

複数論点交渉問題における 公平性に基づいた効用情報の対立度の提案

A Metric of Opposition Level between the Utility Information based on Game Theoretical Fairness for Multi-issue Negotiation

遠山 竜也*¹ 伊藤 孝行*^{1*2}
Tatsuya Toyama Takayuki Ito

*¹名古屋工業大学大学院 情報工学専攻
Nagoya Institute of Technology, Department of Computer Science

*²名古屋工業大学 情報科学フロンティア研究院
Frontier Research Institute for Information Science, Nagoya Institute of Technology

A negotiation is the interaction process in which intelligent agents reach an agreement. Especially, a multi-issue negotiation problem is challenging in the field of multi-agent systems. In order to address such challenge, the Automated Negotiating Agents Competition (ANAC) is organized every year. In negotiations, the utility information influences the overall results because each player's preference is based on its own utility information. However, there were only qualitative evaluations about the difficulty of negotiations in ANAC 2015. In this paper, we propose a metric of opposition between the utility information, which quantitatively indicates the difficulty in making an agreement, measuring how much hostile the opponent has. The opposition is geometrically calculated based on the concept of fairness in Game Theory. For evaluating the opposition, we compare the opposition with qualitative evaluations existing in ANAC 2015. Furthermore, we analyze the opposition by empirical experiments with an automated negotiating simulator.

1. はじめに

マルチエージェントの研究分野において、エージェント間の相互作用の分析に関して多くの研究がなされている。交渉は相互作用の一つとして挙げられ、特に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) [Faratin 02] が重要な研究課題であると注目されている。

複数論点交渉問題を対象とした研究分野として、自動交渉エージェント (Automated Negotiating Agent) がある。自動交渉エージェントは、現実世界の交渉をモデル化した交渉環境の下、他のエージェントと自動的に交渉を行うことで、人間の交渉の支援、または代行を目的とした知的エージェントを指す。人間社会において交渉は様々な状況で必要とされるため、自動交渉エージェントは社会的な負担を軽減できる可能性ある技術として注目されている。さらに、様々な企業や研究機関が人工知能を研究、及び開発が盛んに行われる現代社会において、設計者の異なる人工知能間の自動調整技術としても、自動交渉の技術は有効であると考えられている [COCN 16]。

交渉ゲームとしてのエージェント間の交渉を分析において、お互いの効用情報を非公開とする交渉問題 (Closed negotiation) が存在する。しかし、Closed negotiation ではエージェントが交渉解を算出することができないため、交渉結果に影響する合意案候補全体による交渉ドメインの定量的評価が必要となる。

したがって本研究では、交渉者間の効用情報の違いを評価する指標として、交渉ドメインから形成できる全合意案候補におけるお互いの効用値から効用情報の対立度を提案する。具体的には、ゲーム理論における公平性の概念を幾何学的に表現することで指標を定式化する。

本研究では評価実験として、自動交渉エージェントのシミュレータである General Environmental for Negotiation

with Intelligent multipurpose Usage Simulation (GENIUS) [Lin 14] をテストベッドとして用いた。また分析には、自動交渉エージェントの国際競技会 6th Automated Negotiating Agents Competition (ANAC 2015) [Baarslag 16, Baarslag 13] にて用いられた交渉ドメインを用いた。

2. 対象とする交渉環境と関連研究

2.1 交渉環境

本研究では、自動交渉エージェントの国際競技会である Automated Negotiating Agents Competition (ANAC) [Baarslag 16, Baarslag 13] における交渉環境を用いる。

【交渉ドメイン】

交渉ドメインとは交渉における論点や各論点の取り得る値の定義である。本研究では、現実世界の交渉問題を論点 (issue) ごとに分解し、各論点の取り得る選択肢を数値 (value) に変換することで、エージェントの取り扱える交渉問題として表現している。交渉に参加する全エージェント間に完全な情報が共有され、交渉セッション中は不変である。

【合意案候補 (Bid)】

合意案候補とは、交渉問題の合意案として実現可能な候補である。交渉問題のすべての論点を I とし、個々の論点 i ($i \in I$) は、それぞれ $[0, v_i]$ の範囲の整数値をとる。ここで、 v_i は論点 i の取り得る値の最大とする。合意案候補集合を S 、個々の合意候補案を s ($s \in S$)、及び論点数が n のとき、 S は式 (2.1) と定義される。

$$S = \{s = (s_1, s_2, \dots, s_n) \in \mathbb{N}^n \mid 0 \leq s_i \leq v_i, i = 1, 2, \dots, n\} \quad (1)$$

【効用関数 (Utility function)】

交渉に参加する各エージェントは独自の選好 (効用) を数値として返す効用関数を持つ。本研究における効用関数は、複

連絡先: 遠山 竜也, 名古屋工業大学大学院 情報工学専攻,
〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町,
toyama.tatsuya@itolab.nitech.ac.jp

数の論点 (*issue*) によって表現され、多属性効用関数となっている。さらに、論点 i ごとに独立した評価関数 $eval(v_i)$ を設定し、効用関数の値域を $[0, 1]$ に正規化するための正規化係数 w_i ($\sum w_i = 1.0$) によって定式化される。具体的には、式 (2) と定義される。

$$U(v) = \sum_{i=1}^N w_i \cdot eval(v_i) \quad (2)$$

なお、本研究では互いに相手の効用情報を参照できない Closed Negotiation を対象とする。現実の交渉問題においては、プライバシーの観点から互いに交渉相手に自身の真の効用を知られることは好ましくない。効用情報の公開によって期待できる獲得効用が減少してしまう可能性があるからである。

【交渉プロトコル】

本研究では、交渉プロトコルとして Stacked Alternative Offers Protocol for Multi-Lateral Negotiation (SAOPMN) [Aydogan 16] を採用する。

SAOPMN では、次の 3 つの行動を各エージェントが順番に選択していくことにより交渉が行われる。

- **Accept:** 相手側が提示した合意案候補 (Bid) を受け入れる。提案者以外の全員に *Accept* された場合、合意が形成され、交渉参加者全員が自身の効用関数で評価した効用値を得て、交渉が終了する。
- **Offer:** 相手側が提示した合意案候補を拒否し、新たにこちらから合意案候補を提案する。合意は形成されず、交渉は継続される。
- **EndNegotiation:** エージェントが交渉全体を放棄する。交渉参加者のいずれかでも *EndNegotiation* が選択された時点で、合意が形成されず交渉が終了する。

エージェント A, B, 及び C が三者間交渉を行う場合の提案交換プロトコルの例を示す。まず、エージェント A がエージェント B に 1 つ合意案候補を入札する。次に、エージェント B が入札された合意案候補を受け入れる場合は *Accept* を選択し、受け入れない場合は *Offer* を選択することで代替案を入札する。また、交渉を放棄する場合は *EndNegotiation* を選択し、選択された時点で交渉は終了する。エージェント A, B, 及び C が順番に行動を選択し、全員が特定の合意案候補を受け入れる場合に合意形成が成功し、各エージェントは自身の効用関数から計算された効用値をスコアとして獲得する。交渉中に *EndNegotiation* が選択された場合は、合意形成は失敗し互いが得られる効用値は最低値となる。

【割引効用 (DF: Discount factor)】

交渉時間の経過につれ獲得効用値が割引される割引効用 [Fatima 06] を設定する。これは、人間の効用は時系列的に減少する可能性があることを考慮している。 $[0, 1]$ を定義域とする割引係数 δ に基づいて、式 (3) のように補正した値である。

$$U_D(\omega, t) = U(\omega) \cdot \delta^t \quad (3)$$

割引係数 δ は交渉問題ごとに設定されている。交渉時間 t が大きいほど獲得できる効用値が減少し、減少率は割引係数 δ が小さいほど大きくなる。したがって、エージェントの戦略としてのどのタイミングで合意形成を得るかが重要となる。

表 1: ANAC 2015 で用いられた交渉ドメイン

ID	Domain Size	割引係数 δ	留保価格 RV	Cooperativeness
1	5	1.0	0.5	very competitive
2	5	1.0	0.5	a bit cooperative
3	25	0.2	0.0	very competitive
4	25	1.0	0.5	quite collaborative
5	320	0.5	0.0	competitive
6	320	0.5	0.0	collaborative
7	6561	1.0	0.0	competitive
8	6561	1.0	0.0	collaborative
9	65536	0.4	0.7	very collaborative
10	65536	0.4	0.7	very competitive

【留保価格 (RV: Reservation value)】

留保価格は *EndNegotiation* が選択された場合に獲得できる効用値である。留保価格 RV は交渉問題ごとに設定され、割引効用による補正を考慮し式 (4) のように値は計算される。

$$U_R(t) = RV \cdot \delta^t \quad (4)$$

留保価格 RV の定義域は $[0, 1]$ であり、0 を超える留保価格が設定されていた場合、交渉放棄時にも 0 を超える効用値を得ることができる。したがって、交渉者が合意案によって得ることができる効用値が留保価格より小さいと判断した場合に、*EndNegotiation* を選択する動機が発生する。

2.2 交渉ドメインの先行分析手法

国際自動交渉エージェント競技会 ANAC において、実際の競技会で用いられた交渉ドメインの評価が以下のようにされている。この評価とは、交渉参加者全員の効用情報を参照できる状況での交渉ドメインの分析に基づいているため、交渉過程において交渉参加者が実際に評価できるものではない。つまり、交渉ドメインの分析、及び評価自体は、各交渉参加者の効用情報が参照できる第三者によってなされるものであるが、交渉ドメインの分析、及び評価には交渉参加者に及ぼす影響を考慮すべきである。

ANAC 2012 では、Competitiveness という定量的な評価がされている。Competitiveness は、効用空間上のある合意案候補 ω と、互いにとって最大効用値をとる合意案候補とのユークリッド距離の最小値としている。しかし、Closed negotiation では互いの効用情報を非公開としているため、交渉結果に影響を及ぼす合意案候補を限定することは困難である。したがって、代表的な合意案についてのみの結果に基づく Competitiveness という指標は、交渉ドメインの分析としては不十分である。

ANAC 2015 では、合意案候補全体の各交渉参加者の効用値の分布から、表 1 のように Cooperativeness という定性的な評価がなされている。しかし、定性的な評価ではどれほど合意形成が難しいか具体的に数値で表すことができず、分析結果を交渉戦略に活用するなどといった利用が困難である。

3. 公平性に基づいた効用情報の対立度

3.1 交渉ドメインの定量的な評価指標の必要性

本章では、交渉ドメインの定量的な評価指標として、効用情報の対立度指標を定義する。交渉ドメインを定量的に評価できる指標により、以下のような利点がある。

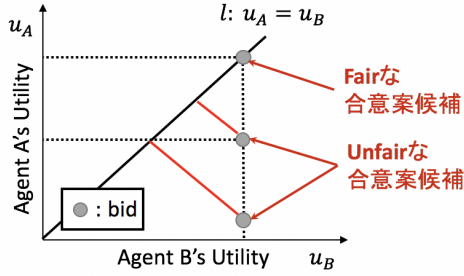


図 1: 直線 $l: u_A = u_B$ に対する合意案候補の分布と公平性

- 評価結果が数値によって示されるため、計算機プログラムにとって容易に利用できる。
- 交渉相手の効用情報を完全に把握できなくても、指標の値を参照できれば交渉相手の分析ができる。
- 交渉相手との対立度指標から、交渉戦略の構築や交渉プロトコルの設計などの応用が期待できる。

特に本研究が対象としているゲーム理論における交渉問題や自動交渉で取り扱う交渉問題では、数理的な分析がなされるため定量的な評価指標は重要である。

3.2 効用情報の対立度の定式化

効用情報の対立度として、ゲーム理論における公平性の概念に基づいて定式化する。ゲーム理論における公平性とは、参加者全員に公平に利得を配分することである。本研究では特に、交渉において各交渉者が獲得する効用値が等しくなることを公平性の定義として論じることとする。

図 1 では、二者間交渉問題を例とした合意案候補の分布と公平性について示す。図 1 に示すように、直線 $l: u_A = u_B$ との距離が大きいほど、一方のエージェントに対して有利な合意案候補である。ここで直線 l は、ゲーム理論における公平性の概念を満たす直線を指し、直線 l 上に位置する合意案候補では各エージェントの効用値が全て等しくなる。また、直線 l から距離が大きいほど各エージェントの効用値の偏りが大きくなり、不公平な合意案候補であると言える。不公平な合意案候補では、効用値に関して有利なエージェントにとっては合意が得られやすいが、不利なエージェントにとっては合意を得ることが難しいため、合意形成の難易度が高い合意案候補であると考えられる。

特に二者間交渉問題では直線 l からの距離は、式 (5) のように示される。

$$\frac{\sqrt{2}}{2} \left| U_A(\omega) - U_B(\omega) \right| \quad (5)$$

式 (5) 中の $U_A(\cdot)$, $U_B(\cdot)$ はそれぞれエージェント A と B の効用関数とし、 ω は対象とした合意案候補を示す。

そして、対象となる全合意案候補に関する式 (5) の平方和を正規化したものを、交渉ドメインにおける合意形成の難易度評価として、効用情報の対立度と定式化する。

$$OPP_N(\Omega) = \frac{1}{|\Omega|} \sum_{\omega \in \Omega} \left(U_A(\omega) - U_B(\omega) \right)^2 \quad (6)$$

式 (6) 中の Ω は対象とする合意案候補集合、 $|\Omega|$ は集合 Ω の要素数を示す。式 (6) の値が大きいほど、公平性の低い合意案候補が多いことを意味し、対象の交渉ドメインは合意形成の難易度が高いと評価する。

表 2: 実験 1.1 及び実験 1.2 の結果

ID	Size	Cooperativeness	効用情報の平均対立度	平均獲得効用値
1	5	very competitive	0.192	0.6427
2	5	a bit cooperative	0.160	0.7341
3	25	very competitive	0.1049	0.4127
4	25	quite collaborative	0.0481	0.7701
5	320	competitive	0.1037	0.3707
6	320	collaborative	0.0708	0.6708
7	6561	competitive	0.0413	0.6770
8	6561	collaborative	0.0241	0.7651
9	65536	very collaborative	0.0236	0.6570
10	65536	very competitive	0.0353	0.5634

3.3 対象とする合意案候補集合に関する議論

対象とする合意案候補集合 Ω は、交渉過程及び結果に影響する合意案候補の集合とする。ドメインの評価に複数の合意案候補から成る合意案候補集合を用いることで、特定な合意案候補のみに基づいた交渉ドメインの既存の評価手法における問題点を解決する。なぜなら Closed negotiation を前提としている交渉問題では、各交渉エージェントは相手の効用値を参照することができず、適切な合意案候補の探索が困難であるためである。

特に本研究では、対象とする合意案候補集合 Ω は全合意案候補を要素に取る集合とする。ただし、交渉参加者全体にとって効用値が低い合意案候補などは、交渉の過程及び結果には影響を受けないと考えられ、交渉ドメインを評価する際に想定すべき合意案候補集合は議論の余地がある。本研究では問題の単純化のため、交渉の過程及び結果には全合意案候補が影響するという仮定の下、議論を進める。

4. 評価実験

本論文では、効用情報の対立度が高い相手ほど公平性の低い合意案候補が多く存在する相手であるので、合意形成の難易度が高い相手であると考えた。本節では、実際に効用情報の対立度が合意形成の難易度に関連性があるかを評価する。

具体的には以下の実験を行った。

実験 1.1: ANAC 2015 における交渉ドメイン (表 1) に対する定性的評価 Competitiveness と比較する。

実験 1.2: 同一エージェント同士の交渉シミュレーションの結果から、効用情報の対立度が高い相手との合意形成の難易度を考察する。

実験 1.1: 定性的評価 Competitiveness との比較

表 1 に示す、ANAC 2015 にて用いられた交渉ドメインについて、効用情報の対立度を計算する式 (6) の値と定性的評価 Competitiveness と比較する。計算の対象とする合意案候補集合は、全合意案候補として効用情報の対立度を計算した。ANAC 2015 は三者間交渉問題を対象としているため、各々の二者における効用情報の対立度の値の平均値 (効用情報の平均対立度) と比較した。

表 2 における定性的評価 Cooperativeness と効用情報の平均対立度を比較する。合意案候補の数 (Domain Size) が等しいドメイン同士を比較すると、Cooperativeness が competitive と設定されているドメインの方が、効用情報の対立度の平均値

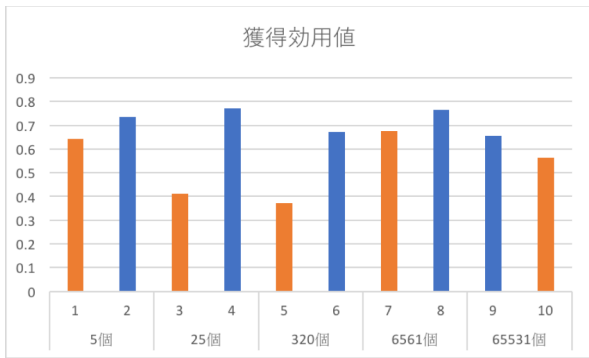


図 2: 実験 1.2 の交渉結果

が高いことがわかる。つまり、Domain Size が等しいドメイン同士の定量評価指標として、効用情報の対立度は用いることができると考えられる。

しかし、Domain Size が異なるドメイン同士の比較は、Cooperativeness と関連性が見られないことがわかる。これは、式 (6) に示したように、値の正規化のために Domain Size で平方和を割っていることが原因でないかと考えられる。本論文では対象とする合意案候補集合は全合意案候補としているため、交渉の過程及び結果に影響を及ぼさない合意案候補が、Domain Size が大きいドメインは多く分布している可能性がある。

実験 1.2: 同一エージェント同士の交渉シミュレーション

実験 1.2 では、効用情報の対立度が実際に合意形成の難易度に関係しているかをシミュレータ GENIUS [Lin 14] を用いた評価実験によって分析する。具体的には、三者間交渉問題において同一のエージェント同士で交渉させ、対立度の高い交渉ドメインか対立度の低い交渉ドメインの交渉結果を比較することで、対立度が合意形成を難しくしているかを分析する。実験設定は以下の通りである。

【実験設定】

参加エージェント: 譲歩の度合いが低い順に Boulware, Linear, 及び Conceder を用いて実験を行う。

交渉試行回数: 同一な交渉条件で 10 回交渉を行う。

交渉形式: 1000 Round 以降の交渉は打ち切り。

交渉ドメイン: ANAC 2015 の交渉ドメイン (表 1) を使用。

【実験結果】

実験 1.2 の結果について、表 2 における平均獲得効用値に具体的な値を、図 2 にて平均獲得効用値をグラフに表す。実験 1.2 の結果についても、合意案候補の数 (Domain Size) が等しいドメイン同士を比較すると、効用情報の平均対立度が高いドメインにおける交渉の方が、獲得効用値が低く合意形成が難しいことがわかる。

5. 本研究のまとめ

本論文では、自動交渉における交渉ドメインの定量的な分析のため、効用情報の対立度を設計した。具体的には、合意形成にはゲーム理論における公平性の概念が重要であるという観点から、合意案候補の各効用情報による効用値の分布に基づいて、公平性の概念を幾何学的なアプローチから指標を定式化した。ここで Closed negotiation を想定した場合、特定の合意

案候補による交渉ドメインでは合意案候補の探索が困難なため、交渉過程及び結果に影響を及ぼす合意案候補集合から交渉ドメインを分析できるようにした。分析に用いる合意案候補集合には、全合意案候補を要素とした。

そして、公平性の低い合意案候補を多く持つ相手ほど、合意形成の難易度が高いという仮定のもと、効用情報の対立度を合意形成の難易度の評価に用いた。これは、公平性の低い合意案候補は、特定の交渉参加者に対してのみ一方的に効用値が高いため、効用値が低い相手から合意を得ることが困難と考えられるからである。

そして、設計した対立度指標について、ANAC2015 の交渉ドメインに関する既存の定性的な評価と比較し、関連性を分析した。また、実際に効用情報の対立度が交渉結果に影響を及ぼすかどうかを、自動交渉エージェントを用いた実証実験により評価した。評価実験の結果から、合意案候補の数 (Domain Size) の等しい交渉ドメイン同士では、既存の定性的な評価との関連性が示された。さらに、効用情報の対立度が高い相手が多い交渉ドメインでは、交渉結果において獲得効用値が小さくなることから、効用情報の対立度を合意形成の難易度の評価に用いることができることを確認した。

参考文献

- [Faratin 02] Faratin, P., Sierra, C. and Jennings, N. R.: *Using similarity criteria to make issue trade-offs in automated negotiation*, Artificial Intelligence, pp. 142:205-237 (2002).
- [COCN 16] 産業競争力懇談会 (COCN): 人工知能間の交渉・強調・連携による社会の超スマート化—それぞれの目的の円滑な達成と互恵関係の形成—, (2016).
- [Lin 14] Lin, R., Kraus, S., Baarslag, T., Tykhonov, D., Hindriks, K. V., and Jonker, C. M.: GENIUS: An Integrated Environment for Supporting the Design of Generic Automated Negotiators, Computational Intelligence, Vol. 30, No. 1, pp. 48-70 (2014)
- [Baarslag 16] Baarslag, T., Aydogan, R., Hindriks, K. V., Fujita, K., Ito, T., and Jonker, C. M.: The automated negotiating agents competition 2010-2015, *AI Magazine*, (2016)
- [Baarslag 13] Baarslag, T., Fujita, K., Gerding, E. H., Hindriks, K. V., Ito, T., Jennings, N. R., Jonker, C. M., Kraus, S., Lin, R., Robu V. and Williams, C. R.: Evaluating Practical Negotiating Agents: Results and Analysis of the 2011 International Competition, *Artificial Intelligence Journal (AIJ)*, Elsevier Science, Vol. 198, pp. 73-103, (2013).
- [Aydogan 16] Aydogan, R., Festen, D., Hindriks, K. V., and Jonker, C. M.: Alternating Offers Protocol for Multilateral Negotiation, In Fujita et. al (editors). *Modern Approaches to Agent-based Complex Automated Negotiation*, Springer, (2016).
- [Fatima 06] Fatima, S. S., Wooldridge, M., and Jennings, N. R: Multi-issue negotiation with deadlines, *Journal of Artificial Intelligence Research*, Vol. 27, pp.381-417, (2006).