

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

奥原 俊^{1,a)} 伊藤 孝行^{1,†1,b)}

概要: 本論文では、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を提案する。自動交渉技術は、異種 (heterogeneous) の自律エージェントが存在する環境において、交渉によって合意し協調を行うために重要な技術である。例えば、異なる設計者による自動運転車の協調が応用の一つである。自動交渉の研究分野は、国際競技会が開催されるなど、近年注目が高い。課題は、既存の多くの自動交渉エージェントはアドホックな妥協プロセスを行なっている点である。つまり、相手の提案を受け入れる時の妥協の程度の判断として閾値の調整によって受理もしくは不受理を決めている。効用の値の閾値の調整のみのため、どのように妥協するのかを説明することが困難である。本論文では、いくつかの制約を信じないという状態にして、制約を緩和することで妥協プロセスを実現することで、妥協が行われた場合にどの制約を信じてどの制約を信じていないかという説明が可能になる。その上でいくつかの妥協戦略を提案している。評価実験では、これらの妥協戦略はランダムに制約を選ぶよりも有為に効果的であることが確認する。

1. はじめに

自動交渉エージェント [1], [2] の重要性が高まっており、広く研究が進められている [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11]。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ドとして、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。

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

¹ 名古屋工業大学大学院情報工学専攻
Nagoya Institute of Technology, Gokiso, Showaku, Nagoya
466-8555, Japan

^{†1} 現在、藤田医科大学医療科学部
Presently with School of Health Sciences, Fujita Health University

a) okuhara@itolab.nitech.ac.jp

b) ito.takayuki@nitech.ac.jp

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。具体的には、エージェントは、信じる (IN) 制約集合と信じない (OUT) 制約集合を持つことを仮定する。初期状態では、全ての制約を信じている (IN) とし、制約緩和のプロセスで、いくつかの制約を信じない (OUT) に変更する。

ここで、どのように制約を IN から OUT に変更していくかについて様々な戦略が考えられる。本論文では、4つの方法を提案する。(1) 価値に基づく制約緩和、(2) ランダム制約緩和、(3) 距離に基づく制約緩和、および、(4) 価値と距離に基づく制約緩和である。評価実験では、(1)、(3)、および (4) による方法が (2) のランダム制約緩和よりも有意に高い社会余剰 (エージェントの効用を足し合わせたもの) を得られることを確認できている。

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 [1]。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 [12], [13], [14]。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 [15], [16] を用いる。ハイパーグラフとは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}

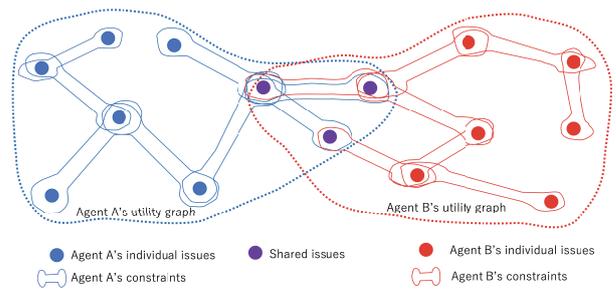


図 1 エージェント間の論点の共有と効用グラフ

は制約 C_j の価値を表す。 ϕ_{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。 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_j} を得る。

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

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 ($range_{C_j}$) 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。

具体的には以下の通りである。

- (1) 各エージェントは、自分の最適な案 (各論点 (Issue) に対する値の最適な割り当て) を生成する。
- (2) 各エージェントは、同時に共有論点に対する値を提案する。
- (3) 合意判定

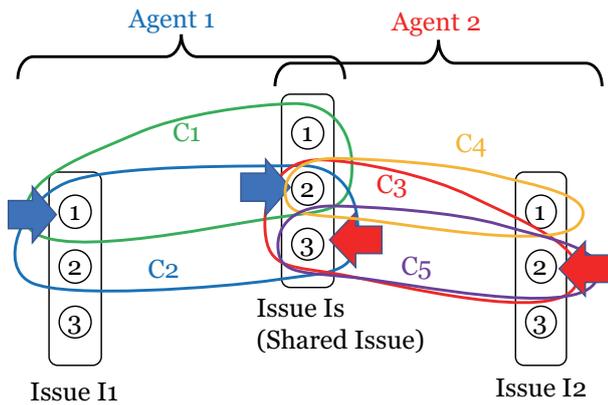


図 2 制約緩和による合意の例 1 : 初期設定

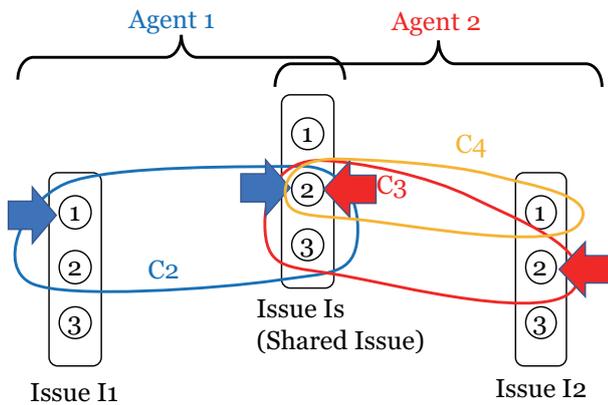


図 3 制約緩和による合意の例 2 : 緩和により合意

- 共有論点に対する値が全て同じであれば合意し終了する。
- もしくは規定の回数に達したら終了する。
- それ以外なら, (1) へ戻る

(4) 各エージェントは妥協プロセス (次節参照) を行う。

エージェントは妥協プロセスを行うことで自らの効用空間を変形させ, その中で最適な提案を行う。つまり, 本プロトコルでは, 毎回の提案においてエージェントは自らの効用空間に基づいて最適な提案を行う。

自動交渉の研究分野では交互提案プロトコル [17] 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, Agent 1 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の一つ減らす (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し 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。
- 1論点の可能な値は5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。
- 各エージェントの最適解の探索には多スタート局所探索を用いる。
- グラフ構造はランダムに与える。

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

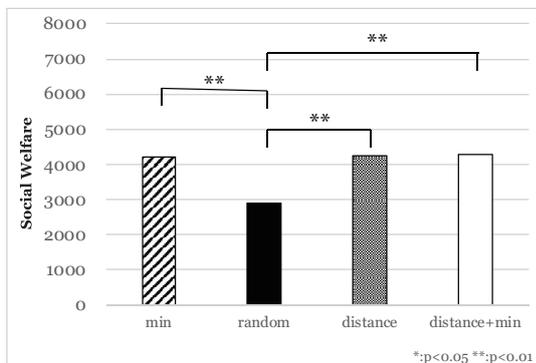


図4 実験結果: $x = 1$ および $y = 16$

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6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 $y = 30$ とする。

いずれ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。

1エージェントあたりの論点の数が50を超えると、実験結果が安定したものを得ることができなかつた。すなわち、描く手法について有意な差を示すような結果を得ることが難しかった。これは、1エージェントあたりの論点の

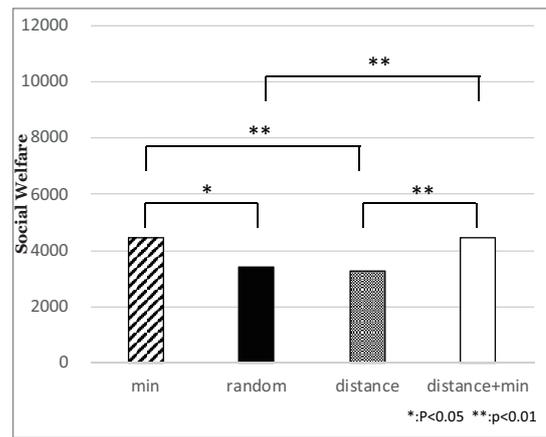


図5 実験結果: $x = 2$ および $y = 11$

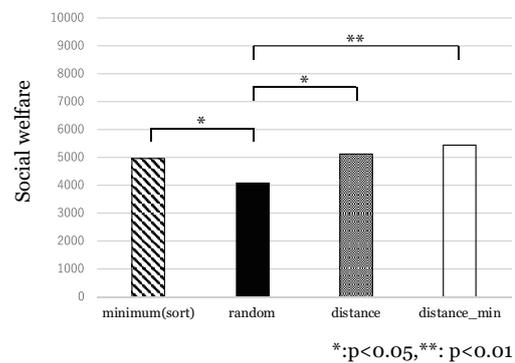


図6 実験結果: $x = 1$ および $y = 30$

数が50を超えると、解の数は 5^{50} を超えることになり、最適解を探索するために相当の計算が必要となるためである。したがって、スケーラブルな方法は今後の課題である。また、現在、エージェントに与えているグラフ構造はランダムに与えている。グラフの構造に基づいた最適化戦略も今後の課題である。

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 [18] 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という指摘している。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 [19] は様々な妥協の関数について分析している。ANAC 競技会 [20] 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す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 [21] 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[22] 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。

説明可能なエージェントの交渉プロセスや妥協プロセスについて事例ベース推論を用いた観点の研究は Katia Sycara の一連の研究がある [23], [24], [25], [26]。ここでの視点は、事例ベース推論の枠組みの中で、論理的な議論の形での妥協や説得を定義している。Sycara らの一連の研究は Argumentation theory[27], [28] と関連があり、数理理論的に発展している。一方で、本研究の着目点は、数値的な取り扱いが可能な効用関数をベースにして、どのように説明可能な妥協プロセスを構築するかであり異なっている。数理議論理論 [27] との統合は今後の課題である。

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 [29] 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、合意するという事は、各エージェントの中で整合しつつ、共有する論点についても整合するという事であり、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

- [1] Ito, T., Hattori, H. and Klein, M.: Multi-issue Negotiation Protocol for Agents : Exploring Nonlinear Utility Spaces, *Proc. of 20th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-2007)*, pp. 1347–1352 (2007).
- [2] 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).
- [3] Bai, Q., Ren, F., Fujita, K., Zhang, M. and Ito, T.: *Multi-agent and Complex Systems*, Springer (2017).
- [4] Fukuta, N., Ito, T., Zhang, M., Fujita, K. and Robu, V.: *Recent Advances in Agent-based Complex Automated Negotiation*, Vol. 638, Springer (2016).
- [5] Fujita, K., Ito, T., Zhang, M. and Robu, V.: *Next Frontier in Agent-based Complex Automated Negotiation*, Vol. 596, Springer (2015).
- [6] 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).
- [7] Ito, T., Zhang, M., Robu, V. and Matsuo, T.: *Complex automated negotiations: Theories, models, and software competitions*, Springer (2013).
- [8] Ito, T., Zhang, M., Robu, V., Fatima, S. and Matsuo, T.: *New trends in agent-based complex automated negotiations*, Vol. 383, Springer (2011).
- [9] Ito, T., Zhang, M., Robu, V., Fatima, S., Matsuo, T. and Yamaki, H.: *Innovations in Agent-Based Complex Automated Negotiations*, Vol. 319, Springer (2010).
- [10] Ito, T., Zhang, M., Robu, V., Fatima, S. and Matsuo, T.: *Advances in agent-based complex automated negotiations*, Vol. 233, Springer (2009).
- [11] Ito, T., Hattori, H., Zhang, M. and Matsuo, T.: *Rational, robust, and secure negotiations in multi-agent systems*, Vol. 89, Springer (2008).
- [12] Robu, V., Somefun, D. J. A. and Poutré, J. L.: Modeling complex multi-issue negotiations using utility graphs, *AAMAS '05: Proceedings of the fourth international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems*, New York, NY, USA, ACM, pp. 280–287 (2005).
- [13] 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).
- [14] 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).
- [15] 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).
- [16] Hadfi, R. and Ito, T.: Modeling Complex Nonlinear Utility Spaces Using Utility Hyper-Graphs, *Modeling Decisions for Artificial Intelligence*, Springer, pp. 14–25 (2014).
- [17] Rubinstein, A.: Perfect Equilibrium In A Bargaining Model, Vol. 50, No. 1, pp. 97–109 (1982).
- [18] Klein, M., Faratin, P., Sayama, H. and Bar-Yam, Y.: Negotiating Complex Contracts, *Group Decision and Ne-*

- gotiation*, Vol. 12, No. 2, pp. 58–73 (2003).
- [19] 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 (online), available from <http://eprints.ecs.soton.ac.uk/2117/> (1998).
 - [20] 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).
 - [21] Kawaguchi, S., Fujita, K. and Ito, T.: Compromising strategy based on estimated maximum utility for automated negotiation agents competition (ANAC-10), *Modern Approaches in Applied Intelligence*, Springer, pp. 501–510 (2011).
 - [22] Baarslag, T.: What to bid and When to stop, Master's thesis, Delft University of Technology (2014).
 - [23] Sycara, K.: Multi-Agent Compromise via Negotiation, *Distributed Artificial Intelligence (Vol. 2)* (Gasser, L. and Huhns, M., eds.), Morgan Kaufmann, Los Altos, CA (1989).
 - [24] Sycara, K. P.: Argumentation : Planning Other Agents' Plans, *Proceedings on International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-89)*, pp. 517–523 (1989).
 - [25] Sycara, K. P.: Resolving Goal Conflicts via Negotiation, *Proceedings of Fifth National Conference on Artificial Intelligence*, pp. 245–250 (1988).
 - [26] Sycara-Cyranski, K.: Arguments of Persuasion in Labor Mediation, *Proceedings of International Joint Conference on Artificial Intelligence(IJCAI-85)*, pp. 294–296 (1985).
 - [27] 若木利子, 新田克己: 数理議論学, 東京電機大学出版 (2017).
 - [28] Sierra, C., Jennings, N. R., Noriega, P. and Parsons, S.: A Framework for Argumentation-Based Negotiation, *ATAL* (1997).
 - [29] Bridgeland, D. and Huhns, M.: Distributed Truth Maintenance, pp. 72–77 (1990).