

複数回の論点交渉問題に対するエージェント戦略の提案と解析

森井 翔太*¹ 川口 将吾*² 伊藤 孝行*³
 Shota Morii Shogo Kawaguchi Takayuki Ito

*¹名古屋工業大学大学院工学研究科情報工学専攻

*¹Department of Computer Science and Engineering, Nagoya Institute of Technology

*²株式会社リクルートホールディングス

*²Recruit Holdings Co.,Ltd.

*³名古屋工業大学大学院産業戦略工学専攻

*³Master of Techno-Business Administration, Nagoya Institute of Technology

The Automated Negotiation Agents Competition (ANAC2012) was organized and our agent (AgentMR) got through the qualifying rounds. It is likely that the strategies of an agent can be applied to real-life negotiation problems. Therefore, this paper deals with a new scenario of multiple-issue negotiation problems. The advantage of the proposed scenario in comparison with the existing ones is being close to real-life negotiation problems. In this paper, a new agent (AgentMRK2) is developed for this competition. We show that AgentMRK2 can negotiate in the proposed scenario.

1. はじめに

マルチエージェントシステムの研究分野において自動交渉エージェントが注目されており、多くの研究が行われている [Fatima 02, Kraus 95, Osborne 90]. 一方で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) が重要な研究課題となっており、複数論点交渉問題を対象とした国際自動交渉エージェント競技会 (Automated Negotiating Agents Competition (ANAC)) が、International Joint Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems (AAMAS) において 2010 年より開催されている。ANAC では効用情報が非公開下での二者間の複数論点交渉問題 (bilateral multi-issue closed negotiation problem) を対象とした自動交渉エージェントの競技会である。

AAMAS2010 のワークショップとして開かれた、International Workshop on Agent-based Complex Automated Negotiations (ACAN) [Ito 09] において、第一回自動交渉エージェント競技会 (ANAC2010) が開催され、世界中から様々な戦略を持つエージェントが提案された [Kawaguchi 11, Baarslag 11, Williams 11]. また、AAMAS2011 では第二回国際自動交渉エージェント競技会 (ANAC2011) が開催された。さらに、ANAC2012 では世界中から 17 エージェントが参加し、予選大会により 8 エージェントが選抜された。本研究では自動交渉エージェント AgentMR を試作し [森井 11], ANAC2012 予選大会において高いスコアを得て、決勝大会に進出している。

ANAC における交渉問題は現実世界に近い設定の問題となっており、交渉におけるエージェントの戦略は実際の交渉問題にも適用可能であると考えられる。本研究では ANAC における既存の問題設定を拡張し、複数回の論点交渉問題を提案する。複数回の論点交渉問題では相手エージェントとの交渉の履歴を引き継ぐことが可能であり、交渉履歴を活用することでより効率的に交渉を行うことができると考えられる。また、既存エージェント AgentMR の改良を行い、交渉履歴を保持する機構を実装した、新たなエージェント AgentMRK2 を開発する。

AgentMRK2 が交渉履歴を活用することで、様々な問題設定において有利な交渉を行えることを確認する。

以下に本論文の設定を示す。まず、ANAC の概要に関して詳細を示す。次に、ANAC における既存の問題設定を拡張した複数回の論点交渉問題を提案する。その後、既存エージェントである AgentMR に AgentK2 の戦略を組み合わせて、交渉履歴を保持する機構を実装した、新たなエージェント AgentMRK2 を提案する。また、AgentMRK2 が過去の交渉履歴を活用することで効果的な交渉を行うことを、シミュレーション実験により示す。最後に、本論文のまとめと今後の課題を示す。

2. 国際自動交渉エージェント競技会 (ANAC)

2.1 ANAC における目的

国際自動交渉エージェント競技会 (ANAC) は効用非公開状況下での二者間の複数論点交渉問題における研究分野の発展を目的として組織化された。ANAC は以下の 4 点を目的としている。

- (1) 様々な状況下における効率的な戦略をもったエージェントを構築する
- (2) 異なった Bidding および Acceptance 戦略を客観的な指標で評価する
- (3) 学習戦略および相手側の戦略モデル構築手法の提案
- (4) 最先端の交渉エージェント、交渉ドメインおよび効用情報を収集し、関連分野の研究発展に利用する

ANAC の交渉問題における情報は不完全で、また、交渉参加者は各々指針が異なるために、一つの確立したゲーム理論モデルで表現することは困難である。したがって、ANAC における交渉戦略では、交渉参加者の戦略指針を推測した上でヒューリスティックに基づいた戦略を用いることが有効であると考えられる。

ANAC2012 では図 1 のように参加者が独自に交渉ドメインを作成し、作成された交渉ドメイン上で競技会を実践してい

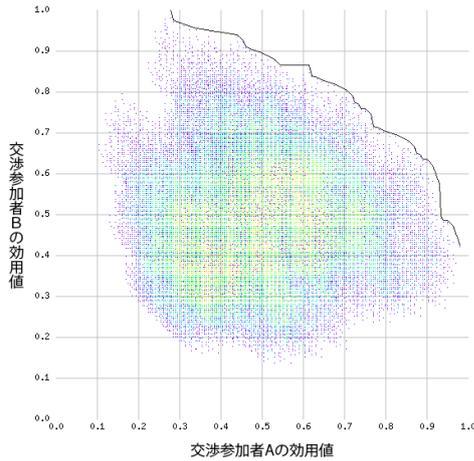


図 1: ANAC における交渉ドメインおよび合意案候補例

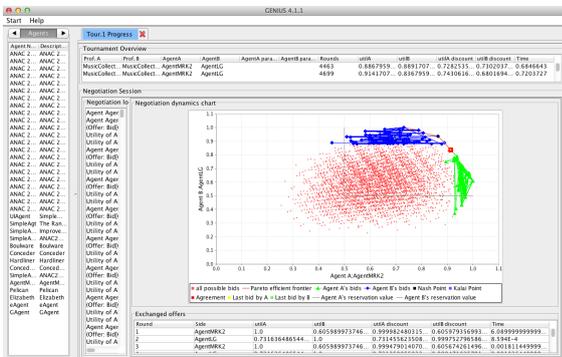


図 2: GENIUS のインターフェイス

る。また、提出された交渉ドメインは売買の値段交渉や電力売買など現実世界の交渉に近い交渉ドメインが採用されており、実際の運用環境の作成に活用できると考えられている。なお、図 1 における各軸は交渉参加者 A および B のそれぞれの効用値 $U(\omega)$ を表しており ($0.0 \leq U(\omega) \leq 1.0$)、交渉ドメインにおける各点は合意案候補を表している。

2.2 交渉プラットフォーム

ANAC では GENIUS (General Environment for Negotiation with Intelligent multi-purpose Usage Simulation) [Lin 09] というシステムを用いて交渉のシミュレーションを行う。GENIUS では図 2 のように交渉参加者 A および B それぞれの現時点における獲得効用値と、行動の履歴が表示される。図 2 において中央右には交渉ドメインが表示されており、シミュレーションにおける交渉過程が可視化できる。特に、GENIUS ではナッシュ解といった重要な交渉解を計算し、エージェントの実績を分析するための様々な数値情報を提供する。GENIUS のツールを用いることで、異なったエージェント戦略の評価を客観的な指標において評価することが可能である。

ANAC では GENIUS 上で動作するエージェントを開発し、様々な交渉ドメイン上でエージェント同士のトーナメントを行うことでエージェント戦略を評価する。

3. 複数回の論点交渉問題の提案と評価

3.1 問題設定

ANAC における交渉問題は現実世界に近い問題が設定されているが、交渉毎の対戦エージェントの情報は引き継がれない。しかしながら、現実世界における交渉では同じ相手と何度も交渉を行うことは少なくない。本研究では ANAC における交渉問題をより実世界に近づけるために、既存の交渉問題の拡張として複数回の論点交渉問題を提案する。すなわち、同じ対戦エージェントに対し複数回の交渉を行う。各交渉においてエージェントは過去の交渉履歴を保持でき、次の交渉において活用することができる。交渉履歴を保持できる問題設定は、ANAC2013 における問題設定としても採用されている。

複数回の交渉問題において交渉結果にどのような変化があるかを調べるために、既存エージェント *AgentMR* を改良し、交渉履歴を保持する機構を持った、新たなエージェント *AgentMRK2* を開発する。なお、本研究では *AgentMRK2* のみ過去の交渉履歴を保持するものとし、相手エージェントは ANAC2012 決勝大会におけるプログラムを用いる。*AgentMRK2* は過去の交渉履歴を保持しているため、交渉を重ねることでより良い効用値を相手から獲得できると考えられる。

3.2 エージェント *AgentMRK2* の開発

ANAC2012 の決勝大会では、決勝大会に進出した多くのエージェントが相手の行動予測を戦略として持っている。しかしながら、エージェント *AgentMR* は相手の行動予測を行わないため、様々な交渉問題において適切な行動を行うことができない。本研究では *AgentMR* を改良することで、種々の交渉問題に対応可能なエージェント *AgentMRK2* を新たに開発した。*AgentMRK2* は、*AgentMR* に川口らによって作成されたエージェント *AgentK2* [Kawaguchi 12] の歩み寄り戦略を新たに実装したエージェントである。以下に *AgentK2* の歩み寄り戦略を示す。

AgentK2 の歩み寄り戦略

AgentK2 の戦略では、相手の提案を自身の効用空間で評価した値の統計情報から、今後の相手から引き出すことが可能な最適な合意案を予想する。具体的には以下の式 (1) と式 (2) に基づき自身の行動を決定する。

$$emax(t) = \mu(t) + (1 - \mu(t))d(t) \quad (1)$$

$$target(t) = 1 - (1 - emax(t))t^\alpha \quad (2)$$

$emax(t)$ は時刻 t での推定される相手から引き出せる最大の効用値を表している。 $emax(t)$ は相手からの合意案候補を自身の効用空間で評価した値の平均を $\mu(t)$ とし、時刻 t までの相手の行動幅を推定した $d(t)$ によって求められる。相手の行動の幅を推定し、平均を加味することで自身の有利な手を相手から引き出せるかを考慮している。

時刻 t までの相手の行動幅 $d(t)$ は、相手からの合意案候補を自身の効用空間で評価した値の累積から、分散を用いて求める。相手からの合意案候補が自身の効用空間の範囲 $[\alpha, \alpha + d(t)]$ において一様分布にもとづいて発生したと仮定すると、その平均および二乗平均は以下の式 (3) と式 (4) によって求められる。

$$\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n x_i = \alpha + \frac{d(t)}{2} \quad (3)$$

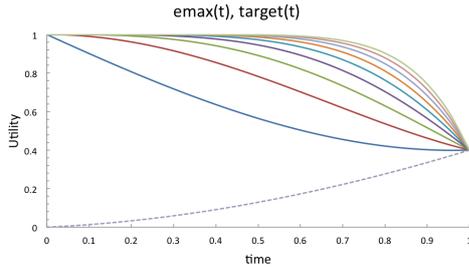


図 3: $\mu(t) = \frac{1}{10}t, d(t) = \frac{1}{3}t^2$ における $target(t)$ の例

$$\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n x_i^2 = \alpha^2 + \alpha d(t) + d^2 \quad (4)$$

したがって、分散 $\sigma^2(t)$ は以下の式 (5) により

$$\sigma^2(t) = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n x_i^2 - \mu^2 = \frac{d^2(t)}{12} \quad (5)$$

と求められるので、相手の行動幅 $d(t)$ は以下の式 (6) によって推定される。

$$d(t) = \sqrt{12}\sigma(t) \quad (6)$$

$target(t)$ は時刻 t において自身が譲歩できる効用値の最低値であり、 α は歩み寄りの速度を調整する係数である。 $target(t)$ は時間経過とともに相手から引き出せる最大の効用値 $emax(t)$ に漸近するような行動を提案する。

図 3 は $emax(t)$ を $\mu(t) = \frac{1}{10}t, d(t) = \frac{1}{3}t^2$ で設定した場合の α を 1 から 9 まで変化させた $target(t)$ の例である。 $target(t)$ は時間経過とともに図 3 の点線で表示している $emax(t)$ の値に近づいていくことが分かる。

3.3 複数回の交渉問題設定における交渉戦略

一つの交渉における交渉回数は数千にも及ぶため、単純に全ての交渉履歴を保持することは困難である。相手エージェントの特徴を簡潔に把握する方法として、合意を形成したときの効用値を保持し、相手が自身の効用空間上においてどの程度まで譲歩しているかを求めることが考えられる。相手エージェントの自身の効用空間上における譲歩度合いを知ることは、自身がどの程度まで譲歩をすれば良いかを判断する上で有効である。ある交渉ドメイン D において、合意候補 ω で合意が形成されたとすると、自身の効用空間上における相手の譲歩度合い λ は、以下の式 (7) で求められる。

$$\lambda = \frac{U(\omega) - U(\omega_{rivalFirst})}{U(\omega_{myMax}) - U(\omega_{rivalFirst})} \quad (7)$$

式 (7) における $U(\omega_{myMax})$ は自身の最大の効用値を持つ合意候補である。また、 $U(\omega_{rivalFirst})$ は相手が初回に提案した合意候補の、自身の効用空間上での効用値である。過去 n 回の交渉について k 回目の交渉における合意形成時の相手の譲歩度合いを λ_k とすれば、 $AgentMRK2$ は譲歩度合いの集合 $\Lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n\}$ を保持している。ある交渉ドメイン D について、自身の効用空間上における相手エージェントが

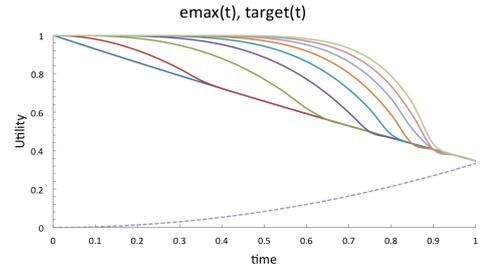


図 4: 図 3 の設定における $g(t)$ を考慮した $target(t)$ の例

提案し得る最大の効用値 $U_{rivalMax}$ は、譲歩度合いの集合 Λ の平均値 $\bar{\Lambda} = \frac{\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lambda_i$ を用いて以下の式 (8) によって求められる。

$$U_{rivalMax} = U(\omega_{rivalFirst}) + (U(\omega_{myMax}) - U(\omega_{rivalFirst})) \cdot \bar{\Lambda} \quad (8)$$

式 (8) と式 (6) で導出した相手の行動幅 $d(t)$ を用いることで、交渉ドメイン D における時刻 t の自身の最低譲歩度合い $g(t)$ を、以下の式 (9) により決定する。

$$g(t) = ((1 - U_{rivalMax}) \cdot t - d(t)) \cdot \epsilon \quad (9)$$

図 4 は図 3 の設定において $g(t)$ を考慮した $target(t)$ の例であるが、図 3 よりも、より早期の段階で相手の譲歩度合いに合わせた譲歩が行えている。また、式 (9) における ϵ は自身の譲歩度合いを調整する係数である。

3.4 評価実験

本実験では過去の交渉履歴を保持した $AgentMRK2$ が、複数回の交渉を行うことによって効率的な交渉を行えることを示す。本実験における交渉ドメインとして、ANAC2012 決勝大会で用いられた交渉ドメイン $Barter$, $Fitness$ および ADG をそれぞれ採用する。交渉ドメイン $Barter$, $Fitness$ および ADG の順に交渉を行い、3つの交渉ドメインによる交渉を繰り返した上で、15回の連続した交渉を行なった。さらに、交渉履歴を用いない場合についても各交渉ドメインで5回の交渉を行なっている。以上のシミュレーション実験から、各ドメインにおいて $AgentMRK2$ が獲得した効用値の平均値および合意形成率をそれぞれ算出し、交渉履歴の活用による変化を考察する。なお、本実験では対戦エージェントとして ANAC2012 決勝大会に進出した $AgentLG$, $TheNegotiatorReloaded$ および $BRAMAgent2$ を採用した。

3.5 シミュレーション実験による評価

本実験では各対戦において、エージェント $AgentMRK2$ が交渉において獲得した効用値の平均値を求めた。表 1 に交渉履歴を用いなかった場合における、3つの交渉ドメインそれぞれの、各エージェントとの対戦結果を示す。また、表 2 に交渉履歴を用いた場合の対戦結果を示す。表 2 より、 $AgentMRK2$ は交渉履歴を活用することで平均獲得効用値が増加した。特に、交渉ドメイン $Fitness$ においては、全ての対戦エージェントにおいて平均獲得効用値が増加している。

表 3 および表 4 では交渉履歴の利用の有無による合意形成率を示している。表 4 より、 $AgentMRK2$ は交渉履歴を活用

表 1: 交渉履歴を用いない場合の平均獲得効用値

AgentName	Barter	Fitness	ADG
AgentLG	0.6436	0.7344	0.5077
Reloaded	0.6640	0.7527	0.6841
BRAMAgent2	0.6408	0.7165	0.9758

表 2: 交渉履歴を用いた場合の平均獲得効用値

AgentName	Barter	Fitness	ADG
AgentLG	0.6384	0.7699	0.6095
Reloaded	0.6808	0.7564	0.7173
BRAMAgent2	0.6980	0.8071	0.9730

することで高い合意形成率を得ている。特に、交渉履歴を用いない場合は *TheNegotiatorReloaded* と合意を形成することが困難であったが、交渉履歴を活用することで他の対戦エージェントと同様に合意を形成することができている。

以上の結果から、*AgentMRK2* は過去の交渉履歴を活用することで、様々な交渉ドメインおよびエージェントとの対戦においてより良い交渉を行っている。*AgentMRK2* は自身の効用空間上における相手の譲歩度合いを予測することで、適切な譲歩を行うことが可能となった。したがって、過去の交渉履歴を用いた戦略が効果的に働いていることが示された。

4. まとめ

本研究では ANAC の概要に関して詳細を示した。次に、ANAC における問題設定を拡張し、複数回の交渉問題を提案した。その後、既存エージェント *AgentMR* に *AgentK2* の戦略を組み合わせ、過去の交渉履歴を活用する戦略を持った、新たなエージェント *AgentMRK2* を開発した。さらに、*AgentMRK2* が様々なエージェントおよび交渉ドメイン上で効果的に交渉を行うことを示した。

今後の課題としては、お互いが交渉履歴を保持している交渉モデルを仮定した場合の評価が挙げられる。また、交渉戦略においてはお互いが交渉履歴に基づいて協調することで早期の合意形成や効率的な合意案の提案を目指す戦略の他、協調せずに裏切り行為を行うことでより高い獲得効用値を得ようとする戦略も考えられる。ゆえに、お互いが交渉履歴を用いた戦略を持つ場合、各エージェントは相手がどのように履歴を活用するのか、それぞれの戦略を予想し対応する必要がある。

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

- [Baarslag 11] Baarslag, T., Hindriks, K. V., and Jonker, C. M.: Acceptance Conditions in Automated Negotiation, in *Proceedings of The Forth International Workshop on Agent-based Complex Automated Negotiations (ACAN 2011)* (2011)
- [Fatima 02] Fatima, S. S., Wooldridge, M. J., and Jennings, N. R.: Multi-issue negotiation under time con-

表 3: 交渉履歴を用いない場合の合意形成率

AgentName	Barter	Fitness	ADG	Ave.
AgentLG	100%	60%	80%	80%
Reloaded	80%	20%	100%	67%
BRAMAgent2	100%	100%	80%	93%

表 4: 交渉履歴を用いた場合の合意形成率

AgentName	Barter	Fitness	ADG	Ave.
AgentLG	100%	100%	80%	93%
Reloaded	100%	80%	100%	93%
BRAMAgent2	100%	100%	100%	100%

straints, in *1st International Joint Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, pp. 143–150 (2002)

- [Ito 09] Ito, T., Zhang, M., Robu, V., Fatima, S., and Matsuo, T.: *Advances in Agent-Based Complex Automated Negotiations*. Springer (2009)

- [Kawaguchi 11] Kawaguchi, S., Fujita, K., and Ito, T.: Compromising Strategy Based on Estimated Maximum Utility for Automated Negotiation Agents Competition (ANAC-10), in *24th International Conference on Industrial Engineering and Other Applications of Applied Intelligent Systems (IEA/AIE-2011)*, pp. 501–510 (2011)

- [Kawaguchi 12] Kawaguchi, S., Fujita, K., and Ito, T.: AgentK2: Compromising Strategy Based on Estimated Maximum Utility for Automated Negotiating Agents, in *Complex Automated Negotiations: Theories, Models, and Software Competitions*, pp. 235–241 (2012)

- [Kraus 95] Kraus, S., Wilkenfeld, J., and Zlotkin, G.: Multiagent Negotiation under Time Constraints, *Artif. Intell.*, pp. 297–345 (1995)

- [Lin 09] Lin, R., Kraus, S., Baarslag, T., Tykhonov, D., Hindriks, K., and Jonker, C. M.: Supporting the Design of General Automated Negotiators, in *Proceedings of the Second International Workshop on Agent-based Complex Automated Negotiations (ACAN2009)* (2009)

- [Osborne 90] Osborne, M. J. and Rubinstein, A.: *Bargaining and Markets (Economic Theory, Econometrics, and Mathematical Economics)*, Academic Press (1990)

- [Williams 11] Williams, C. R., Robu, V., Gerding, E. H., and Jennings, N. R.: Using Gaussian Processes to Optimise Concession in Complex Negotiations against Unknown Opponents, in *Proceedings of the 22nd International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-2011)*, pp. 432–438 (2011)

- [森井 11] 森井 翔太, 伊藤 孝行: 複数論点交渉問題における自動交渉エージェントの試作, 平成 24 年度電気関連学会東海支部連合大会 (2011)