

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—」

ANAC : Automated Negotiating Agents Competition (国際自動交渉エージェント競技会)

ANAC: Automated Negotiating Agents Competition

藤田 桂英
Katsuhide Fujita

東京農工大学大学院工学研究院先端情報科学部門
Faculty of Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology.
katfuji@cc.tuat.ac.jp, <http://www.tuat.ac.jp/~katfuji/>

森 顕之
Akiyuki Mori

名古屋工業大学大学院工学研究科情報工学専攻
Department of Computer Science and Engineering, Graduate School of Engineering, Nagoya Institute of Technology.
mori.akiyuki@itolab.nitech.ac.jp, <http://www.itolab.nitech.ac.jp/>

伊藤 孝行
Takayuki Ito

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
School of Techno-Business Administration, / Department of Computer Science, Nagoya Institute of Technology.
ito.takayuki@nitech.ac.jp, <http://www.itolab.nitech.ac.jp/~ito/>

Keywords: Automated Negotiating Agents Competition, bargaining and negotiation, multi-agent systems.

1. はじめに：エージェントの交渉機構の研究

本稿では国際自動交渉エージェント競技会(Automated Negotiating Agents Competition : ANAC) について紹介する。特に、具体的な内容、これまでの経緯、(簡単な)交渉エージェントのつくり方、および最新のANAC 2015の決勝について詳述する。ANACは、自律エージェントとマルチエージェントに関する国際会議(International Joint Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems : AAMAS) とともに開催されている自動交渉エージェントのソフトウェアに関する競技会である。

マルチエージェントシステムの重要かつ古典的な課題として、複数のエージェントが、いかに交渉し、より良い合意を形成するか、という交渉機構に関する課題がある[Jennings 01, Kraus 01]。個人合理性をもつエージェントが協調作業をするためには、個々の利益や効用を最大化しながら、社会やグループの利益も最大化できるように合意を得る必要がある。交渉というインタラクションは、多数のエージェント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、本質的に不可欠な要素であり、マルチエージェントシステムの研究を行う限り必ず考慮する必要がある。したがって、これまで、エージェント間の交渉プロトコルおよび交渉メカニズムの設計、個々のエージェントの交渉戦略の設計、交渉問題そのものの設計、交渉結果の評価手法、交渉における学習機構など、多くの研究が展開されてきた[Fatima 14, 原 13, 伊藤 10a, López-Carmona 12, Marsá-

Maestre 09, Marsá-Maestre 14b, Rafk 15]。

2006年頃から著者らは複雑な問題に対する非線形効用空間モデルとその交渉プロトコルについて研究を進めていた[Ito 07, Ito 08, 伊藤 10b, 伊藤 14]。本テーマは多くの注目を受け、評判も良かったため、エージェントの交渉について、Agent-based Complex Automated Negotiation (ACAN) という国際ワークショップを立ち上げて、交渉機構、交渉戦略、効用空間などの関連テーマについて議論を深めていた[藤田 08, 藤田 10, 藤田 11a, 藤田 11b, Fujita 12, Fujita 14a, Fujita 14b]。

ACANではエージェント間の交渉についてさまざまな観点から多くの研究テーマが展開され、年ごとに活性化しており、現在も続いている([Fujita 15b, Fukuta 16, Ito 11, Ito 12, Marsá-Maestre 14a] etc.)。一方で、交渉に関する研究は個々の研究者が独自の実験設定を想定していて、具体的に研究の成果を積み上げていくことが難しかった。そこで、ある一定の実験環境を設定し、そのうえで交渉エージェントを競い合わせるような競技会ANACを立ち上げ、一定の評価基準で評価できるようなテストベッドを設けようということと合意した。2009年のブダペストのAAMAS 2009にて開催されたACAN 2009において、デルフト工科大学のCatholijn Jonker教授を中心としたチームによって提案を受け、著者らも参画していく方向で進めた。競技会によって、個々のエージェントの戦略の評価、競技会で毎回設定する交渉プロトコルの評価、エージェント交渉という研究の啓蒙など、さまざまな効果が期待できた。

第1回の競技会では、共同で使うシミュレータはす

でデルフト工科大学のチームで開発していた GENIUS [Lin 14] を利用することになった。著者らは、まずはエージェントをスクラッチから書いてみるという方向で貢献することにした (RoboCup Rescue のときにも、南カリフォルニア大学の Milind Tambe 教授の下で、誰もつくっていない RescueAgent をスクラッチから書いた経験があった)。他人の書いたシミュレータ上で、エージェントを開発するというのは非常に労力のかかることで、何の指針もない状態でプログラムを作成した。

著者らは、交渉機構に関する研究や協力ゲームの知見などから、交渉戦略について妥協プロセスをいかに設計するかが肝要であることを研究ノウハウとしてもっていた。そのため、スクラッチからプログラムを作成する困難はあったものの、交渉戦略の本質的な内容にいち早く取り組むことができ、第1回の大会では優勝をおさめることができた。第1回大会の優勝によって、著者らのチームの交渉戦略設計とプログラミング技術の優位性を世界の研究機関に示すことができた [Kawaguchi 11]。第2回大会以降からはシミュレータ自体を分散実行し、競技会自体を効率的に計算することにも貢献している [Baarslag 15a]。また、各大会で著者らを含めた主催者間の議論により、これまでの競技会の状況や自動交渉の研究状況を考慮した毎大会ごとに競技会のルールや評価指標などを決定している。

本稿では、国際交渉エージェント競技会 ANAC の内容、これまでの経緯、簡単な交渉エージェントのつくり方、および ANAC 2015 の決勝戦の概要について示す。2章では国際交渉エージェント競技会 ANAC の内容について述べる。ANAC で定義された交渉のモデルやルールを示す。3章では ANAC のこれまでの経緯を示す。4章では、自動交渉エージェントの簡単な作成方法を示す。5章では、ANAC 2015 決勝戦の概要と優勝エージェントについて述べ、最後に6章でまとめる。

2. 国際交渉エージェント競技会 (ANAC)

国際自動交渉エージェント競技会 ANAC は、2010年から競技会がスタートし、過去6回開催されているが、世界中からさまざまな戦略をもったエージェントやドメインが提案され、優秀な交渉エージェントの開発に貢献している。さらに、競技会の結果の解析を行うことで、全体としてどのような傾向があるのか、より競技会を発展させるためにはどのような要素が必要か議論されている。今後、競技会の成果を活用して、売買の値段交渉や電力売買交渉など現実世界の交渉に近い交渉問題をモデル化し、自動交渉の共通テストベッドの開発が期待される。本章では、国際交渉エージェント競技会 (ANAC) のルールおよび競技会で使用されるプラットフォーム (GENIUS) に関して説明する。

2.1 国際交渉エージェント競技会 (ANAC) の目的

国際自動交渉エージェント競技会 (ANAC) は、Multi-issue Closed Negotiation (効用非公開状況下での複数論点交渉) をターゲットとしている。互いの効用情報が公開されない交渉問題は現実世界に近い設定であり、交渉のクラスとしては重要かつ現実的である。

具体的には以下の4点を自動交渉エージェントの競技会の目的として掲げている。

- さまざまな状況下でも効果的な交渉を行えるエージェントの設計
- 異なる戦略を客観的に評価する指標の提供
- 異なる学習戦略と適応戦略および交渉相手のモデル構築手法の提案
- 最先端の交渉エージェントと交渉シナリオおよび、より広い分野での研究成果の活用

2.2 国際交渉エージェント競技会 (ANAC) の交渉プロトコル

競技会において Alternating-offers Protocol [Rubinstein 82, Rubinstein 85] という二者間の自動交渉において頻繁に用いられるプロトコルが採用されている。例えば、交渉エージェント A と B が交渉を行う場合を考える。まず、交渉エージェント A が相手に合意案候補 (Bid) を提案する。その後、相手つまり交渉エージェント B が提示された合意案候補に対して、以下の選択肢 (Accept, Offer および EndNegotiation) をとる。

- Accept: 相手側から提示された合意案候補 (Bid) を受け入れる。この場合、両者で合意が成立し、互いに合意案に対する自身の効用関数で評価した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 (Bid) を拒否し、新たにこちらから合意案候補 (Bid) を提示する。合意は形成されず、交渉は継続される。
- EndNegotiation: 交渉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である。

その後、交渉エージェント B が Offer を選択した場合、交渉エージェント A は交渉エージェント B から提案された合意案候補 (Bid) に対して、同様に三つの動作から一つを選択する。以上の一連の操作を制限時間までもしくは合意が形成されるまで継続する。本競技会では制限時間が設定されており、制限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、互いに得られる効用値は最低値となる。

2.3 国際交渉エージェント競技会 (ANAC) のドメインと効用関数

まず、競技会における交渉ドメインについて説明する。交渉ドメインは交渉に参加するエージェント間に共

有されており、交渉セッション中にドメインが変更されることはない。ドメイン名はその交渉の目的を示し、目的を構成する要素として論点 (Issue) が設定されている。各論点はそれぞれ複数の値 (Value) をもつ。論点は次の2種類の形式をとる。

- 離散型 (Discrete) : 離散値で表される論点形式であり、複数の独立した値とその選好値が設定されている。
- 連続型 (Integer) : 連続値で表される論点形式であり、上限と下限の値とその選好値が設定される。上限と下限の間の選好値はあらかじめ用意された関数により決定する。

図1は離散型のドメインの例を示している。論点数が5であり、各論点に対しそれぞれ4, 5, 4, 4, 5個の値が設定されている。

Name	Type	Value
GroceryDomain	OBJECTIVE	This == Objective
Bread type	DISCRETE	Baguette, Crackers, Croissants, Plain bread
Fruit	DISCRETE	Apples, Bananas, Cherries, Grapes, Pears
Snacks	DISCRETE	Chocolate bars, Doughnuts, Nachos, Popcorn
Spreads	DISCRETE	Cheese, Jam, Peanut butter, Sandwichspread
Vegetables	DISCRETE	Beans, Broccoli, Leek, Potatoes, Spinach

図1 離散型のドメイン例

次に、各エージェントが所持する選好情報 (効用情報) に関して説明する。競技会では、各エージェントは独自の選好情報 (profile) を所持しており、交渉相手に公開されることはない。選好情報は各論点に対する重みと各論点の値に対する選好情報からなり立っており、各エージェントごとにそれぞれ異なる値が設定される (図2)。例えば、すべての合意案候補の集合を Ω とし、エージェントはそれぞれに Ω の上で表現される異なる選好情報を所持する。各合意案候補 (bid) は $\vec{w} = (w_1, \dots, w_m)$ とする。また、エージェントの選好情報は取り得る結果 $\vec{w} \in \Omega$ を写像する効用関数 (選好情報) $U(\vec{s})$ をもつとする。効用関数は各論点に対する重み w_i ($\sum w_i = 1$) と各論点

Name	Type	Value	Weight
GroceryDomain	OBJECTIVE	交渉者Aの効用情報	
Bread type	DISCRETE	Baguette (10), Crackers (5), Croissants (2), Plain bread (1)	0.2
Fruit	DISCRETE	Apples (10), Bananas (3), Cherries (1), Grapes (2), Pears (5)	0.05
Snacks	DISCRETE	Chocolate bars (2), Doughnuts (10), Nachos (1), Popcorn (5)	0.5
Spreads	DISCRETE	Cheese (1), Jam (10), Peanut butter (2), Sandwichspread (5)	0.15
Vegetables	DISCRETE	Beans (1), Broccoli (3), Leek (5), Potatoes (10), Spinach (2)	0.1
GroceryDomain	OBJECTIVE	交渉者Bの効用情報	
Bread type	DISCRETE	Baguette (10), Crackers (2), Croissants (1), Plain bread (5)	0.3
Fruit	DISCRETE	Apples (1), Bananas (5), Cherries (3), Grapes (3), Pears (10)	0.2
Snacks	DISCRETE	Chocolate bars (1), Doughnuts (2), Nachos (5), Popcorn (10)	0.05
Spreads	DISCRETE	Cheese (1), Jam (2), Peanut butter (10), Sandwichspread (5)	0.15
Vegetables	DISCRETE	Beans (1), Broccoli (2), Leek (5), Potatoes (3), Spinach (10)	0.3

図2 各エージェントの選好情報 (効用関数)

の値に対する評価関数 $u_i(w_i)$ から以下の式 (1) で定義される。

$$U(\vec{w}) = \sum_{i=1}^m w_i \cdot u_i(w_i) \tag{1}$$

また、ドメインは時間が経過するごとに獲得する効用値が減少していく、割引効用 (Discount Factor) が設定されている。各選考情報に割引率 d ($0 \leq d \leq 1$) が設定されており、交渉終了時刻 t ($0 \leq t \leq 1$) における、獲得効用は以下の式 (2) で決定される。

$$discountedUtility = originalUtility * d^t \tag{2}$$

$d = 1$ のとき、割引率の効果はないものと設定される。図3は割引率を $0.1 \sim 1.0$ に 0.1 ずつ変化させた場合の効用値の変化を示している。

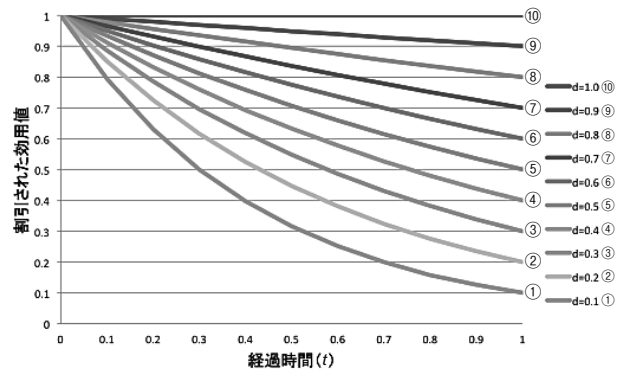


図3 割引率 d を変化させた場合の効用値の変化

さらに、ドメインは留保価格 (Reservation Value) が設定されている。留保価格とは制限時間内に合意ができなかった場合、もしくはどちらか一方が *EndNegotiation* を選択した場合に、互いに得られる効用値を最低値より高い値に設定したものである。

各交渉における Bid のやり取りを保存し、交渉履歴として活用できる。通常、競技会では同じドメイン情報を用いて複数のエージェントと対戦する。そこで、以前に対戦した際に両者で交換した合意案候補 (Bid) の情報を保存しておき、次の同じドメインで対戦する際に保存している履歴情報を呼び出すことが可能になる。具体的には、送信者、受信者、時間、bid の内容、受信者の動作を履歴情報として呼び出すことができる。

2.4 GENIUS (General Environment for Negotiation with Intelligent multi-purpose Usage Simulation)

競技会では図4が示すように、GENIUS (General Environment for Negotiation with Intelligent multipurpose Usage Simulation) [Lin 14] という交渉プラットフォーム上でシミュレーションを行い、交渉戦略を競う。また、GENIUSには自動交渉エージェント作成のための JavaAPI が用意されており、これを開発に

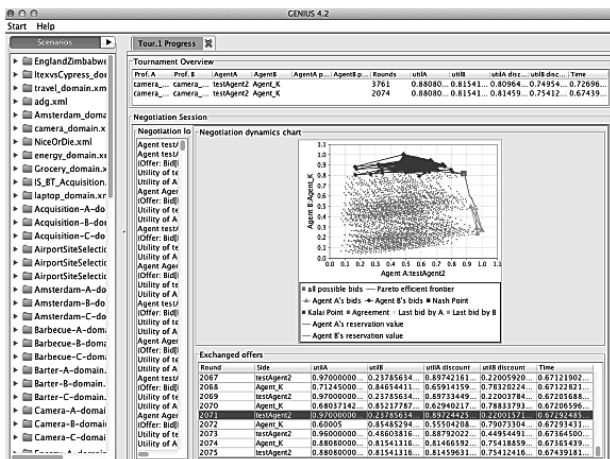


図4 GENIUSのインターフェース

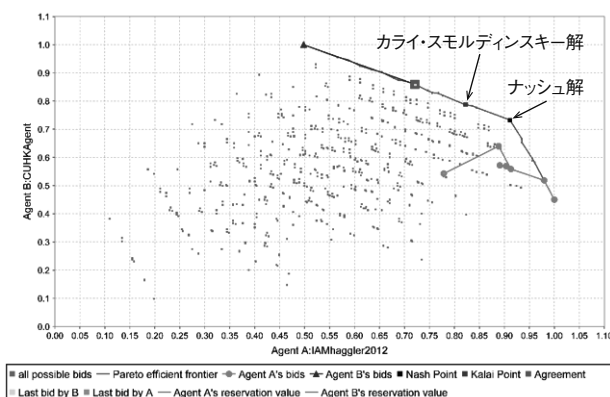


図5 GENIUSにおける自動交渉過程の解析画面

使用する環境にインポートすることで、GENIUSが用意している自動交渉エージェント開発のクラスの利用が可能となる。その他、GENIUSは以下を主な機能としてもつ。

- 交渉ドメインおよび効用情報の作成と自動交渉エージェント作成の補助
- 自動交渉エージェントによる交渉シミュレーション
- 交渉の過程や結果の記録と解析

GENIUSでは交渉シミュレーションを行うと同時に図5に示すようにパレートフロント、ナッシュ解、カライスモルディンスキー解といわれる重要な交渉解と合意案の距離を解析結果として出力する。

パレートフロントとは効用空間内でパレート効率的であるbidをつないだラインである。パレート効率的であるとは、ある集団において集団内のいずれかの者の効用を下げないと他者の効用を上げられない状態のことをいう。パレートフロント上の合意案は一種の最適な合意案を発見できたと捉えることができる。図5のグラフにおいてパレートフロントは右上に示される赤い線であり、効用空間内でパレート効率的なbidをつないだものである。このラインより右上、つまり両者の効用を同時に増加させる合意案候補は存在しないことがわかる。

ナッシュ交渉解は、交渉空間内で両者の効用値の積(ナッシュ積)が最大となる点である[Nash 50]。正アフィ

ン変換からの独立性、対称性、妥結点のパレート最適性、無関連な代替案からの独立性の4公理を満たす交渉解である。図5のグラフ中において黒い四角で表されるbidがナッシュ解である。

カライスモルディンスキー解、交渉の基準点と理想点を結ぶ線分と交渉領域のパレート最適な境界線とが交わる点を妥結点とする解である[Kalai 75]。正アフィン変換からの独立性、対称性、妥結点のパレート最適性、限定単調性の4公理を満たす唯一の交渉解である。カライスモルディンスキー解は図5のグラフ中において青い四角で示される。

3. 国際交渉エージェント競技会の歴史 (ANAC 2010 ~ 2015)

本章では過去に行われた国際交渉エージェント競技会(ANAC)の歴史を示す。国際交渉エージェント競技会は2010年から続いており、毎年5月にAAMASに合わせて開催されている。表1が示すように、2010~15年までに合計6回開催され、2011年からは毎年約20体のエージェントが参加している。例年、開催年の2~3月までに参加者は作成したエージェントを提出し、エージェントの動作テストを実施後に、予選を行う。その後、4月中旬にファイナリストを決定し、5月初旬に決勝進出者がAAMASの開催地に集まり、決勝戦の結果発表および表彰式を行う(図6)。



図6 ANAC 2015の様子

表1の新しい要素やドメイン数が示すように、毎年ANACではルールに新しい要素を導入しており、これまでの競技会の状況や自動交渉の研究を考慮して主催者が競技会のルールや交渉ドメイン、評価指標を決定している。以下に、毎年ANACで新たに導入したルールの経緯などをまとめる。

- ANAC 2011では、新たに割引効用を導入したドメインを追加し、ドメイン数を増加させた。ANAC 2010では、ドメイン数が少ないためある特定の特徴をもったドメインに強いエージェントが有利であった。また、互いの戦略や効用情報をより多く引き出せるため、ほとんどのエージェントの合意形成

表1 国際交渉エージェント競技会 (ANAC) の参加者数とルールの変更

年	参加者数	ドメイン数	新しい要素
2010	7	3	—
2011	18	8	割引効用
2012	17	24	留保価格
2013	19	24	交渉履歴
2014	21	12	非線形効用関数
2015	24	12	三者間交渉

するタイミングが制限時間直前であった。以上の2点の課題を解決するために、合意形成を早いタイミングで行うインセンティブとなる割引効用を導入し、ドメイン数も増加させた。

- ANAC 2012では、新たに留保価格を導入したドメインを追加し、ドメイン数をさらに増加させた。ANAC 2010, ANAC 2011とも合意できないことへのリスクが大きいため、協調的なエージェントがほとんどであった。そこで、ANAC 2012から新たに留保価格が導入され、合意ができないことに対するリスクを少なくした。また、特定のドメインに有効な戦略が有利になることを減らすために、ドメイン数を大幅に増加させた。
- ANAC 2013では、ANAC 2010で設定した基本的なルールに対して有効な戦略のデータベースが充実したことを考慮して、競技会のルールを大幅に変化させるために交渉履歴の導入を行った。実際に、過去の交渉履歴を使用できるため、学習や過去データの解析が可能となり、大幅に交渉戦略の幅が広がるとともに、優勝するためには過去の履歴の活用というより難しい課題に取り組む必要がある。
- ANAC 2014では、ANAC 2013での交渉履歴の導入とは異なる方向で競技会のルールを大幅に変化させるために、非線形効用の導入を行った。実際に、探索の高速化などが大切な要素となり、優勝するためには、ANAC 2013とは異なる方向の難しい課題に取り組む必要がある。一方、ANAC 2014ではこれまでの大会と比較してより難しい課題となることを考慮し、交渉履歴の使用の禁止し、ドメイン数を減らした。
- ANAC 2015では、ANAC 2013とANAC 2014とはさらに異なる方向で競技会のルールを大幅に変化させるために、交渉の参加人数を二者間から三者間に増加させた。これまで、対戦相手1体の効用情報や戦略を推定するだけでよかったが、ANAC 2015では、対戦相手2体の効用情報や戦略を同時に推定し、戦略に考慮する必要がある。一方、ANAC 2015ではこれまでの大会と比較してより難しい課題となることを考慮し、交渉履歴の使用を禁止し、非線形効用の導入を行わなかった。

以降に、これまで行われた6回のANACの状況と優

勝した交渉エージェントの概要を示す。

3.1 ANAC 2010 (The 1st International Automated Negotiating Agents Competition)

ANAC 2010は自動交渉エージェント競技会として初めて開催され、全部で7体にエージェントが参加し、サイズやエージェント同士の対立度が異なる3種類のドメインを競技会運営側で用意した[Baarslag 12]。初回大会ということもあり、サイズが大きなドメインでは、合意に至らず獲得効用値0となるエージェントが散見された。

最終的に優勝したエージェントは名古屋工業大学のAgentK[Kawaguchi 11, Kawaguchi 12]であった。AgentKは歩み寄りに基づく協調型のエージェントであり、制限時間直前で合意を目指すエージェントである。AgentKはサイズが大きなドメインでも合意できており、3ドメインすべてで上位の効用値を獲得できていた。本大会では、割引効用のルールがなく、合意すること自体が難しかったために、協調型かつ制限時間をできる限り使って合意を目指す戦略が有効であったといえる。

3.2 ANAC 2011 (The 2nd International Automated Negotiating Agents Competition)

ANAC 2011は18体のエージェントが参加し、参加者数が大幅に増加した。多数のエージェントの総当たり戦を十分な回数を行い勝者を決定するのが難しかったため、初めて予選を行った。実際には、3回総当たり戦を行い、それらの平均獲得効用値が上位の8エージェントが決勝トーナメントに進出した。本競技会から割引効用を取り入れたドメインが採用されており、参加者が作成した18ドメインを使用したため、交渉ドメインの多様化が見られた。また、2回目の開催ということもあり、学習を利用したエージェントが増えるなど戦略に多様性が見られた[Fujita 13]。

本大会では、デルフト工科大学のHardHeaded[Krimpen 13]が優勝した。HardHeadedは、交渉の制限時間直前まで歩み寄らない強固な交渉戦略である。また、S. S Fatimaの提案した理論[Fatima 02]に基づいている。前回大会は比較的協調的なエージェント戦略が有効だったが、今回は協調的なエージェントが増加したため、逆に強固な戦略のほうが協調的なエージェントを損する直前まで歩み寄らせることができるため有効であった。

また、Empirical Game Theory (EGT)に基づいて、ANAC 2011エージェント戦略のロバスト性を解析した文献[Baarslag 13]が発表されている。時間が経つにつれて、着実に譲歩するエージェントに対しては最小の協力にとどめ、強固なエージェント戦略に対しては、交渉決裂を避けるために、譲歩が必要であることが定量分析により示されている。さらに、競技会のように多数のドメインで効用値を競い合うとともに、戦略のロバスト性

を考慮した EGT も今後取り入れることが重要であることが示唆されている。

3.3 ANAC 2012 (The Third International Automated Negotiating Agents Competition)

ANAC 2012 から新たに留保価格が導入され、合意ができないことに対するリスクが少なくなった。ANAC 2012 には 17 体のエージェントが参加し、予選を通過した 8 エージェントで決勝トーナメントを行った [Williams 14]。決勝では参加者が提出した 17 ドメインおよび過去の競技会で使用したドメイン (ANAC 2011 のドメインが 5, ANAC 2010 のドメインが 2) に対して、異なる割引効用と留保価格の組からランダムに三つを選択し設定した。本大会では The Chinese University of Hong Kong の *CUHKAgent* が優勝した。*CUHKAgent* [Hao 14] は環境適応型のエージェントであり、相手の戦略や効用のタイプを予測して、それに対して有効な戦略を選択する。特に、本大会は交渉ドメインと交渉エージェントが多様であるため、どのような対戦相手、ドメインに対しても対応できる交渉戦略が有効であった。

3.4 ANAC 2013 (The 4th International Automated Negotiating Agents Competition)

ANAC 2013 では新たに、過去の交渉履歴からの学習と BOA エージェントの利用が可能となった [Gal 15]。BOA エージェントとは交渉戦略を構成する次の四つの要素に対して、過去の競技会エージェントの戦略やモデルを体系化し、個別に選び出し組み合わせることで作成できる BOA フレームワークにより作成したエージェントである [Baarslag 14]。交渉戦略を構成する次の四つの要素は以下のとおりである。

- **Bidding strategy** : 次の自身が提案する bid の作成
- **Opponent model** : 相手の選考情報の推測
- **Opponent model strategy** : Opponent model に従う相手の Bidding strategy の推定
- **Acceptance strategy** : 相手に提案された bid を受け入れるか否かの判断

ANAC 2013 では 19 体のエージェントの参加があり、参加者が提出したドメインのうちランダムに選ばれた 11 ドメインを使用した。本大会も、全参加エージェント間の総当たりで予選を行い、予選を通過した 7 エージェントで決勝トーナメントが行われた。決勝では ANAC 2012 の 6 ドメインを含む 18 ドメインが使用された。交渉は ANAC 2013 までの機能に加え過去の交渉履歴の利用が可能になったため、膨大な履歴データから短時間で必要な情報を見つけ出し、交渉エージェントに学習させるかが重要である。

優勝エージェントはデルフト工科大学の *TheFawkes* [Koeman 15] であり、BOA フレームワークと過去の履歴からの相手のモデル推定を組み合わせた手法であっ

た。実際に、Best Learning Agent も *TheFawkes* であったことから、学習アルゴリズムが効率的に活用されていたことがわかる。

3.5 ANAC 2014 (The 5th International Automated Negotiating Agents Competition)

ANAC 2014 では非線形効用と Integer Value のドメインが導入された [Fujita 16]。非線形効用はかなり凹凸の激しい効用関数を用いられており [Ito 07, Ito 08]、効用空間のサイズも最大 10^{50} と過去の大会と比較してもかなり大きい。特に、非線形効用関数を導入した場合に、線形効用において有効であった戦略が同様に有効であるとは限らない [Klein 03]。したがって、これまでの大会以上に効率的な探索手法の導入が必要となる。ANAC 2014 では 21 体のエージェントの参加があり、運営者側が準備した 12 ドメインを使用して予選を行った。各ドメインは効用空間の大きさは 10^{10} , 10^{30} , 10^{50} の 3 種類であり、それぞれ、留保価格や割引効用がさまざまに設定されている。予選では、ランダムに割り振った四つのグループ内の総当たり戦を実施し、個別効用だけではなく社会的余剰も考慮して、上位 10 エージェントを選出した。その後、同様のドメインを用いて、決勝に進出した 10 エージェント間で決勝トーナメントが行われた。

優勝エージェントは名古屋工業大学の *AgentM* [Niimi 16] であり、シミュレーテッドアニーリング (SA) を用いた高速な合意案候補の探索を可能としている。戦略は協調的な戦略であり、最終的に必ず合意できることを目指している。ANAC 2014 では、多くの上位のエージェントがシミュレーテッドアニーリング (SA) もしくは遺伝的アルゴリズム (GA) を導入しており、高速に最適解を発見することが重要であった [柿本 15]。

3.6 ANAC 2015 (The 6th International Automated Negotiating Agents Competition)

ANAC 2015 では新たに、Alternating-offers Protocol [Rubinstein 82] を三者間交渉問題に拡張した Stacked Alternating Offers Protocol (SAOP) を採用している。SAOP では、図 7 が示すようにエージェント A, B, C が三者間交渉を行う場合、まずエージェント A がエージェント B に *Bid* を一つ提案する。エージェントは *Accept*, *Offer*, *EndNegotiation* から一つの行動を選択する。例えば、エージェント B がエージェント A の *Bid* に対して、*Accept* を選択した場合、エージェント C にはエージェント A の *Bid* が提案される。一方、エージェント B が *Offer* を選択した場合、エージェント A の *Bid* は放棄され、エージェント B の新しい *Bid* がエージェント C に提案される。そして、エージェント C は *Accept*, *Offer*, *EndNegotiation* から行動を選択する。これらの動作を決められた順番で繰り返していき、最終的にある *Bid* が自身以外の全員に *Accept* される、交渉の制限時間になる、

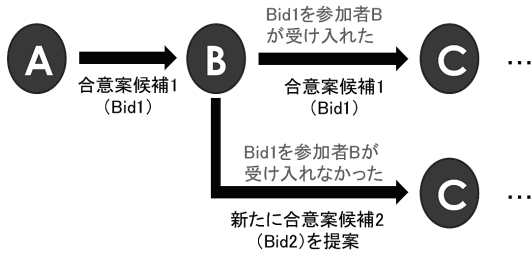


図7 Stacked Alternating Offers Protocol (SAOP) の流れ

もしくはエージェントのうち一体が *EndNegotiation* を選択するまで交渉は継続される。また、ある *Bid* が提案者以外全員に *Accept* された場合に合意が形成され、それ以外の場合は合意形成に失敗したと判断される [Fujita 15a].

ANAC 2015 では過去最多となる 24 エージェントの参加があり、運営者側が準備した 12 ドメインを使用した予選を行った。各ドメインは線形ドメインであり、それぞれ、対立度と効用空間の大きさ、留保価格や割引効用がさまざまに設定されている。予選では、ランダムに全参加者を 4 グループに分け、各グループの個別効用、ナッシュ積それぞれの上位 8 エージェントが決勝に進出した。その後、同様のドメインを用いて、予選を通過した各カテゴリーの上位 8 エージェントで決勝トーナメントが行われた。三者間交渉というこれまでと大きく異なる設定であったため、さまざまな戦略が提案され、最終的に名古屋工業大学の *Atlas3* が優勝した。

4. 自動交渉エージェントの作成方法

競技会に参加するためには、自動交渉エージェントのプラットフォームである GENIUS 上で動作する自動交渉エージェントを作成する必要がある。GENIUS の自動交渉エージェントは Java 言語で記述されている。本章では、GENIUS に付随しているサンプルプログラムをもとに、エージェントの作成方法を説明する。

通常の交渉エージェントを作成する場合、*Bidding strategy*, *Opponent model*, *Opponent model strategy*, *Acceptance strategy* の四つの戦略を決定する必要がある。上記の要素を作成するために重要となるのが、表 2 で示されている GENIUS 上で定義されているクラスとメソッドである。最終的にエージェントを実装するためには、先にあげた交渉戦略の 4 要素を考案したうえで、*init()*, *ReceiveMessage()*, *chooseAction()* の三つのメソッドをオーバーライドする必要がある。また、*negotiator.Agent* クラスを継承しさえすれば、複数のクラスでエージェント戦略を作成することができる。

以下に、エージェントを作成するために必要となる三つのメソッドに関して、図 8 のサンプルコードを参考にしながら説明していく。

- *init()*: 新たな交渉 (セッション) が開始された際に

表 2 GENIUS 上で定義された重要クラス

UtilitySpace utilitySpace 選好情報をエージェントに割り当てる。
Timeline timeline [0, 1] に正規化された経過時間を得る。
double getUtility (Bid bid) bid における自身の効用値を得る。
void init() 新たな交渉 (セッション) が開始された際に実行されるメソッド。
void ReceiveMessage (Action opponentAction) 相手が行った Action (Accept, Offer, EndNegotiation) を得る。
Action chooseAction () 自身の Action (Accept, Offer, EndNegotiation) を決定する。

```

1 package examplepackage;
2
3 import negotiator.Agent;
4 import negotiator.Bid;
5 import negotiator.session.Timeline;
6 import negotiator.actions.Accept;
7 import negotiator.actions.Action;
8 import negotiator.actions.Offer;
9
10
11 public class ExampleAgent extends Agent{
12     private Action actionOfPartner=null;
13
14     public void init(){/*セッション開始時の処理を記述する*/
15         MINIMUM_BID_UTILITY = 0.0;
16     }
17
18     public void ReceiveMessage(Action opponentAction){ /*前回の相手の選択を返す*/
19         actionOfPartner = opponentAction;
20     }
21
22     public Action chooseAction(){/*自身の次のActionを決定する*/
23         Action action = null;
24         try{
25             if(actionOfPartner==null)
26                 action = chooseRandomBidAction();
27             if(actionOfPartner instanceof Offer){
28                 Bid partnerBid = ((Offer)actionOfPartner).getBid();
29                 double offeredUtil = getUtility(partnerBid);
30                 double time = timeline.getTime();/*現在の交渉時間を得る。*/
31                 action = chooseBidAction();
32
33                 /*現在の状況でAcceptするか判断する*/
34                 if (isAcceptable(offeredUtil, time))
35                     action = new Accept(getAgentID());
36
37             }
38         } catch (Exception e) {
39             System.out.println("Exception in ChooseAction:"+e.getMessage());
40             action=new Accept(getAgentID()); /*エラー発生場合はAcceptで返す。*/
41         }
42         return action;
43     }
44
45     /*合意するかどうかを判定するメソッド*/
46     private boolean isAcceptable(double offeredUtil, double time) throws Exception{
47         //合意する場合の条件を作成する。
48     }
49
50
51     /*次回の提案Bidを生成するメソッド*/
52     private Action chooseRandomBidAction(){
53         Bid nextBid=null ;
54
55         //次回提案するBidを生成アルゴリズムを作成する。
56
57     }
58     return (new Offer(getAgentID(), nextBid));
59 }
60
  
```

図 8 自動交渉エージェントのプログラム例

必ず呼び出されるメソッドであり、エージェントの初期動作を定義する。例えば、図 8 では、独自に設定した変数の初期化を行っている。

- *ReceiveMessage (Action opponentAction)*: 前回どのような行動を相手を選択したかを返すメソッドである。一番最初の Offer の場合は null が返され、その他の場合は、Offer, Accept, EndNegotiationのうち、相手を選択された行動が返される。例えば、図 8 では、相手の Action を *actionOfPartner* という独自に定義した変数に保存している。
- *chooseAction()*: 自身の Action (Accept, Offer, EndNegotiation) を決定するメソッドである。通常、このメソッドに交渉戦略の中核を記述する。例えば、図 8 では、*chooseRandomBidAction()* という独自

のメソッドを呼び出し、どの Bid を次回に提案するかを探索したり、選択したりする。また、独自に定義したメソッド *isAcceptable()* により、相手からの提案を受諾するかどうかを判断し、受諾する場合は、Accept を返すようにしている。

その他にも、Bid 情報とその評価値を保存するクラス *BidDetails* や相手の予測した効用関数と自身の効用関数からパレートフロントなどを解析できる *BidSpace* クラスなど戦略を記述する際に頻繁に使用されるメソッドやクラスがすでに定義されている。上記のメソッドやクラスを含め、すでに GENIUS において定義されているクラスやメソッドに関しては、付随している GENIUS User Guide などに詳しく説明されている [Baarslag 15b]。

最終的に、作成したエージェントをコンパイルし、GENIUS に追加する必要がある。コンパイルはターミナルから *negosimulator.jar* を指定してコンパイルするか、Eclipse や Netbeans に *negosimulator.jar* へのクラスパスを追加して行うことができる。その後、作成されたクラスファイルを GENIUS から指定することで、GENIUS 上で独自に作成したエージェントを対戦させることができる。詳細は下記のページを参照してほしい (<http://web.tuat.ac.jp/~katfujigenius/index.html>)。

5. ANAC 2015 決勝戦の概要

5.1 ANAC 2015 の概要

2015 年 5 月に ANAC 2015 が AAMAS 2015 において開催された。ANAC 2015 では、個人効用とナッシュ積の平均値を評価指標として採用している。個人効用が大きいほど、自身にとって望ましい合意案候補での合意に成功しており、ナッシュ積が大きいほど、交渉全体として望ましい合意案候補で合意しているといえる。

第 6 回目の開催となる ANAC 2015 では、著者らのエージェントを含む 24 体のエージェントが予選大会に提出された。予選大会では、24 体のエージェントを 4 グループに分け、グループごとに本論文で想定する交渉環境

下で三者間交渉の総当たり戦を行った。表 3 は ANAC 2015 の予選大会および決勝戦で用いられた全 10 種の交渉問題の論点数と交渉条件である。なお、ANAC 2015 で用いられた交渉問題では、すべての交渉参加者の割引率 d と留保価格 u_r は同値であった。評価に用いられた交渉問題はそれぞれ 三つの効用関数を備えており、エージェントは効用関数のすべての組合せで 1 回ずつ交渉を行った。ANAC 2015 で用いられた交渉問題は問題ごとに交渉者間の対立度が異なるため、エージェントはそれぞれの問題に適した交渉戦略を判断し、適応する必要があった。

5.2 ANAC 2015 決勝戦の結果と考察

著者らが提案した *Atlas3* は交渉の制限時間に着目し、交渉の最終局面を分析することによって、最終局面に至るまでの適切な譲歩を推定している。ANAC の交渉問題では他の交渉参加者の効用情報が参照できないため、適切な譲歩を決定することが困難である。そこで、*Atlas3* は交渉ゲームにおける最終局面の交渉を戦略型ゲームとして分析し、進化的に安定な戦略 [Smith 82] の均衡点における、交渉者の推定期待効用値を導出している。進化的に安定な戦略とは、進化ゲーム理論の研究分野で用いられる概念であり、進化的に安定な戦略を選択した集団は、他の戦略を選択した個体によって侵略されないという特徴をもつ。進化ゲーム理論において、進化的に安定な戦略はタカハトゲーム [Maynard Smith 73] などの分析に用いられる。*Atlas3* は、進化的に安定な戦略の均衡点における期待効用値を譲歩関数のパラメータとして用いることで、多様な交渉状況下で適応できる交渉戦略を実現している [森 15]。

表 4 は ANAC 2015 決勝戦における個人効用部門の平均値を示している。決勝戦はエージェントは効用関数のすべての組合せで 5 回ずつ交渉を行った。表 4 から、*Atlas3* が個人効用部門の決勝進出エージェントの中で最も個人効用が高いことがわかる。また、ほかのエージェントと標準偏差を比較して、*Atlas3* の標準偏差が小さいことから、安定して個人効用が高い合意案候補で合意できていることがわかる。表 5 は ANAC 2015 決勝戦におけるナッシュ積部門の平均値を示しており、個人効用部

表 3 ANAC 2015 で用いられた交渉問題と交渉条件

Domain	Number of issues	Number of bids	d	u_r
1	1	5	1.0	0.5
2			1.0	0.5
3	2	25	0.2	0.0
4			1.0	0.5
5	4	320	0.5	0.0
6			0.5	0.0
7	8	3 ⁸	1.0	0.0
8			1.0	0.0
9	16	2 ¹⁶	0.4	0.7
10			0.4	0.7

表 4 個人効用部門の結果 (ANAC 2015 決勝戦)

Agent Name	Average	SD
<i>Atlas3</i>	0.481	0.00156
ParsAgent	0.471	0.00313
RandomDance	0.461	0.00304
kawaii	0.460	0.00272
agentBuyog	0.459	0.00384
PhoenixParty	0.443	0.00503
XianFaAgent	0.353	0.00192
PokerFace	0.344	0.00143

表5 ナッシュ積部門の結果 (ANAC 2015 決勝戦)

Agent Name	Average	SD
Atlas3	0.324	0.000405
Mercury	0.322	0.00162
JonnyBlack	0.314	0.00103
AgentX	0.312	0.00139
CUHKAgent	0.309	0.00173
RandomDance	0.295	0.00109
AgentH	0.292	0.00155
agentBuyog	0.282	0.00236

門と同様に安定してナッシュ積が大きい合意案候補で合意できていることがわかる。

6. ま と め

本稿では国際自動交渉エージェント競技会 ANAC について紹介した。特に、具体的な内容、これまでの経緯、交渉エージェントの作り方、および最新の ANAC 2015 の決勝について詳述した。ANAC では、今後、交渉の仲介をするメディエーションに関する競技会、人間との対戦をする競技会、より複雑な推論を必要とするような交渉問題を対象としたような競技会についても議論を進めており、今後の発展が注目されている。交渉エージェントを作成することはそれほど難しい作業ではないため、ぜひ試みていただきたい。過去の優勝エージェントのソースコードも公開されており、初学者にとっては参考になる。

謝 辞

本研究は JST CREST 研究領域「人間と調和した創造的協働を実現する知的情報処理システムの構築」研究課題名「エージェント技術に基づく大規模合意形成支援システムの創成」および JSPS 科研費 15H01703 の支援を受けたものです。また、ANAC に長年ご協力いただいている, Aydogan Reyhan 博士, Tim Baarslag 博士, Catholijn Jonker 博士, その他多くの研究者の方々に感謝の意を表します。さらに、ANAC の競技会セッションを共催いただいている AAMAS カンファレンス、および毎年特別セッションを開催いただく ACAN ワークショップに関係する研究者の皆様々に感謝の意を表します。

◇ 参 考 文 献 ◇

- [Baarslag 12] Baarslag, T., Hindriks, K. V., Jonker, C. M., Kraus, S. and Lin, R.: The 1st Automated Negotiating Agents Competition (ANAC 2010), *New Trends in Agent-Based Complex Automated Negotiations*, pp. 113-135, Springer (2012)
- [Baarslag 13] Baarslag, T., Fujita, K., Gerding, E. H., Hindriks, K. V., Ito, T., Jennings, N. R., Jonker, C. M., Kraus, S., Lin, R., Robu, V. and Williams, C. R.: Evaluating practical negotiating agents: Results and Analysis of the 2011 International Competition, *Artificial Intelligence*, Vol. 198, pp. 73-103 (2013)
- [Baarslag 14] Baarslag, T., Hindriks, K., Hendrikx, M., Dirkzwager, A. and Jonker, C.: Decoupling negotiating agents to explore the space of negotiation strategies, Marsa-Maestre, I., Lopez-Carmona, A. M., Ito, T., Zhang, M., Bai, Q. and Fujita, K., eds., *Novel Insights in Agent-based Complex Automated Negotiation*, Vol. 535 of Studies in Computational Intelligence, pp. 61-83, Springer (2014)
- [Baarslag 15a] 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, pp. 115-118 (2015)
- [Baarslag 15b] Baarslag, T., Pasman, W., Hindriks, K., Tykhonov, D., Visser, W., Hendrikx, M. and Feirstein, D.: *Negotiation User Guide*, Delft University of Technology (2015)
- [Fatima 02] Fatima, S. S., Wooldridge, M. and Jennings, N. R.: Multi-issue negotiation under time constraints, *Proc. 1st Int. Joint Conf. on Autonomous Agents and Multiagent Systems*, Part 1, pp. 143-150 (2002)
- [Fatima 14] Fatima, S., Kraus, S. and Wooldridge, M.: *Principles of Automated Negotiation*, Cambridge University Press (2014)
- [藤田 08] 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公開範囲の調整に基づく交渉手段の実現, *コンピュータソフトウェア*, Vol. 25, No. 4, pp. 167-180 (2008)
- [藤田 10] 藤田桂英, 伊藤孝行, マーク クレイン: 複数論点交渉問題におけるセキュアでスケーラブルな交渉プロトコルの提案, *電学論 (C)*, Vol. 130, No.4, pp. 651-659 (2010)
- [藤田 11a] 藤田桂英, 伊藤孝行, クレイン マーク: 大規模交渉問題における論点グループ数の調整に基づいた自動合意形成機構, *情処学論*, Vol. 52, No. 4, pp. 1727-1738 (2011)
- [藤田 11b] 藤田桂英, 伊藤孝行, クレイン マーク: 複数論点交渉問題における論点グループに基づくスケーラブルな合意形成手法の提案, *人工知能学会論文誌*, Vol. 26, No. 1, pp. 147-155 (2011)
- [Fujita 12] Fujita, K., Ito, T. and Klein, M.: A secure and fair protocol that addresses weaknesses of the nash bargaining solution in nonlinear negotiation, *Group Decision and Negotiation*, Vol. 21, No. 1, pp. 29-47 (2012)
- [Fujita 13] Fujita, K., Ito, T., Baarslag, T., Hindriks, K. V., Jonker, C. M., Kraus, S. and Lin, R.: The 2nd Automated Negotiating Agents Competition (ANAC 2011), *Complex Automated Negotiations: Theories, Models, and Software Competitions*, Vol. 435 of Studies in Computational Intelligence, pp. 183-197, Springer (2013)
- [Fujita 14a] Fujita, K., Ito, T. and Klein, M.: An approach to scalable multi-issue negotiation: Decomposing the contract space, *Computational Intelligence*, Vol. 30, No. 1, pp. 30-47 (2014)
- [Fujita 14b] Fujita, K., Ito, T. and Klein, M.: Efficient issue-grouping approach for multiple interdependent issues negotiation between exaggerator agents, *Decision Support Systems*, Vol. 60, pp. 10-17 (2014)
- [Fujita 15a] Fujita, K., Aydogan, R., Baarslag, T., Hindriks, K., Ito, T. and Jonker, C.: The 6th Automated Negotiating Agents Competition (ANAC 2015), <http://www.tuat.ac.jp/~katfujii/ANAC2015/> (2015)
- [Fujita 15b] Fujita, K., Ito, T., Zhang, M. and Robu, V.: *Next Frontier in Agent-Based Complex Automated Negotiation*, Vol. 596 of Studies in Computational Intelligence, Springer (2015)
- [Fujita 16] Fujita, K., Aydogan, R., Baarslag, T., Ito, T. and Jonker, C.: The 5th Automated Negotiating Agents Competition (ANAC 2014), *Recent Advances in Agent-Based Complex Automated Negotiation*, Vol. 638 of Studies in Computational Intelligence, Springer (2016)
- [Fukuta 16] Fukuta, N., Ito, T., Zhang, M., Fujita, K. and Robu, V.: *Recent Advances in Agent-Based Complex Automated Negotiation*, Vol. 638 of Studies in Computational Intelligence, Springer (2016)
- [Gal 15] Gal, Y. K. and Ilany, L.: The Fourth Automated Negotiation Competition, *Next Frontier in Agent-Based Complex Automated Negotiation*, Vol. 596 of Studies in

- Computational Intelligence, pp. 129-136, Springer (2015)
- [Hao 14] Hao, J. and Leung, fung H.: CUHKAgent: An Adaptive Negotiation Strategy for Bilateral Negotiations over Multiple Items, *Novel Insights in Agent-based Complex Automated Negotiation*, Vol. 535 of Studies in Computational Intelligence, pp. 171-179, Springer (2014)
- [原 13] 原 圭佑, 伊藤孝行: 経時的に変化する効用に基づくエージェント間自動交渉の仲介メカニズムの提案, 信学論 (D), 情報・システム, Vol. 96, No. 12, pp. 2900-2907 (2013)
- [Ito 07] Ito, T., Klein, M. and Hattori, H.: Multi-issue negotiation protocol for agents: Exploring nonlinear utility spaces, *Proc. 20th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI 2007)*, pp. 1347-1352 (2007)
- [Ito 08] Ito, T., Klein, M. and Hattori, H.: A multi-issue negotiation protocol among agents with nonlinear utility functions, *Multiagent and Grid Systems*, Vol. 4, No. 1, pp. 67-83 (2008)
- [伊藤 10a] 伊藤孝行: マルチエージェントの自動交渉モデルとその応用, 知能と情報 (日本知能情報ファジィ学会誌), Vol. 22, No. 3, pp. 295-302 (2010)
- [伊藤 10b] 伊藤孝行: マルチエージェントの自動交渉機構と集合的コラボレーション支援への応用, 経営システム, Vol. 20, No. 5, pp. 255-262 (2010)
- [Ito 11] Ito, T., Zhang, M., Robu, V., Fatima, S. and Matsuo, T.: *New Trends in Agent-Based Complex Automated Negotiations*, Vol. 383 of Studies in Computational Intelligence, Springer (2011)
- [Ito 12] Ito, T., Zhang, M., Robu, V. and Matsuo, T.: *Complex Automated Negotiations: Theories, Models, and Software Competitions*, Vol. 435 of Studies in Computational Intelligence, Springer (2012)
- [伊藤 14] 伊藤孝行: マルチエージェントシミュレーション: 5. マルチエージェントの自動交渉モデルとその応用, 情報処理, Vol. 55, No. 6, pp. 563-571 (2014)
- [Jennings 01] Jennings, N. R., Faratin, P., Lomuscio, A. R., Parsons, S., Wooldridge, M. J. and Sierra, C.: Automated negotiation: prospects, methods and challenges, *Group Decision and Negotiation*, Vol. 10, No. 2, pp. 199-215 (2001)
- [Kalai 75] Kalai, E. and Smorodinsky, M.: Other solutions to Nash's bargaining problem, *Econometrica*, Vol. 43, No. 3, pp. 513-518 (1975)
- [柿本 15] 柿本真司, 藤田桂英: 二者間非線形交渉問題における論点間の依存関係を考慮したパレートフロント推定手法と交渉戦略の提案, 信学論 (D), Vol. 98, No. 6, pp. 926-935 (2015)
- [Kawaguchi 11] Kawaguchi, S., Fujita, K. and Ito, T.: Compromising Strategy Based on Estimated Maximum Utility for Automated Negotiation Agents Competition (ANAC-10), *Modern Approaches in Applied Intelligence, Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 6704, pp. 501-510 (2011)
- [Kawaguchi 12] Kawaguchi, S., Fujita, K. and Ito, T.: Agent K: Compromising strategy based on estimated maximum utility for automated negotiating agents, *New Trends in Agent-Based Complex Automated Negotiations*, Vol. 383 of Studies in Computational Intelligence, pp. 137-144, Springer (2012)
- [Klein 03] 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)
- [Koeman 15] Koeman, V. J., Boon, K., Oever, van den J. Z., Dumitru-Guzu, M. and Stanculescu, L. C.: The Fawkes Agent — The ANAC 2013 Negotiation Contest Winner, *Next Frontier in Agent-Based Complex Automated Negotiation*, Vol. 596 of Studies in Computational Intelligence, pp. 143-151, Springer (2015)
- [Kraus 01] Kraus, S.: *Strategic Negotiation in Multiagent Environments*, Cambridge University Press (2001)
- [Krimpen 13] Krimpen, van T., Looije, D. and Hajizadeh, S.: Hard-Headed, *Complex Automated Negotiations: Theories, Models, and Software Competitions*, Vol. 435 of Studies in Computational Intelligence, pp. 223-227, Springer (2013)
- [Lin 14] Lin, R., Kraus, S., Baarslag, T., Tykhonov, D., Hindriks, K. V. and Jonker, C. M.: GENIUS: An integrated environment for supporting the design of generic automated negotiators, *Computational Intelligence*, Vol. 30, No. 1, pp. 48-70 (2014)
- [López-Carmona 12] López-Carmona, M. A., Marsá-Maestre, I., Klein, M. and Ito, T.: Addressing stability issues in mediated complex contract negotiations for constraint-based, non-monotonic utility spaces, *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, Vol. 24, No. 3, pp. 485-535 (2012)
- [Marsá-Maestre 09] Marsá-Maestre, I., López-Carmona, M. A., Velasco, J. R., Ito, T., Klein, M. and Fujita, K.: Balancing utility and deal probability for auction-based negotiations in highly nonlinear utility spaces, *Proc. 21st International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI 2009)*, pp. 214-219 (2009)
- [Marsá-Maestre 14a] Marsá-Maestre, I., López-Carmona, M. A., Ito, T., Zhang, M. and Fujita, K.: *Novel Insights in Agent-based Complex Automated Negotiation*, Vol. 535 of Studies in Computational Intelligence, Springer (2014)
- [Marsá-Maestre 14b] Marsá-Maestre, I., López-Carmona, M. A., Klein, M., Ito, T. and Fujita, K.: Addressing utility space complexity in negotiations involving highly uncorrelated, constraint-based utility spaces, *Computational Intelligence*, Vol. 30, No. 1, pp. 1-29 (2014)
- [Maynard Smith 73] Maynard Smith, J. and Price, G. R.: The logic of animal conflict, *Nature*, Vol. 246, No. 5427, pp. 15-18 (1973)
- [森 15] 森 顕之, 伊藤孝行: 推定期待効用に基づく自動交渉エージェントの提案, 情処学論, Vol. 56, No. 10, pp. 1968-1976 (2015)
- [Nash 50] Nash, J.: The bargaining problem, *Econometrica*, Vol. 18, No. 2, pp. 155-162 (1950)
- [Niimi 16] Niimi, M. and Ito, T.: AgentM, in recent advances in Agent-Based Complex Automated Negotiation, *Studies in Computational Intelligence*, Springer (2016) (to appear)
- [Rafik 15] Rafik, H. and Ito, T.: Low-complexity exploration in utility hypergraphs, 情処学論, Vol. 56, No. 3, <http://dx.doi.org/10.2197/ipsjjip.23.176> (2015)
- [Rubinstein 82] Rubinstein, A.: Perfect equilibrium in a bargaining model, *Econometrica*, Vol. 50, No. 1, pp. 97-109 (1982)
- [Rubinstein 85] Rubinstein, A.: A bargaining model with incomplete information about time preferences, *Econometrica*, Vol. 53, No. 5, pp. 1151-1172 (1985)
- [Smith 82] Smith, J. M.: *Evolution and the Theory of Games*, Cambridge University Press (1982)
- [Williams 14] Williams, C. R., Robu, V., Gerding, E. H. and Jennings, N. R.: An overview of the results and insights from the 3rd Automated Negotiating Agents Competition (ANAC 2012), *Novel Insights in Agent-based Complex Automated Negotiation*, Vol. 535 of Studies in Computational Intelligence, pp. 151-162, Springer (2014)

2016年2月3日 受理

 著 者 紹 介



藤田 桂英 (正会員)

2011年名古屋工業大学大学院工学研究科情報工学専攻博士後期課程修了。博士(工学)。2010年から日本学術振興会特別研究員(DC1/PD)。2010～11年マサチューセッツ工科大学スローン経営大学院訪問学生。2011～12年東京大学大学院工学系研究科総合研究機構特任研究員。2012年より東京農工大学大学院工学研究院准教授。現在に至る。平成22年度山下記念研究賞受賞。マルチエージェントシステム、自動交渉に興味をもつ。IEEE, AAAI, 電子情報通信学会, 情報処理学会各会員。



森 顕之 (学生会員)

2015年名古屋工業大学大学院工学研究科情報工学専攻入学。同大学在学中。現在に至る。情報処理学会学生会員。



伊藤 孝行 (正会員)

2000年名古屋工業大学大学院工学研究科博士後期課程修了。博士(工学)。1999～2001年日本学術振興会特別研究員(DC2およびPD)。2000～01年南カリフォルニア大学 Information Sciences Institute (USC/ISI) 客員研究員。2001年北陸先端科学技術大学院大学知識科学教育研究センター助教授。2003年より名古屋工業大学大学院情報工学専攻助教授。2005～06年米国ハーバード大学 Division of Engineering and Applied Science 客員研究員および、米国マサチューセッツ工科大学 Sloan School of Management 客員研究員。2006年より名古屋工業大学大学院産業戦略工学専攻准教授。2008～09年米国マサチューセッツ工科大学 Sloan School of Management 客員研究員。2009～11年科学技術振興機構(JST) さきがけ大挑戦型研究員。2010年東京大学客員研究員。名古屋工業大学グリーン・コンピューティング研究所所長。2014年より名古屋工業大学大学院産業戦略工学専攻、情報工学教育類教授。2015年名古屋工業大学大学院産業戦略工学専攻専攻長。2015年より科学技術振興機構(JST) CREST 代表研究者。名古屋工業大学コレクティブインテリジェンス研究所所長。現在に至る。2014年 ITS シンポジウム 2014 最優秀論文賞。2014年日本ソフトウェア科学会基礎研究賞。2014年日本学術振興会賞受賞。2013年文部科学大臣表彰科学技術賞受賞(研究部門)。国際会議 AAMAS 2013 プログラムチェア。2011年内閣府最先端・次世代研究開発プロジェクト代表研究者。2010年 IFAAMAS 国際財団理事。2007年文部科学大臣表彰若手科学者賞受賞。情報処理学会長尾真記念特別賞受賞。2006年 International Joint Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems (AAMAS 2006) 最優秀論文賞受賞。2005年日本ソフトウェア科学会論文賞受賞。平成16年度 IPA 未踏ソフトウェア創造事業スーパークリエイター認定。第66回情報処理学会全国大会優秀賞および奨励賞受賞。マルチエージェントシステム、計算論的メカニズムデザイン、合意形成、限定合理性、ソフトウェア工学に興味をもつ。マルチエージェントシステム国際財団(IFAAMAS)理事、ACM 上級会員、IEEE 上級会員、情報処理学会代表会員、AAAI, 電子情報通信学会、日本ソフトウェア科学会、計測制御自動学会、日本経済学会、日本栄養改善学会、日本建築学会各会員。