

## マルチエージェントシステムにおける自動交渉の研究動向

藤田 桂英\*

## 1. はじめに

本稿では、マルチエージェントシステム (Multi-Agent System) において、エージェント間の衝突を自動で解決する自動交渉に関する研究動向を紹介する。マルチエージェントシステムの分野では、交渉は Negotiation や Bargaining とよばれ、交渉プロトコルとよばれるルールのもとで相互に提案（オファー、プロポーザル、ディールともよばれる）を行い、各提案を受け入れるか拒否するかの判断を互いに繰り返すインタラクションである。交渉に関する研究は、1950年代からゲーム理論の分野を中心に研究されており [1]、マルチエージェントシステムにおいても重要かつ古典的な課題として、複数のエージェント間の衝突を解決するために、どのように交渉し、より良い合意を形成するかを中心に行われている [2–4]。また、マルチエージェントシステムにおいて個人合理性をもつエージェント同士が協調作業するためには、個々の利益や効用を考慮しながら社会やグループの利益も最大化することを可能とする自動交渉が必要となる。さらに、多数の主体から構成される人間社会などの分散環境かつ利益が競合する状況では、交渉は本質的に不可欠な要素であり、日常でも頻繁に行われている。

本稿では、複数論点交渉問題の定式化および自動交渉に関する代表的な理論やアプローチを紹介する。これらは、ゲーム理論、ヒューリスティックス、機械学習に基づくアプローチに大別して示す。また、自動交渉のプラットフォーム、および、人間とエージェントの交渉に関する研究分野を含めたいくつかの応用事例を紹介する。

## 2. 複数論点交渉問題

## 2.1 定式化

複数論点交渉問題では、 $M$  個のエージェント  $\mathbf{A} = \{A_1, A_2, \dots, A_M\}$  が、共通の交渉ドメインにおいて交渉を行う場合を想定する。交渉ドメインとは交渉における論点や各論点における選択肢を定義するものであり、 $n$  個の要素からなる論点集合  $\mathbf{I} = \{I_1, I_2, \dots, I_n\}$  と、各論点  $I_i$  に対する  $k_i$  個の要素からなる選択肢集合  $\mathbf{V}_i = \{v_{k_i}^1, v_{k_i}^2, \dots, v_{k_i}^{k_i}\}$  から構成される。交渉中に提案される合意案候補 (Bid) は各論点から選択肢を決定し、

$\omega = (v_{c_1}^1, v_{c_2}^2, \dots, v_{c_n}^n)$  という形で表される。ただし、 $v_{c_i}^i$  は論点  $I_i$  で選ばれた選択肢であり、 $c_i \in \{1, 2, \dots, k_i\}$  を満たす。また、全合意案候補集合  $\Omega$  は (1) 式で表す。交渉ドメインにおける合意案候補の総数をドメインサイズとよび、 $|\Omega|$  で表す。

$$\Omega = \{(v_{c_1}^1, \dots, v_{c_n}^n) \mid c_i \in \{1, \dots, k_i\}, i \in \{1, \dots, n\}\} \quad (1)$$

交渉を行うエージェントにはそれぞれ、各選択肢に対する好みの度合いを表す効用が設定される。基本的に効用は非公開であり、ほかのエージェントは知ることができない。エージェント  $a$  は、任意の Bid の効用値を算出する効用関数  $U_a(\cdot)$  を独自に所持している。各エージェントの目的関数は、個人合理性を有していることから、この交渉によって得られる自身の効用値を最大化することを仮定する場合が多い。

交渉が決裂したときに得られる最低効用値として、エージェントごとに留保価格 (Reservation Value) や合意決裂点 (Disagreement Point)  $\mathbf{D} = \{d_1, d_2, \dots, d_M\}$  を持つ。また、エージェント間のインタラクションは交渉プロトコル  $\mathbf{P}$  とよばれるルール集合に従って行われる。

## 2.2 Alternating Offers Protocol (AOP)

二者間交渉で広く利用されている代表的な交渉プロトコルとして、Alternating Offers Protocol [5] を紹介する。このプロトコルにおいては双方のエージェントが交互に行動を行う。エージェントは自身のターンにおいて、以下の三つの行動のうち一つを選択する。

- *Accept*: 相手から送られた（直近の）提案を受け入れる。ただし、交渉開始時の最初の行動として選択できない。
- *Offer*: 相手の提案を棄却し、新たな合意案候補 (Bid) を相手に提案する。
- *EndNegotiation*: 合意せずに交渉を放棄する。

AOP では、実時間またはラウンド数（各エージェントの行動回数）による制限時間が設定され、どちらかのエージェントによって *Accept* もしくは *EndNegotiation* が選択される。制限時間に達する、のいずれかの条件を満たした時点で終了する。*Accept* を選択することで交渉が終了した場合、直前の時刻  $t$  で受理した提案  $\omega_t$  におけるエージェント  $a$  の効用値  $U_a(\omega_t)$  を得る。また、*EndNegotiation* が選択されるもしくは時間切れによっ

\* 東京農工大学 大学院 工学研究院

Key Words: automated negotiation, multi-agent system.

て交渉が終了していた場合、交渉による合意が得られずにエージェントごとの留保価格  $d_a$  をスコアとして獲得する。

AOP をもとに各 Bid をスタックさせ、三者以上の交渉問題にも適用できるようにした Stacked Alternating Offers Protocol (SAOP)[6] も競技会などでよく使用される交渉プロトコルである。

### 2.3 代表的な交渉解

交渉問題における代表的な交渉解を二者間の場合を想定して説明する。

#### 均等解 (Fair solution)

均等解とは、各エージェントの効用値を等しく最大化する交渉解である。

#### パレート最適解 (Pareto optimal solution)

パレート最適解とは、パレート最適性を満たす交渉解である。ある合意案候補がパレート最適性を満たすとき、すべての交渉参加者が獲得する効用値を同時に上昇させるような合意案候補が存在しない。すなわち、いずれかの交渉参加者の獲得する効用値を上昇させるためには少なくとも一人の交渉参加者の獲得する効用値を低下させる必要がある。パレート最適な合意案候補の集合、もしくは合意案候補を効用空間に写像した際にそれらをつなぎ合わせた超平面のことをパレートフロントとよぶ。

#### 社会的余剰最大 (Social welfare maximization)

社会的余剰とは、交渉に参加する全エージェントの効用値の和を示している。その社会的余剰が最大化される点は交渉解となりうる。社会的余剰が最大な交渉解はパレート最適である。

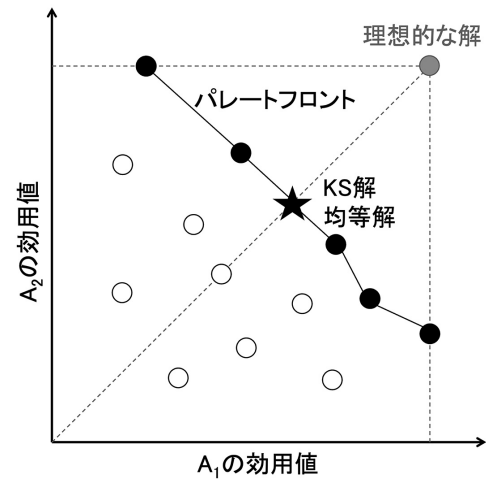
#### ナッシュ交渉解 (Nash bargaining solution)

ナッシュ交渉解とは、各エージェントにおける、獲得する効用値から留保価格を引いた値の積（ナッシュ積）を最大化する合意案候補のことである [7]。ナッシュ交渉解はパレート最適性を満たす。また、ナッシュ積は各エージェントが獲得する効用値の積であるので、ナッシュ積が最大となるナッシュ交渉解は効用空間上に張る面積が最大となる合意案候補である。

#### カライ・スモルディンスキー解 (KS bargaining solution)

カライ・スモルディンスキー解とは、効用空間の基準点  $(0,0)$  と理想点  $(1,1)$  を結ぶ線分とパレートフロントとの交点である [8]。カライ・スモルディンスキー解はパレート最適性を満たす。

第 1 図は、横軸にエージェント 1 の効用値、縦軸にエージェント 2 の効用値を示す空間に合意案候補をプロットした交渉空間 (outcome space) において、パレートフロントとカライ・スモルディンスキー解を示している。黒丸と線がパレート最適解とパレートフロント、星印がカライ・スモルディンスキー解を示す。白丸はパレート最適でない合意案候補である。



第 1 図 交渉空間におけるパレートフロントとカライ・スモルディンスキー解

## 3. ゲーム理論に基づくアプローチ

### 3.1 Alternating Offers による交渉

AOP により一つのリソース（パイ）をどのような割合で二者に分割するかに関する敵対的なドメインでの交渉を考える。このリソース全体の価値は 1 であり、二つに分割される。このシナリオにおける提案は  $(x, 1-x)$  と表し、この提案で合意した場合  $A_1$  が価値  $x$ 、 $A_2$  が価値  $x-1$  を得る。このとき、可能な合意案候補の集合 (negotiation set) は  $\{(x, 1-x) : 0 \leq x \leq 1\}$  で表される。

1 ラウンドだけ交渉を行う状況を考える。このとき、 $A_1$  が提案を行い、 $A_2$  がその提案を受け入れるか、拒否するかを判断する最後通牒ゲームとなる。この場合、取引の提案者 (first mover) である  $A_1$  がこの交渉を支配している。たとえば、 $A_1$  は自身にとって最も得である  $(1,0)$  の提案を行うとすると、 $A_2$  にとって合意形成失敗よりも合意形成できる方が高い効用が得られると判断し  $(1,0)$  を受け入れる。 $A_1$  にとって、 $(1,0)$  を提案する以上に良い行動はない。以上から、 $A_1$  と  $A_2$  にとって上記の戦略がナッシュ均衡となる。一般的に、ラウンド数が固定の場合、最後に行動できるエージェントが最も有利な合意案で合意を得ることが可能となる。

ラウンド数に制限がない一般的なケースを考える。この場合、 $A_1$  は毎回  $(1,0)$  を提案し、すべての相手からの提案 (counter-offer) を拒否するのが最適戦略となる。同様に  $A_2$  も相手からの提案を拒否し続けた場合、交渉は永遠に継続し、両者にとって最悪な結果となる。したがって、 $A_2$  にとって  $A_1$  から最初に提案されたものを受理するより良い選択肢がなくなり、これがナッシュ均衡となる。今回の例では極端な場合を想定しているが、現実の交渉では、 $A_1$  は毎回  $(0.8, 0.2)$  など自身に有利な Bid を提案しながらすべての相手からの提案を拒否する戦略をとる。最終的に、同様の議論により、交渉空間における  $A_1$  の最初の提案  $(x, 1-x)$  で合意するのが、ナッ

シュ均衡の交渉戦略のペアとなる。

### 3.2 Task-oriented ドメインにおける交渉

Task-oriented ドメインとよばれる各エージェントにタスクを割り振るような交渉問題を考える。全タスク  $T$  に対して、交渉前に  $A_1$  に  $T_1^0$ ,  $A_2$  に  $T_2^0$  が割り当てられているとする。また、各エージェントがタスクを実行するのに単調性を満たすコスト関数  $c(\cdot)$  により決定されるコストが必要である。このとき、本交渉問題での提案は  $(T_1, T_2)$  と表し、エージェント  $A_i$  の効用関数  $U_i((T_1, T_2)) = c(T_i) - c(T_i^0)$  とする。もし、両エージェントにとって  $U_i((T_1, T_2)) > 0$  であれば個人合理性が満たされており、この個人合理性が満たされない場合は、どちらかのエージェントは最初に割り当てられた  $(T_1^0, T_2^0)$  を好むこととなる。合理的なエージェントであれば、個人合理性が満たされない提案は受諾せず、相手の効用を減らさずに自身の効用を向上する提案をすることを考慮すると、この交渉では、個人合理性とパレート最適性を同時に満たす合意案を目指す必要がある。

この問題において有効なアプローチとして monotonic concession protocol[9] が提案されている。まず、同時に  $A_1$  から  $\omega_1$ ,  $A_2$  から  $\omega_2$  の提案を行う。もし、相手から自身の効用を向上させるような提案 ( $U_1(\omega_2) \geq U_1(\omega_1)$  or  $U_2(\omega_1) \geq U_2(\omega_2)$ ) がされた場合に、合意を形成する。このときの合意案は、両方の提案が上記の条件が満たされていればランダムにどちらかの提案が選択され合意案になり、片方の提案だけが条件を満たされていればその提案が合意案となる。もし、合意が形成できない場合は、同時に提案するフェーズを繰り返す。その際に、各エージェントは前回の提案を繰り返すか、前回から歩み寄り（相手にとってより好ましい案を提案する）を行う。どちらのエージェントも歩み寄りを行わない状況に収束した場合は、この交渉が失敗されたものとして扱い、最初に割り当てられた案でタスクが割り当てられる。

monotonic concession protocol に有効な交渉戦略として、Zeuthen strategy[4] が有名である。この戦略は今回の提案の効用と合意失敗時の差分を現時点の合意形成失敗のリスクとして捉え、もしそのリスクが小さいときは歩み寄りをあまり行わず、逆にリスクが大きいときは歩み寄りを積極的に行う、合意形成失敗時のリスクに応じて歩み寄りの度合いを変える交渉戦略である。この戦略同士での交渉により得られる合意案はパレート最適性と個人合理性を満たし、コイントスルールを取り入れることでナッシュ均衡を満たすことが知られている。

### 3.3 最近のゲーム理論に基づく解析

最近のゲーム理論に基づくアプローチに基づく研究では、さまざまな交渉問題に対して、多項式時間でおおよそその均衡を見つける近似アルゴリズムを提案しているものが多い。たとえば、Fatima らは、時間的制約が存在するもとの複数問題交渉において、均衡解が一意であ

り対称性をもっていることを示しているが、常にパレート最適であるとは限らないことを示している [10]。その後、これらの交渉モデルを拡張し、時間制約 [11]、交渉期限 [12]、および、非線形効用関数 [13] の場合を、ゲーム理論のモデルにより解析している。

ゲーム理論に基づくアプローチでは、現実の交渉問題を一般的なゲームとして捉えることで、交渉問題の分析やどのような合意案に均衡するかを導くことを目標としている場合が多い。さらに、交渉問題のモデル化の際に、各エージェントの行動は自身の効用関数に対して合理的であり（個人合理性）、無限の計算能力をもつものと仮定されている。そのため、エージェントの戦略や行動に対して、お互いの効用関数がわからないことによる不確実性が十分に考慮されているとはいえない。また、人間との交渉を想定した場合、人間の交渉者がエージェントのように合理的に振る舞うとは限らない問題もある。

## 4. ヒューリスティックスによるアプローチ

人間が現実の交渉で使用するヒューリスティックスに基づくアプローチは、複数論点交渉問題の戦略を構築するのに有効な場合がある。とくに、さまざまな状況において、相手のエージェントや状況がどのようになるかを正確に予測することは通常不可能であるため、シミュレーションと経験的分析によって評価することは重要になる。

### 4.1 BOA フレームワーク

BOA フレームワーク [14] は自動交渉エージェントの戦略を三つの要素に分離することで、それぞれの戦略の要素を個別に解析することを目的に提案された。BOA フレームワークにおいては、交渉戦略を以下の三つの要素に分離する。

**Bidding Strategy (提案戦略)** つぎに自身が提案する内容を決定する戦略である。Faratin らの分類に基づく、代表的な Bidding Strategy として以下のものが挙げられる [15]。

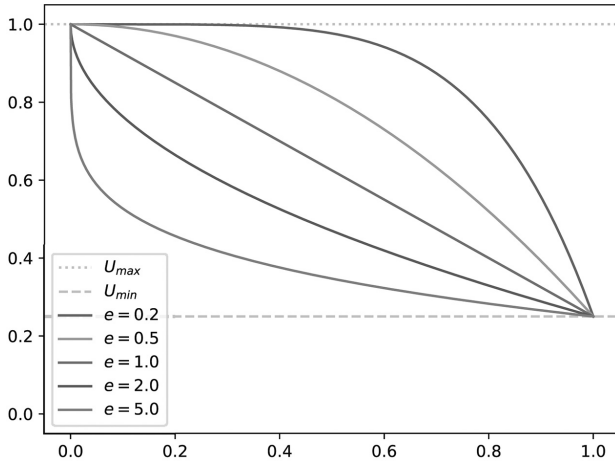
- Time dependent : 時間に依存して提案する内容を決定する戦略。
- Behavior dependent : 交渉相手の行動に依存して提案する内容を決定する戦略。

これら以外にも時間と交渉相手の行動の両方に依存して提案する内容を決定する戦略など、さまざまな提案戦略が考えられている。

**Opponent Modeling (交渉相手のモデリング戦略)**

交渉相手から提案された合意案候補を用いて交渉相手の効用関数を予測する戦略である。Baarslag らの分類に基づく、代表的な Opponent Modeling として以下のものが挙げられる [14,16,17]。

- Frequency Model : 交渉相手の提案の頻度を用いて効用関数を推定。
- Bayesian Model : 交渉相手の提案戦略に確率分布



第 2 図  $e$  の値を変化させたときの譲歩曲線。横軸は時刻、縦軸は提案する Bid の効用値を示す。

を仮定して効用関数を推定。

**Acceptance Condition (受け入れ戦略)** 交渉相手からの提案に対して、受諾する・拒否する・交渉を終了するという三つの行動のうちどの行動を取るかを決定する戦略である。Baarslag らの分類に基づく、代表的な Acceptance Condition として、以下のものが挙げられる [18]。

- Utility based: 提案された合意案候補の効用値に基づいて行動を決定する戦略。
- Time based: 時間に依存して行動を決定する戦略。

#### 4.2 基本的な提案戦略

交渉戦略において、とくに重要視されているのが提案戦略である。以下に代表的な提案戦略を示す。

##### 時間依存の交渉戦略

時間に依存した交渉戦略は、交渉の制限時間に近づくに従って譲歩していく [14]。本戦略では次に提案する Bid の効用値  $U(\omega_{t+1})$  は (2) 式で決定される。

$$U(\omega_{t+1}) = U_{max} - (U_{max} - U_{min}) \left( \frac{t}{T} \right)^{-e} \quad (2)$$

(2) 式における  $U_{max}$ ,  $U_{min}$  はそれぞれ効用値が最大・最小となる Bid の効用値であり、 $t$  は現在の経過時間、 $T$  は交渉の制限時間を示す。 $e$  は譲歩の速度を決定するパラメータであり、この値によって各時刻での譲歩の度合いを描画した譲歩曲線の形状が決定する (第 2 図)。 $e$  によりそれぞれの戦略名があり、以下の特徴をもつ。

- **Boulware** ( $e < 1$ ): 制限時間に到達する直前まではあまり譲歩せず、到達する直前に大きく譲歩する。
- **Linear** ( $e = 1$ ): 時間経過に従って線形に譲歩する。
- **Conceder** ( $e > 1$ ): 交渉開始直後に大きく譲歩し、その後はあまり譲歩しない。

##### 行動依存戦略 (TitForTat)

行動依存戦略 (TitForTat) は、交渉相手の行動を模倣する戦略であり、交渉相手の行動に依存した戦略として

知られている [19]。以下では、Average Tit-for-Tat とよばれる、交渉相手の時刻  $t$  での提案の効用値と時刻  $t-\gamma$  での提案の効用値との変化率によってつぎに提案する合意案候補の効用値  $U(\omega_{t+1})$  を決定する戦略を説明する。

$\gamma$  はウィンドウサイズとよばれるパラメータであり、過去何ラウンド前の相手の行動を参照するかを決定する。この戦略では、つぎに提案する合意案候補  $\omega_{t+1}$  の効用値  $U(\omega_{t+1})$  は以下の (3) 式によって決定される。

$$U(\omega_{t+1}) = \min \left( \max \left( \frac{U(\omega'_{t-\gamma})}{U(\omega'_t)} U(\omega_t), U_{min} \right), U_{max} \right) \quad (3)$$

(3) 式における  $\omega'_t$  は時刻  $t$  での交渉相手からの提案であり、 $\omega_t$  は時刻  $t$  での自身の提案である。

#### 4.3 自動交渉メカニズム

交渉に参加しない第三者の立場としてメディエータを導入し、交渉を効率的に進めることを目的とした、交渉メカニズムに関する研究を紹介する。

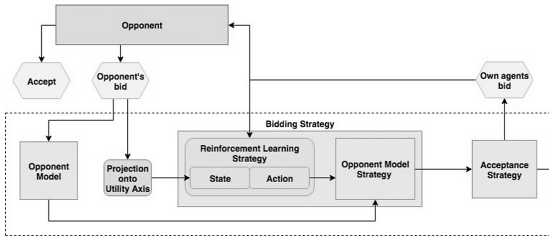
Faratin らは、単純な線形効用関数をもつエージェント同士の交渉問題に対して、トレードオフ戦略とそれに対するヒューリスティックな計算モデルを提案し、それが社会的余剰の向上につながる可能性があることを示した [15,20,21]。アルゴリズム自体は、ファジ理論を使用してほかのエージェントの選好構造を近似し、山登り法により交渉空間における合意案を探索している。Klein ら [22] は、とくに複雑な非線形の効用関数が仮定されている交渉問題に対して有効な交渉プロトコルを提案している。山登り法とシミュレーティッドアニーリングベースの交渉戦略の提案とその解析を行っている。その後、Klein らの研究成果を発展させ、非線形効用関数が仮定された交渉問題でも効率的に交渉を行うことができるプロトコルが提案されている [23,24]。

#### 5. 強化学習によるアプローチ

近年、深層学習などの機械学習の急速な発展もあり、様々な交渉シナリオや交渉相手に適応できるという理由から、機械学習の一種である強化学習によって交渉戦略の獲得を行う研究が注目されている。

Bakker ら [25] は BOA フレームワークに基づいて自動交渉エージェントの戦略を分離し、強化学習により提案戦略を獲得できる RLBOA フレームワークを提案した。提案戦略のみ Q 学習で学習を行っており、交渉相手のモデリング戦略と受け入れ戦略については既存の戦略を使用している。RLBOA フレームワークの概観図を第 3 図に示す。RLBOA フレームワークにおいてはさまざまな交渉ドメインに対応するため、提案の具体的な内容などが含まれる合意案候補を効用値に変換して使用するという工夫が行われている。これによりどのような交渉ドメインでも学習における状態・行動が同じ形式となり、交渉ドメインに依存しない学習が可能となる。

Bagga ら [26] は電子商取引において複数の売り手



第3図 RLBOA フレームワークの概観図 [25]

と同時に交渉する場面における交渉戦略を学習する ANEGMA という交渉モデルを提案し, Deep Deterministic Policy Gradient (DDPG) アルゴリズムを用いて学習を行っている. この手法では複数の相手との交渉が前提となっている.

Ayan ら [27] は任意の交渉者に対して有効な提案戦略を深層強化学習により獲得し, Opponent Classifier により相手の戦略を分類し, Strategy Switching Mechanism により自身の戦略を変更するフレームワークを提案している. また, Reviewer により, 新たに得た交渉戦略を自身のもつ戦略集合に追加するかを判断している.

## 6. 交渉プラットフォーム

### 6.1 国際自動交渉エージェント競技会 (ANAC)

ANAC は参加者が作成した自動交渉エージェントに対して, さまざまなルール, 交渉プロトコル, 交渉シナリオにおいて, 各エージェントの獲得したスコアなどを競う競技会である [28]. 2010 年の第 1 回大会から毎年開催されており, 2010 年から 2016 年までは International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS) と共催, 2017 年から 2022 年までは International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI) と共催している.

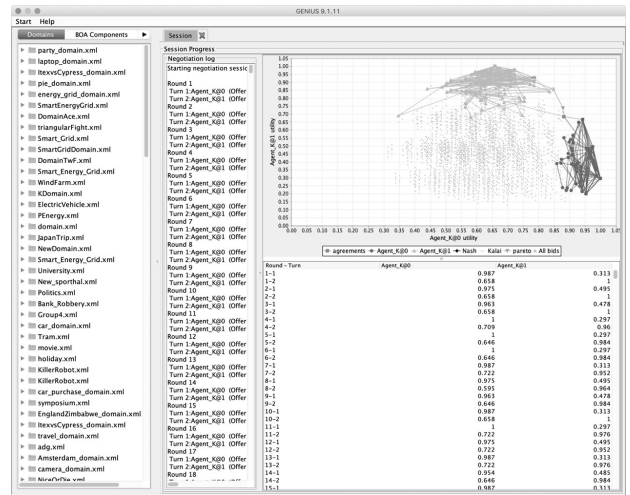
ANAC は以下の 4 点を目的としている.

- 効果的な交渉プロトコルの開発, およびさまざまな交渉シナリオの交渉戦略の開発を促進する.
- 交渉シナリオ, 交渉プロトコル, 交渉戦略のベンチマークの収集と開発を行う.
- 新たな交渉プロトコル, 交渉戦略の評価と調査を行うための共通のツールや基準を開発する.
- 自動交渉分野における研究課題を設定する.

ANAC では 2010 年から 2016 年まではエージェント同士の交渉に着目したリーグ (Automated Negotiation League) のみが開催されていたが, 近年は, Human-Agent League, Supply Chain Management League, Artificial Intelligence base Werewolf League, Diplomacy Game League など複数のリーグが開催されるようになっている [29,30].

### 6.2 自動交渉のためのプラットフォーム

GENIUS (General Environment for Negotiation with Intelligent multipurpose Usage Simulation)[31]



第4図 GENIUS のインタフェース [31]

は ANAC の Automated Negotiation League で使用される自動交渉プラットフォームである. GENIUS では自動交渉のための共通のプラットフォームを提供するほか, さまざまな交渉プロトコル・交渉ドメインや過去の競技会で使用された交渉エージェントなども提供されている. また, GENIUS では GUI によって交渉ドメインを作成することができるほか, 提供されている JavaAPI を用いて交渉エージェントの作成・追加を行うことができ, 作成した交渉ドメインや交渉エージェントを用いて交渉シミュレーションを行うことができる. GENIUS のインタフェースである第 4 図からわかるように, 提案しうる合意案候補の分布, 提案した合意案候補の遷移, パレート最適解などの交渉解, 交渉によって得られた合意案, 交渉中に提案された合意案候補の詳細な履歴などが表示される.

NegMAS (NEGotiations Managed by Agent Simulations) は ANAC の Supply Chain Management League で使用される自動交渉プラットフォームである [32]. NegMAS はサプライチェーンマネジメントにおける交渉シミュレーションのほか, さまざまな交渉プロトコルを用いた交渉シミュレーション, 交渉プロトコル, 交渉戦略の開発を行うことができる Python ベースの汎用的な交渉プラットフォームである.

## 7. 応用問題

### 7.1 人間とエージェントの交渉

自動交渉の知見を用いて, 人間とエージェントとの現実世界の交渉支援に発展させた研究事例も存在する. 人間とエージェントの交渉が可能になると, 現実世界のさまざまな人間同士の交渉に自動交渉技術が導入できるとともに, 人間の交渉技術向上のための教育にも使用できる. このような研究分野は Human-Agent Negotiation (HAN) とよばれる.

HAN における交渉プラットフォームとして, IAGO

(Interactive Arbitration Guide Online) が有名であり、実際に ANAC の Human-Agent Negotiation リーグで使用されている [33]。IAGO では、人間と交渉することが可能なエージェントおよび人間とエージェントの交渉に用いるドメインを作成することが可能である。作成したエージェントは WEB サーバ上で動作し、エージェントおよび交渉ドメインの設計・開発を独立して行えるように API が展開されている。また、交渉者は部分的な提案を行うことが可能で、提案だけでなく感情の表出やメッセージの送信、お互いの選好に関する情報を送受信することができる。留保価格についての情報交換や見返りの要求、事前約束も行うことができ、より現実に即した交渉を行うことができる。IAGO を用いた研究により、見返りを求めるエージェントの方が人間との交渉では高い効用を得るという結果が示唆されている [34]。

TKI は対立した交渉における個人の行動を評価・分析するための指標であり、協調性 (cooperativeness) と積極性 (assertiveness) の二つの軸を用いる [35]。協調性は相手の利益や要求を満たそうとする程度を表し、積極性は自分自身の利益や要求を満たそうとする程度を表す。TKI では協調性と積極性の指標によって、共存 (Collaborating)、順応 (Accommodating)、競争 (Competing)、回避 (Avoiding)、妥協 (Compromising) の 5 のモードに分類している。Fujita[36] は提案した TKI に基づいて譲歩速度を変更するエージェント戦略を提案した。また、Koley[37] らはその戦略を人間とエージェントの交渉問題で評価と解析を行い、あらゆる相手に適応できる柔軟性をもつことができることを示した。

## 7.2 その他の応用例

自動交渉技術は、現実世界の人手で行っている交渉をエージェント間の交渉に置き換えることができる。そのため、複数の主体間の交渉や調整が発生するさまざまなサービスに対して、自動交渉技術を適用できる。

サプライチェーンマネジメントに自動交渉技術を取り入れた事例がある [29,32]。各工場を一つのエージェントと捉えて、工場間の取引量や単価の調整を自動交渉で行うものである。また、サプライチェーンマネジメントの物流に着目した研究も出始めている [38]。これは、複数のトラックにおける荷物の配送を適切に分配しながら、各トラックのルートを適切に決定する問題である。複数のトラック間で、運搬する荷物を交換することでお互い得になる場面が多数発生することから、その調整に自動交渉技術が適用されている。

自動交渉はさまざまなイベントスケジューリング問題にも適用されている。複数のイベントへの参加者にスケジュールのコンフリクトがある場合に、自動交渉を用いて、適切なイベントスケジューリングを行うことができる。CMRadar[39] は、各個人のカレンダーマネジメントを行いながら、電子メールなどの通知、参加者間の交

渉をすべて自動で行うシステムである。そのほかに有名な応用例として、日や時間単位で、契約体系や電力の料金などを決定する必要があるスマートグリッド [40] への自動交渉の導入、サービス提供者と利用者で毎回行われる Web サービスにおける権限管理とその契約に関する交渉の自動化 [41] などがある。このように、クラウドソーシング、電子商取引、グリッドコンピューティング、資源分配問題など、さまざまな分野に自動交渉技術が応用され、それらに対応したシステム開発が続けられている。これは、国外だけではなく国内でも広まりつつあり、自動交渉技術がどのような業界に応用できるかに関する議論が進められている [42]。

## 8. おわりに

本稿では、マルチエージェントシステムにおける自動交渉の研究と応用例の紹介をおこなった。最初に、複数論点交渉問題の定式化と代表的な交渉解を説明したのちに、ゲーム理論に基づくアプローチ、ヒューリスティクスに基づくアプローチに大別して、自動交渉に関する重要な知見や研究成果を示した。また、実際に自動交渉戦略などを実装する際に重要な自動交渉のプラットフォームも示すとともに、自動交渉の様々な応用例を紹介した。

自動交渉に関する研究成果はさまざまな現実世界の問題に応用できるとともに、それを支援するためのプラットフォームの開発も着実に進んでいる。自動交渉技術が現実世界のさまざまな課題解決に大きな役割を果たすことを願っている。

(2022 年 7 月 4 日受付)

## 参考文献

- [1] J. F. Nash: The bargaining problem; *Econometrica*, Vol. 18, No. 2, pp. 155–162 (1950)
- [2] N. R. Jennings, P. Faratin, A. R. Lomuscio, S. Parsons, M. J. Wooldridge and C. Sierra: Automated negotiation: prospects, methods and challenges; *Group Decision and Negotiation*, Vol. 10, No. 2, pp. 199–215 (2001)
- [3] S. Kraus: *Strategic Negotiation in Multiagent Environments, Intelligent robots and autonomous agents*, MIT Press (2001)
- [4] S. Fatima, S. Kraus and M. Wooldridge: *Principles of Automated Negotiation*, Cambridge University Press (2014)
- [5] A. Rubinstein: Perfect equilibrium in a bargaining model; *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, pp. 97–109 (1982)
- [6] R. Aydoğan, D. Festen, K. V. Hindriks and C. M. Jonker: Alternating offers protocols for multilateral negotiation; *Modern Approaches to Agent-based Complex Automated Negotiation*, pp. 153–167, Springer International Publishing (2017)

- [7] J. F. Nash Jr.: The bargaining problem; *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, pp. 155–162 (1950)
- [8] E. Kalai, M. Smorodinsky, et al.: Other solutions to Nash’s bargaining problem; *Econometrica*, Vol. 43, No. 3, pp. 513–518 (1975)
- [9] U. Endriss: Monotonic concession protocol for multilateral negotiation; *Proceedings of the International Conference on Autonomous Agents (AAMAS 2006)*, pp. 392–399 (2006)
- [10] S. S. Fatima, M. J. Wooldridge and N. R. Jennings: Multi-issue negotiation under time constraints; *Proceedings of The First International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems, (AAMAS 2002)*, pp. 143–150 (2002)
- [11] S. S. Fatima, M. J. Wooldridge and N. R. Jennings: Optimal negotiation of multiple issues in incomplete information settings; *Proceedings of 3rd International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS 2004)*, pp. 1080–1087 (2004)
- [12] S. S. Fatima, M. Wooldridge and N. R. Jennings: Multi-issue negotiation with deadlines; *Journal of Artificial Intelligence Research*, Vol. 27, No. 1, pp. 381–417 (2006)
- [13] S. S. Fatima, M. J. Wooldridge and N. R. Jennings: An analysis of feasible solutions for multi-issue negotiation involving nonlinear utility functions; *Proceedings of 8th International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS 2009)*, Vol. 2, pp. 1041–1048 (2009)
- [14] T. Baarslag, K. Hindriks, M. Hendrikx, A. Dirkzwager and C. Jonker: Decoupling negotiating agents to explore the space of negotiation strategies; *Novel Insights in Agent-based Complex Automated Negotiation*, pp. 61–83, Springer (2014)
- [15] P. Faratin, C. Sierra and N. R. Jennings: Negotiation decision functions for autonomous agents; *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 24, No. 3, pp. 159–182 (1998)
- [16] T. Baarslag, M. Hendrikx, K. V. Hindriks and C. M. Jonker: Measuring the performance of online opponent models in automated bilateral negotiation; *Proceedings of the 25th Australasian Joint Conference on Advances in Artificial Intelligence (AI’12)*, pp. 1–14 (2012)
- [17] T. Baarslag, M. Hendrikx, K. Hindriks and C. Jonker: Predicting the performance of opponent models in automated negotiation; *2013 IEEE/WIC/ACM International Joint Conferences on Web Intelligence (WI) and Intelligent Agent Technologies (IAT)*, Vol. 2, pp. 59–66 (2013)
- [18] T. Baarslag, K. Hindriks and C. Jonker: Acceptance conditions in automated negotiation; *Studies in Computational Intelligence*, Vol. 435, pp. 95–111, Springer Verlag (2013)
- [19] T. Baarslag, K. Hindriks and C. Jonker: A tit for tat negotiation strategy for real-time bilateral negotiations; *Complex Automated Negotiations: Theories, Models, and Software Competitions*, pp. 229–233, Springer (2013)
- [20] P. Faratin, M. Klein, H. Sayama and Y. Bar-Yam: Simple negotiating agents in complex games; *8th International Workshop of Intelligent Agents (ATAL 2001)*, pp. 367–376 (2001)
- [21] S. S. Fatima, M. Wooldridge and N. R. Jennings: Optimal negotiation strategies for agents with incomplete information; *Proceedings of 8th International Workshop of Intelligent Agents VIII (ATAL 2001)*, pp. 377–392 (2002)
- [22] M. Klein, P. Faratin, H. Sayama and Y. Bar-Yam: Protocols for negotiating complex contracts; *IEEE Intelligent Systems*, Vol. 18, No. 6, pp. 32–38 (2003)
- [23] T. Ito, H. Hattori and M. Klein: Multi-issue negotiation protocol for agents: Exploring nonlinear utility spaces; *Proceedings of the 20th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI 2007)*, pp. 1347–1352 (2007)
- [24] K. Fujita, T. Ito and M. Klein: Efficient issue-grouping approach for multiple interdependent issues negotiation between exaggerator agents; *Decision Support Systems*, Vol. 60, pp. 10–17 (2014)
- [25] J. Bakker, A. Hammond, D. Bloembergen and T. Baarslag: Rlboa: A modular reinforcement learning framework for autonomous negotiating agents; *Proceedings of the 18th International Conference on Autonomous Agents and MultiAgent Systems (AAMAS 2019)*, pp. 260–268 (2019)
- [26] P. Bagga, N. Paoletti, B. Alrayes and K. Stathis: A deep reinforcement learning approach to concurrent bilateral negotiation; *Proceedings of the Twenty-Ninth International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI 2020)*, pp. 297–303 (2020)
- [27] A. Sengupta, Y. Mohammad and S. Nakadai: An autonomous negotiating agent framework with reinforcement learning based strategies and adaptive strategy switching mechanism; *Proceedings of the 20th International Conference on Autonomous Agents and MultiAgent Systems (AAMAS 2021)*, pp. 1163–1172 (2021)
- [28] C. Jonker, R. Aydogan, T. Baarslag, K. Fujita, T. Ito and K. Hindriks: Automated negotiating agents competition (ANAC); *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence (AAAI 2017)*, Vol. 31, No. 1 (2017)
- [29] モハammad, 中台, 森永, 藤田: サプライチェーンマネジメントリーグ (SCML) — 製造バリューチェーンにおける自動交渉エージェントを想定した競技会 —; 人工知能, Vol. 35, No. 3, pp. 351–358 (2020)
- [30] 藤田, 森, 伊藤: ANAC: Automated negotiating agents competition (国際自動交渉エージェント競技会); 人工

- 知能, Vol. 31, No. 2, pp. 237–247 (2016)
- [31] R. Lin, S. Kraus, T. Baarslag, D. Tykhonov, K. Hindriks and C. M. Jonker: Genius: An integrated environment for supporting the design of generic automated negotiators; *Computational Intelligence*, Vol. 30, No. 1, pp. 48–70 (2014)
- [32] Y. Mohammad, E. A. Viqueira, N. A. Ayerza, A. Greenwald, S. Nakadai and S. Morinaga: Supply chain management world - a benchmark environment for situated negotiations; *Proceedings of the 22nd International Conference on Principles and Practice of Multi-Agent Systems (PRIMA2019)*, pp. 153–169, Springer International Publishing (2019)
- [33] J. Mell and J. Gratch: IAGO: interactive arbitration guide online (demonstration); *Proceedings of the 2016 International Conference on Autonomous Agents & Multiagent Systems*, pp. 1510–1512 (2016)
- [34] J. Mell, G. M. Lucas and J. Gratch: Varied magnitude favor exchange in human-agent negotiation; *Proceedings of the 2020 International Conference on Intelligent Virtual Agents (IVA '20)*, pp. 1–8 (2020)
- [35] R. H. Kilmann and K. W. Thomas: Developing a forced-choice measure of conflict-handling behavior: The mode instrument; *Educational and Psychological Measurement*, Vol. 37, No. 2, pp. 309–325 (1977)
- [36] K. Fujita: Compromising adjustment strategy based on TKI conflict mode for multi-times bilateral closed negotiations; *Computational Intelligence*, Vol. 34, No. 1, pp. 85–103 (2018)
- [37] G. Koley and S. Rao: Adaptive human-agent multi-issue bilateral negotiation using the Thomas-Kilmann conflict mode instrument; *22nd IEEE/ACM International Symposium on Distributed Simulation and Real Time Applications (DS-RT 2018)* (2018)
- [38] D. de Jonge, F. Bistaffa and J. Levy: A heuristic algorithm for multi-agent vehicle routing with automated negotiation; *Proceedings of the 20th International Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems (AAMAS 2021)*, pp. 404–412 (2021)
- [39] P. J. Modi, M. Veloso, S. F. Smith and J. Oh: Cmradar: A personal assistant agent for calendar management; *Agent-Oriented Information Systems II*, pp. 169–181, Springer (2005)
- [40] M. Alam, S. D. Ramchurn and A. Rogers: Cooperative energy exchange for the efficient use of energy and resources in remote communities; *Proceedings of the 2013 International Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems (AAMAS 2013)*, pp. 731–738 (2013)
- [41] T. Baarslag, A. T. Alan, R. Gomer, M. Alam, C. Perera, E. H. Gerding and M. C. Schraefel: An automated negotiation agent for permission management; *Proceedings of the 16th Conference on Autonomous Agents and MultiAgent Systems (AAMAS 2017)*, pp. 380–390 (2017)
- [42] 産業競争力懇談会 COCN: 産業競争力懇談会 2017 年度プロジェクト最終報告, 人工知能間の交渉・協調・連携 (2018); <http://www.cocn.jp/report/theme98-L.pdf>

#### 著者略歴

藤田 桂英



2011 年名古屋工業大学大学院情報工学専攻博士後期課程修了。2010 年から 2011 年日本学術振興会特別研究員 (DC1/PD), 2010 年から 2011 年マサチューセッツ工科大学訪問学生, 2011 年から 2012 年東京大学大学院工学系研究科特任研究員, 2012 年より東京農工大学大学院工学研究院准教授, 2018 年より産業技術総合研究所人工知能研究センター招聘研究員兼任, 現在に至る。マルチエージェントシステム, 自動交渉, テキストマイニングに興味を持つ。博士 (工学)。IEEE, AAAI, 電子情報通信学会, 人工知能学会, 情報処理学会, 各会員。