

二者間交渉問題における進化的安定戦略を考慮した 交渉戦略の提案

森 顕之^{1,a)} 伊藤 孝行^{1,b)}

概要: 自動交渉の研究分野において、互いの効用情報が非公開下における二者間複数論点交渉問題 (Bilateral Multi-issue Closed Bargaining Problem: BMCBP) が重要な研究課題とされている。BMCBP では相手の効用情報が不明であるため、ゲーム理論的なアプローチをそのまま適用することによって、適切な譲歩を実現することは困難である。本論文ではヒューリスティックな譲歩関数に、進化的安定戦略の均衡点における期待効用値を組み込むことによって、適切な譲歩を行う交渉戦略を提案する。その後、エージェントによる交渉シミュレーションによって提案手法の評価実験を行い、提案手法が既存手法よりも良い交渉結果を得られることを示す。

キーワード: 自動交渉, 交渉戦略, ANAC

A Negotiation Strategy based on Evolutionary Stable Strategy in Bilateral Closed Bargaining Problem

AKIYUKI MORI^{1,a)} TAKAYUKI ITO^{1,b)}

Abstract: Bilateral Multi-issue Closed Bargaining Problems (BMCBP) are critical in the research field of automated negotiations. In BMCBP, it is difficult to adapt game theory for a negotiator because the negotiator cannot know opponent's preference information. In this paper, we propose a heuristic negotiation strategy that is based on the expected utility value at the equilibrium point of an evolutionary stable strategy.

Keywords: Automated Negotiation, Negotiation Strategy, ANAC

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いる。自動交渉エージェントは数値化した選好情報をもとに、人間の代理として交渉を行うことを目的としている。自動交渉エージェント技術の応用としては電子商取引システムやスケジューリングシステムの自動化が挙げられる [1], [2]。現実世界の交渉問題ではプライバシー上の問題から、交渉参加者の選好など

のプライベート情報が非公開であることが望ましい。したがって、自動交渉の研究分野では、互いに相手の選好情報が明らかでないような二者間複数論点交渉問題 (Bilateral Multi-issue Closed Bargaining Problem: BMCBP) が重要な研究課題とされている。

BMCBP に対する取り組みとして、自動交渉エージェントの国際競技会 (Automated Negotiating Agents Competition: ANAC) [3] が、International Joint Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems (AAMAS) において 2010 年より毎年開催されている。ANAC における交渉問題では、互いの選好情報が明らかではないという条件に、時間制限や割引効用などの制約が加わることで、より現実の交渉問題に近い条件設定がなされている。ANAC

¹ 名古屋工業大学
Nagoya Institute of Technology, Gokiso, Showa, Nagoya,
Aichi, Japan

a) mori.akiyuki@itolab.nitech.ac.jp

b) ito.takayuki@nitech.ac.jp

では多様な交渉戦略をもつエージェントが出場する。しかし、既存の交渉戦略の多くは有効性が割引効用や留保価格などの交渉条件に依存しており、多様な交渉環境において適切な譲歩を実現することは困難である。

本論文では多様な交渉条件に対して適応可能な交渉戦略を提案する。提案する交渉戦略は協力戦略と非協力戦略を選択した場合の推定獲得効用値を設定することによって戦略型ゲームとして解析する。そして、進化的安定戦略 [4] の均衡点における推定期待効用値に基づき適切な譲歩関数を設計する。進化的安定戦略とは進化ゲーム理論における概念であり、他の戦略によって侵略されないような環境に適応した戦略である。譲歩関数とは合意案候補の合意判定を行うための閾値を定義する関数である。本論文で提案する交渉戦略を評価するために、提案する交渉戦略を実装したエージェントと ANAC2014 決勝大会出場エージェントによって交渉シミュレーションを行う。

本論文の構成を次に示す。第 2 章では本論文で想定する交渉ルールについて説明し、既存の代表的なエージェントと交渉戦略の特徴を述べる。第 3 章で本論文で提案する交渉戦略について述べる。第 4 章で提案する交渉戦略を実装したエージェントと ANAC2014 決勝大会出場エージェントによってトーナメントを行い、評価スコアを比較する。また、各エージェントの特徴を評価するためにセルフプレイ (同じ交渉戦略を実装したエージェント同士の交渉) を行うことで評価結果を考察する。第 5 章で本論文のまとめと今後の課題を示す。

1.1 関連研究

AgentK [5] は ANAC2010 の優勝エージェントである。AgentK の交渉戦略を発展させたエージェントとして、AgentK2(ANAC2011)[6], AgentKF (ANAC2013) [7], そして E2Agent(ANAC2014) が存在し、いずれのエージェントも各大会で優秀な成績を取っている。AgentK の特徴として、相手の提案履歴から相手の効用空間と交渉姿勢を推定する点が挙げられる。AgentK は相手が友好的である場合は素早く相手に譲歩し、相手が敵対的な場合は一定以上譲歩しないという歩み寄り制御に基づく交渉戦略をとる。HardHeaded は ANAC2011[8] の優勝エージェントである。HardHeaded の特徴として、S.S.Fatima の譲歩関数 [9] に基づき譲歩の大きさを決定する点が挙げられる。S.S.Fatima の譲歩関数はパラメータの値によって時間経過による譲歩の大きさが変化する。HardHeaded は譲歩関数のパラメータを割引係数 df と時間 t によって調整する。The Fawkes[10] は ANAC2013 の優勝エージェントである。The Fawkes の特徴として、相手の提案履歴に対して分散波形予測 (Discrete Wavelet Prediction) [11] と呼ばれる学習手法を適用し、最適な譲歩を推定している点が挙げられる。AgentM は ANAC2014 の優勝エージェントである。

AgentM の特徴として、時間経過と相手の提案効用幅に基づいて譲歩の大きさを決定している点が挙げられる。提案効用幅とは、相手の提案履歴を自身の効用関数で評価して得られる最も大きな効用値と最も小さな効用値の差である。

既存のエージェントの問題点として、交渉戦略が交渉環境に依存しているため、評価スコア順位が交渉環境によって大きく変動することが挙げられる。既存のエージェントの多くは相手の提案履歴を自身の効用関数で評価することによって、相手の交渉戦略を推定する。しかし、相手の提案履歴を自身の効用関数で評価する手法は交渉ドメイン、交渉者の制約集合、およびパレートフロントの形状の影響を大きく受ける。したがって、既存の交渉戦略の有効性は交渉環境に大きく依存する。

本論文で提案する交渉戦略は推定期待効用値に基づき譲歩の大きさを決定する。提案する交渉戦略は非協力戦略と協力戦略の二つの交渉戦略を定義し、進化的安定戦略の均衡点における推定期待効用値を導出する。そして、導出した推定期待効用値を譲歩関数に組み込むことによって、適切な譲歩を実現する。提案する交渉戦略は既存のエージェントが実装する交渉戦略とは異なり、推定が困難である相手の交渉戦略ではなく、自身の交渉戦略における推定期待効用値に基づき譲歩の大きさを決定している。したがって、提案する交渉戦略は既存のエージェントの交渉戦略よりも交渉環境に対する依存性が小さい。

2. 交渉ルール

2.1 国際自動交渉エージェント競技会 (ANAC)

本論文の交渉ルールは Automated Negotiating Agents Competition(ANAC) に準拠する。ANAC は交渉を研究する世界中の研究者たちが自動交渉エージェントを作成し、作成されたエージェントによるトーナメントの評価スコアを競い合う国際競技会である。ANAC では互いに相手の選好情報が明らかでないような二者間複数論点交渉問題における交渉を想定している。ANAC の目的は次のようになる。

- 選好情報が明らかでない相手に対して、様々な状況において合理的に対応できる実用的な自動交渉エージェントの設計
- 多様な交渉戦略の客観的な評価指標の提供
- 交渉過程におけるエージェントの学習や適応戦略、および、未知の交渉相手のモデリング手法の探求
- 最先端の自動交渉エージェントと交渉シナリオの収集と提供

ANAC は 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 [3]。2014 年 5 月に第五回目となる ANAC2014 が AAMAS2014 において開催された。ANAC2014 では世界中から 19 エージェントが参加し、予

選大会により 10 エージェントが選抜された。その後、選抜されたエージェントによって決勝大会が行われ、最終的な順位が決定された。本論文では、提案する交渉戦略の比較対象として ANAC2014 決勝大会に出場したエージェントを使用する。

2.1.1 交渉ドメイン

交渉ドメインとは交渉問題を数値として定義したものである。BMCBP における交渉ドメインは複数の論点によって構成されている。現実世界の交渉問題を論点毎に分解し、各論点の取り得る選択肢を数値に変換することで、交渉問題をエージェントが扱うことができる数値データとして表現している。本論文では、交渉に参加する全てのエージェントに交渉ドメインの完全な情報が与えられていることを想定している。

2.1.2 効用関数

効用関数とは合意案によって交渉者が得ることができる効用値を定義した関数である。BMCBP では互いに相手の選好情報が未知の状況下での交渉を想定しているため、相手の効用関数を参照することができない。

2.1.3 交渉プロトコル

ANAC では Rubinstein が提唱する Alternating Offers をベースとした交渉プロトコルを採用している [12]。Alternating Offers に関する研究は多く存在し、ゲーム理論やヒューリスティックスに基づくアプローチがなされている [13], [14], [15], [16]。Alternating Offers では次の 3 つのアクションによって合意案候補 (Bid) を扱う。

- *Offer*: 相手に Bid を提案するアクション。最初に *Offer* する交渉者は交渉問題毎に設定されている。
- *Accept*: *Offer* された Bid を受容するアクション。Accept した場合は交渉が成立し、互いに合意案を自身の効用関数で評価し、割引効用を引いた効用値を獲得して交渉を終了する。相手が *Offer* を拒否する場合は新たな Bid を代替案として相手に *Offer* する。
- *EndNegotiation*: 交渉を放棄するアクション。二者間交渉の場合、いずれかの交渉者が *EndNegotiation* を選択した時点で交渉は終了する。*EndNegotiation* が選択された場合、交渉者は留保価格から割引効用を引いた効用値を獲得し、交渉を終了する。

Alternating Offers における交渉の例として、エージェント A とエージェント B による交渉を考える。最初の行動権をエージェント A が持つ場合、まずエージェント A が任意の合意案候補である Bid₁ をエージェント B に *Offer* する。エージェント A の *Offer* の後、行動権がエージェント B に移る。エージェント B はエージェント A が *Offer* した Bid₁ を受容するならば *Accept* する。エージェント B は、Bid₁ を拒否するならば代替案として任意の合意案候補である Bid₂ をエージェント A に *Offer* する。エージェント B の *Offer* の後、再び行動権がエージェント A に移る。本例

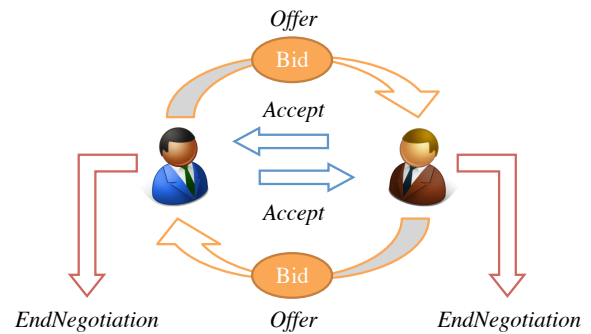


図 1 Alternating Offers の概要図

のような手続きを繰り返すことによって二者間交渉は進行する。また、行動権を持つ交渉者は任意で *EndNegotiation* できる。図 1 は Alternating Offers におけるエージェントと三つのアクションの関係を示した概要図である。

2.1.4 制限時間

現実の交渉では有限の時間内に結論を導くことが要求される。したがって、本論文では ANAC と同様に 180 秒の交渉制限時間を設ける。制限時間を超過した場合、交渉参加者は *EndNegotiation* を選択する。本論文では交渉開始からの経過時間を $[0,1]$ の範囲で正規化した時刻 t として扱う。

2.1.5 割引効用

交渉問題には時間経過によって得られる効用値が減少する割引効用 (Discount Utility) と呼ばれる制約が存在する。割引効用は既存研究でも考慮されている交渉問題における制約の一つである [17], [18], [19]。本論文では ANAC と同様に、交渉問題における割引効用は $(0,1]$ の範囲の値をとる割引係数 (Discount Factor) によって定義する。割引係数 df は交渉問題ごとに設定されている。合意案候補 \vec{s} の効用値を $U(\vec{s})$ とした場合、割引効用を考慮した効用関数 $U_D(\vec{s}, t)$ は式 (1) で定義される。

$$U_D(\vec{s}, t) = U(\vec{s}) \cdot df^t \quad (1)$$

2.1.6 留保価格

交渉問題には交渉放棄 (*EndNegotiation*) を選択した場合に一定の効用値が得ることができる留保価格 (Reservation Value) と呼ばれる制約が存在する。留保価格は交渉問題ごとに設定されている。留保価格は割引効用の影響を受け、留保価格 RV から割引効用を引いた留保価格 $RV_D(t)$ は式 (2) で定義される。

$$RV_D(t) = RV \cdot df^t \quad (2)$$

3. 推定期待効用に基づく交渉戦略

3.1 交渉フローのフェーズ分割

本論文で提案する交渉戦略は交渉の制限時間に着目し、交渉問題のフローを図 2 のような二つのフェーズに分割

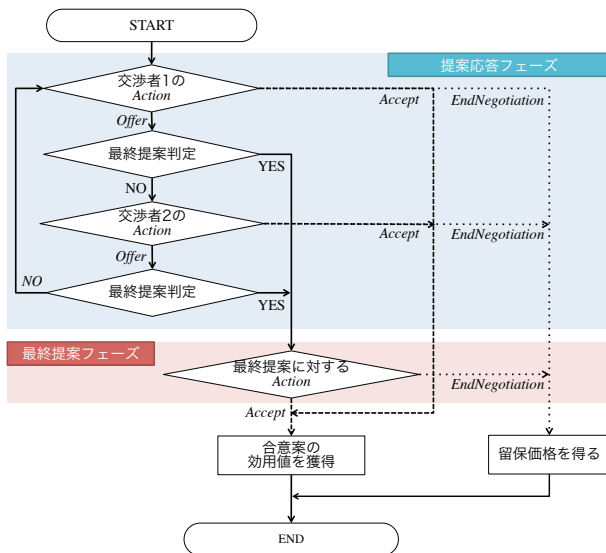


図2 交渉フローとフェーズ分割

する。図2で示すように、交渉フローの前半を提案応答フェーズ、後半を最終提案フェーズと定義する。図2のようにフェーズを分割するのは、提案応答フェーズと最終提案フェーズにおける合意失敗時の損失が異なるためである。本章では2つのフェーズについて考察することで交渉戦略を設計する。

3.2 提案応答フェーズ

提案応答フェーズは交渉フローにおける交渉開始から交渉終了直前までの交渉を指す。提案応答フェーズでは合意に失敗した場合、割引効用に基づき獲得効用値が減少する。提案間隔を表す正規化時間を ϵ とした場合、提案応答フェーズにおける一回あたりの合意失敗による将来利得に対する割引係数 δ は式(3)で定義される。

$$\delta = df^\epsilon \quad (3)$$

本論文の交渉ルールでは交渉時間間隔を定義していない。ただし、互いに相手の効用空間が未知である交渉では、交渉者は制限時間内により多くの提案を行うことで互いの選好を探り合うことが重要となる。したがって、本論文では提案応答フェーズにおける提案時間間隔 ϵ が十分に小さいと仮定する。式(3)から、 $\epsilon \simeq 0$ である場合は $\delta \simeq 1.0$ となり、割引係数 δ による割引効用は微小となる。よって、提案応答フェーズにおける一回あたりの合意失敗による損失は微小であるといえる。しかし、合意が失敗する度に損失は累積して大きくなるため、提案応答フェーズであっても、割引効用による損失を減らすためには早期に妥協する必要がある。本論文で提案する交渉戦略では、後述の最終提案フェーズにおける推定期待効用値に基づき、提案応答フェーズの譲歩を決定する。

3.3 最終提案フェーズ

最終提案フェーズは交渉終了直前から交渉終了までの交渉を指す。交渉時間が制限されているため、最後の提案における合意失敗は交渉全体の失敗となる。交渉が失敗した場合、互いに $EndNegotiation$ を選択するため、交渉者は留保価格として設定された効用値を得る。最終提案フェーズにおいて、妥協する時刻を $1.0 - \epsilon$ 、妥協した場合に得られた効用値が C である場合、交渉失敗による損失 X は式(4)で定義される。

$$X = df^{1.0-\epsilon} \cdot C + df \cdot RV \simeq df \cdot (C - RV) \quad (4)$$

例えば、 $RV = 0$ の交渉問題において、 $C = 0.5$ である状況(自分が妥協した場合に効用値 0.5 の合意案候補で合意できるような状況)を想定する。本例のような状況で、交渉が失敗して獲得効用が 0 となることは、式(4)から効用値 0.5 の損失といえる。本例のような損失を防ぐために、交渉者は妥協した際に得ることができる推定効用値と留保価格を比較して、妥協するか否かを判定する必要がある。特に重要となるのは、互いに交渉失敗の損失が大きいような場合である。もし交渉相手が交渉失敗を避けるために妥協するのであれば、最後まで妥協しないことで一方的に相手の譲歩を引き出し、自身の獲得効用値を増大させることができる。しかし、交渉相手も同様に考えた場合は、互いに最後まで妥協せずに交渉が失敗する。結果として、互いに交渉失敗の損失をそれぞれ被ることになる。本例のような最終提案フェーズの駆け引きはチキンゲームや鷹鳩ゲームに近い。

3.4 推定獲得効用値の設定と推定期待効用値

提案する交渉戦略について説明する。提案する交渉戦略では最終提案フェーズにおける交渉戦略を次のように分類する。

非協力戦略： 交渉終了時まで合意条件を緩和しない

協力戦略： 交渉終了直前に妥協案で合意する

分類した交渉戦略の推定獲得効用値を表1のように設定する。表1において、エージェント A とエージェント B が共に非協力戦略を選択した場合におけるエージェント A の推定獲得効用値が A_{11} 、エージェント B の推定獲得効用値が B_{11} となる。ここではエージェント A が提案エージェントで、エージェント B が交渉相手であるとする。本論文で提案する交渉戦略では表1に基づき、進化的安定戦略

表1 交渉戦略とエージェントの推定獲得効用値

		B	
		非協力戦略	協力戦略
A	非協力戦略	(A_{11}, B_{11})	(A_{12}, B_{12})
	協力戦略	(A_{21}, B_{21})	(A_{22}, B_{22})

を導出し、最終提案フェーズにおける期待効用値を互いに進化的安定戦略を選択した場合の期待効用値とする。そして、提案応答フェーズの譲歩関数の下限が最終提案フェーズにおける期待効用値となるように交渉戦略を設計する。しかし、BMCBPではエージェントBの効用関数はエージェントAにとっては未知であり、エージェントAはエージェントBの獲得効用値を推定することは困難である。そこで、本論文ではエージェントAの推定獲得効用値を設定することによって、最終提案フェーズにおける期待効用値を導出する。エージェントAの割引係数を df_A 、留保価格を RV_A 、および妥協案の効用値を C_A とする。そして、最終提案フェーズの時刻を $1.0 - \epsilon$ とし、 $p_c(A)$ を互いに協力戦略を選択した場合にエージェントAが先に妥協する確率とする。エージェントAの推定獲得効用値 A_{11} - A_{22} を式(5a)-(5d)のように定義する。提案する交渉戦略では ϵ を近似的に0、 C_A を相手の提案履歴の中で最も大きな効用値 (Best Offered Utility) とする。

$$A_{11} = RV_A \cdot df_A^{1.0-\epsilon} \quad (5a)$$

$$A_{12} = df_A^{1.0-\epsilon} \quad (5b)$$

$$A_{21} = \begin{cases} C_A \cdot df_A^{1.0-\epsilon} & (C_A \geq RV_A) \\ RV_A \cdot df_A^{1.0-\epsilon} & (C_A < RV_A) \end{cases} \quad (5c)$$

$$A_{22} = p_c(A) \cdot A_{21} + (1.0 - p_c(A)) \cdot A_{12} \quad (5d)$$

式(5a)ではエージェントAとエージェントBが共に非協力戦略を選択した場合のエージェントAの効用値を設定している。エージェントAとエージェントBが共に非協力戦略を選択した場合、互いに交渉終了時まで妥協しないため交渉は失敗する。そして、互いに留保価格から割引効用を引いた値を得る。

式(5c)と式(5b)ではエージェントAとエージェントBのいずれか一方が協力戦略を選択し、残りの一方が非協力戦略を選択した場合のエージェントAの効用値を設定している。協力戦略は交渉終了前に妥協するため、非協力戦略と交渉を行った場合は一方的に譲歩を引き出されてしまう。したがって、自身が非協力戦略をとった場合は一方的に最大効用値に割引効用を引いた値を、自身が協力戦略をとった場合には妥協案に割引効用を引いた値を得る。

式(5d)ではエージェントAとエージェントBが共に協力戦略を選択した場合のエージェントAの効用値を設定している。協力戦略は交渉終了直前に合意条件を緩和するまでは、非協力戦略と同様に合意条件の緩和を行わない。よって、エージェントAとエージェントBが共に協力戦略を選択した場合は、先に妥協した方が相手に一方的に譲歩し、妥協が遅れた方は一方的に相手の譲歩を引き出させる。したがって、エージェントAとエージェントBが共に協力戦略を選択した場合はどちらのエージェントが先に妥協するかが重要となる。互いに相手よりも後

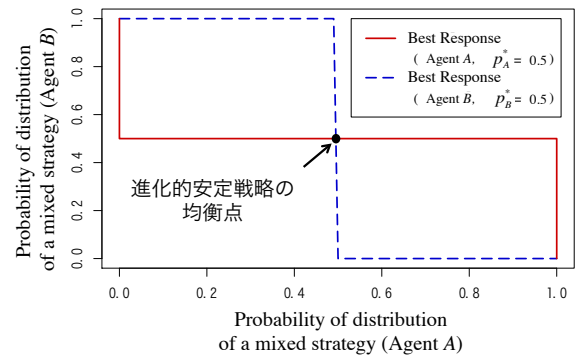


図3 進化的安定戦略の均衡点

に譲歩しようと ϵ を小さくした場合、協力戦略における譲歩が間に合わなくなり、結果的に非協力戦略となってしまふ。よって、互いに協力戦略を選択した場合、互いに相手の譲歩を先に引き出すことは困難であるため、本論文では $p_c(A)$ は $p_c(B)$ と等確率として扱う。エージェントXが非協力戦略を選択する確率を p_X 、協力戦略を選択する確率を $1 - p_X$ とし、エージェントXの混合戦略の確率分布を $\mathbf{p}_X = (p_X, 1 - p_X)$ とする。式(6)はエージェントAの推定期待効用関数 $F_A(\mathbf{p}_A, \mathbf{p}_B)$ である。

$$\begin{aligned} F_A(\mathbf{p}_A, \mathbf{p}_B) &= p_A \cdot p_B \cdot A_{11} + p_B \cdot (1 - p_B) \cdot A_{12} \\ &\quad + (1 - p_A) \cdot p_B \cdot A_{21} + (1 - p_A) \cdot (1 - p_B) \cdot A_{22} \\ &= p_A \cdot \{p_B \cdot (A_{11} - A_{21}) + (1 - p_B) \cdot (A_{12} - A_{22})\} \\ &\quad + p_B \cdot A_{21} + (1 - p_B) \cdot A_{22} \end{aligned} \quad (6)$$

式(6)において、 p_A の係数である $p_B \cdot (A_{11} - A_{21}) + (1 - p_B) \cdot (A_{12} - A_{22})$ が0となるような \mathbf{p}_B がエージェントBの進化的安定戦略 $\mathbf{p}_B^* = (p_B^*, 1 - p_B^*)$ となる。図3は進化的安定戦略の均衡点を示している。エージェントBが混合戦略 \mathbf{p}_B^* をとった場合、エージェントAの推定期待効用 $F_A(\mathbf{p}_A, \mathbf{p}_B^*)$ はエージェントAの混合戦略 \mathbf{p}_A の影響を受けない。したがって、エージェントAは自身の進化的安定戦略 \mathbf{p}_A^* が未知であっても、進化的安定戦略の均衡点における $F_A(\mathbf{p}_A^*, \mathbf{p}_B^*)$ は導出可能である。したがって、最終提案フェーズにおける推定期待効用 $F_A(\mathbf{p}_A^*, \mathbf{p}_B^*)$ は式(7)によって導出できる。

$$F_A(\mathbf{p}_A^*, \mathbf{p}_B^*) = p_B^* \cdot A_{21} + (1.0 - p_B^*) \cdot A_{22} \quad (7)$$

3.5 提案応答フェーズにおける譲歩関数の設計

最終提案フェーズにおける推定期待効用 $F_A(\mathbf{p}_A^*, \mathbf{p}_B^*)$ に基づき、提案応答フェーズにおける譲歩関数を設計する。譲歩関数の値よりも合意案候補の効用値が譲歩関数の値よりも大きい場合、交渉者は合意案候補をOfferまたはAcceptする。本論文で提案する交渉戦略では、提案応答フェーズで得られる効用値の下限を推定期待効用 $F(\mathbf{p}_A^*, \mathbf{p}_B^*)$ とす

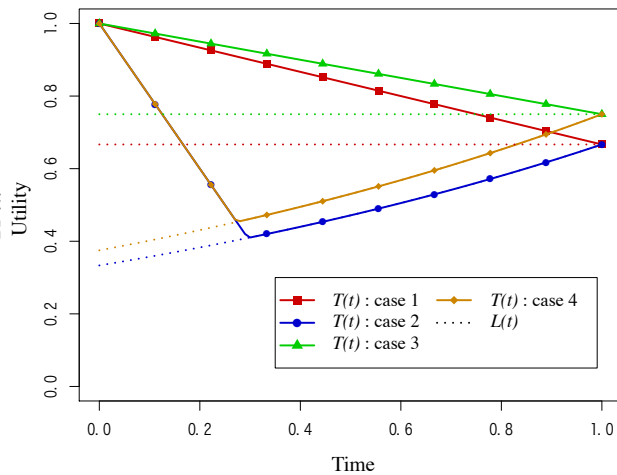


図 4 譲歩関数 $T(t)$ のグラフ

る。よって、提案応答フェーズの譲歩関数は割引効用を引いても $F(\mathbf{p}_A^*, \mathbf{p}_B^*)$ より大きくなければならない。したがって、割引効用を考慮したエージェント A の譲歩関数の下限 $L(t)$ は式 (8) となる。

$$L(t) = F(\mathbf{p}_A^*, \mathbf{p}_B^*) / df_A^t \quad (8)$$

譲歩関数の下限は $L(t)$ とするが、必要以上の譲歩を避けるために、最大効用値 1.0 から徐々に合意条件を緩和する譲歩関数を実現する必要がある。したがって、本論文では $[0,1]$ の値を持つ譲歩関数 $T(t)$ を式 (9) のように設計する。

$$T(t) = \begin{cases} L(t) + (1.0 - L(t)) \cdot (1.0 - t) & (df_A = 1.0) \\ 1.0 - t/\alpha & (df_A < 1.0 \cap 1.0 - t/\alpha > L(t)) \\ L(t) & (df_A < 1.0 \cap 1.0 - t/\alpha \leq L(t)) \end{cases} \quad (9)$$

$T(t)$ は割引効用が存在しない場合 ($df_A = 1.0$) の場合は、時間経過によって最大効用値 1.0 から $L(t)$ に合意案候補の効用値の合意条件を緩和する。ただし、割引効用が存在する場合 ($0.0 < df_A < 1.0$) は早期合意が重要となるため、時刻 $t = \alpha$ に $T(t)$ が最小効用値 0 に到達するように合意条件を緩和する。割引効用が大きいほど早期合意が重要となるため、提案する交渉戦略では $\alpha = df_A$ とする。ただし、 $T(t)$ が $L(t)$ を下回る場合は $T(t) = L(t)$ とする。

図 4 は各パラメータが次の case 1 から case 4 の場合における $T(t)$ のグラフである。case 1 から case 4 の df および RV は ANAC2014 で使用された交渉条件である。

case 1: $df_A = 1.0, RV_A = 0.00, C_A = 0.5$

case 2: $df_A = 0.5, RV_A = 0.00, C_A = 0.5$

case 3: $df_A = 1.0, RV_A = 0.75, C_A = 0.5$

case 4: $df_A = 0.5, RV_A = 0.75, C_A = 0.5$

case 4 のように割引効用と留保価格が大きな交渉問題の場合、 $T(t)$ が割引効用を引いた留保価格 RV_D よりも小さくなる可能性がある。提案する交渉戦略では $T(t)$ が RV_D よりも小さくなった場合、EndNegotiation を選択し、交渉を終了させる。

提案応答フェーズにおいては $T(t)$ にしたがって譲歩を行う。ただし、最終提案フェーズにおける進化的安定戦略 \mathbf{p}_A^* は Agent B のプライベートな情報によって決定するため、エージェント A には導出することができない。したがって、本論文で提案する交渉戦略では、最終提案フェーズにおける交渉戦略は合意形成を優先し、自身が一方的に譲歩してでも合意する協力戦略を選択する。

4. 評価実験と考察

提案する交渉戦略を実装したエージェントと ANAC2014 決勝大会に出場したエージェントによって交渉シミュレーションを行うことで、提案する交渉戦略を評価する。本シミュレーションでは ANAC2014 決勝大会で使用された全 12 個の交渉ドメインを用いて、提案する交渉戦略を実装したエージェントを含む全 11 エージェントで総当りの交渉シミュレーションを行う。そして、交渉結果として得ることができる平均獲得効用値と平均社会的余剰値を評価する。また、交渉結果を解析するために、社会的余剰に対する獲得効用値の平均比率（搾取率）と平均割引効用を測定する。表 2 は交渉シミュレーションで用いる ANAC2014 の交渉問題の条件である。各交渉問題は交渉者二人分の効用情報を持つ。表中の $U(NBS)$ は社会的余剰が最大となる合意案候補である Nash Bargaining Solution における交渉者の獲得効用値を示している。図 5 は交渉問題の例であ

表 2 ANAC2014 の交渉問題

ID	Issues	Profile	$U(NBS)$	df	RV		
1	10	1	0.76	1.00	0.00		
		2	0.92				
2	30	1	0.89				
		2	0.95				
3	50	1	0.98				
		2	0.90				
4	10	1	0.97			0.50	0.00
		2	0.76				
5	30	1	0.95				
		2	0.95				
6	50	1	0.91				
		2	0.96				
7	10	1	0.85	1.00	0.75		
		2	0.90				
8	30	1	0.90				
		2	0.92				
9	50	1	0.95				
		2	0.97				
10	10	1	0.90			0.50	0.75
		2	0.88				
11	30	1	0.87				
		2	0.87				
12	50	1	0.95				
		2	0.87				

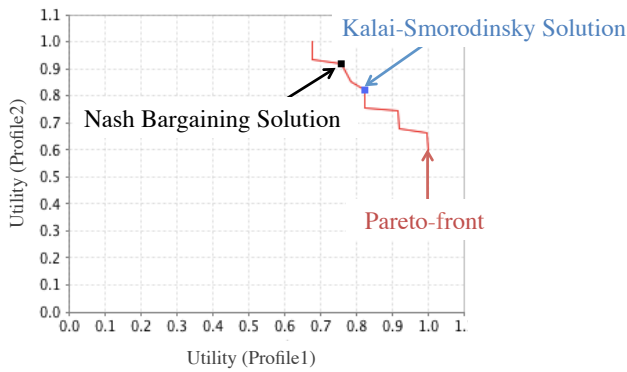


図 5 ID 1 の交渉問題におけるパレートフロントと交渉解

表 3 トーナメントにおける獲得効用と社会的余剰

エージェント	獲得効用値		社会的余剰値	
	Mean	SD	Mean	SD
Our Agent	0.833	0.162	1.610	0.226
AgentM	0.766	0.143	1.601	0.255
Gangster	0.750	0.198	1.494	0.318
DoNA	0.743	0.152	1.460	0.284
GROUP2Agent	0.733	0.227	1.393	0.424
WhaleAgent	0.725	0.212	1.462	0.374
E2Agent	0.722	0.216	1.437	0.375
kGA_gent	0.700	0.303	1.330	0.553
AgentYK	0.691	0.203	1.392	0.394
BraveCat v0.3	0.681	0.173	1.409	0.354
ANAC2014Agent	0.622	0.203	1.392	0.397

表 4 トーナメントにおける搾取率と割引効用

エージェント	搾取率		割引効用	
	Mean	SD	Mean	SD
Our Agent	0.514	0.082	0.025	0.157
AgentM	0.475	0.050	0.033	0.180
Gangster	0.499	0.067	0.064	0.244
GROUP2Agent	0.527	0.065	0.097	0.296
DoNA	0.509	0.085	0.015	0.123
WhaleAgent	0.494	0.061	0.073	0.261
E2Agent	0.501	0.070	0.088	0.284
kGA_gent	0.521	0.044	0.078	0.268
AgentYK	0.498	0.054	0.095	0.293
ANAC2014Agent	0.451	0.077	0.048	0.214

る。図 5 では ID 1 の交渉問題のパレートフロントと各交渉解を示している。

表 3 は ANAC2014 の交渉環境における交渉シミュレーションの結果を示している。表 3 において、提案する交渉戦略を実装したエージェントは ANAC2014 決勝大会出場エージェントと比べて平均獲得効用値と平均社会的余剰値におけるスコア順位が最も高い。したがって、本論文で提案する交渉戦略は既存のエージェントと比較して、適切な譲歩を実現していることがわかる。

表 4 は ANAC の 2014 決勝大会に提案する交渉戦略を実装したエージェントを加えた場合の搾取率と割引効用を示

表 5 セルフプレイにおける獲得効用と社会的余剰

エージェント	獲得効用値		社会的余剰値	
	Mean	SD	Mean	SD
Our Agent	0.855	0.054	1.721	0.096
WhaleAgent	0.790	0.135	1.586	0.264
AgentM	0.779	0.189	1.583	0.386
Gangster	0.741	0.205	1.455	0.441
GROUP2Agent	0.682	0.230	1.463	0.503
AgentYK	0.664	0.189	1.353	0.396
E2Agent	0.664	0.201	1.325	0.408
DoNA	0.609	0.240	1.226	0.472
ANAC2014Agent	0.601	0.236	1.209	0.467
kGA_gent	0.580	0.301	1.175	0.605
BraveCat v0.3	0.578	0.220	1.181	0.451

表 6 セルフプレイにおける割引効用

エージェント	割引効用	
	Mean	SD
Our Agent	0.023	0.148
WhaleAgent	0.058	0.234
AgentM	0.024	0.154
Gangster	0.076	0.264
GROUP2Agent	0.155	0.363
AgentYK	0.161	0.368
E2Agent	0.173	0.379
DoNA	0.022	0.147
ANAC2014Agent	0.069	0.255
kGA_gent	0.136	0.343
BraveCat	0.136	0.343

している。表 4 から提案する交渉戦略を実装したエージェントは搾取率が大きいかつ割引効用が小さいため、最も平均獲得効用値と平均社会的余剰値が大きくなった。提案する交渉戦略を実装したエージェントよりも搾取率が大きなエージェントである GROUP2Agent と kGA_gent は、提案する交渉戦略を実装したエージェントよりも割引効用が大きい。したがって結果的に、提案する交渉戦略を実装したエージェントよりも GROUP2Agent と kGA_gent の平均獲得効用値は時間損失による影響によって小さくなった。

本論文では、各エージェントの特徴を考察するために、同じエージェント同士で交渉するセルフプレイを行う。総当りのトーナメントでは非協力戦略をとるエージェントは協力戦略をとるエージェントから一方的に譲歩を引き出すことができる。しかし、セルフプレイでは単純に非協力戦略をとるエージェントは、合意形成が困難となり、良い交渉結果を得ることができない。交渉シミュレーションでは総当りのトーナメントと同様に、ANAC2014 で用いられた全 12 個の交渉ドメインを用いる。表 5 はセルフプレイの交渉結果である。表 5 の結果から、提案する交渉戦略を実装したエージェントが最も獲得効用と社会的余剰が大きくなることわかる。表 6 はセルフプレイにおける割引効用

である。表6から提案する交渉戦略を実装したエージェントの割引効用は他のエージェントと比較して小さいことがわかる。

総当りのトーナメントとセルフプレイの二つの交渉シミュレーションの結果から、提案する交渉戦略は多様な交渉条件および交渉戦略に対して適切に対応できていることがわかる。

5. おわりに

本論文では進化的安定戦略の均衡点における推定期待効用値に基づき適切な譲歩を推定する交渉戦略を提案した。評価実験として、提案する交渉戦略を実装したエージェントとANAC2014決勝大会出場エージェントによる総当りのトーナメントとセルフプレイの交渉シミュレーションを行った。結果として、両方の交渉シミュレーションにおいて、提案する交渉戦略を実装したエージェントが平均獲得効用値と平均社会的余剰値の両方でスコア順位が最も高くなることを示し、適切な譲歩を実現していることを示した。

今後の課題として、提案した交渉戦略を拡張し、三人以上の多者間交渉に対応させることが挙げられる。

参考文献

- [1] Kraus S: "Strategic Negotiation in Multiagent Environments", Cambridge University Press, 2001.
- [2] Sandip Sen and Edmund H. Durfee: "On the design of an adaptive meeting scheduler", In Proc. of the Tenth IEEE Conference on AI Applications, 1994.
- [3] Tim Baarslag, Koen Hindriks, Catholijn Jonker, Sarit Kraus and Raz Lin: "The First Automated Negotiating Agents Competition (ANAC2010)", New Trends in Agent-based Complex Automated Negotiations, Series of Studies in Computational Intelligence, pp.113-135, 2012.
- [4] John Maynard Smith: "Evolution and the Theory of Games", Cambridge University Press, 1982.
- [5] Shogo Kawaguchi, Katsuhide Fujita, and Takayuki Ito. "Agentk: Compromising strategy based on estimated maximum utility for automated negotiating agents." In New Trends in Agent-Based Complex Automated Negotiations, pages 137-144. Springer, 2012.
- [6] S. Kawaguchi, K. Fujita, and T. Ito: "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.
- [7] Katsuhide Fujita: "Compromising Strategy based on Conflict Mode for Multi-times Bilateral Closed Negotiations", ACAN2014, 2014
- [8] Tim Baarslag, Katsuhide Fujita, Enrico H. Gerding, Koen Hindriks, Takayuki Ito, Nicholas R. Jennings, Catholijn Jonker, Sarit Kraus, Raz Lin, Valentin Robu and Colin R. Williams: "Evaluating practical negotiating agents: Results and analysis of the 2011 international competition", Artificial Intelligence, pp.73-103, 2013.
- [9] S. Shaheen Fatima, Michael Wooldridge and Nicholas R. Jennings: "Optimal Negotiation Strategies for Agents with Incomplete Information", In Revised Papers from the 8th International Workshop on Intelligent Agents VIII, ATAL '01, pp.377-392, Springer-Verlag, 2002.
- [10] Tim Baarslag: "What to Bid and When to Stop", 2014.
- [11] Chen, S. and Weiss, G: "An efficient and adaptive approach to negotiation in complex environments", In Proceedings of the 20th European Conference on Artificial Intelligence, pp.228-233. IOS Press, Montpellier, France, 2012.
- [12] A. Rubinstein: "Perfect equilibrium in a bargaining model", Econometrica, pp.97-109, 1982.
- [13] Shaked, A and J. Sutton, "Involuntary unemployment as a perfect equilibrium in a bargaining model", Econometrica, pp.1351-1364, 1984.
- [14] P. Faratin, C. Sierra and N. R. Jennings: "Using similarity criteria to make issue trade-offs in automated negotiations", In Artificial Intelligence, volume 142, pp.205-237, 2002.
- [15] S. S. Fatima, M. Wooldridge, N. R. Jennings: "Multi-issue negotiation under time constraints", In Proceedings of the first international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems (AAMAS 2002), pages 143-150, New York, NY, USA, 2002.
- [16] M. J. Osborne and A. Rubinstein: "Bargaining and Markets (Economic Theory, Econometrics, and Mathematical Economics)", Academic Press, April 1990.
- [17] 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.
- [18] Fatima, S. S., Wooldridge, M., and Jennings, N. R: "Approximate and online multi-issue negotiation", In Proceedings of 6th International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems(AAMAS2007), pp.156, 2007.
- [19] Fatima, S. S., Wooldridge, M., and Jennings, N. R: "An analysis of feasible solutions for multi-issue negotiation involving nonlinear utility functions", In Proceedings of 8th International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems(AAMAS2009), pp.1041-1048, 2009.