約緩和に基づく妥協ア ルゴリズムについて述べる、4章で評価実験とその評価につい て述べる、5章で関連研究と本研究の違いを明らかにし、6章 で本稿をまとめる、

# 2. 自動交渉エージェント

#### **2.1** 効用ハイパーグラフ

エージェントは複雑な効用空間を持つものとする [Ito 07]. 複雑な効用空間の表現方法は様々な方法が提案されている [Robu 05, Robu 08, Aydogan 15].本論文では,論点間の依 存関係に注目して表現するために,ハイパーグラフによる表現 [Hadfi 14b, Hadfi 14a]を用いる.ハイパーグラフとはグラフ



図 1: エージェント間の論点の共有と効用グラフ

を一般化した数学の表現で,エッジが複数のノードを連結できる.ハイパーグラフを用いた効用空間を,効用ハイパーグラフ と呼ぶ.ここでは,ノードを論点,および,エッジを制約とし て考える.

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、ある決められた範囲  $D_i$  内の論点値 (Issue Value)をもつ、例えば、車を購入する場合の論点の一 つ「色」は、「赤、青、緑」という範囲のどれかの論点値をも つ、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  $C_j$  の価値を表す.  $\phi_{C_j}$  は制約  $C_j$  が連結している論点の集合 である、したがって、 $\phi_{C_j} \subset I$  である.  $\delta_{C_j}$  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以下の通りである. 論 点  $I_i$  がとる値を  $x_{I_i}$  とする.  $C_j$  が満たされた場合,  $C_j$  を持 つエージェントはその価値  $v_{C_i}$  を得る.

$$C_{j} = \begin{cases} satisfy & if \ x_{I_{i}} \in range_{C_{j}}(I_{i}) \ \forall I_{i} \in \phi_{C_{j}} \\ unsatisfy \quad otherwise \end{cases}$$

図1にエージェントの効用グラフと論点の共有についての 例を示す.ここでは2つのエージェントが、効用グラフを持つ と同時に3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.論点は値をとる.制約は、結ん でいる論点の値が、制約としての範囲(range)に含まれる時 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 値を得ることができる.

仮定 1. 制約は充足しにくい制約ほど価値が高い

仮定1に従い、本論文の実験では以下の2つを仮定している.

- より広いの値域(range<sub>Cj</sub>)を持っている制約の方が充足しやすいので,価値は低い.一方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のほうが価値が高い。
- 2.2 交渉プロトコル

今回は、妥協アルゴリズムに焦点を置くため、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 提案プロトコルを提案する.すなわち、毎回、各エージェント が同時に提案を提出し、提案が互いにとって受け入れられるな ら合意する.そうでなければ、次の提案を行う.という単純な プロトコルである.

自動交渉の研究分野では交互提案プロトコル [Rubinstein 82] も採用されるが、どちらが先手で提案を出すかにより、妥協の



図 2: 制約緩和による合意の例1:初期設定



図 3: 制約緩和による合意の例2:緩和により合意

戦略が変わってしまうため,今回は単純な繰り返し同時提案プロトコルを採用した.交互提案プロトコルへの拡張は今後の課 題である.

# 3. 制約緩和に基づく説明可能な妥協プロセス

## 3.1 説明可能な妥協プロセス

本章では、制約緩和に基づく妥協プロセスを示す。制約緩和 とは、満たすべき制約の数を少なくすることで、自分が取り得 る効用(価値)の総和を少なくすることをいう.

既存の研究のように,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,満たすべき制約を少なくする,具体 的には,ここでは制約を考慮に入れないことにすることで,ど の制約を考慮に入れ,どの制約を考慮に入れないことで,合意 できたか,という妥協の説明が可能となる.基本的には,まず 信じている(IN)制約と信じていない(OUT)制約を分ける. 初期は全ての制約を IN としており,緩和した制約を OUT に する.

図 2 と図 3 に本論文で提案する妥協プロセスの簡単な例を 示す. 図 2 で示すように, Agent1 は Issue  $I_1$  と Issue  $I_s$  を持 つ. Issue  $I_s$  は, 共有論点である. Agent 2 は Issue  $I_2$  と Issue  $I_s$  を持つ. 各 Issue は値を 1, 2, および 3 の三つを持 つとする. Agent 1 は, 制約  $C_1$  と  $C_2$  を持つ. 両方を満たし た方が効用が高くなるため, 初期の最適解は Issue  $I_1$  につい ては 1, および  $I_s$  については 2 となる. 一方 Agent 2 は, 制 約  $C_3$ ,  $C_4$ , および  $C_5$  をもつ. 同様に最適解は Issue  $I_s$  につ いては 3,  $I_2$  については 2 となる. 図 2 の状態では,共有論 点  $I_s$  について解が異なるため,合意はできていない.

そこで、各エージェントは制約を一つ減らす(IN から OUT に変える)ことで妥協プロセスを行う.ここでは例えば、Agent 1 は制約  $C_1$  を OUT にしたとする.Agent 2 は制約  $C_5$  を OUT にしたとする.すると Agent 1 の Issue  $I_s$  の値は 2 のままで あるが、Agent 2 の Issue  $I_s$  の値も 2 に変化する(より多く の制約を満たす値の方が効用が高くなる).これにより Agent 1 と Agent 2 は合意ができる.

妥協においてどの制約を OUT にしたか(信じないようにしたか)ということがわかるため,たん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。

## 3.2 制約緩和アルゴリズム

様々な制約緩和が考えられるが,ここでは以下の4つの方法 を提案する.初期は全ての制約を IN としており,緩和した制 約を OUT にする.

- ランダム制約緩和: IN の制約のなかからランダムに制約 を選択し OUT にする.
- 価値に基づく制約緩和: IN の制約の中からもっとも価値の低い制約を選択し OUT にする.
- 距離に基づく制約緩和: IN の制約の中から共有論点から もっとも距離の遠い制約を選択し OUT とする.ここで 距離とは、共有論点からの連結する制約の数とする.
- 価値と距離に基づく制約緩和: IN の制約の中から共有論 点からもっとも距離の遠い制約のうち最も価値の低い制 約を選択肢 OUT とする.

## 4. 評価実験

#### 4.1 実験設定

妥協のための制約緩和アルゴリズムの性能比較のために実 験を行う.以下に実験設定を示す.

- 参加するエージェントは2エージェントとする.
- 共有論点は1つとする..
- 各エージェントの論点の数は x とする.
- 各論点を包含する制約を1つ以上持つものとする.つまり制約のない論点はないものとする.
- 各論点を包含する制約の数は y とする.

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 交渉の設定としては,論点がたくさんあり,それらが少ない制 約で連結しているような場合である.

## 4.2 結果と考察

いくつかの設定で結果が得られているが,ここでは2つの 結果について図4と図5に示す.ここでは,価値に基づく制 約緩和(min),ランダム制約緩和(random),距離に基づく 制約緩和(distance),および,価値と距離に基づく制約緩和 (distance+min)について比較を行なった.

図4では、各エージェントの論点の数はx = 1とする.各 論点を包含する制約の数はy = 16とする.

図 5 では、各エージェントの論点の数は x = 2 とする. 各 論点を包含する制約の数は y = 11 とする.



図 4: 実験結果: x = 1 および y = 16



図 5: 実験結果: x = 2 および y = 11

どちらの場合もランダム制約緩和(random)に対して,価 値に基づく制約緩和(min),ランダム制約緩和(random), 距離に基づく制約緩和(distance),および,価値と距離に基 づく制約緩和が,有意に社会的余剰を多く獲得することができ ている.

# 5. 関連研究

本節では関連研究と本研究の提案の差異を示す.

妥協プロセスが提案されたのは、Klein らの論文 [Klein 03] である. 主な主張は、論点が独立な多論点効用空間を前提とした 交渉では, パレートフロントにおいて, エージェントが徐々に妥 協するのが合理的であるが, 論点が依存している場合は効用空 間が複雑になり、単純にはパレートフロントを見出せないので 単純ではないということを指摘している.一つの方法として SA による合意点探索プロトコル(暗黙に妥協を仮定している)を 提案している. さらに, Payemann ら [Faratin 98] は様々な妥 協の関数について分析している. ANAC 競技会 [Baarslag 12] は 2010 年から開催されている. 相手のオファーから統計的 に相手が受理しうる提案を推定し提案しながら、時間による 割引を考慮した閾値の調整によって提案を受け入れるという 方式が、一般的である. 例えば、AgentK [Kawaguchi 11] は、 ANAC2010の優勝エージェントである. AgentK は,相手の 提案履歴から相手の効用空間と交渉に対する姿勢を推定する. 相手が友好的であれば譲歩し、相手が敵対的であれば一定以上 は譲歩しないという, ANAC の基本的な譲歩戦略の先駆けと なった戦略である. Fawkes[Baarslag 14] は, ANAC2013 の 優勝エージェントである. Fawkes は、相手の提案履歴に基づ いて,離散ウェーブレット予測を用いて,最適な譲歩を推定す る.以上の研究では、基本的には、妥協のプロセスについて、

閾値を変化させる方法が多く、何によって妥協が実現されてい るかという説明可能性は実現できない.また,著者らが知る限 り,多論点の効用関数を仮定している自動交渉エージェントに 関する研究で,妥協の説明可能性について言及している研究は 存在しない.

マルチエージェント環境における,一貫性の分類について DTMS(Distributed Truth Maintenance System)を提案し た論文 [Bridgeland 90] で提案されている.彼らは,分散整 合性を Inconsistent, Local-Consistency, Local-and-Shared-Consistency, Global Consistency に分類している.本研究で, 合意するということは,各エージェントの中で整合しつつ,共 有する論点につても整合するということであり,Local-and-Shared-Consistency に当たる.本論文で提案する妥協の方法 は,Local-and-Shared-Consistency を得るための方法の一つ である.ただし,本論文で扱う制約グラフは効用空間を表現し ているが,DTMS では好みを表現していない.

# 6. おわりに

本論文では,自動交渉エージェントのための説明可能な妥協 プロセスを示した.既存のほとんどの自動交渉の妥協プロセス は,閾値のアドホックな調整がほとんどだが,ここでは制約を 一つずつ削る(INからOUTにする)ことで制約緩和を行い 説明可能とした.本研究の新しい貢献は以下の点にある.(1) 制約のグラフ構造に基づく説明可能な妥協プロセスを新たに提 案した.(2)自動交渉において,共有論点と個人的論点を区 別したモデルを新たに提案した.(3)妥協プロセスにおいて, 影響と価値に基づく制約緩和プロセスを提案し,その効果を示 した.

# 参考文献

- [Aydogan 15] Aydogan, R., Baarslag, T., Hindriks, K., Jonker, C., and Yolum, P.: Heuristics for using CPnets in utility-based negotiation without knowing utilities, *Knowledge and Information Systems*, Vol. 45, pp. 357–388 (2015)
- [Baarslag 12] Baarslag, T., Fujita, K., Gerding, E., Hindriks, K., Ito, T., Jennings, N. R., Jonker, C., Kraus, S., Lin, R., Robu, V., and Williams, C.: The First International Automated Negotiating Agents Competition, Artificial Intelligence Journal (AIJ) (2012), (to appear)
- [Baarslag 14] Baarslag, T.: What to bid and When to stop, Master's thesis, Delft University of Technology (2014)
- [Bai 17] Bai, Q., Ren, F., Fujita, K., Zhang, M., and Ito, T.: Multi-agent and Complex Systems, Springer (2017)
- [Bridgeland 90] Bridgeland, D. and Huhns, M.: Distributed Truth Maintenance, pp. 72–77 (1990)
- [Faratin 98] Faratin, P., Sierra, C., and Jennings, N. R.: Negotiation Decision Functions for Autonomous Agents, *Int. Journal of Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 24, No. 3 - 4, pp. 159–182 (1998)
- [Fujita 15] Fujita, K., Ito, T., Zhang, M., and Robu, V.: Next Frontier in Agent-based Complex Automated Negotiation, Vol. 596, Springer (2015)
- [Fukuta 16] Fukuta, N., Ito, T., Zhang, M., Fujita, K., and Robu, V.: Recent Advances in Agent-based Complex Automated Negotiation, Vol. 638, Springer (2016)

- [Hadfi 14a] Hadfi, R. and Ito, T.: Modeling Complex Nonlinear Utility Spaces Using Utility Hyper-Graphs, in *Modeling Decisions for Artificial Intelligence*, pp. 14–25, Springer (2014)
- [Hadfi 14b] Hadfi, R. and Ito, T.: On the Complexity of Utility Hypergraphs, in Proceedings of the Seventh International Workshop on Agent-based Complex Automated Negotiations(ACAN2014) (2014)
- [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)
- [Ito 08] Ito, T., Hattori, H., Zhang, M., and Matsuo, T.: Rational, robust, and secure negotiations in multi-agent systems, Vol. 89, Springer (2008)
- [Ito 09] Ito, T., Zhang, M., Robu, V., Fatima, S., and Matsuo, T.: Advances in agent-based complex automated negotiations, Vol. 233, Springer (2009)
- [Ito 10] Ito, T., Zhang, M., Robu, V., Fatima, S., Matsuo, T., and Yamaki, H.: *Innovations in Agent-Based Complex Automated Negotiations*, Vol. 319, Springer (2010)
- [Ito 11] Ito, T., Zhang, M., Robu, V., Fatima, S., and Matsuo, T.: New trends in agent-based complex automated negotiations, Vol. 383, Springer (2011)
- [Ito 13] Ito, T., Zhang, M., Robu, V., and Matsuo, T.: Complex automated negotiations: Theories, models, and software competitions, Springer (2013)
- [Jennings 01] Jennings, N. R., Faratin, P., Lomuscio, A. R., Parsons, S., Wooldridge, M., and Sierra, C.: Automated Negotiation: Prospects, Methods, and Challenges, *Group Decision and Negotiation*, Vol. 10, pp. 199–215 (2001)
- [Kawaguchi 11] Kawaguchi, S., Fujita, K., and Ito, T.: Compromising strategy based on estimated maximum utility for automated negotiation agents competition (ANAC-10), in *Modern Approaches in Applied Intelli*gence, pp. 501–510, Springer (2011)
- [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)
- [Marsa-Maestre 14] Marsa-Maestre, I., Lopez-Carmona, M. A., Ito, T., Zhang, M., Bai, Q., and Fujita, K.: Novel insights in agent-based complex automated negotiation, Vol. 535, Springer (2014)
- [Robu 05] Robu, V., Somefun, D. J. A., and Poutré, J. L.: Modeling complex multi-issue negotiations using utility graphs, in AAMAS '05: Proceedings of the fourth international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems, pp. 280–287, New York, NY, USA (2005), ACM
- [Robu 08] Robu, V. and La Poutré, H.: Constructing the Structure of Utility Graphs Used in Multi-Item Negotiation through Collaborative Filtering of Aggregate Buyer Preferences, in *Rational, Robust, and Secure Negotiations* in Multi-Agent Systems, pp. 147–168, Springer (2008)
- [Rubinstein 82] Rubinstein, A.: Perfect Equilibrium In A Bargaining Model, Vol. 50, No. 1, pp. 97–109 (1982)