

5

マルチエージェントの 自動交渉モデルとその応用

■伊藤孝行 名古屋工業大学大学院工学研究科産業戦略工学専攻/情報工学科

自動交渉エージェント

自動交渉エージェントの研究分野は、人間の交渉を支援もしくは代行する計算機プログラムを実現することを目指している。また、実際の交渉を分析することで、社会や世界のさまざまな課題に対して人類がどのように合意形成をなし得るのかについて示唆を与えることができる。

本稿では、まず本研究分野の基本的な動機付けの部分や定義を本章で説明する。次章の「効用関数」では交渉において最も大事な人間の価値観を定義づける効用関数の研究について簡単に紹介する。交渉に関する研究はゲーム理論、人工知能、マルチエージェントシステムの分野で多く行われており、そのアプローチは「ゲーム理論的アプローチ」の章で紹介するゲーム理論的アプローチと、「ヒューリスティックアプローチ」の章で紹介するヒューリスティックアプローチに大別される。「交渉エージェント競技会 ANAC」の章では、交渉における戦略をプログラムによって実現し、共通のテストベッドで競い合うという試みとして交渉エージェント競技会 ANAC について紹介する。自動交渉技術は、あらゆる場面に適用可能であり、「交通管理システムへの応用」の章では自動交渉を未来の交通管理システムに適用しようという試みを紹介する。

交渉 (Negotiation) は、人間の社会生活の基盤となる根源的な活動である。人間は社会に属すと互いに競合する目的や興味を持つ。つまり、社会において人間は根源的に交渉を行うニーズを持っている。マルチエージェントの分野⁹⁾では、エージェント間の相互作用の分析に関して多くの研究がなされている。交渉は相互作用の中の1つである。

交渉とは、互いに競合する目的や興味 (Conflicting goals or interests) を持つエージェント間の相互作

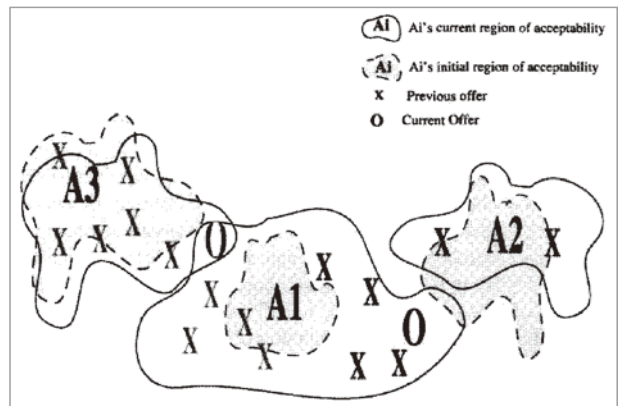


図-1 N. R. Jennings らの交渉の定義 (文献 3) より抜粋)

用 (Interaction) の形体の1つである。交渉を通して、エージェントはお互い合意できる結果 (Outcome) を得ようとする。結果は、リソース (サービス、時間、お金、商品、効用、など) をどのように割り当てるかのように表現される場合が多い。ここで、エージェント同士は競合している (Conflicting) ことが仮定される。つまり、エージェント同士は、同時に満たされるようなことが部分的または全体的にできない状況にある。

自動交渉 (Automated negotiation) の研究では、情報技術や計算論的な観点から交渉に関する研究が進められる。たとえば、エージェントプログラムによる完全な自動交渉の方法や、人間の交渉を計算機プログラムで仲介する方法などがある。N. R. Jennings らのグループは、マルチエージェントの自動交渉の分野を世界で最も早く提唱したグループの1つである。彼らによれば、交渉 (Negotiation) とは、可能な合意 (候補) の空間の分散探索と見ることができる (Negotiation can be viewed as a distributed search through a space of potential agreements)³⁾。可能な合意点の集合が探索問題空間であり、個々のエージェントがなるべく合意を得るように分散探索するのである (図-1)。

図-1では、3つのエージェント A1, A2, および A3

の交渉空間の直感的な例を示している（交渉空間の表し方はいくつかあり、「ゲーム理論的アプローチ」の章のゲーム理論の表し方がスタンダードである。図-1はスタンダードな表し方ではない）。初期の状態では、提案（Offer）を受け入れ可能な領域（Region of acceptability）は狭いが、提案を繰り返しながら、受け入れ可能な領域を広くしていくプロセスを示している。ここでは、交渉において基本的には交渉者が自分の利益だけに固執せず「妥協」をする必要性が示唆されている。

交渉において考えるべき構成要素は以下の4つである：(1) 交渉の目的となる結果、(2) 交渉に参加するエージェント、(3) 交渉プロトコル、および、(4) エージェントの選好に基づく戦略。

【(1) 交渉の目的となる結果】

結果（Outcome）は、合意（Agreement）、ディール（Deal）、または妥結と呼ばれる。結果は、離散的か連続的か、単一論点か複数論点か、などで分類することができる。

【(2) 交渉に参加するエージェント】

参加するエージェントはプレイヤーと呼ばれることもある。2人だけの交渉を2者間交渉（Bilateral negotiation）と呼び、複数の場合はマルチパーティ交渉（Multi-party negotiation）と呼ぶ。

たとえば、家を購入する交渉をする場合を示す。目的は、取引する家に対して合意することである。家に関して、論点は、価格、デザイン、場所など、複数想定できる。参加するエージェントは、買い手と売り手の2エージェントである。

【(3) 交渉プロトコル】

交渉プロトコルは、交渉をする場合にエージェントが従う相互作用のルールである。「ゲーム理論的アプローチ」の章で示す交互提案プロトコル、「ヒューリスティックアプローチ」の章で示す仲介プロトコルやオークションは、交渉プロトコルである。

【(4) エージェントの選好に基づく戦略】

エージェントは、それぞれ選好を持っている。選好は効用関数で表現することが一般的で、合意の成否に大きく影響する。選好を表現する効用関数は次章で詳しく説明する。交渉では、選択する戦略によって、「どのよう

な提案をするか」、「どのような情報を明かすか」が決まる。設定にもよるが、「どのような提案を受け入れるか」も戦略によって決まる。合理的なエージェントは、選好に関して最も良い結果を得ることができそうな戦略を選択する。「交渉エージェント競技会 ANAC」の章で示す交渉エージェント競技会 ANAC では、エージェントの戦略を共通のテストベッドで競い合うことに主眼が置かれている。

以上が、本稿で扱う交渉である。交渉に関する研究はゲーム理論的アプローチ（「ゲーム理論的アプローチ」の章）とヒューリスティックアプローチ（「ヒューリスティックアプローチ」の章）に大別される。2つのアプローチには概念や用語について多く重なりあう点がある。主な違いとしては、ゲーム理論的アプローチでは、数学的に望ましい交渉の結果（解）を定義したり、望ましいプロトコルの均衡点の存在を示すことに主眼が置かれる。一方でヒューリスティックなアプローチでは、複雑な効用関数や不確実性を前提とした戦略、交渉における計算コスト、相手の提案の予測、相手の効用関数の学習などに主眼が置かれる。

効用関数

効用理論に関する研究は、経済学、ゲーム理論、経営工学をはじめ、さまざまな分野で古くから多くの研究が行われている。効用理論は人間の価値観を定量化することを目的としている。人間の代理で交渉し、合意形成をするエージェントを構築するには、人間の好みや価値をエージェントに伝える必要がある。そのためには、人間の好みや価値を、効用関数という形で表現し、ソフトウェアやコンピュータシステムであるエージェントに与える必要がある。効用理論の歴史は、1783年に Daniel Bernoulli が発表した以下のサンクトペテルブルグのパラドックスから始まっているといわれている。

【サンクトペテルブルグのパラドックス】

コインを繰り返し投げ、 n 回目 ($n=1, 2, \dots$) で初めて表が出たら 2^n 円貰えるとする。ただし、このゲームに参加するには、参加料を支払う必要がある。参加料はいくら程度までなら支払えるだろうか。このゲームにおける、期待金額を計算する。コイン

の表と裏の出る確率を $1/2$ とする。最初の回に表が出る確率は $1/2$ である。2 回目に初めて表が出る確率は $(1/2)^2$ である。すなわち、 n 回目まで初めて表が出る確率は $(1/2)^n$ となる。したがって、得られる金額の期待値は、 $(1/2)2 + (1/2)^2 2^2 + \dots + (1/2)^n 2^n + \dots = 1 + 1 + \dots = \infty$ 。すなわち、金額の期待値を基準に参加するかどうかを考えるなら、いくら支払っても参加して良いことになる。しかし、現実にはそうではない。偶然性を含む意思決定問題においては、金額や金額の期待値だけが必ずしも人間が意思決定するときの評価基準にはなっていないことが示されている。

そこで、Bernoulli は、客観的に決まる金額に対して、主観的な評価を数値化した**効用**という概念を導入した。たとえば、貨幣 x に対して効用 $u(x) = \log x$ を定義することで、上記のパラドックスに対する 1 つの解決法を示した。効用の期待値は、 $(1/2)\log 2 + (1/2)^2 \log 2^2 + \dots + (1/2)^n \log 2^n + \dots = (1/2 + 2/2^2 + \dots + n/2^n + \dots)\log 2 = 2\log 2 = \log 4$ となる。参加の意思決定を、効用の期待値を基準にするなら、参加料が 4 円以下なら参加しても良いことになる。厳密には、Bernoulli の解決法そのものにはその後もさまざまな議論があるが、効用という概念を導入したことに大きな意義がある。

【期待効用仮説】

意思決定者の選択することができる代替案 a と代替案 b があるとする。意思決定者が、代替案 a を選択したとき、結果 x_i が得られる確率 p_i 、および代替案 b を選択したとき、結果 y_i が得られる確率 q_i とする。そして、 $U(a) = \sum_i p_i \times u(x_i)$ と $U(b) = \sum_i q_i \times u(y_i)$ と定義する。ここで $u(\cdot)$ は結果 (x_i など) に対する効用関数であり、 $U(\cdot)$ は、代替案 (a や b) に対する期待効用関数である。

John von Neumann らは「意思決定者は期待効用を最大にする代替案を選択する」という期待効用仮説を提唱した。すなわち、 $a \succ b$ は「代替案 a のほうが代替案 b より望ましい」であり、 $a \sim b$ は「代替案 a と代替案 b は同等の価値がある」であるとする (選好順序と呼ばれる)。このとき、 $a \succ b \Leftrightarrow U(a) > U(b)$ であり、 $a \sim b \Leftrightarrow U(a) = U(b)$ となり、期待効用を最大化され

るものが最も望ましいということになる。そして、von Neumann らは、上記の期待効用関数が、一定の公理系のもとで存在することを示した。また、von Neumann 以外にも、同じような公理系を示した研究もある。

【序数的効用と基数的効用】

Von Neumann らが示した期待効用仮説では、期待効用を数量的に比較できるということであり、**基数的効用**と呼ばれる。すなわち、基数的効用を用いる場合、2 つの代替案の効用の差異の大きさはなんらかの意味を持つとされている。一方、**序数的効用**では、2 つの代替案に対しては、好ましさの順序のみが意味を持つ。たとえば、 $a \succ b$ は、代替案 a は代替案 b より好ましいという意味**だけ**を持ち、その差や大きさは議論しない。序数的効用と基数的効用のどちらが良いかということはない。

【多属性効用関数】

ある結果 (代替案) x が、 n 個の属性 X_1, X_2, \dots, X_n によって、特徴付けられているとする。たとえば、身近な例では、車を買おうとするとき、車の色、形、馬力、値段、などの属性を評価基準として、車を評価する。このとき結果 x はベクトル $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 、 $x_1 \in X_1, x_2 \in X_2, \dots, x_n \in X_n$ で表すことができる。起こり得るすべての結果 X は直積集合 $X_1 \times X_2 \times \dots \times X_n$ で表され、 n 属性空間と言う。 n 属性効用関数は、 $X = X_1 \times X_2 \times \dots \times X_n$ 上に $u : X_1 \times X_2 \times \dots \times X_n \rightarrow R$ として定義される。多属性効用関数を前提とする場合、複数の属性を同時に考慮して選好判断をする必要があり、困難になる。そこで、属性の次元を減少する分解表現などが広く研究された。特に、Keeney and Raiffa の効用独立性や Fishburn の加法独立性は有名な手法である。すなわち、直感的に言えば、各属性が他の属性に依存しないときには各属性の重み付きの加法形もしくは、重み付きの乗法形として表すことができる。逆にこれは、評価基準間に一切の依存を認めないことになり、現実的には厳しい制約である。

ゲーム理論的アプローチ

ここでは、協力ゲーム、交渉問題、およびその解概

		B		
		1	2	3
A	1	6	4	0
	2	8	5	1
	3	9	7	2

表-1 利得行列

念について文献 11) に従って説明する。ゲーム理論¹¹⁾における、協力ゲームでは各エージェント(プレイヤー)は話し合い、共同で何らかの戦略を選択し、その結果に従って行動することを約束する。ゲーム理論の戦略形ゲームでは、各エージェントが選択する戦略によって得られる利得を表の形で示すことによってゲームを表現する。表-1に利得行列の例を示す。表-1では、エージェントAの戦略を行で表現し、エージェントBの戦略を列で表現しているとする。たとえば、表-1中に下線で示すように、エージェントAとエージェントBがそれぞれ戦略1と戦略2を選択したとき、Aは4、およびBは8を利得として得られることを示している。

話し合いがないとき、つまり非協力ゲームとして考えた場合、表-1の例では各エージェントは支配戦略(相手がどの戦略をとっても自分にとって最良の戦略。存在しない場合もある)を持つ。そのため、均衡点は、エージェントAとエージェントBが、それぞれ戦略3と戦略3を選択した場合で、得られる利得はそれぞれ、2と2となる(支配戦略均衡と呼ばれる)。つまり、エージェントAの戦略3とエージェントBの戦略3という点は話し合いがないときに最低保証される利得の組であると言える。このような点を交渉問題の基準点という(図-2のc)。

2人の中で十分に話し合いを行い、ともに戦略1で合意すれば、効用は(6, 7)に改善される。これは、2人が支配戦略をとった場合の(2, 2)よりも社会的には良い。

エージェントの集合を $N = \{1, 2, \dots, n\}$ とする。交渉が不成立の場合に得られると予想される効用(利得)ベクトルを $c = (c_1, c_2, \dots, c_n)$ とする。cを基準点と呼ぶ。n人のエージェントが合意のうえでの戦略を共同戦略

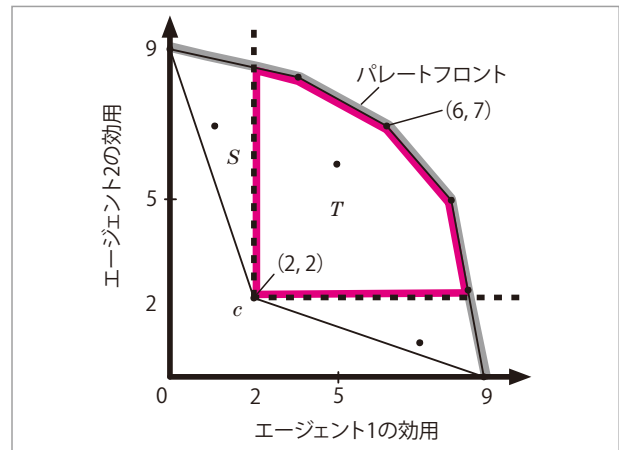


図-2 基準点と実現可能集合

と呼ぶ。共同戦略をとったときに実現すると期待される利得ベクトルの集合 $S = \{x = (x_1, x_2, \dots, x_n)\}$ を実現可能集合と呼ぶ。

実現可能集合Sは以下の条件を満たすものとする。

- (1) Sはn次元ユークリッド空間 R^n の有界閉な凸集合である。
- (2) Sは基準点cを含む。
- (3) Sはすべての $i \in N$ について $x_i > c_i$ なる点xを少なくとも1つ含む。

ゲーム理論では一般に(1)が仮定されるが、現実的には強い仮定である。

プレイヤーの集合N, 実現可能集合S, および基準点cが与えられたとき、この3つの要素の組 (N, S, c) をn人交渉問題という。交渉問題 (N, S, c) が与えられたとき、すべてのプレイヤーが納得するSに属するただ1つの点 $s = (s_1, s_2, \dots, s_n)$ が選び出されたとき、この点を交渉の妥結点という。交渉問題 (N, S, c) が与えられたとき、 (N, S, c) に対して、ただ1つの妥結点 $s \in S$ を対応させるルールを、この交渉問題の解(交渉解)という。

対応させるルールは、関数Fとして $F(N, S, c) = s$ と書く。つまり、交渉解すなわちルールFが決まれば、妥結点は基準点に応じて一意に定まる。

【交渉の妥結点の満たすべき性質】

(1) 個人合理性

利得ベクトル $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ が、次の条件を満たすとき、xは個人合理的であるという。 $c = (c_1, c_2, \dots, c_n)$ を基準点とすると、 $x_1 \geq c_1, x_2 \geq c_2, \dots, x_n \geq c_n$ が

成り立つ。 $F(N, S, c)$ の妥結点 s が個人合理的であるとき、解 F は個人合理的であるという。

交渉の基準点 c は交渉が不成立な場合に得られると予想される点であるから、交渉が成立した場合には、各プレイヤーに、この点における利得より大きい利得を保証しなければならない。したがって、 S が個人合理的な妥結点を含むことが、交渉が成立するための最低の条件である。 $c = \{0, 0, \dots, 0\}$ が仮定されることも多い。

(2) パレート最適性

交渉の妥結点 $F(N, S, c) = s$ は実現可能集合 S のパレート最適な点でなければならない。すなわち、もし $x (\in R^n)$ が $x_i \geq y_i, i = 1, 2, \dots, n$ (弱パレート支配) かつ $x \neq s$ ならば、 x は S の点ではない。

パレート最適な点とは、あるエージェントの利得を増やそうとしたときに、もう一方のエージェントの利得を減らす必要がある点のことを言う。

実現可能集合が上に挙げた3つの条件を満たし、基準点を c としたとき、次の条件を満たす実現可能集合 S の部分集合 T を交渉領域という： $T = \{x \in S : x_i \geq c_i, i = 1, 2, \dots, n\}$ 。

交渉解として、直感的な均等解と功利主義的解を示し、その後、ナッシュ解を示す。

【均等解と功利主義的解】

均等解はエージェント間で利得を均等に配分するというルールに基づく解である。任意の交渉問題 (N, S, c) に対して、妥結点を s とすると、 s は、 $s_1 - c_1 = \dots = s_n - c_n$ となる S の最大点である。均等解はパレート最適とは限らない。

功利主義的解は、すべてのエージェントの利得の和を最大にする点を妥結点とする。パレート最適な点では、常に利得の和が一定であるが、そのような場合にただ1つの妥結点を決めることができない。

【ナッシュ解⁷⁾】

ナッシュ解は、交渉領域の中で、各エージェントの基準点からの利得の増分の積を最大にする点を妥結点とするルールである。

• ナッシュ積

ナッシュ積とは、各エージェントの基準点からの利得の増分の積 $\prod_{i \in n} (x_i - c_i) = (x_1 - c_1) \times \dots \times (x_n - c_n)$

である。

• ナッシュ交渉解

任意の交渉問題 (S, c) について、ナッシュ解 $N(S, c)$ はナッシュ積を最大にする S の点 $s = (s_1, s_2, \dots, s_n)$ である。すなわち妥結点 s は、 $(s_1 - c_1) \times \dots \times (s_n - c_n) = \max_{x \in S, x \geq c} (x_1 - c_1) \times \dots \times (x_n - c_n)$

二人交渉問題のナッシュ解は、個人合理性、パレート最適性をはじめ複数の望ましい性質を持つ。

【Rubinstein の交渉モデル⁸⁾】

Rubinstein は、ナッシュ解に到達する具体的な交渉 (Bargaining) のモデルとして、2人交互提案 (Alternating Offer) ゲームを提案した。非常にシンプルなモデルで、現在交渉問題ではよく取り上げられる。第1期 ($t=1$) にエージェント1が分配案として、パレートフロント上の集合 P 上の一点をエージェント2にオファーする。パレートフロントとは、パレート最適な点の集合のことを言う。たとえば、前出の図-2では、グレーのラインとなる。

エージェント2が了承すれば終了、了承しなければ第2期に入り、今度はエージェント2がオファーする。これを交互に繰り返していく。図-3に概念図を示す。

エージェント i は共通の割引率 $\delta_i (0 \leq \delta_i \leq 1)$ を持つとする。すなわち、エージェント i が第 t 回目のオファーで得られる現在効用は割引されて $u_i = \delta_i^{t-1} x_i$ と定義される。ここで x_i はエージェント i への利得の分配 (分け前) とし、 $x_1 + x_2 = 1$ とする。Rubinstein は、上記の割引率が存在するという設定において、2人交互提案ゲームにおいて均衡点が唯一存在することを示した。

そして Rubinstein は、ある種の均衡点では、最初のラウンド ($t=1$) において、直ちに合意が実現し、利得の分配は先手の分配は $x_1 = (1 - \delta_2) / (1 - \delta_1 \delta_2)$ となり、後手の分配は $x_2 = (\delta_2 - \delta_1 \delta_2) / (1 - \delta_1 \delta_2)$ となることを示した。さらに Rubinstein は、2人の割引率が限りなく1に近いとき、2人の提案が、ナッシュ解に収束することを示した。

しかし、上記の Rubinstein の分析には締切時間 (deadline) が考慮されておらず、現実的には応用が難しい。「交渉エージェント競技会 ANAC」の章で示す交渉エージェント競技会 ANAC では締切時

間が考慮されている。

ヒューリスティックアプローチ

前章で見たように、ゲーム理論を用いたアプローチでは、解が存在するかどうか、もしくは、均衡が存在するかどうか重点が置かれており、個々のエージェントの行動、推論、学習などにはそれほど重点が置かれていない。一方、交渉は、ゲーム理論を用いた数学的アプローチに限らず、マルチエージェントシステムや分散人工知能の分野でも、伝統ある基本的な問題として認識されており1980年代から議論されている。本章ではマルチエージェントシステムや分散人工知能でのアプローチをヒューリスティックアプローチと呼ぶ。特にヒューリスティックアプローチの1つとして、複数論点交渉問題について解説する。複数論点交渉問題では、実社会での交渉を前提にして、大規模な交渉可能領域を想定している。したがって、その基本的な興味は、交渉プロトコル、エージェントのアルゴリズムで最適な提案生成や合意判定、モデルの柔軟さ、および、不確実な效用空間における交渉相手に関する学習といった点にある。

複数論点交渉問題に関して、多くの研究が行われているが、既存の多くの研究では論点の独立性が仮定されており、エージェントの効用は線形の効用関数として表現可能であった。現実世界の交渉では各論点が独立している場合は稀であり、大きさが変化すれば価格が変化するなど各論点が互いに依存関係である場合が多い。さらに、論点の独立性が仮定された交渉問題において良質な合意案が発見できる手法でも、各論点が相互依存関係にある場合には有効に働かないと示されている⁵⁾。ここでは、より現実的かつ計算量が膨大である、複数の論点が相互依存関係にある複雑な交渉問題に注目する。

各論点が相互依存関係にある場合に有効な効用関数として制約に基づく効用関数が考えられる²⁾。各論

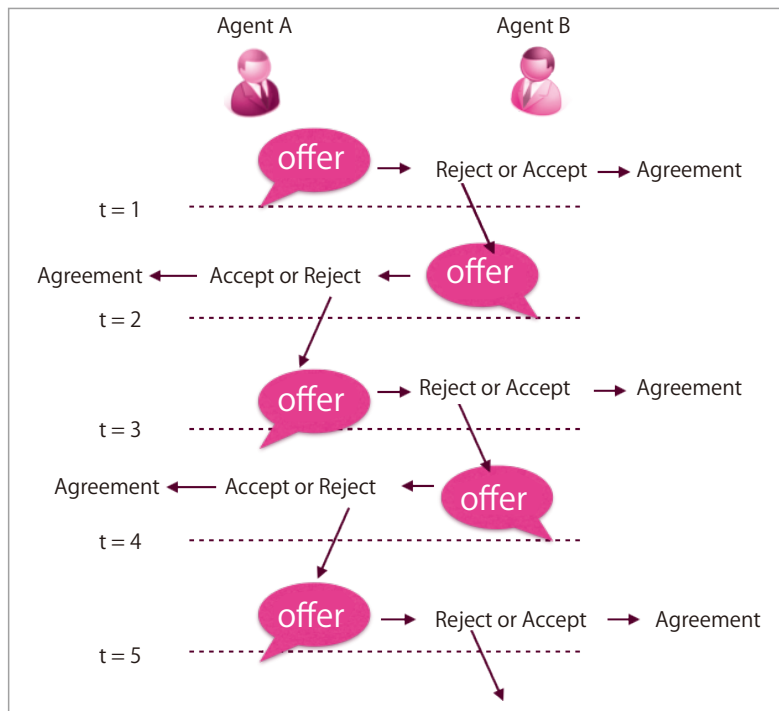


図-3 交互提案ゲーム

点が独立している場合、効用関数は単純な線形関数で表現できたが、各論点が相互依存関係の場合は複雑で非線形な効用関数を定義する必要がある。制約とは、図-4の右上の効用関数Aが示すように、論点1の値が3から7、論点2の値が4から6のときに効用55を持つように表現される。エージェントはこのような多数の制約を独自に持っている。また、各エージェントが持つ効用関数をすべて集積させ、効用空間を表現する。図-4の効用空間が示すように、エージェントは複雑な効用空間を持つ。

制約に基づく効用関数に対して有効な手法としてオークションに基づく交渉手法が提案されている²⁾。オークションに基づく交渉プロトコルでは、エージェント自身がサンプリングを行い自身が合意したい入札情報を生成するフェーズ、そして、途中で交渉を管理するメディアータ(中間人)がエージェントからの入札情報から合意案を発見するフェーズからなる。オークションに基づく交渉手法はエージェントが持つすべてのプライバシー情報を公開することなく、各論点が相互依存関係の場合でも良い合意案を発見できることが示されている。

しかし、各論点が相互依存関係である複数論点交渉プロトコルに対して、2つの重要な課題が存在する。

(i) 交渉の参加者がプライバシー情報を公開することで被る不利益を考慮する必要がある。交渉において自身の効用情報などプライバシー情報を他者に公開することは次回以降の交渉で不利益を被る可能性がある。また、セキュリティの観点から見てもプライバシー情報の公開は危険である。(ii) 交渉プロトコルに対してスケーラビリティの高さが求められる。交渉における論点数やエージェント数が大きい場合、計算量が莫大である。以上の2つの課題に対して、多くの研究が継続的に行われている。

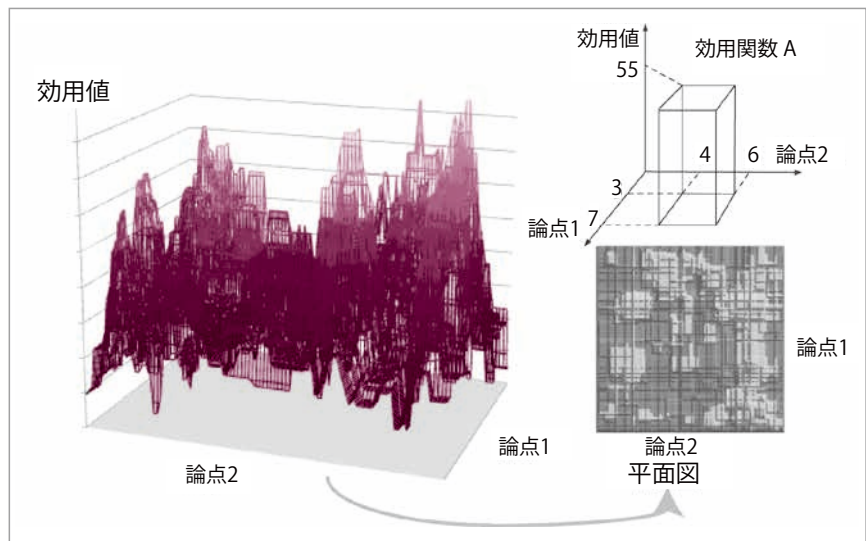


図-4 複雑な効用関数と効用空間の例

交渉エージェント競技会 ANAC

ANACは効用情報非公開下での二者間多論点交渉問題 (Bilateral multi-issue closed negotiation) を対象として、参加者が個々に作成した自動交渉エージェントを競わせる競技会である¹⁾。本大会で対象としている他者の効用情報が公開されない状況下での交渉は現実世界でよく起こり得る交渉のクラスである。また、効用などの設定もより現実に近い交渉問題 (売買の際の値段交渉等) が対象となっている。

交渉プロトコルとしては「ゲーム理論的アプローチ」の章で紹介した交互提案プロトコルが採用されている。具体的にはたとえば、エージェント A と B が交渉を行う場合を考える。まず、エージェント A が相手に合意案候補 (Bid) を提案する。その後、相手側つまりエージェント B が提示された合意案候補に対して、以下の Accept, Offer, そして 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お互い合意案に対する効用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: エージェント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。また、得られる効用値も最低値の 0 である。

エージェントが動作を選択後、もし Offer が選択された場合、エージェント A がエージェント B から提案された合意案候補に対して動作を選択する。以上の操作を締切時間 (Deadline) まで継続する。締切時間が設定されており、締切時間内に合意が形成されない場合は合意形成に失敗したものと扱われ、お互い得られる効用値は最低値の 0 である。

競技会では、本交渉プロトコルを全エージェントの総当たりで行い、最終的に得られた効用値の平均が最大のエージェントが優勝となる。また、近年はより多くの社会的効用 (相手の効用も足す) を得たエージェントにも賞が与えられる。他者の効用情報が非公開のため、ゲーム理論的アプローチを直接導入することは困難となる。一方、シミュレーションを用いた学習、統計的解析、およびヒューリスティックを基にしたアプローチが有効である。

本競技会は GENIUS と呼ばれるソフトウェアシステム^{☆1}を用いて行われる。GENIUS は交渉エージェントの開発のための共通のテストベッドの提供を目的としている。具体的には (1) 交渉ドメインおよび効用データの作成、(2) 自動交渉エージェントにおける 2 者間

☆1 <http://ii.tudelft.nl/genius/>

交渉のシミュレーション、および(3)交渉の過程や結果の解析が主な機能である。特に、解析ツールによりさまざまな交渉設定における、パレートフロント、ナッシュ交渉解など交渉において重要な解を計算し表示するため、容易に解析が可能である(図-5)。また、自動交渉エージェントの開発のためのJava APIが標準で用意されており、Javaプログラミングの基礎的な知識さえあれば自動交渉エージェントを作成できる。

本競技会では、多数の興味深い戦略を持ったエージェントのプログラムが提出されている。たとえば、ANAC2011で、Williamsら¹⁰⁾は、Gaussian Processに基づく回帰学習によって、相手の将来の行動を予測し、自らの妥協の割合を調整する戦略を実装している。本エージェントの戦略は、国際会議IJCAIなどでも発表されるなど、未知の相手に対する行動予測戦略の1つとして評価されている。

2014年の第5回ANAC2014は、国際会議AAMAS2014と同時開催でフランスのパリで開催される予定である。表-2にANACの年ごとの参加者数の変化と新しく加えられたルールを示す。まず、ANACへの参加者は年々増えている。また毎年、組織委員会において議論を重ねながら、ルールを改善している。したがって毎年同じ戦略では勝つことが難しい。

交通管理システムへの応用

本章では、自動交渉の社会シミュレーションへの応用を述べる。社会シミュレーションは、新しい社会システムを仮想の環境で検証するための方法論として注目を集めている。一般に、新しい社会システムは、社会全体を効率的にすることを目指している。ただし、全体が効率化される一方で、損をする人と得をする人が発生し不公平感が出てくる。そこで、交渉機構を用いることで、そのような不公平感をなるべく少なくするた

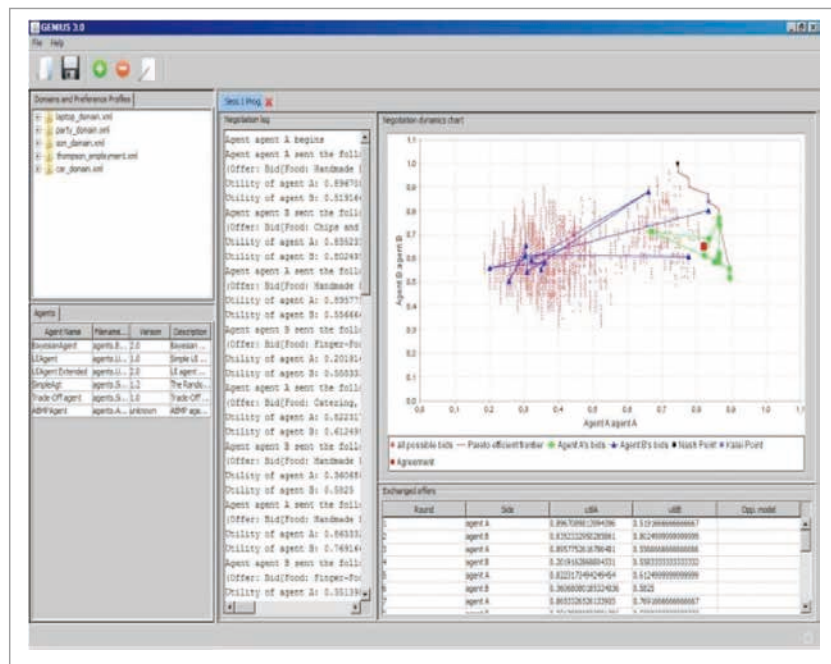


図-5 GENIUS インタフェースの例

Year	2010	2011	2012	2013	2014
参加数	7	18	17	19	21
新ルール	-	割引率	留保値	入札履歴	非線形効用

表-2 ANACの推移

めの試みがなされている。以下では、試みの1つを紹介する。

交通情報提供、ロードプライシングや交通状態に応答した信号制御など、ITS (Intelligent Transport Systems) による次世代交通システムが注目されている。特に、交通情報や経路情報の提供は車両感知器やナビゲーションシステムの普及に伴い、その技術も高度化している。

交通システムにおいて、渋滞や混雑解消を目的として間接的に共有する交通情報を Stigmergy (間接的な共有情報) と見ることができる。共有情報をもとに、各自動車のカーナビゲーションシステムなどで、経路探索を行うことで、より効率的な経路発見が可能になる。既存の交通システムでは、一般に、過去にどのくらい渋滞が発生したかなどの実績情報を共有情報としている。そこで、文献4)では、予見的な交通情報 (Anticipatory stigmergy) を共有することによる効率的な交通管理の可能性を示した。ここでは、既存の交通情報の共有手法である交通所要時間の実績情報(過去の

情報)の利用だけでなく、各車両から提出される数分後の予測位置情報(未来の情報)を収集し、見込み交通量を基に経路探索を行う予見的経路情報の共有方法を提案している。すなわち、各ドライバーは、数分後にどの道がどの程度混雑するかの、見込みの情報(予見的な交通情報)を共有することできる。文献4)では、既存の実績情報に基づく経路と予見的な交通情報に基づく経路の2つの経路選択肢を持つ車両(ドライバー)に対して、交通混雑や渋滞を回避する経路の割当手法を導入することで効率的な交通管理が実現できることを示している。

一方、予見的な交通情報を共有する場合、ドライバーはお互いの意思決定に関するプロセスが分からないため、経路選択についての振動現象が観察されている。つまり、お互いの意思決定に関する情報が分からず、多くの車は、混雑がないと予想される経路 X を選択する。さらに、 X が混雑すると分かると、多くの車が異なる経路 Y を選び、その結果今度は経路 Y が混雑してしまう。以上のような、人間のグループの予想に基づく振舞いの振動現象は、El Farol Bar Problem, マイノリティゲーム, 混雑ゲームなどで研究されている。特に、混雑ゲームでは、過去の所要時間の実績値に基づく最短経路を多くの車両が利用することによる混雑、渋滞状態(負のコスト)が増加するような現象が研究されている。

上のような振舞いの振動現象を解決するためにいくつかの基礎的な研究が行われている。Klein ら⁶⁾は、情報遅延によって、緊急時のリソースが効率的に利用されず、振動が起こってしまう問題を、マイノリティゲームと関連づけている。そして、リソース利用の振動を緩めるために、情報をあえて与えないという戦略の効果を示している。本研究が対象とする交通システムにおいても、情報を与えない戦略は考えられるが、ドライバー間での不公平感が問題である。

文献4)では、経路を再割り当てするために“車両間の経路変更交渉”を提案している。ここでは、ドライバーの経路間の所要時間差に対する合理的判断に基づいて交渉を行う。ドライバーの効用関数はロジットモデルに基づいてモデル化されている。一般に、経路の

再割り当ては、そのドライバー自身にとっては遠回りになる。そこで、経路の変更によって所要時間が増加することが許容できる場合は、回り道を選択し妥協ができるものとする。さらに現在の研究では、ドライバーは「ポイント」収集性向を持つと仮定する。つまり、経路変更に伴う所要時間の増加が車両のポイント価値以下であれば、最短経路ではない経路を選択し、ポイント収集する行動を考慮する。すなわち、迂回路を選択するドライバーに対してポイントを与えることで、効率的な渋滞解消を実現する。

参考文献

- 1) Baarslag, T., Fujita, K., Gerding, E. H., Hindriks, K., Ito, T., Jennings, N. R., Jonker, C., Kraus, S., Lin, R., Robu, V. and Williams, C. R. : Evaluating Practical Negotiating Agents : Results and Analysis of the 2011 International Competition, *Artif. Intell.*, Vol.198, pp.73-103(2013).
- 2) Ito, T., Hattori, H. and Klein, M. : Multi-issue Negotiation Protocol for Agents : Exploring Nonlinear Utility Spaces, *Proc. of 20th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-2007)*, pp.1347-1352(2007).
- 3) Jennings, N. R., Faratin, P., Lomuscio, A. R., Parsons, S., Wooldridge, M. and Sierra, C. : Automated Negotiation : Prospects, Methods, and Challenges, *Group Decision and Negotiation*, Vol.10, pp.199-215 (2001).
- 4) Kanamori, R., Takahashi, J. and Ito, T. : Evaluation of Traffic Management Strategies with Anticipatory Stigmergy, *Journal of Information Processing*, Vol.22, No.2(2014).
- 5) 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).
- 6) Klein, M., Metzler, R. and Bar-Yam, Y. : Handling Emergent Resource Use Oscillations, *Lecture Notes in Computer Science*, Vol.3215, Springer Berlin Heidelberg, pp.809-816 (2004).
- 7) Nash, J. : The Bargaining Problem, *Econometrica*, Vol.18, No.2, pp.155-162 (1950).
- 8) Rubinstein, A. : Perfect Equilibrium In A Bargaining Model, Vol.50, No.1, pp.97-109 (1982).
- 9) Weiss, G. : *Multiagent Systems*, MIT Press (2013).
- 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*, AAAI Press, pp.432-438 (2011).
- 11) 鈴木光男 : 新ゲーム理論, 勁草書房 (1994).

(2014年3月4日受付)

■ 伊藤孝行 (正会員) ito.takayuki@nitech.ac.jp

名工大教授。博士(工学)。IFAAMAS理事。過去に、北陸先端大助教授、名工大准教授、USC、Harvard大、およびMIT客員研究員、NEXTプログラムおよびさきがけ代表研究者などを歴任。日本学術振興会賞、文部科学大臣表彰科学技術賞および若手科学者賞、長尾真記念特別賞、JSSST基礎研究賞、AAMAS2006 Best Paper Award、IPA未踏スーパークリエイター等を受賞。