

二者間非線形交渉問題におけるパレートフロント推定を利用した自動交渉エージェントの設計と評価

柿本 真司^{1,a)} 藤田 桂英^{2,b)}

概要：マルチエージェントシステムの分野において、自動交渉エージェントが注目されている。特に、互いの効用情報を明らかにしない交渉モデル (Closed Negotiation) や効用空間が非線形関数の場合を想定した交渉戦略は現実の世界に近い設定であるため、自動交渉機構において重要な問題である。本論文では、相手の効用空間を推定しパレートフロントを推定することで、パレート最適な Bid の提案を行う自動交渉エージェントの提案を行う。相手の提案 Bid を論点の依存関係を考慮した要素に分解することで効用空間を推定し、多目的最適化アルゴリズムを用いることでパレートフロントの推定を行う。提案エージェントは、推定パレートフロントの対立度合いを考慮した譲歩戦略に基づき、推定パレートフロント上の Bid から相手への提案 Bid を決定する。評価実験により、パレートフロント推定において論点間の依存関係を考慮する手法が優れていることを示し、提案エージェントが ANAC-2014 決勝戦における最新のエージェントと比較して優れていることを示す。

キーワード：自動交渉エージェント、複数論点交渉問題、非線形効用関数、パレートフロント

1. はじめに

マルチエージェントシステムの分野で自動交渉エージェントが重要な役割を果たしている ([1] etc.)。特に、自動交渉エージェントの開発により、電子商取引やスマートグリッドおよび現実世界の意思決定支援などへの応用などが期待されている。近年、自動交渉エージェントが扱う問題として効用情報が非公開下での二者間複数論点交渉問題 (bilateral multi-issue closed negotiation) が注目されている。特に、非線形関数に基づく効用空間モデルは、複数の論点間に依存関係が存在する場合にも有効であり、実世界の交渉問題に近いモデルである [2]。例えば、Tim らは相手の提案 Bid を自分の効用空間で評価した場合に決まった範囲内での一様分布を仮定し、最適な受諾の閾値を求める手法を提案している [3]。Chen らは Conditional Restricted Boltzmann Machines を用いることで、相手から引き出せる最大の効用値とその時刻を推定する手法を提案している [4]。しかし、これらの研究では、使用している効用空間が線形の場合のみを想定している。非線形関数に基づく効用空間では、線形な効用関数の場合と比べて、有効な合意

案の発見が困難であることが知られている [2]。また、これまで提案されてきた自動交渉戦略では論点数が 10 をこえる場合の有効性に関して十分に検証されているとはいえない。International Joint Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems (AAMAS) において開催されている自動交渉エージェント競技会 (Automated Negotiating Agents Competition (ANAC))[5] においても、2014 年度から非線形効用関数や論点数が 10 を超える効用空間が採用されており、これらの条件は複数論点交渉問題において重要である。互いに損のない合意案の提案を行うことが可能になるため、パレートフロントを推定することは重要であるが、これまで提案されてきた自動交渉戦略の多くは、相手の提案 Bid の自身の効用空間での効用値推移などを利用しているため、パレートフロント推定に対して有効な手法が提案されているとはいいがたい。

本論文では、非線形効用空間においてパレート最適な Bid の探索を行うために、論点間の依存関係を考慮した相手の効用関数を適切に推定する手法を提案する。提案手法では、相手の提案 Bid を論点間の組み合わせを考慮した要素に分解し、各要素の出現回数を数え上げることで、相手の効用関数の推定を行う。さらに、効用空間が膨大かつ非線形な状況でも適切にパレートフロントを探索するために多目的最適化手法 SPEA2[6] を導入する。評価実験におい

¹ 東京農工大学 工学部 情報工学科

² 東京農工大学大学院 工学研究院 先端情報科学部門

a) kakimoto@katfujilab.tuat.ac.jp

b) katfujie@cc.tuat.ac.jp

て、自分の効用関数と相手の推定効用関数でのパレートフロントを探索し、得られた解を自分の効用空間と相手の実際の効用空間にプロットした際の支配面積を用いて比較を行う。最終的に、相手の提案 Bid を論点間の依存関係を考慮して分解する手法がパレート最適な Bid を正しく探索できていることを示す。

また、本論文で提案するパレートフロント推定手法に基づいた自動交渉エージェントを提案する。提案エージェントは推定したパレートフロントと割引率から譲歩の度合いを決定する。さらに、推定パレートフロント上の Bid を提案することで、合意を導く可能性が高い提案を行う。評価実験において、ANAC-2014 決勝トーナメントに進出した最新エージェントに対して対戦を行い、他エージェントに比べてパレートフロントに近い Bid が提案できており、提案エージェントが他の戦略に対して有効であることを示す。

以下に本論文の構成を示す。まず、関連研究について示し、対象とする交渉モデルを示す。次に、効率的なパレートフロント探索アルゴリズムである SPEA2 について説明し、本論文で提案する相手の効用関数の予測手法を提案する。さらに、提案した相手の効用関数予測手法を用いた交渉エージェントを提案する。その後、相手の効用情報の予測手法の評価実験と提案した交渉戦略の評価実験を行う。最後に、本論文のまとめおよび今後の課題を示す。

2. 関連研究

本論文では、実世界での交渉問題に近いモデルとして重要である効用情報が非公開下での二者間複数論点交渉問題 (bilateral multi-issue closed negotiation) を考える。本交渉モデルでは、選好情報が個人情報として扱われ完全非公開であるため、ゲーム理論に基づいた戦略を直接導入することは難しく、ヒューリスティックに基づいたアプローチが重要であると考えられている [7]

近年、二者間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)) ([5].etc) が開催されている。競技会では、世界中から様々な戦略をもったエージェントやドメインが提案され、ルールに基づいてより優秀な交渉エージェントの開発に貢献している。また、ANAC での結果を分析することで、開発の際に重要な要素や戦略が示されている。Baarslag らは ANAC2011 のエージェントを対象として、経験的ゲーム理論に基づく戦略の堅牢性を調査し、戦略の解析を行っている [8]。Chen と Weiss は離散ウェーブレット分解と平滑化スプラインを用いて相手の提案 Bid の効用値を予測し、相手の戦略を学習する OMAC と呼ばれる戦略を提案している [9]。Williams らはガウス過程に基づいて相手のモデル化を行う交渉エージェントを提案している [10]。Kawaguchi らは相手の提案 Bid を自身の効用関数で評価した場合の平均や分散から、相手から引

き出せる最大効用値を推定し、推定最大効用値をもとに譲歩する戦略を提案している [11]。Tim らは相手の提案 Bid を自身の効用関数で評価した場合に決まった範囲内での一様分布を仮定し、最適な受諾の閾値を求める手法を提案している [3]。Chen らは Conditional Restricted Boltzmann Machines を用いることで、相手から引き出せる最大の効用値とその時刻を推定する手法を提案している [12]。しかし、これらの研究では、対象している効用関数が線形の場合のみを想定している。

一方、非線形関数に基づく効用関数では、線形な効用関数の場合と比べて、有効な合意案の発見が困難であることが知られている [2], [13]。そのような問題に対して近年は、複数エージェントがメディーエータを用いて、自動的に交渉を行う手法が提案されている。Klein ら [13] は、二項制約を含む中規模の双方向型の交渉問題を対象とし、シミュレーテッドアニーリングに基づくメディーエータが準最適解を得る手法が提案されている。一方、本論文では、さらに高次の依存関係と多数のエージェントが存在するより複雑な交渉問題に関して、高い最適性を議論している。Ito らは制約に基づく非線形効用関数を提案するとともに、メディーエータを導入したオークションに基づく交渉手法が提案されている [2]。さらに、メディーエータを導入したオークションに基づく交渉手法を改良した手法として、効用空間の絞り込みに基づく交渉手法 [14] と閾値調整交渉メカニズム [15] が提案されている。効用空間の絞り込みに基づく交渉手法 [14] において、メディーエータは、クラスター入札、最大制約入札そしてピーク入札を行なうことで、ラウンドごとに合意形成を探索する範囲を絞りこみながら交渉を行っていく。また、閾値調整メカニズム [15] は入札に関する閾値を調整しながら交渉を行なうことで、メディーエータに公開する範囲を最低限にすることに成功している。

これらの研究は、非線形の効用関数でも最適性の高い合意案を発見できることを示しているが、本論文が対象とする、効用情報が完全に非公開かつメディーエータを導入しない交渉プロトコルを前提としていない。また、これまでは提案されてきた自動交渉戦略では論点数が 10 をこえる場合の有効性に関して十分に検証されているとはいえない。さらに、相手の提案 Bid を自分の効用関数に基づいて評価値を決定しており、パレートフロントの推定に対して有効な手法が提案されているとはいいたい。

3. 非線形効用関数における二者間複数論点交渉問題

3.1 二者間複数論点交渉問題

二体のエージェント A, B が交渉を行う場合を考える。交渉において、論点が M 個存在し、個々の論点を i_j と表す。論点 i_j は $[0, X_j]$ の範囲の整数を値として持ち、合意案候補は $\vec{s} = (i_1, \dots, i_M)$ と表現される。エージェント A

と B の交渉において得られる効用値はそれぞれ効用関数 $U_A(\vec{s})$, $U_B(\vec{s})$, により決定される.

エージェント A , B は交渉を通じて自身の効用値を最大化させることを目的とする. 以下に, エージェント a ($a = \{A, B\}$) の目的関数を示す.

$$\max_{\vec{s}} U_a(\vec{s}) \quad (1)$$

3.2 Alternative Offers Protocol

本論文では alternative offers[16], [17], [18] という二者間交渉において頻繁に用いられるプロトコル上における, 交渉戦略を対象とする. Alternative Offers は ANAC でも取り入れられている交渉プロトコルである. 交渉参加者 A と B が交渉を行う場合を考える. まず, 交渉参加者 A が相手に合意案候補 (bid) を提案する. その後, 相手側つまり交渉参加者 B が提示された合意案候補に対して, 以下の Accept, Offer, 及び EndNegotiation を選択する.

- Accept: 相手側から提示された合意案候補を受け入れることである. この場合, 両者で合意が成立し, 互いに合意案に対する効用値を自身の効用関数で評価した値を得て交渉を終了する.
- Offer: 相手から提示され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示する. 合意は形成されず, 交渉は継続される.
- EndNegotiation: 交渉参加者が交渉全体を放棄する. どちらかにより EndNegotiation が選択された時点で合意は形成されずに交渉が終了する. 得られる効用値は留保価格 (Reservation Value) の値に従う.

以上の動作を, 合意が形成されるもしくは制限時間まで繰り返す. 合意が形成された場合は, 各エージェントは合意案における個々の効用値を得る. 一方, 制限時間内に合意を形成できなかった場合は, 留保価格をお互いの効用値として得る.

3.3 制約に基づく非線形効用関数

交渉ドメインやエージェントの選好情報などの仕様は交渉結果に大きく影響を及ぼす. 本論文では Ito ら [2] によって提案された制約に基づく非線形効用空間モデルを採用する. 以下に制約に基づく非線形効用空間モデルを示す.

効用関数は, 制約 $c_k \in C$ を用いて表される. 制約は, 単一, もしくは複数の論点に関して制約充足条件となる値の範囲と効用値を持つ. エージェント a は, 合意案候補 \vec{s} が制約 c_k の制約充足条件を満たす場合のみ, 効用値 $w_a(c_k, \vec{s})$ を持つ. 例えば, 制約は論点 1 に対して $[4, 6]$, 論点 2 に対して $[1, 7]$ の値を持つ場合に 0.5 の効用が得られるなどのように表現される. 制約 C における合意案 \vec{s} の効用関数 $U(\vec{s})$ は式 2 で表される.

$$U_a(\vec{s}) = \sum_{c_k \in C} w_a(c_k, \vec{s}) \quad (2)$$

効用関数 $U_a(\vec{s})$ は $[0, 1]$ に正規化される. 制約に基づく効用関数では, 多くの制約を満たす合意案は効用値が高く, ほとんどの制約を満たせない合意案は効用値が低くなるため, 凹凸のある非線形の効用関数となる.

さらに, 得られた効用は合意形成時の時間に応じて, 割引されるものとする. 割引率 d は $[0, 1]$ の値をとる. 正規化され時刻 $t(0 \leq t \leq 1)$ に対して, 効用値 $U_D^t(\vec{s})$ は以下のように計算される.

$$U_a^t(\vec{s}) = U_a(\vec{s}) \times d^t \quad (3)$$

4. 推定パレートフロントに基づく自動交渉エージェントの提案

4.1 SPEA2 を用いたパレートフロントの探索

SPEA2(Strength Pareto Evolutionary Algorithm 2) は Zitzler らによって提案された遺伝的アルゴリズムによる多目的関数のパレートフロント探索アルゴリズムである [6]. SPEA2 の特徴として, 探索で得られた非劣解集合をアーカイブとして保持することや, 特別なパラメータを設定することなく混雑度の高い個体を削除できることが挙げられる. 以下に SPEA2 のアルゴリズムを示す.

Step1: 初期個体集団 P_0 と空のアーカイブ \overline{P}_0 を作成する. $t = 0$ とする.

Step2: P_t と \overline{P}_t の適合度を計算する.

Step3: Step2 で計算した適合度に基づいて非劣解個体群を選ぶ. 非劣解個体数がアーカイブサイズ N より小さければ適合度の小さい個体で埋め合わせ, N より大きければ端切り法を用いて, 個体数を N にする.

Step4: 終了条件を満たしていれば, Step3 で選んだ N 個の個体を出力し, 満たしていなければアーカイブ \overline{P}_{t+1} にコピーする.

Step5: \overline{P}_{t+1} の個体からバイナリトーナメント選択を行いマッチングプールを作成する.

Step6: マッチングプールから交叉, 突然変異を行い, 結果を P_{t+1} とする. $t = t + 1$ とし, Step2 に戻る.

SPEA2 での適合度割り当ては以下のように行われる. まず, すべての個体 i の支配している個体数 $S(i)$ を求める. 個体 i の適合度 $R(i)$ は個体 i を支配している個体 j が持つ $S(j)$ の総和とする. どの個体にも支配されていない非劣解の適合度は 0 となり, 混雑度の高い個体の適合度は大きくなる. 端切り法は, 個体群の中で最も距離が近い個体ペアのうち, 個体ペア以外の個体との最小距離が小さい個体を削除することで個体数を減らす方法である. これにより, 偏りの少ない解集合が得られる. SPEA2 では, 提案 Bid を個体とし, 論点を遺伝子座とする. 論点の取りう

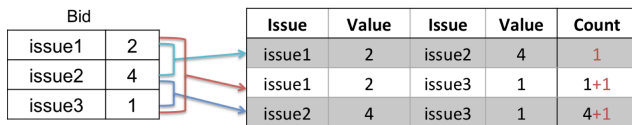


図 1 Bid の分割と数え上げ手法

Fig. 1 Division of Bid and Counting up Method

る整数値を遺伝子とし、交叉は一樣交叉を用いる。突然変異確率は 10 % とする。

4.2 論点間の依存関係を考慮した相手の効用関数の推定

本論文では相手からの提案をいくつかの要素に分解し、それらの統計情報に基づいて相手の効用情報を推定する。Alternative Offering において、交渉中に多く提案される Bid は、相手にとって重要であり、効用が高いものであると推測される。しかし、Bid のみを数え上げたとしても、提案される Bid の種類は限られているため統計情報を得るのが難しい。一方、非線形効用関数では、Bid を論点ごとに完全に分割してしまうと、論点間の依存関係を損なうため、適切に推定することができない。そこで、相手の提案について、論点間の依存関係を考慮しながら出現回数を数え上げる効果的な相手の効用関数の推定手法を提案する。

M 個の論点から構成される合意案候補 \vec{s} を D 個の要素からなる部分合意案候補に分割することを考える。 M 個の合意案候補を構成する要素から D 個を組み合わせた集合をえる関数を $C(D, \vec{s})$ とする。 $(|C(D, \vec{s})| = {}_M C_D)$ 。合意案候補を分割した集合 $C(D, \vec{s})$ を構成する要素 e がこれまでの提案に含まれていた回数を $count(e)$ とする。合意案候補 \vec{s} の相手の推定効用関数は以下の式 4 で計算される。

$$U(\vec{s}) = \sum_{e \in C(D, \vec{s})} count(e) \quad (4)$$

図 1 は合意案候補 (Bid) を分割した場合の例を示している。 $\vec{s} = (2, 4, 1)$ が相手から提案され、分割要素数 = 2 の部分合意案候補を作成することを考えた場合、 $C(2, \vec{s}) = \{[i_1 = 2, i_2 = 4], [i_1 = 2, i_3 = 1], [i_2 = 4, i_3 = 1]\}$ に分割される。また、今回の合意案候補の提案がなされる前に、 $count([i_1 = 2, i_3 = 1]) = 1, count([i_2 = 4, i_3 = 1]) = 4$ であったので、今回提案された合意案候補の反映後は、 $count([i_1 = 2, i_2 = 4]) = 1, count([i_1 = 2, i_3 = 1]) = 2, count([i_2 = 4, i_3 = 1]) = 5$ となる。

相手が交渉中に同じ提案を連続して繰り返した場合、相手の提案回数として考慮しない。理由として、その提案に含まれる要素の値が極端に大きくなり、他の提案による影響を受けなくなる場合があるためである。

4.3 論点間の依存関係を考慮した自動交渉エージェント戦略

本節では、4.1 で説明した SPEA2 と 4.2 で提案した効用

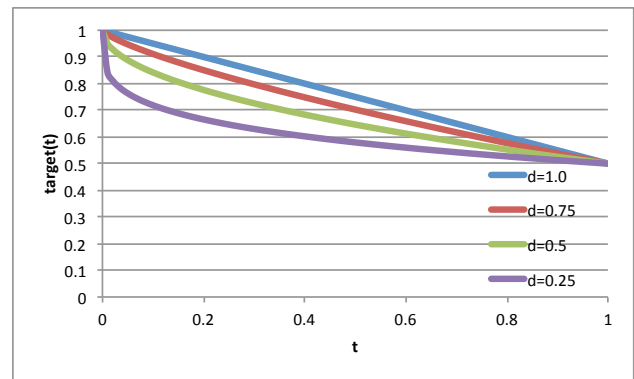


図 2 $p(t) = 0.5$ の場合での提案と受諾の閾値

Fig. 2 Example of Threshold of Offer and Accept ($p(t) = 0.5$)

空間の推定手法を用いてパレートフロントを推定し、それに基づき Bid の提案と受諾の可否判断を行う新しいエージェント戦略を提案する。提案エージェントは情報収集ステップと歩み寄りステップの 2 ステップからなる。

情報収集ステップ

交渉が開始されると、エージェントは情報収集ステップを開始する。情報収集ステップは受諾を行わず、こちらにとって有利な Bid を提案することで、相手の効用情報を推定するための Bid 情報を収集することを目的とする。情報収集ステップでは、自分の効用空間を GA を用いて探索し、効用値の高い Bid から 50 個の Bid を提案する。50 個の Bid を提案したのち、エージェントは歩み寄りステップに移行する。情報収集ステップでは SPEA2 や相手の推定効用関数を導入した提案 Bid の探索は行わない。この理由としては、5.1 の実験結果が示すように相手からの提案 Bid 数が少ない場合、パレートフロントの推定精度が低いからである。

歩み寄りステップ

歩み寄りステップでは、情報収集ステップで得られた相手からの Bid 情報を用いて SPEA2 を用いて推定したパレートフロント上の Bid を提案し、合意を目指す。

歩み寄りステップでは、まず最初に、自分の効用空間と相手の推定効用空間から、SPEA2 を用いてパレートフロントを推定する。SPEA2 は個体数 250、アーカイブサイズ 50 とする。情報収集ステップから歩み寄りステップに移行した際に、SPEA2 を用いて世代数 50 で探索を行う。以降は、相手から Bid が提案されるごとに、相手の提案 Bid により更新された推定効用関数を用いて、前回の探索結果から 1 世代更新する。1 回の相手からの提案 Bid では推定効用関数が大きく変化しないため、前回の探索結果を利用することで、計算時間の短縮を行う。

次に、情報収集ステップで探索した情報と推定パレートフロントから、提案する Bid や相手からの提案における受諾の可否を決定する。以下の式 5 と式 6 に基づき自身の行動を決定する。

$$u_a(t) = (1 - t^d)(1 - p_a(t)) + p_a(t) \quad (5)$$

$$target_a(t) = \min_{t' \leq t} u_a(t') \quad (6)$$

時刻 t において探索した推定パレートフロント上の Bid のうち、自身の効用値が最も低い Bid の効用値を $p_a(t)$ とする。つまり、 $p_a(t)$ は相手の効用関数で評価した際に最も効用値が高いと推定される Bid を自身の効用関数で評価した際の効用値を表す。次に、エージェントは、 $target_a(t)$ 以上の効用値の推定パレートフロント上の Bid のうち、効用値の低い 5 つの Bid からランダムに提案を行う。

図 2 に、 $p_a(t) = 0.5$ の場合の $target_a(t)$ の変化を示す。割引率 d の値が小さいほど、時間経過による減点が大きくなるため、より早い時刻で相手に歩み寄る。 $p_a(t)$ をもとに提案や受諾の行動を決定することにより、互いの効用関数の対立度合いを考慮しつつ譲歩が行える。

相手からの提案 Bid の受諾の可否は、相手の提案 Bid における自身の効用値が $target_a(t)$ を上回った場合のみ提案を受諾する。また、 $target_a(t)$ が留保価格以下になった場合、留保価格以上の効用値での合意が不可能であると判断し、交渉を放棄する。

5. 評価実験

5.1 パレート最適な Bid 探索における評価

本実験では、ランダムに生成された効用関数を用いて実験を行う。すべての論点の取りうる値は $[0, 9]$ とし、論点数は 10 から 30 まで 5 刻みとし、それぞれの論点数ごとに 5 種類の効用関数を作成する。効用関数における制約は平均して 3.5 個の論点に対して制約を持ち、効用関数は論点数 \times 10 個の制約を持つとする。

対戦相手のエージェントの提案手法は、自身の効用空間を遺伝的アルゴリズムを用いて探索し、探索中に得られた全ての Bid から効用値の高い順に提案を行うものとする。これにより、時間の経過によって徐々に相手に取っての効用値が低い Bid を提案するようになる。自動交渉エージェント競技会 (ANAC)[5] においては、序盤に自身にとって有利な Bid をしながら様子をうかがうとともに、時間が経過し、制限時間直前になると歩み寄る戦略がほとんどである。そこで、提案手法が多くのエージェントが導入している戦略に対して有効か評価するために、対戦相手エージェントを上記のように設定した。

推定したパレートフロント候補を、多目的最適化における探索手法の比較手法の 1 つである支配面積を比較する手法を用いて比較する [19]。支配面積は、解集合がパレートフロントに近く、解が隙間無く存在するほど増加する。本実験では、パレートフロントから遠い提案 Bid の効用値推定は重要ではなく、推定効用関数を用いてパレートフロントが正確に予測できることが重要であると考えられるため、支配面積を評価指標とする。推定したパレートフロント候

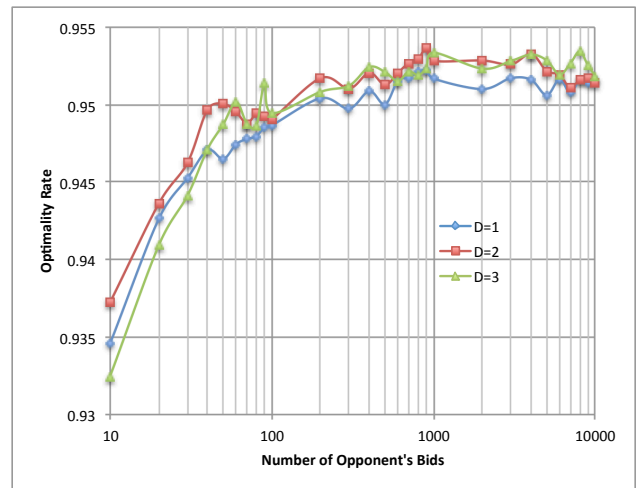


図 3 相手の提案数による精度の変化

Fig. 3 Dominant Area with Number of Opponent's Bids

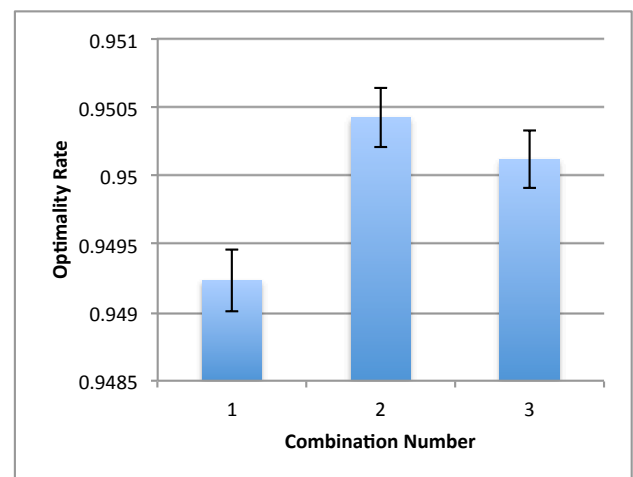


図 4 組み合わせ数による面積の変化 (バーは標準誤差を示す)

Fig. 4 Dominant Area with Combination Number (The lines show standard errors)

補解を、自分の効用空間と相手の実際の効用空間にプロットした場合の支配面積を求め比較を行う。組み合わせ数 D は 1, 2, 3 の 3 種類で実験を行う。SPEA2 は個体数 250, 世代数 100, アーカイブサイズ 50 とする。効用空間によって支配面積は変化するため、自分の効用空間と相手の実際の効用空間で、SPEA2 を用いて同条件で探索を行った場合の支配面積を 1 として割合を求め、比較を行う。

図 3 に相手の提案数が変化した場合のすべての効用空間における支配面積の平均値を示す。相手の提案数が増えるにつれて、パレートフロントに近い解を得られている。しかし、相手の提案数が一定の値をこえると支配面積は横ばいとなった。この原因としては、後半では、相手のエージェントは効用値の低い提案が主になるため、パレートフロントの特定に関係しないことが考えられる。

図 4 に組み合わせ数 D を変化した場合のすべての効用空間における支配面積の平均値を示す。組み合わせ数 1

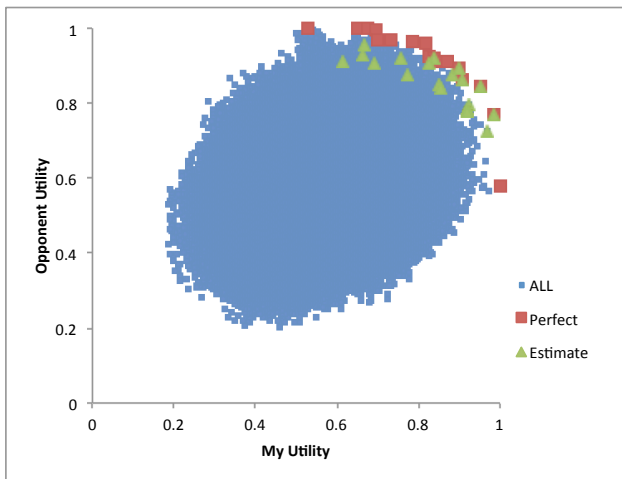


図 5 提案手法におけるパレートフロントの探索

Fig. 5 Searching Pareto Fronts by our Proposed Method

の場合よりも、組み合わせ数 2 以上の方がパレートフロントに近い解を探索できている。組み合わせ数 1 の場合、論点間の依存関係を考慮せずに論点ごとに分割させて、推定効用値が計算される。しかし、非線形効用関数に基づく効用空間では複数の論点が依存関係を持つため、組み合わせ数 2 以上で複数の論点の組を用いた提案 Bid の分解を行う方が、非線形効用関数に対しての表現力が高まり、組み合わせ数 1 の場合よりも良い結果になる。

一方、組み合わせ数 2 と 3 では優位差は見られなかった。理由として、組み合わせ数が 2 の時点ですべての組み合わせにおける論点の組について考慮しているため、3 個以上の論点が依存関係にある場合においても表現ができていたためである。組み合わせ数 D の値を大きくすることの欠点として、計算時間の増加が挙げられる。論点数 M が組み合わせ数 D に対して十分大きいとき、提案 Bid の推定効用値を求める計算量は $O(M^D)$ となる。論点数 M が大きくなると、組み合わせ数を増加させることが困難になる。そのため、論点数に応じて適切な分解数を決定する必要がある。

図 5 では、論点数 6 の場合の提案手法の実行結果を示している。横軸は提案エージェントの効用値、縦軸は相手のエージェントの効用値を示している。Perfect は相手の効用関数が完全に公開されている場合でのパレートフロント、Estimate は提案手法で対戦させた後に推定したパレートフロントである。図が示すように、提案した手法は、ほぼ、パレートフロントに近い Bid を判別できていることが分かる。本実験では、Perfect を探索するために比較的小さな論点数 6 を用いているが、論点数が大きい場合でも、本提案手法は適切にパレートフロントを探索することができる。

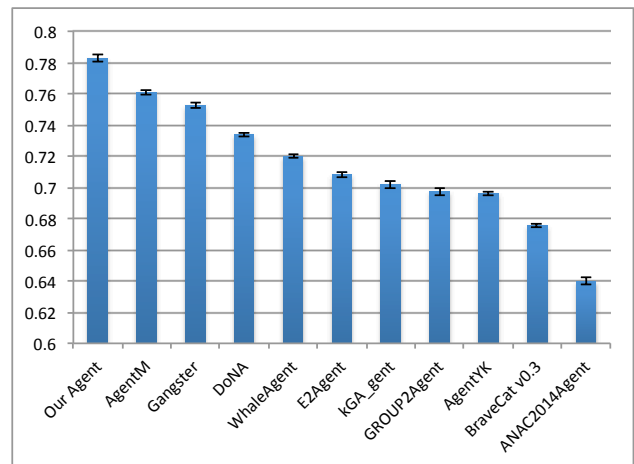


図 6 獲得効用値についての結果 (バーは標準誤差を示す)

Fig. 6 Average of Individual Utilities among ANAC2014 Finalists (The lines show standard errors)

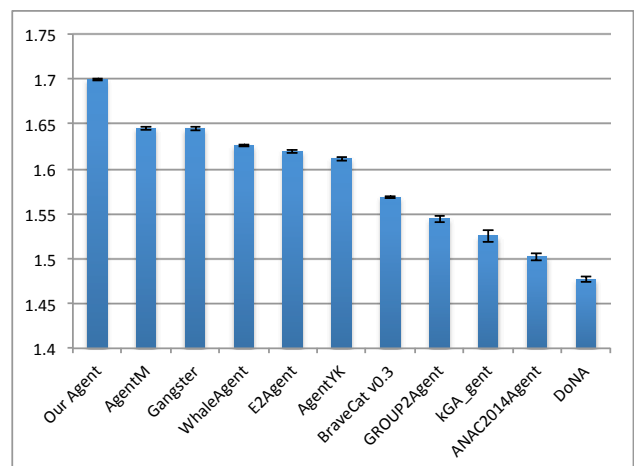


図 7 社会的効用についての交渉結果 (バーは標準誤差を示す)

Fig. 7 Average of Social Welfares among ANAC2014 Finalists (The lines show standard errors)

表 1 重要な交渉解における評価 (赤字は最良値を示す)

Table 1 Utility Based Quality Measures

Agent Name	Average Pareto Distance	Average Nash Distance	Average Kalai Distance
Our Agent	0.0542	0.1420	0.1316
Gungster	0.0917	0.1827	0.1730
AgentM	0.0974	0.1749	0.1695
WhaleAgent	0.1035	0.1713	0.1602
E2Agent	0.1097	0.1953	0.1833
AgentYK	0.1131	0.1961	0.1829
BraveCat v0.3	0.1426	0.2126	0.1996
GROUP2Agent	0.1597	0.2495	0.2423
kGAgent	0.1733	0.2544	0.2436
ANAC2014Agent	0.1904	0.2721	0.2625
DoNA	0.2039	0.2816	0.2689

5.2 ANAC-2014 決勝エージェントとの対戦における評価

本実験では、ANAC2014の決勝エージェントに対しトーナメントを行うことで提案エージェントの評価を行う。交渉ドメインはANAC2014決勝トーナメントと同一のドメインを使用する。Issueの数は10, 30, 40の3種類、割引率 d は1.0, 0.5の2種類、留保価格は0, 0.75の2種類をそれぞれ組み合わせた12ドメインである。制限時間についてはANAC2014決勝トーナメントと同一の3分とする。ANAC2014決勝進出の10エージェントに、本論文で提案したエージェントを加えた11エージェントで総当たりを行う。総当たりを14回行い平均獲得効用値や社会的効用値の比較を行う。

図6は各エージェントの平均獲得効用値、図7は各エージェントの平均社会的効用値を示している。提案エージェントは平均獲得効用値、平均社会的効用値のどちらも、他のエージェントに比べて高い効用が得られており、有効な交渉戦略を持っている。表1に合意Bidのパレートフロントからの距離、ナッシュ解からの距離、カライ解からの距離の平均を示す。他のエージェントに比べて、どの交渉解についても最小の距離であった。これにより、提案したパレートフロント推定手法が有効であることが分かる。提案エージェントはパレートフロントに近いBid提案ができていたため、獲得効用値や社会的効用値が高い状態で合意が形成できている。

6. まとめと今後の課題

本論文では、互いの効用情報が公開されない非線形効用関数に基づく効用関数での二者間複数論点交渉問題において、相手の提案を要素に分解し、要素ごとに数え上げることで効用関数を推定する手法を提案した。非線形効用関数に基づく効用関数では、提案の分解時に論点ごとに分解するよりも、論点間の依存関係を考慮して分解する方がパレートフロントを適切に予測することができる。さらに、提案したパレートフロント推定手法を導入した交渉エージェントを提案した。提案エージェントとANAC-2014の決勝エージェントとのトーナメントにより、パレートフロントに近いBidでの合意ができており、獲得効用値や社会的効用値についても他のエージェントより優れていることを示した。

今後の課題として、さらなる効用関数推定精度をの向上やさらなる提案エージェントの改良が挙げられる。本論文では単純に要素の回数を数えていたが、提案の順番によって重み付けを行うことなどで精度を高められる可能性がある。提案エージェントに関しては、相手が協力的か、非協力的かなどの相手の戦略の推定を行っていない。相手の戦略のモデル化などを行うことで、より強力なエージェント戦略が考えられる。

参考文献

- [1] Fatima, S. S., Wooldridge, M. and Jennings, N. R.: Multi-issue negotiation under time constraints, *Proceedings of the first international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems (AAMAS 2002)*, New York, NY, USA, pp. 143–150 (2002).
- [2] Ito, T., Hattori, H. and Klein, M.: Multi-issue Negotiation Protocol for Agents: Exploring Nonlinear Utility Spaces., *IJCAI*, Vol. 7, pp. 1347–1352 (2007).
- [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] Chen, S. and Weiss, G.: An efficient automated negotiation strategy for complex environments, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, (online), DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engappai.2013.08.012> (2013).
- [5] Gal, K., Ito, T., Jonker, C., Kraus, S., Hindriks, K., Lin, R. and Baarslag, T.: The Forth International Automated Negotiating Agents Competition (ANAC2013), <http://www.itolab.nitech.ac.jp/ANAC2013/> (2013).
- [6] Zitzler, E., Laumanns, M., Thiele, L., Zitzler, E., Zitzler, E., Thiele, L. and Thiele, L.: SPEA2: Improving the strength Pareto evolutionary algorithm (2001).
- [7] Kraus, S.: *Strategic Negotiation in Multiagent Environments*, Mit Press (2001).
- [8] Baarslag, T., Fujita, K., Gerding, E., Hindriks, K., Ito, T., Jennings, N. R., Jonker, C., Kraus, S., Lin, R., Robu, V. and Williams, C.: Evaluating practical negotiating agents: Results and analysis of the 2011 international competition, *Artificial Intelligence Journal (AIJ)*, Vol. 198, pp. 73–103 (2013).
- [9] Chen, S. and Weiss, G.: An Efficient and Adaptive Approach to Negotiation in Complex Environments., *Proceedings of the 19th European Conference on Artificial Intelligence (ECAI-2012)*, Vol. 242, pp. 228–233 (2012).
- [10] Williams, C. R., Robu, V., Gerding, E. H. and Jennings, N. R.: Using Gaussian Processes to Optimise Concession in Complex Negotiations against Unknown Opponents, *Proceedings of the 22nd International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-2011)*, pp. 432–438 (2011).
- [11] Kawaguchi, S., Fujita, K. and Ito, T.: Compromising Strategy Based on Estimated Maximum Utility for Automated Negotiation Agents Competition (ANAC-10), *24th International Conference on Industrial Engineering and Other Applications of Applied Intelligent Systems (IEA/AIE-2011)*, pp. 501–510 (2011).
- [12] Chen, S., Ammar, H. B., Tuyls, K. and Weiss, G.: Conditional restricted Boltzmann machines for negotiations in highly competitive and complex domains, *Proceedings of the Twenty-Third international joint conference on Artificial Intelligence*, AAAI Press, pp. 69–75 (2013).
- [13] Klein, M., Faratin, P., Sayama, H. and Bar-Yam, Y.: Negotiating Complex Contracts, *Group Decision and Negotiation*, Vol. 12, No. 2, pp. 58–73 (2003).
- [14] 服部宏充, 伊藤孝行, Klein, M.: 複数論点交渉問題のための効用空間の絞り込みに基づくマルチエージェント交渉手法, 電子情報通信学会論文誌 D-I, 「ソフトウェアエージェントとその応用特集号」, Vol. J90-D, No. 9, pp. 2336–2348 (2007).
- [15] 藤田桂英, 伊藤孝行, 服部宏充: 複数論点交渉問題にお

けるエージェントの効用空間の公開範囲に基づく交渉手段の実現, コンピュータソフトウェア(日本ソフトウェア科学会論文誌)「ソフトウェアエージェントとその応用特集号」, Vol. 25, No. 4, pp. 167–180 (2008).

- [16] Rubinstein, A.: Perfect Equilibrium in a Bargaining Model, *Econometrica*, Vol. 50, No. 1, pp. 97–109 (1982).
- [17] Rubinstein, A.: A Bargaining Model with Incomplete Information About Time Preferences, *Econometrica*, Vol. 53, No. 5, pp. 1151–1172 (1985).
- [18] Sandholm, T. and Vulkan, N.: Bargaining with Deadlines, *Proceedings of The 13th Association for the Advancement of Artificial Intelligence (AAAI-1999)*, pp. 44–51 (1999).
- [19] Zitzler, E. and Thiele, L.: Multiobjective evolutionary algorithms: a comparative case study and the strength Pareto approach, *Evolutionary Computation, IEEE Transactions on*, Vol. 3, No. 4, pp. 257–271 (1999).