

不完全な効用情報下での交渉問題における受け入れ戦略

谷口 直也¹ 藤田 桂英²

概要： マルチエージェントシステムに関する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。これに伴い、自動交渉の発展と実世界問題への適応を目的として国際自動交渉競技会 (ANAC) が毎年開催されている。競技会で用いられている Alternating-offers Protocol という交渉プロトコルにおいて、自動交渉エージェント同士は「合意案候補を受け入れる」、「合意案候補を提案する」、「交渉全体を放棄する」といった3種類の中からの行動の選択を繰り返すことで交渉を行っている。本研究では「合意案候補を受け入れる」行動に着目し、相手が送ってくる合意案候補をどのようなタイミングで受け入れるか、ということに注目する。多くの既存研究では相手の効用関数を推定しつつ合意案候補をどのように提案するか、ということに戦略の重点が置かれていたため、相手の合意案候補の受け入れ戦略について模索することは重要である。本研究では相手を (1) 合意案候補の中から一様に提案してくるエージェント (2) 合意案候補の中から規則的に提案してくるエージェントの2種類を対象に、それぞれについて割引係数を考慮した受け入れ戦略を提案する。評価実験により、理想的な状況下では理論値に近い効用を獲得することができたことを示す。さらに、提案手法にノイズを付加し、相手が提案してくるだろうと思われる合意案候補の理論的な予測範囲に意図的に誤差を発生させることで、提案手法の獲得効用がどのように変化をするのかについて調査を行う。

Acceptance Strategy in Automated Negotiation with Incomplete Utility

1. はじめに

近年、マルチエージェントシステムの1つである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を用いることにより、実際に人間同士が交渉するよりも効率的に進められコストの削減が可能である。また自動交渉の応用例として電子商取引 [15], [18] や製造バリューチェーン [5], スマートグリッド [14] などが挙げられる。

2010 年から自動交渉エージェント競技会 (Automated Negotiating Agent Competition(ANAC)) が毎年行われており、様々な戦略を持った複数のエージェントが世界中から参加することで自動交渉分野の発展に貢献している [19]。また、競技会で用いられているオープンソースの交渉プラットフォーム GENIUS[10] や自動交渉分野のコミュニティ Negowiki[12] を通じて、自動交渉プロトコル・シナリオの共通化が行われている。

不完全な効用情報下で獲得効用を高めるためには、相手が提案してくる合意案候補から相手の交渉戦略を予測したうえで、学習したモデルを自身の交渉戦略に取り込むことが重要である。実際に過去の ANAC では、相手の譲歩度合いに応じて自身の協調性を決めるエージェント [2] に有利な交渉結果となったり、相手の戦略を予測し有効な戦略を選択するエージェント [7] が優勝している。しかし、相手の戦略をモデル化したうえで自身がどのように合意案候補を提案するかを模索するエージェントは数多く存在しているが、相手がどのように合意案候補を送ってくるかを予測したうえで、どのタイミングで相手の合意案候補を受け入れるかを模索する、受け入れ戦略に注目したエージェントは数少ない。自身に有利な合意案候補を相手が送ってくるタイミングを見極め、そこで受け入れるか、もしくは合意案候補を拒否して交渉を続けるかを選択する受け入れ戦略は、自身の獲得効用を高めるには重要な戦略の一種である。

本研究の目的は、割引係数が有効である交渉問題において、相手が送ってくる合意案候補をどのタイミングで受け入れるかを決めるエージェント戦略の提案である。さらに、本論文では割引効用を考慮したうえでの受け入れ戦略の対象とする。

¹ 東京農工大学工学部
Faculty of Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology

² 東京農工大学大学院工学研究院
Institute of Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology

本研究では、受け入れ戦略の先行研究に基づき二者間の複数論点交渉問題を対象とする。相手が合意案候補の中から一様に提案してくる場合と、より現実的に相手が規則性を持って提案してくる場合の二種類を想定する。相手が今後送ってくる合意案候補を自身の効用関数に照らし合わせた際に、どのような範囲に収まるかについて予測しつつ、それに基づいて相手の合意案候補を受け入れる閾値を提案する。

本研究の目的を以下にまとめる。

- 相手が合意案候補から一様に提案してくる場合に有効な受け入れ戦略の提案
- 相手が合意案候補から規則的に提案してくる場合に有効な受け入れ戦略の提案
- シミュレーション実験により、提案した受け入れ戦略の精度の評価

本論文の構成を以下に示す。まず第1章において本研究の背景と目的を示し、第2章にて自動交渉エージェント競技会 (ANAC)、自動交渉プラットフォーム GENIUS の説明を行い、第3章にて先行研究である相手から提案される合意案候補の推定を用いた受け入れ戦略について述べる。次に第4章にて二者間複数論点交渉問題での問題設定を定義し、第5章で提案手法である割引係数を考慮した受け入れ戦略を示す。その後、第6章では提案手法の精度の評価を行い、最後に第7章で本研究のまとめと今後の課題を示す。

2. 関連研究

2.1 国際自動交渉エージェント競技会 (ANAC)

2.1.1 ANAC の概要

国際自動交渉エージェント競技会 (Automated Negotiating Agent Competition (ANAC)) は、各研究機関が独自の戦略を搭載したエージェント同士を交渉させ、より高い獲得効用や社会的余剰を手に入れることを目標とする競技会である。ANAC は以下の4点を目標として開催されている。

- 様々な交渉シナリオ、プロトコル、戦略の開発の促進
- 交渉シナリオ、プロトコル、戦略のベンチマークの収集と開発
- 様々な交渉戦略を客観的に評価するためのツールの提供
- 自動交渉の新たな研究課題の模索

2.1.2 GENIUS

GENIUS (General Environment for Negotiation with Intelligent multi-purpose Usage Simulation) [10] は ANAC で利用されているオープンソースの自動交渉シミュレーションプラットフォームである。誰でも利用することが可能のため、自動交渉の分野において GENIUS は広く利用されている。GENIUS は下記の3つの機能を提供する。

交渉ドメインの作成

GENIUS では GUI 上で、エージェントが使用する交渉ドメインを作成可能である。交渉ドメインごとに論点、論点の種類、論点の重み、および論点の選択肢と効用情報が設定可能である。また、後述する割引効用と留保価格についても交渉ドメインごとに決めることができる。

交渉エージェントの作成支援

GENIUS では Java を用いて交渉エージェントを作成する。必要なクラスを継承したうえでオーバーライドし、作成したエージェントをコンパイルしたのちに、GENIUS に追加してやることで交渉が可能となる。また、BOA Framework を用いることで、交渉エージェントに必要な四種類の核心部分をそれぞれ分けて設計することができる。そのため、作成するエージェントの必要な機能について他のエージェントのものを利用する、といった作成方法が可能である。

自動交渉の経過や結果の記録、解析

GENIUS では二者間または三者間以上の自動交渉をシミュレーションすることができる。また、サンプル用のエージェントや交渉シナリオ以外に、競技会で使用された過去のエージェント・交渉シナリオも用意されており、自身で作成したエージェントと交渉させ、その性能を評価することも可能である。自動交渉の途中経過については、エージェントが提案した bid、そしてその効用値などが GENIUS のインターフェースに表示されるようになっている。

3. 受け入れ戦略の既存研究

3.1 獲得効用の推定を用いた受け入れ戦略

相手が送信した合意案候補を受け入れるかどうかを判断する指標の一つとして、残りのラウンド数と相手が送信すると考えられる bid の予測を照らし合わせて閾値を設定する受け入れ戦略 [3] がある。この手法は「相手が合意案候補の中から一様に bid を送信してくる場合」と「相手が合意案候補の中から規則的に bid を送信してくる場合」の二種類を対象とし、それぞれについて閾値を設定していた。

3.2 相手が一様に提案してくる場合

残りのラウンド数を $j \in \mathbb{N}$ 、相手から Offer された最新の bid の効用値を $x \in [0, 1]$ としたとき、全ての交渉段階は状態 (j, x) と記述できる。また、 j ラウンド残っている交渉状況の効用分布が確率変数 X_j 、累積分布関数 F_j によって与えられている。相手の Offer を拒否して次の bid を待つ行動のコストを C としたとき、期待効用は

$$V(j, x) = \max(x, E(V(j-1, X_{j-1})) - C) \quad (1)$$

にて与えられる。ここで $v_j = E(V(j-1, X_{j-1})) - C$ とす

ると、以下の再帰関係を導くことができる。

$$\begin{cases} v_0 = 0, \\ v_j = E(\max(X_{j-1}, v_{j-1})) - C. \end{cases} \quad (2)$$

そして [4], [8] において、任意の $s \in \mathbf{R}$ と、 $E(X)$ が有限であるときの累積分布関数 F をもつ任意の確率変数 X について、以下が成り立つことが証明されている。

$$E(\max(X, s)) = s + T_F(s) \quad (3)$$

ここで $T_F(s)$ は

$$T_F(s) = \int_s^\infty (1 - F(t))dt \quad (4)$$

である。したがって、 v_j の再帰関係は下記のように書き表すことができる。

$$v_j = v_{j-1} + \int_{v_{j-1}}^\infty (1 - F(t))dt - C \quad (5)$$

コスト C が 0 であると仮定したとき、累積分布関数 F_j が分かれば v_j が求められる。これは受け入れ戦略において、相手から *Offer* された合意案候補の効用値 x と v_j 比較し、 $x \geq v_j$ であれば *Accept* するといった閾値として機能する。

定理 1 $[0, 1]$ に一律に bid が分配されたドメインから一様に合意案候補を送ってくるエージェントが交渉相手であるとき、累積分布関数 F_j は図 1 で表され、 j ラウンド残っているときの v_j は次の二つの式を満たす。

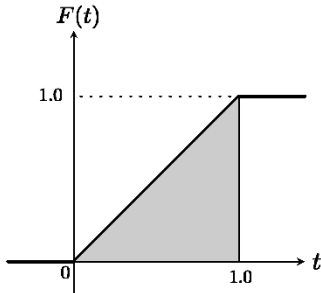


図 1 相手が一様に提案してくる場合の累積分布関数 $F(t)$

$$\begin{cases} v_0 = 0 \\ v_j = \frac{1}{2} + \frac{1}{2}v_{j-1}^2 \end{cases} \quad (6)$$

$$\lim_{j \rightarrow \infty} v_j = 1 \quad (7)$$

証明 1 X を累積分布関数 F の $[0, 1]$ 上の連続一様分布であるとする。全ての bid を等しい生起確率で *Offer* するエージェントが対戦相手であるとき、全ての X_j は $[0, 1]$ 上での連続一様分布であり X に等しくなる。したがって、

$$\begin{aligned} T_F(s) &= \int_s^\infty (1 - F(t))dt \\ &= \begin{cases} \frac{1}{2} - s, & s < 0. \\ \frac{1}{2}(1 - s)^2, & 0 \leq s \leq 1. \\ 0, & s > 1. \end{cases} \end{aligned} \quad (8)$$

ここで本研究では $0 \leq s \leq 1$ を想定しているため、

$$v_j = v_{j-1} + \frac{1}{2}(1 - v_{j-1})^2 = \frac{1}{2} + \frac{1}{2}v_{j-1}^2 \quad (9)$$

また、

$$1 - \frac{2}{j} < v_{j-1} < v_j < 1 \quad (10)$$

$$\therefore \lim_{j \rightarrow \infty} v_j = 1 \quad \square \quad (11)$$

3.3 相手が規則的に提案してくる場合

残りラウンド数が j ラウンドである交渉において、図 2 に示す累積分布関数に従う確率変数 $X_j = [0, 1]$ を持つエージェントに対して、閾値 v_j は次のように表せる。証明方法は前述の方法と同様である。

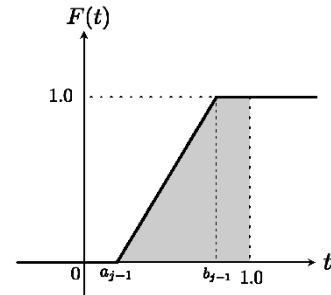


図 2 相手が規則的に提案してくる場合の累積分布関数

$$v_j = \begin{cases} 0, & \text{if } j = 0 \\ v_{j-1}, & \text{if } v_{j-1} \geq b_{j-1} \\ \frac{b_{j-1} + a_{j-1}}{2}, & \text{if } v_{j-1} \leq a_{j-1} \\ v_{j-1} + \frac{1}{2} \cdot \frac{(b_{j-1} - v_{j-1})^2}{b_{j-1} - a_{j-1}}, & \text{if } a_{j-1} < v_{j-1} < b_{j-1} \end{cases} \quad (12)$$

4. 問題設定

4.1 二者間複数論点交渉問題

二つのエージェントがドメイン D について交渉するとき、ドメイン D は n 個の論点 $I_1, I_2, \dots, I_N$ を含み、さらに論点 I_i は k 個の選択肢 $v_1^i, v_2^i, \dots, v_k^i$ を含んでいる。また論点には論点の重み w_i が各々に設定されており、論点 I_i の選択肢 v_c^i にも評価値 $eval(v_c^i) \in [0, +\infty)$ がドメイン D ごとに定められている。ここで、論点の重み w_i は $\sum_{i=1}^n w_i = 1$ かつ $w_i \geq 1$ を満たす。各論点 I_i について選択肢 c を選択したとき、合意案候補 bid は $\vec{b} = [v_c^1, v_c^2, \dots, v_c^n]$ で表され、

効用関数 $U(\vec{b})$ は式 13 で示される. この効用関数が交渉相手に公開されることはない.

$$U(\vec{b}) = \sum_{i=1}^n w_i \times \frac{eval(v_c^i)}{\max(eval(I_i))} \quad (13)$$

4.2 Alternating-Offers Protocol

Alternating-Offers Protocol[16], [17] とは, 競技会でも頻繁に用いられている二者間での自動交渉プロトコルである. エージェント A と B で自動交渉を行うことになった際のプロトコルの説明図を図 3 に示す.

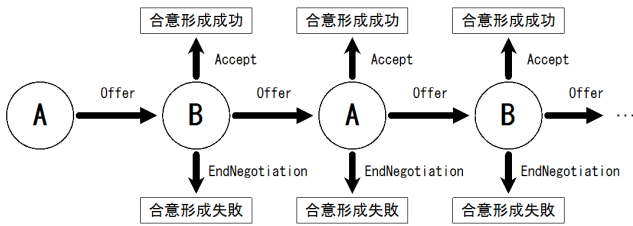


図 3 Alternating Offers Protocol

交渉開始時に交渉エージェント A は B に対して合意案候補の一つを送る. これを受けて交渉エージェント B は以下の三つの選択肢 (*Accept*, *offer* および *EndNegotiation*) の中から次の行動を選ぶこととなる.

Accept : 相手の合意案候補を受け入れて, 両者ともにその合意案候補の効用値を獲得する.

offer : 相手の合意案候補の受け入れを拒否して, こちらから新たな合意案候補を相手に提案する. これにより交渉が継続される.

EndNegotiation : 合意形成することなく交渉を放棄する.

交渉エージェント B が *offer* を選択した場合, 新たな合意案候補が交渉エージェント A に提案する. これを繰り返すことによって行動順番が A, B, A, B,... と推移していき交渉が継続される. 自動交渉は以下の条件のいずれかを満たすまで行われる.

- どちらかのエージェントが合意案候補を *Accept* する.
- どちらかのエージェントが *EndNegotiation* を選択する.
- 交渉時間が制限時間に達する.

どちらかのエージェントが *Accept* した場合のみ合意案候補の効用値を獲得することができる. その他の方法で交渉が終了した場合, 交渉エージェントが獲得できる効用は最低値, もしくは留保価格となる.

4.3 割引係数

交渉シナリオには実時間またはラウンド数 (提案回数) によって定められ正規化された時刻 $t \in [0, 1]$ が存在する. 時刻 t は現在の交渉時刻が開始時刻から制限時刻までのどの

位置に属するかを判断する指標である. 提案する回数の最大が定められているラウンド制の交渉において, 現在のラウンド数 $CurrentRounds$ と提案できる最大回数 $TotalRaounds$ を用いると時刻 t は以下の式で表せる.

$$t = \frac{CurrentRounds}{TotalRaounds + 1} \quad (14)$$

また, 交渉シナリオには割引係数 $d \in [0, 1]$ が設定されている. これは時間経過とともに獲得効用が減少するように定められた要素の一つであり, 以下に示す式のように獲得効用 $U(\vec{b})$ に乗算されるようになっている. したがって, エージェントの獲得効用は時間経過とともに減少する.

$$U_D(\vec{b}) = U(\vec{b}) \times d^t \quad (15)$$

本交渉問題は割引効用 (割引係数が有効であるときの獲得効用) $U_D(\vec{b})$ を最大化することが目的であるため, 各エージェントによる目的関数は式 16 で与えられる.

$$\max(U_D(\vec{b})) \quad (16)$$

4.4 留保価格

エージェントが取り扱う交渉ドメイン D について, それぞれ留保価格 (Reservation Value) $RV \in [0, 1]$ が設定されている. エージェント間での合意形成が成功しなかった際に, エージェントはドメイン D に設定された留保価格 RV を獲得効用として得ることができる. エージェントが提案された合意案を受け入れるかどうかを判断する際に必要な指標の一つである.

4.5 交渉結果の評価指標

自動交渉エージェントの性能評価指標は二つ存在する [1]. 一つは式 15 に示した個人獲得効用であり, もう一つは交渉参加者の獲得効用を合算した社会的余剰である. 獲得効用と社会的余剰がより高い状態で交渉を合意できたエージェントが性能の良いエージェントとされる. 本研究では, 個人獲得効用の最大化を目指す受け入れ戦略を利用したエージェントを提案する.

5. 割引効用を考慮した受け入れ戦略

本研究では, 割引係数が有効である交渉問題においても機能するように, 3 章で示した先行研究 [3] の受け入れ戦略を発展させる.

5.1 交渉相手が一様に提案してくる状況

図 1 は合意案候補の中から相手が一様に提案してくると仮定したうえでの累積度数分布であった. これに割引係数を適用すると, $[0, d^t]$ に一律に bid が分配されたドメインから一応に合意案候補を送ってくるエージェントを対戦相手

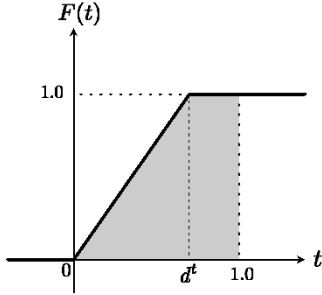


図 4 割引係数が有効かつ相手が一様に提案してくる場合での累積分布関数

にすることとなり、累積分布関数 $F(t)$ は図 4 のように変化する。

d^t は時間経過とともに $[0, 1]$ の範囲内で単調減少するため、交渉の時間経過で累積度数分布は変化していく。 d^t を考慮したうえで、式 8 より $T_F(s)$ は以下の式で表すことができる。

$$T_F(s) = \int_s^\infty (1 - F(t))dt = \begin{cases} \frac{1}{2}d^t - s, & s < 0. \\ \frac{1}{2}(\frac{s^2}{d^t} + d^t - 2s)^2, & 0 \leq s \leq d^t. \\ 0, & s > d^t. \end{cases} \quad (17)$$

本研究では相手が合意案候補を $0 \leq v_{j-1} \leq d^t$ の範囲内で送ってくることを仮定している。そのため閾値 v_j は、

$$v_j = v_{j-1} + \frac{1}{2}(\frac{v_{j-1}^2}{d^t} + d^t - 2v_{j-1})^2 = \frac{1}{2}d^t + \frac{1}{2} \cdot \frac{v_{j-1}^2}{d^t} \quad (18)$$

と新たに定めることができる。

5.2 交渉相手が規則的に提案してくる状況

相手が規則的に合意案候補の中から提案をしてくる場合、3.3 節では合意案候補を提案してくる範囲 $[a_{j-1}, b_{j-1}]$ を予測し累積度数分布を組み上げた。そこで、割引係数が有効な状況下では、 $[a_{j-1}d^t, b_{j-1}d^t]$ の範囲から一様に合意案候補を送ってくる対戦相手を仮定し、図 5 に示す累積分布関数 $F(t)$ を作成する。

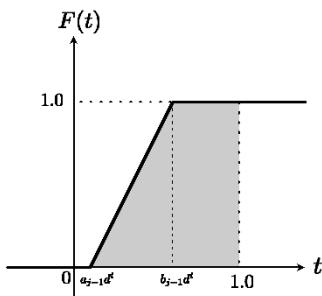


図 5 割引係数が有効かつ相手が規則的に提案してくる場合での累積度数分布

これより、 $T_F(s)$ は以下の式 19 で与えられる。

$$T_F(s) = \int_s^\infty (1 - F(t))dt = \begin{cases} (a_{j-1} \cdot d^t - s) + \frac{1}{2}(b_{j-1} - a_{j-1}) \cdot d^t, & 0 \leq s \leq a_{j-1} \cdot d^t. \\ \frac{1}{2}(b_{j-1} \cdot d^t - s) \frac{b_{j-1} \cdot d^t - s}{(b_{j-1} - a_{j-1})d^t}, & a_{j-1} \cdot d^t < s < b_{j-1} \cdot d^t. \\ 0, & s \geq b_{j-1} \cdot d^t. \end{cases} \quad (19)$$

式 5 より、相手が送ってきた最新の bid を自身の効用関数に照らし合わせた際に、 $[a_{j-1}d^t, b_{j-1}d^t]$ の範囲内で提案してくると予測した場合の閾値 v_j は、

$$v_j = \begin{cases} 0, & \text{if } j = 0 \\ v_{j-1}, & \text{if } v_{j-1} \geq b_{j-1} \cdot d^t \\ \frac{1}{2}(b_{j-1} + a_{j-1})d^t, & \text{if } v_{j-1} \leq a_{j-1} \cdot d^t \\ v_{j-1} + \frac{1}{2} \cdot \frac{(b_{j-1} \cdot d^t - v_{j-1})^2}{(b_{j-1} - a_{j-1}) \cdot d^t}, & \text{if } a_{j-1} \cdot d^t < v_{j-1} < b_{j-1} \cdot d^t \end{cases} \quad (20)$$

と新たに定めることができる。

6. 評価実験

6.1 実験設定

提案手法の精度を確かめるためシミュレーション実験を行う。本実験では、交渉相手、交渉ドメイン、割引係数といった項目が変化する様々な状況下で交渉を行い、提案手法を搭載したエージェントがより高い獲得効用を得るほど、優れた受け入れ戦略であると評価する。

6.1.1 交渉における実験設定

評価実験は GENIUS を用いて行う。本実験では交渉相手が一様に提案してくるか、または規則的に提案してくるかによって、交渉相手、交渉ドメイン、交渉回数異なる。共通項目である実験設定を以下に示す。本実験では、割引係数の変化に対応した受け入れ戦略に着目しているため、bid を受け入れる指標の一つである留保価格は 0 に設定している。

- 交渉プロトコル：Alternating offers protocol[16], [17]
- 制限時間：1,000rounds
- 割引係数： $d \in \{0.10, 0.30, 0.50, 0.70, 0.90, 1.00\}$
- 留保価格： $RV = 0$

6.1.2 一様に提案してくる状況下での実験設定

4.1 節で示した提案手法を評価するため、合意案候補の中から bid を一様でランダムに選び出して交渉相手に bid を送信するエージェントを作成し、提案手法である受け入れ戦略を搭載したエージェントと交渉を行う。提案手法を搭載したエージェントの Offer は送られてきた bid をそのまま返すように設計されている。また、提案手法によるエージェントの受け入れ戦略の性能を評価するため、一様でランダムに提案してくるエージェントは Accept できないように設計されている。そして、交渉ドメイン Pie[16] を用いて 5,000 回交渉を繰り返す。Pie を使用することで、図 4 に示した累積分布関数 $F(t)$ に近い実験設定が可能である。

6.1.3 規則的に提案してくる状況下での実験設定

予測方法の設定

4.2節で示した提案手法を評価する．合意案候補を提案してくる範囲 $[a_{j-1}, b_{j-1}]$ の精度によって，この受け入れ戦略の提案手法の精度も変わってくる．そこで本実験では，交渉相手が送ってくる合意案候補を既知のものとして，理論値としての範囲 $[eMin_{j-1}, eMax_{j-1}] (= [a_{j-1}, b_{j-1}])$ を二種類を用意する．以下の二種類の予測方法を設定することで，獲得効用にどのような変化が生じるか調査する．

予測範囲設定 (1)

図6のように予測範囲を交渉相手の提案に応じて変化させるものである．具体的には，送信されてくる合意案候補の効用値の最大値 (eMax)・最小値 (eMin) を，交渉の期限から交渉開始時に遡りつつ更新し設定する．

予測範囲設定 (2)

図7のように予測範囲 $[eMin_{j-1}, eMax_{j-1}]$ を相手が送ってくる合意案候補の最大値・最小値に常に固定しておく．

交渉相手は，交渉時間に依存して譲歩度合いを調整するエージェント [6] *Boulware*, *Conceder*, *Concederliner*, *Hardliner* の四種類を用意した．提案手法を搭載したエージェントの受け入れ戦略の性能を評価するために，この四種類のエージェントは *Accept* できないように設計し直されている．また，交渉ドメインについては ANAC で使用されているものから四つ選択した．実験に使用したドメインを表1に示す．

表 1 評価実験で使用したドメイン

ドメイン名	ドメインの大きさ	対立度
ADG[2]	15625	低
Amsterdam[2]	3024	中
England-Zimbabwe[11]	527	中
Itex-Cypress[9]	180	高

ノイズ付与による意図的な誤差の発生

相手が送ってくる合意案候補を予測する手法の予測誤差を想定して，前節にて示した予測範囲の設定に意図的にパーリンノイズ [13] を付与することで，提案手法の獲得効用がどのように変化するかを調査する．交渉時間を $t \in [0, 1]$ ，パーリンノイズの影響度を制御する係数を $k \in \{0, 1.0, 2.0\}$ とする．本実験では，予測範囲 $[eMin, eMax] (= [a, b])$ に式 21, 22 で示すようにパーリンノイズを付与することで予測範囲に意図的に誤差を発生させる．この時， $eMax > 1.0$ (または $eMin < 0$) となる場合は， $eMax = 1.0$ (または $eMin = 0$) となるように補正を行う．また，パーリンノイズを付与した際に $eMax < eMin$ となる場合は， $eMin$ と $eMax$ の中点を新たな予測範囲 (予測点) として設定する．

$$eMax + k * \frac{1}{10} \text{PerlinNoise}(1000t, 0, 0) \quad (21)$$

$$eMin + k * \frac{1}{10} \text{PerlinNoise}(-1000t, 0, 0) \quad (22)$$

6.2 実験結果と考察

6.2.1 一様に提案してくる状況下での評価

提案手法の獲得効用平均を表2に示す．ドメインの割引係数が高い場合から低い場合まで，全ての場合において提案手法は高い効用値を獲得することが確認された．これは図8に示す相手の合意案候補を受け入れるタイミングが関係している．割引係数が1.0である交渉では，割引係数が獲得効用に影響を及ぼさないため，相手が最善の合意案候補を送ってくるまで時間をかけて待つ事にデメリットが生じない．割引係数が1.0の際，提案手法は約300roundsの交渉時間をかけて自分にとって有利な合意案候補が来るのを待ったことが，高い効用を獲得できた理由である．一方で，割引係数が $\{0.10, 0.30, 0.50, 0.70, 0.90\}$ のいずれかである交渉状況下では，いずれも100rounds以下で合意に達している．早めに合意を結ぶことによって，獲得効用に乗算される割引係数の影響を最小限に抑えることができるため，高い効用を獲得することができる．つまり，割引係数の設定が低い状況下でも提案手法が高い効用を獲得した要因は，割引係数に応じて早めに *Accept* していることである．

6.2.2 規則的に提案してくる状況下での評価

予測範囲設定 (1) と (2) のそれぞれの割引係数ごとの獲

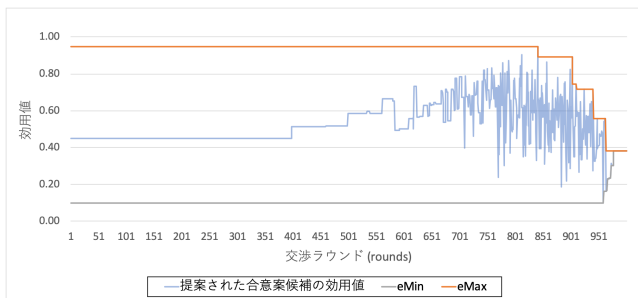


図 6 予測範囲設定 (1) の例

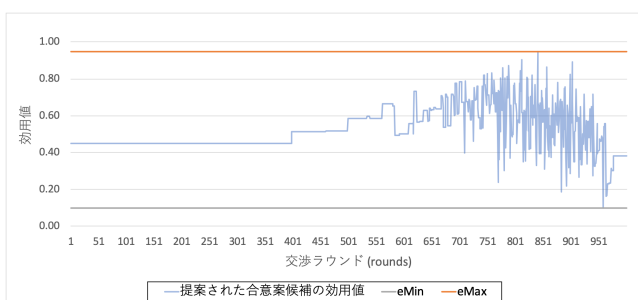


図 7 予測範囲設定 (2) の例

表 2 提案手法の獲得効用平均

割引係数	0.10	0.30	0.50	0.70	0.90	1.00
獲得効用平均	0.9346497	0.9527044	0.9641584	0.9741368	0.9859544	0.9984183

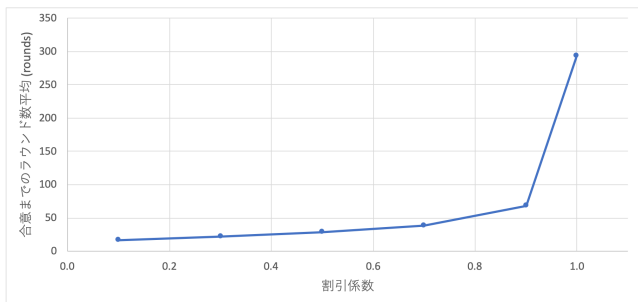


図 8 合意するまでのラウンド数平均

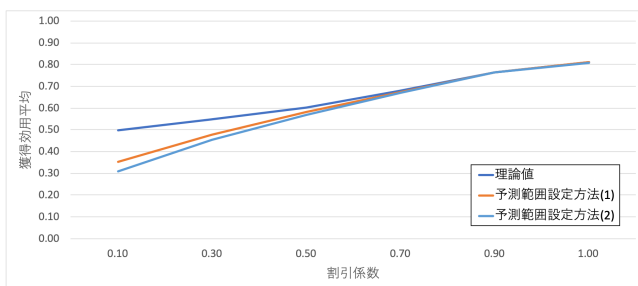


図 9 予測範囲設定ごとの獲得効用平均

得効用平均と、獲得効用の理論的最大値を図 9 に示す。割引係数の全ての設定において、予測範囲設定 (1) が (2) よりも高い効用値を獲得する結果となった。ただし、有意水準 5% の t 検定で各割引係数ごとの予測範囲設定 (1) と (2) の獲得効用平均の間に有意差はなかった。いずれの予測方法についても、割引係数が高い時は理論値に近い平均獲得効用を示しているが、割引係数の設定が下がるにつれて獲得効用平均が理論値から離れる結果となっている。これは相手がより高い合意案候補を送ってくるのを時間をかけて待ったため、獲得効用が割引係数の影響を大きく受けて、獲得効用の減少に繋がったのである。

6.2.3 ノイズ付与時の獲得効用の評価

予測範囲 $[eMin, eMax]$ にパーリンノイズを加算した際の獲得効用について、予測範囲設定 (1) の獲得効用を図 10 に、予測範囲設定 (2) を図 11 に示す。予測範囲設定 (1) では、パーリンノイズを付加した時としていない時での獲得効用にほぼ差が見られなかった。ノイズを付加すると、 bid を受け入れる目安である閾値 v_j は強固な姿勢を見せて閾値を上昇させる戦略を見せた。ただし、予測範囲設定 (1) は (2) に比べて、終盤で相手に譲歩する形で閾値を下げる傾向があった。その結果、ノイズが付加されていなかった 6.2.2 節とほぼ同様の受け入れ戦略を取り、より良い合意案候補で *Accept* できたのである。一方で、予測範囲設定 (2) では割引係数が低く設定されている状況下において、ノイズを付与したときの方が獲得効用が高い結果となっている。これは、

ノイズを付与した時と付与していない時の合意するまでのラウンド数平均を示した表 3 より、割引効用が $[0.10, 0.90]$ であるときはノイズを乗せた提案手法の方が早めの *Accept* を行っているため、獲得効用の割引を抑えて高い獲得効用ができた。

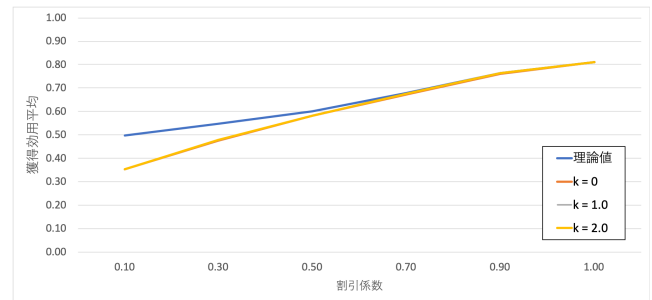


図 10 ノイズ加算時の予測範囲設定 (1) の獲得効用平均

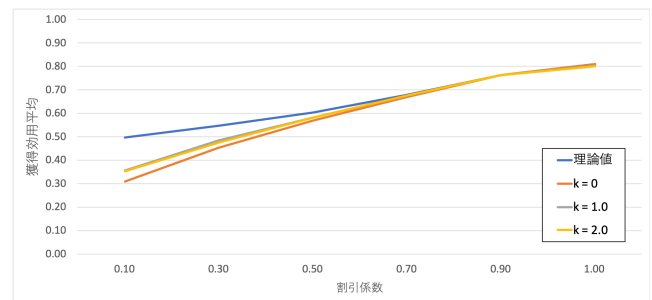


図 11 ノイズ加算時の予測範囲設定 (2) の獲得効用平均

7. まとめ

本研究では不完全な情報下での交渉の受け入れ戦略について、割引係数に対応した相手の合意案候補を受け入れる目安となる閾値の定式化を行った。一様に相手が提案してくる場合、定期的に相手が提案してくる場合の二種類を対象とし、それぞれについて累積分布関数を定義し定式化を行った。また、予測範囲設定方法を二種類用意し、獲得効用にどのような変化が起こるかを確認した。シミュレーション実験によって、一様に提案してくる場合では高い効用の獲得を確認できた一方で、定期的に提案してくる場合では割引効用が高い時に理論値とほぼ同値の高い獲得効用を得られたが、低い時はやや精度が落ち獲得効用が低くなった。

また、予測範囲設定方法二種類にそれぞれパーリンノイズを加算し、獲得効用にどのような変化が起こるかをシミュレーション実験にて確認した。予測範囲設定方法 (1) では獲得効用に変化がほぼ見られなかったが、(2) では割引係数が低い時にノイズを付与した方が獲得効用が高くなるとい

表 3 予測範囲設定 (2) の合意に達するまでのラウンド数平均

割引係数	0.10	0.30	0.50	0.70	0.90	1.00
k=0 (rounds)	424.3125	436.5625	440.5625	443.3750	461.6875	484.8750
k=2.0 (rounds)	372.6250	402.6875	411.0625	413.7500	440.7500	539.5625

う結果になった。そして、いずれのシミュレーション実験において、早めに *Accept* することで割引係数の影響を抑えて高い効用が獲得できることを示した。

今後の課題として、本研究でのシミュレーション実験は、受け入れ戦略の性能を評価するため、予測に関しては相手が送ってくる *bid* を予め知っているといった設定で実験を行った。しかし、相手が送ってくる *bid* を最初から知っているというのは、実世界上では稀にしか見られない設定であるため、相手がどのような *bid* を送ってくるのかを予測する方法の提案は重要である。また、全ての実験において留保価格を 0 として実験を行っていた。留保価格が設定されていると、相手の合意案候補を受け入れる際に留保価格と比較することで *EndNegotiation* を選択する動機が発生する。本研究の受け入れ戦略では *Accept* だけに注目していたため、留保価格を踏まえた受け入れ戦略の研究は今後の課題の一つである。そして、本実験の対戦エージェントは交渉時間 t に依存して送信する *bid* を選択するエージェントであった。そのため、提案手法を搭載したエージェントの *Offer* が対戦相手の *Offer* に影響を及ぼすことがなかった。しかし、自身の *Offer* の内容が相手の行動に影響を及ぼす場合は多数想定される。自身の *Offer* を工夫することで、相手のより良い *Offer* をどうやって引き出すかを模索することも受け入れ戦略の重要な要因の一つである。

参考文献

- [1] Baarslag, T., Aydogan, R., Hindriks, K. V., Fujita, K., Ito, T. and Jonker, C. M.: The Automated Negotiating Agents Competition, 2010-2015, *AI Magazine*, Vol. 36, No. 4 (2015).
- [2] Baarslag, T., Fujita, K., Gerding, E. H., Hindriks, K., Ito, T., Jennings, N. R., Jonker, C., Kraus, S., Lin, R., Robu, V. et al.: Evaluating practical negotiating agents: Results and analysis of the 2011 international competition, *Artificial Intelligence*, Vol. 198, pp. 73-103 (2013).
- [3] Baarslag, T. and Hindriks, K. V.: Accepting optimally in automated negotiation with incomplete information, *Proceedings of the 2013 international conference on Autonomous agents and multi-agent systems*, International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems, pp. 715-722 (2013).
- [4] De Groot, M. H.: *Optimal statistical decisions / Morris H. De Groot*, McGraw-Hill, New York :, (1970).
- [5] Eymann, T., Padovan, B. and Schoder, D.: Simulating value chain coordination with artificial life agents, *Proceedings International Conference on Multi Agent Systems (Cat. No. 98EX160)*, IEEE, pp. 423-424 (1998).
- [6] Faratin, P., Sierra, C. and Jennings, N. R.: Negotiation decision functions for autonomous agents, *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 24, No. 3-4, pp. 159-182 (1998).
- [7] Hao, J. and Leung, H.-f.: Cuhkagent: An adaptive negotiation strategy for bilateral negotiations over multiple items, *Novel Insights in Agent-based Complex Automated Negotiation*, Springer, pp. 171-179 (2014).
- [8] Ito, T., Zhang, M., Robu, V. and Matsuo, T.: *Complex automated negotiations: Theories, models, and software competitions*, Springer (2013).
- [9] Kersten, G. E. and Zhang, G.: Mining inspire data for the determinants of successful internet negotiations, *Central European Journal of Operational Research*, Vol. 11, No. 3, pp. 297-316 (2003).
- [10] Lin, R., Kraus, S., Baarslag, T., Tykhonov, D., Hindriks, K. and Jonker, C. M.: Genius: An integrated environment for supporting the design of generic automated negotiators, *Computational Intelligence*, Vol. 30, No. 2, pp. 48-70 (2014).
- [11] Lin, R., Kraus, S., Wilkenfeld, J. and Barry, J.: Negotiating with bounded rational agents in environments with incomplete information using an automated agent, *Artificial Intelligence*, Vol. 172, No. 6-7, pp. 823-851 (2008).
- [12] Marsa-Maestre, I., Klein, M., de la Hoz, E. and Lopez-Carmona, M. A.: Negowiki: A set of community tools for the consistent comparison of negotiation approaches, *International Conference on Principles and Practice of Multi-Agent Systems*, Springer, pp. 424-435 (2011).
- [13] Perlin, K.: Improving noise, *ACM transactions on graphics (TOG)*, Vol. 21, No. 3, ACM, pp. 681-682 (2002).
- [14] Pipattanasomporn, M., Feroze, H. and Rahman, S.: Multi-agent systems in a distributed smart grid: Design and implementation, *2009 IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition*, IEEE, pp. 1-8 (2009).
- [15] Rahwan, I., Kowalczyk, R. and Pham, H. H.: Intelligent agents for automated one-to-many e-commerce negotiation, *Australian Computer Science Communications*, Vol. 24, No. 1, Australian Computer Society, Inc., pp. 197-204 (2002).
- [16] Rubinstein, A.: Perfect equilibrium in a bargaining model, *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, pp. 97-109 (1982).
- [17] Rubinstein, A.: A bargaining model with incomplete information about time preferences, *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, pp. 1151-1172 (1985).
- [18] Schoop, M., Jertila, A. and List, T.: Negoisst: a negotiation support system for electronic business-to-business negotiations in e-commerce, *Data & Knowledge Engineering*, Vol. 47, No. 3, pp. 371-401 (2003).
- [19] 藤田桂英, 森頭之, 伊藤孝行ほか: ANAC: Automated Negotiating Agents Competition (国際自動交渉エージェント競技会)(<特集>人工知能研究のベンチマークとは-標準問題・データセット・評価手法-), *人工知能*, Vol. 31, No. 1, pp. 237-247 (2016).