

特集 「エージェント」

未来の社会システムを支える マルチエージェントシステム研究 (1)

—経済パラダイム, 交渉エージェント, 交通マネジメント—

A Survey of Multi-Agents Research That Supports Future Societal Systems (1)
—Economic Paradigm, Negotiating Agents, and Transportation Management—

伊藤 孝行 Takayuki Ito 名古屋工業大学大学院産業戦略工学専攻, 情報工学科
School of Techno-Business Administration. / Dept. of Computer Science, Nagoya Institute of Technology.
ito.takayuki@nitech.ac.jp, <http://www.itolab.nitech.ac.jp/~ito/>

金森 亮 Ryo Kanamori 名古屋工業大学グリーン・コンピューティング研究所
Center for Green Computing, Nagoya Institute of Technology.
kanamori.ryo@nitech.ac.jp

チャクラボルティ シャンタヌ Shantanu Chakraborty (同上)
shantanu.chakraborty@nitech.ac.jp

大塚 孝信 Takanobu Otsuka カリフォルニア大学アーバイン校
University of California, Irvine.
totsuka@uci.edu

原 圭佑 Keisuke Hara 名古屋工業大学大学院産業戦略工学専攻
School of Techno-Business Administration, Nagoya Institute of Technology.
hara.keisuke@itolab.nitech.ac.jp

Keywords: multiagent systems, societal systems, economic paradigm, negotiating agents, and transportation management.

1. はじめに

マルチエージェントの分野はもともと社会を対象とした分野である。人工知能が人間の知性を対象としているように、マルチエージェントの分野は社会の仕組み、特徴、知性などを対象とする分野である。多数の知的主体が形成する社会を支援するツールの開発やその特徴を理論的に分析することが主な研究分野といえる。現在のホットなトピックは、マルチエージェントの理論やモデルをベースとした社会基盤や社会システムへの応用となっている。その理由のいくつかを以下に示す。

- (1) マルチエージェントの分野の過去 10 年の動向から見ると、もともと想定していた理論やモデルに、現実的応用領域としての外の世界がようやく追いついてきた。
- (2) マルチエージェントの分野が、社会を対象とした研究領域であることから非常に相性が良い。
- (3) 学術研究全体としても、持続可能社会やスマート

シティに関連するトピックに注目が集まっており、研究予算が多いという状況もある。

(1) のマルチエージェントの現実的応用領域というのは、本分野の研究者にとっては熱望していたものである。まず、マルチエージェントの分野の過去 10 年の動向を以下に示す。

【システムやモデルが強かった時代 (2000 年前後)】

国際会議 AAMAS (Autonomous Agents and Multi-Agent Systems) の第 1 回がイタリアのボローニャで開催された 2002 頃は、分散人工知能や自律エージェントというコンセプトが強く、何らかの人工的、自律的、かつ知的な計算システムが、ある環境において互いに相互作用をする、というような共通の概念があった。

「エージェント」とは何かという言葉の定義についての議論が頻繁にあったが、多くの研究者で共有していたのはエージェントは何らかの人工的なシステムであるという点である。テーマは多く、複雑系から群知能まで、何か多く集まればマルチエージェントという雰囲気であった。当時は比較的未來を想像する夢があるような研究

も多かった。

【経済パラダイムが強い時代 (～2010年前後)】

その後、複数のエージェント間のリソース割当ての問題に対して、オークションやメカニズムデザインという経済学を背景とした研究が非常にたくさん広がった。Jeffrey S. Rosenschein 博士によるエージェント間の交渉プロトコルのゲーム理論的解析 [Rosenstein 94] や Tuomas Sandholm 博士による組合せオークションに関する研究が経済パラダイム研究のはじめだと考えられる。その後、真実申告が最良なオークションへと注目が集まり多くの研究がなされた。その後、経済学自体との交流が深まり、情報や計算についての課題を強調したアルゴリズムックゲーム理論や計算論的メカニズムデザインという分野が発展した。人工物としてのエージェントを「合理的 (期待効用を最大化する)」とだけ仮定すれば、一定のルール (オークションなど) によってシステム全体を制御することも可能なので、経済パラダイムはマルチエージェントに相性が良いという考え方もあった。もちろん、その他の、マルチエージェントシミュレーション、マルチエージェント学習、エージェント指向ソフトウェア工学、ロボティクス、バーチャルエージェントといった分野も議論や研究が発展した。

【社会に実装されることが大事な時代 (近年)】

ヒューマンコンピュータシミュレーションという手法に代表されるように、ネット上の人間の集合知をいかに利用するかについて注目が集まっている。人間の集合知をうまく制御しようという見方が広まったのである。実際のところ経済パラダイムの考え方そのものであったので理論的には相性が良かった。もともと経済理論自体が、人間社会を対象しているためである。一方で、エージェントが何らかの人工的なシステムであるという 2000 年前後のコンセプトは変化し、エージェントという定義に人間も含む傾向が生まれている。これは Sarit Kraus 博士や Milind Tambe 博士が提唱しており、何らかのスペシャリティラックに発展する可能性もある。

エージェントの定義に人間を含めることで、経済パラダイムに基づく理論をそのまま実社会に応用し、実際に動かすための仕組みを情報システムとして実装することで具体的な社会実装実験が進められている。具体的な社会実装実験までいかない研究でも、比較的規模の大きなシミュレーションを行うことで、理論やモデルの妥当性を示す試みが行われている。一方で、エージェントの合理性さえ定義すればよかった経済パラダイム全盛期と比較して、人間を扱う場合にどのようにインセンティブを与えるか、また、人間の限定合理性を考えることが重要になる。例えば、スコアリングルールに関する研究は、なるべく自分の予測をそのまま報告させるようなインセンティブデザインを可能とするものである。

スマートシティやスマートグリッドは、AAMAS だけではなく、IJCAI や AAAI などの関連トップカンファレ

ンスにおいても特別セッションが組まれるほど注目されている。もちろん、マルチエージェントの分野はその対象がもともと社会であったため、そのまま応用しやすい。ただし、上で見たように、スマートシティやスマートグリッドの応用では、実装もしくは実装に向けた具体的構想が不可欠であるため、エージェントという定義には人間を含めたほうが整合性が良い。

以上のマルチエージェント研究の 2000 年前後からの経緯から、本解説では現在のトレンドの重要な部分を占める以下のトピックについて俯瞰する。

- 経済パラダイム
- 自動交渉エージェント
- 交通シミュレーション
- 電力マネジメント
- ワイヤレスセンサネットワーク

本解説は 2 本立てになっている [伊藤 13]。前半の本稿では、2 章で経済パラダイムの最新動向の概要を述べ、その中でもオンラインメカニズムデザイン、スコアリングルール、およびセキュリティゲームについて述べる。3 章ではエージェント間のネゴシエーションの研究動向について述べる。4 章で、マルチエージェントに基づく交通シミュレーションの研究動向について述べる。5 章で関連の国際会議およびワークショップの動向について紹介し、まとめる。後半 [伊藤 13] では、マルチエージェントシステムに関する、電力マネジメントとセンサネットワークについての研究動向について述べる。

2. 経済パラダイム

2.1 概要

経済パラダイムに関する研究は、経済理論と情報学の学際的な研究が多い。査読では、マルチエージェントとの関係が必ず指摘される分野でもある。しかし、1 章で述べたようなマルチエージェントシステムの理論的基礎としての経済パラダイムは重要である。トピックは主に、ゲーム理論、メカニズムデザインおよび社会的選択に大別される。

メカニズムデザイン [Dash 03, 伊藤 08b, Krishna 02, Parkes 05, Varian 08] は、ミクロ経済学やゲーム理論の分野の一つである。メカニズムは、個人的な情報をもつ利己的なエージェントが、集団としての意思決定をするためのルールやプロトコルである。メカニズムデザインではある望ましい結果を得ることができるようなルールやプロトコルを設計する。ここでは、プライバシーを守りながら、システムとしていかにして望ましい解を実現するかが課題である。

計算論的メカニズムデザインでは、上記のメカニズムデザインに対して、計算機科学の問題意識や計算機科学のアプローチを取り入れる。例えば、マルチエージェントシステムにおいて、利己的なエージェントを仮定する状況では、システムとして全体を制御するために最低限

のルールやプロトコルを設計する必要がある。設計されるルールやプロトコルは、何らかの望ましい理論的性質をもつべきであり、古典的メカニズムデザインの理論を応用することができる。また、電子市場の設計においては、古典的なメカニズムデザインを理論的ツールとして用いながら、実装において計算アルゴリズムや暗号化などの技術と効果的に融合することが必要となる。さらに、古典的なメカニズムデザインの解概念は、計算機科学が当然問題としているような計算量の問題などがほとんど反映されていない。そこで古典的メカニズムデザインにおける解概念に対する計算量の分析や近似アルゴリズムの設計も行われている。

社会選択理論 (Social Choice) の分野では、主に投票理論が扱われている。投票理論はマルチエージェントのコミュニティでは古くから扱われている。投票理論は経済学において極めて多くの研究がなされているが、マルチエージェントのコミュニティでは、さまざまなタイプの投票方式の提案、投票における操作 (Manipulation) に対する頑健性、投票の操作自体の計算複雑などについての議論が多い。特に近年では、Schulze の投票方式に関する分析も行われつつある。

ゲーム理論 (Game Theory) は、広く知られたトピックである。ゲーム理論は、複数の意思決定主体または行動主体が存在し、それぞれ一定の目的の実現を目指して相互に依存し合っている状況を数理的で厳密な方法論を用いて分析する理論である。広い分野であり、見方によっては上記のメカニズムデザインや社会的選択理論も含む。マルチエージェントの分野でのゲーム理論に関する主な研究トピックとしては以下があげられる。

- ナッシュ均衡の計算アルゴリズム、計算困難性、準最適アルゴリズムなどに関する研究。
- 提携ゲームに関する操作、拡張とその特徴付け、安定性に関する研究。
- セキュリティゲームに関する研究 (近年非常に注目を集めている)。

ほかにも、協力ゲームに関する研究も多い。特に、交渉問題 (Bargaining) については最も盛んに行われているので、本稿では別の章で交渉エージェントとして詳細に述べる。

以上の分野の中で特にホットなトレンドとして、オンラインメカニズムデザイン、スコアリングルール、およびセキュリティゲームをあげて説明する。

2.2 オンラインメカニズムデザイン

メカニズムデザイン研究 [伊藤 08b, Krishna 02] の一つとして、ダイナミックな環境において社会的決定を逐次的に行うオンラインメカニズムデザイン [Friedman 03, Hajiaghayi 05, Parkes 07] が注目を集めている。基本的なオンラインメカニズムデザインでは、時間の経過を前提とし、新しいエージェントが到着したり、出発したりするような状況で、財の割当てや支払いを逐次的に

決定する。オンラインメカニズムでは、将来に到着するタイプを知ることをなしに現在の決定を行う必要がある。なるべく経済効率性が高くなり、かつ真実申告が最良になるようなメカニズムの設計を目標にしている。すなわち、オンラインメカニズムデザインでは、財に対する価値だけではなく、到着時間と出発時間に関しても正直な申告をするように動機付けると同時に、なるべく経済的な効率性を高めることが期待される。オンラインメカニズムデザインは、真実申告を目指すメカニズムデザインと、将来に対する不確実性を扱うオンラインアルゴリズムの両方の問題を統合しており、それだけ困難な問題である。

オンラインアルゴリズムの分野において、オークションに基づくリソース割当ての研究については比較的多くの文献がある (例えば, [Blum 04])。ただし、多くの文献では、エージェント (もしくはジョブ) の到着時間や出発時間があらかじめ決められており、真実申告に関してはあまり議論されていない。むしろ、利益の最適性や効率性についての議論が中心であった。真実申告について注目し始めた文献として、[Lavi 00] では、単調に減少しない価格曲線を用いることで、到着時間や出発時間に関するミスレポートを防ぐことを実現している。

[Porter 04] では、オンラインのジョブスケジューリングの観点から、各エージェントが戦略をもって、ジョブを投入するという状況を設定し、オンラインメカニズムデザインを行っている。特に、ジョブの長さが、エージェントのタイプに含まれている。ジョブの長さについても、提案メカニズムでは、単調性を満たすような系 (lemma) が証明されている。[Hajiaghayi 05] では、さまざまなオンラインメカニズムを設計している。例えば、長さが同じ財と異なる財の場合、および、同期 (長さが同じ場合) と非同期 (長さが同じ、もしくは違う場合) のメカニズムを設計している。ここでは、特に、支配戦略誘因両立なオンラインメカニズムを設計する場合に、制限付きのミスレポートの重要性が強調されている。[Gerding 11] では、複数財のデマンドをもち、複数財の割当てを行うオンラインメカニズムを設計している。[Todo 12] では、架空名義入札に頑健なオンラインメカニズムの特徴付けを行っている。

複数次元のタイプを前提とした場合、弱単調性が重要であることは [Bikhchandani 06] が提示している。本結果は大変一般的なもので、さまざまな用途が考えられる。多くのオンラインメカニズムにも単調性によって、支配戦略誘因両立を保証している。さらに無制限供給を仮定したデジタル財に関するオンラインオークション [Bar-Yossef 02], 2 サイドのオンラインオークション [Bredin 05], 相互依存価値環境でのオンラインオークション [Constantin 07] などがある。以上は、基本的には、model-free のオンラインメカニズムと呼ばれている。Markov Decision Process に基づいて過去の状態遷

移から将来の状態をモデル化することで, より経済効率的なオンラインメカニズムの設計も行われている. 例えば [Parkes 03, Parkes 04] では, VCG に基づいたオンラインメカニズムを提案しており, 真実申告がベイジアンナッシュ均衡であることを示している. [Hajiaghayi 07] では, オンラインメカニズムを自動メカニズムデザインを用いて, Strategy proof かつ近似的に効率的なオンラインメカニズムのデザインとその分析を行っている.

2.3 スコアリングルール

スコアリングルール [Gneiting 07] は不確実な事象に対して専門家に正しいと信じる予測を正直に申告させるためのツールの一つである. スコアリングルールの考え方自体は新しいものではなく, 天気予報の分野などでは古くから研究がなされている [Brier 50]. 予測市場 (Prediction Market) [Chen 11] の応用において, 専門家の予測を正直に申告させるためにスコアリングルールが注目されたのがきっかけで, 正直申告のためのインセンティブメカニズムの一つとして, マルチエージェントの分野でも最近再度注目を集めている. [Bacon 12] (AAMAS2012 の最優秀論文賞) では, タスクの完了時間に関する予測を正直にさせる方法を提案している. 直感的には, 自分のタスク処理の進み具合は自分で調整できてしまうため, その完了予測時間を正直に申告させることは極めて困難である. ここでは, タスクを実行するワーカーと, それを監督するマネージャを想定し, 3段階のプロセスによって, スコアを決定する. ワーカーのスコアとマネージャのスコアは異なる関数から決定され, マネージャにとってはワーカーがベストエフォートで働いた場合の終了時間の正直な予測, ワーカーにとってはベストエフォートで働くこと, がスコアが最も高くなるような, スコアリング関数の特徴付けがされている. [Robu 12] では複数の分散電源 (風力発電など) からなる仮想電源プラント (Virtual Power Plant) を想定し, 将来の電力予想を正確にすることで仮想電源プラントの信頼性を高める仕組みを提案している. 協調的に将来の電力を予想することから協調的な仮想電源プラント (Cooperative Virtual Power Plant) と呼んでいる. 個々の分散電源 (風力発電など) が, 発電電力量の正しい予測を申告することで, CVPP としての将来の発電電力量の総量の正しい予測が得られるとされている. スコアリングルールとしては, Continuous Ranked Probability Score (CRPS) を用いている. [Boutilier 12] では, 専門家の予測をプリンシプルが意思決定に使う状況を想定している. そして, 専門家がプリンシプルの意思決定に何らかの影響を与えたいと考え, 専門家が虚偽の報告をするインセンティブが働くことを指摘している. ここでは, 補償 (支払) を新たに導入することで, 上のような状況であっても専門家が正直に申告する仕組みを提案している.

2.4 セキュリティゲーム

セキュリティゲームは近年非常に注目を集めており, 多くの研究が行われている. セキュリティゲームが注目されるようになった理由は, Milind Tambe 教授のグループでのロサンゼルス空港の警備に関連する実アプリケーション ARMOR [Pita 08] の成功がある. ARMOR では, 限られた警備のリソースをゲーム理論の中のスタックルブルグゲームを用いて, 割り当てることで一定の成果をあげている. ARMOR のほかにも, 連邦航空保安局で実際に使われた IRIS [Tsai 09] や, アメリカ国土安全保障省の運輸保安庁 TSA で広く全米で使われている GUARDS [Pita 11] でも, セキュリティゲームが用いられている.

メカニズムデザインの研究で真実申告を引き出すためのインセンティブデザインの数理的に厳密な議論が続いていた中で, Milind Tambe 教授は, 実社会の問題に対して, ゲーム理論としては入門的なスタックルブルグゲームを採用し実システムとして実装した, という点が興味深い. 研究では, 相手のタイプが確率的にわかる (ベイジアンゲームと呼ばれる) という設定のベイジアンスタックルブルグゲームが採用されており, 実際はベイジアンスタックルブルグゲームのことをセキュリティゲームと呼んでいる. スタックルブルグゲームおよびセキュリティゲームの詳細は, 本特集の [岩崎 13] において詳述されているので, ここでは割愛する. Milind Tambe 教授グループの ARMOR に始まるセキュリティゲームの実社会応用の一連の研究は, 理論的側面からも応用的側面からも成功している近年のマルチエージェント研究の重要な成果の一つである.

3. 自動交渉エージェント

3.1 自動交渉エージェントと交渉問題

マルチエージェントの自動交渉の分野を最も早く確立したグループとして, Nicholas R. Jennings らのグループがあげられる. Nicholas R. Jennings らによれば, 交渉 (Negotiation) とは, 可能な合意案候補の空間における分散探索と見ることができる [Jennings 01]. 可能な合意点候補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を行う.

自動交渉エージェントにおける複数論点交渉問題の研究に関しては多くの研究が行われている [Faratin 02]. 既存の多くの研究では各論点の独立性が仮定されているので, 効用関数は単純な線形関数で表現する. 効用関数については経済学, ゲーム理論および経営工学の分野で多くの研究が行われている [Luce 89]. 人間の代理として交渉を行い, 合意を形成するエージェントを実装するためには, 人間の嗜好情報を効用関数として表現したうえで, エージェントに与える必要がある.

3.2 複数論点交渉問題

マルチエージェントの研究分野において複数の論点が存在する交渉問題（複数論点交渉問題：Multi-issue negotiation problem）が注目されている。ソフトウェアエージェントによる合意形成の開発が進むことにより、将来的にはソフトウェアエージェントが人の代理として交渉を行い、交渉の自動化が促進されると期待できる。これまでに複数論点交渉問題に関して多くの研究が行われている [Barbuceanu 00, Lin 03]。既存の研究の多くは論点同士が互いに独立している問題を対象としている [Faratin 02, Fatima 07, Jonker 07, Lau 05, Soh 04]。しかし、実世界における交渉問題は複雑であり、複数の論点が相互に依存関係にあるケースが多い。例えば、複数の設計者が共同で車の設計を行う場合、キャブレターの選択と、採用するエンジンには高い依存関係が存在する。設計者はこの依存関係を考慮しながら、部品の選択を決定する必要がある。論点の相互依存関係を考慮する場合、効用関数は線形ではなく非線形となる [Barbuceanu 00, Hindriks 06, Ito 07, Ito 08a, Klein 02, Luo 03, Lai 08, Marsa-Maestre 09a, Maestre 11]。

[Barbuceanu 00] では、合意点を、オンまたはオフのラベルをもつノードからなるゴールツリーとして定義し、制約解消アルゴリズムに基づいて求解する手法を提案している。[Klein 02] では、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、Simulated Annealingに基づくメタヒューリスティックが準最適解を得る手法が提案されている。[Luo 03] では、分散制約最適化問題として交渉問題のモデル化を行っている。エージェントが提案の交換を介して制約緩和を行い、合意形成を試みる。エージェントの選好は、優先度付きのファジィ制約として表現され、複数の属性を扱うため、非線形の効用関数が成り立つ。[Fatima 06, Fatima 07] では、時間制約が存在する場合の多論点交渉に関して、論点ごとの二者間交渉を提案しており、ナッシュ均衡となる戦略を示している。[Hindriks 06] では、スケラビリティを考慮しており、非線形効用関数を単純な効用関数へ重み付き近似を行い、合意形成の計算量を削減している。[Ito 07] では、論点の依存関係を制約を用いることで表現しており、非線形関数をもつエージェントのためのオークションを基とした交渉プロトコルが提案されている。[Lai 08] では、二者間の複数論点の交渉問題を取り扱っており、提案した手法がパレート最適性を満たす解を探すことが可能であることが示されている。[Rob 08] では、電子商取引における二者間の複数の商品取引や複数論点の交渉問題に対して効用空間を効用グラフというグラフ表現を用いて取り組んでいる。[Marsa-Maestre 09b, Maestre 11] では、制約ブロックの組合せに基づく効用空間の最適化手法を提案している。効用空間が極端な形をしていても最大値を効率良く求めることができる。[Baarslag 12]

では、2010年から開始された国際交渉エージェント協議会の規定および展望を発表している。[Hoz 13] では、マルチエージェント交渉の新規のフレームワークを提案している。マルチエージェント交渉では、すべての参加者の合意を求める場合が多かったが、本文献では、コンソーシアムの形成のような大規模な合意形成に焦点を当て、コンセンサスポリシーに基づいたフレームワークを提案している。[Fujita 13] では、論点の相互依存関係グラフに基づいて、存在する相互依存度が最大になるように論点グループを定めることで、共通の知識をもっていない場合でも計算量を削減しながら合意が可能である。

3.3 国際自動交渉エージェント競技会 (ANAC) 概要

国際自動交渉エージェント競技会 (ANAC: Automated Negotiating Agents Competition) では効用非公開状況下での二者間の複数論点交渉問題における研究分野の発展を目的としている。AAMAS2010のInternational Workshop on Agent-based Complex Automated Negotiations (ACAN) [Ito 09] と共同で、第1回自動交渉エージェント競技会 (ANAC2010) [ANA 10] が開催され、世界中からさまざまな戦略をもつエージェントが提案された [Baarslag 11, Kawaguchi 11, Williams 11]。AAMAS 2011では第2回国際自動交渉エージェント競技会 (ANAC 2011) [ANA 11] が開催され、18エージェントが参加している。ANAC 2012 [ANA 12] では世界中から17エージェントが参加し、予選大会により8エージェントが選ばれた。AAMAS 2012において決勝大会が行われ、最終順位が決定されている。図1にプラットフォームとなる交渉管理ソフトウェア GENIUS のインタフェースを示す。

ANACは効用非公開状況下での二者間の複数論点交渉問題 (Bilateral Multi-issue Negotiation) における研究分野の発展を目的として組織化された。ANACは以下の4点を目的としている。(1) さまざまな状況下における効率的な戦略をもったエージェントを構築する。(2) 異なった Bidding および Acceptance 戦略を客観的な指標で評価する。(3) 学習戦略および相手側の戦略モデル構築手法の提案する。(4) 最先端の交渉エージェント、交渉ドメインおよび効用情報を収集し研究発展に利用する。

互いの効用情報が非公開である状況は現実世界での交渉問題に近い設定であり、自動交渉のモデルとして重要である。情報非公開下における交渉では相手側の情報が不足しているため、ゲーム理論の均衡概念や解概念に基づいた戦略を導入するだけでは不十分である。ANACの交渉問題における情報は不完全で、また、交渉参加者はおのおの指針が異なるために、一つの確立したゲーム理論モデルで表現できないためである。ANACにおける交渉戦略では相手の戦略を推測したうえでヒューリスティックに基づいた戦略を用いることが有効である。

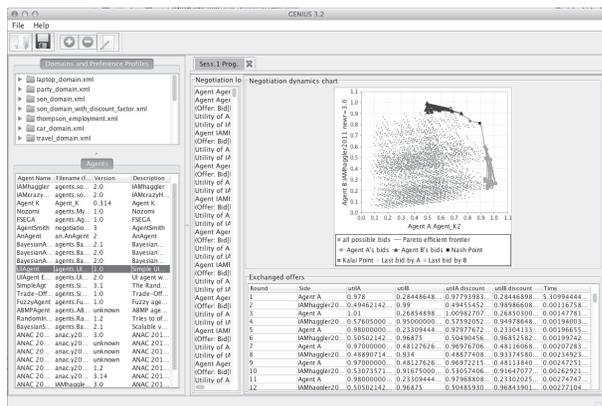


図1 GENIUSのインタフェース

4. 交通マネジメント

4.1 概要

人間の活動に伴う移動と定義される交通では、混雑・渋滞発生による経済効率の低下、大気汚染や温暖化などの環境悪化、交通事故の増加といった諸問題が日常的に発生しており、持続可能な社会を目指して施策導入・検討がなされている。先進国ではITS (Intelligent Transport Systems: 高度道路交通システム) やICT (Information and Communications Technology: 情報通信技術) の進展により、従来の社会資本の整備・改善から運用・管理に該当する施策が主な対象となりつつあり、情報科学、特に人工知能の視点から検討することも多くなっている。近年のAAAIやIJCAIなどの主要国際会議で“Computational Sustainability and Artificial Intelligence”と題したSpecial Trackが設けられ、交通システムを対象とした領域があることから、人工知能の研究対象として注目されている。AAAIのSpecial Trackにて報告された交通関連の論文を整理すると、話題のスマートシティとの関連から電気自動車 (EVs: Electric Vehicles) に関する研究が多い。ガソリン車などと比較して航続距離が短いEVsの最適経路探索手法としてエネルギー回生や充電を含めた電池残量を考慮するA*アルゴリズムの改良 [Sachenbacher 11] や、EVsの電池充電・交換のタイミングを考慮した最適経路探索手法 [Storandt 12] が提案されている。さらにすでに社会実装されたシステムの紹介として、自身のGPSデータと信号現示データをもとに所要時間と燃料消費量を最小化する経路探索システムと蓄積されたGPSデータから自動車の進行状況を隠れマルコフモデルにて推計するシステムを組み合わせた“Green Driver” [Apple 11] がある。また、ドライバーの取り得る行動をエントロピー最大化逆強化学習にて推計し、エンジンと電池からなるハイブリット車の燃料効率向上を目指した研究もある [Vogel 02]。その他、交差点マネジメントとして従来の信号や停止表示を導入するよりも効果的であったFCFS (First Come, First Served) の原理で予約割当てを行う

システム [Dresner 08] の改良として、交通量が大きく異なる交差点でも有用なバッチ処理を新たに導入した研究があった [Au 11]。

一方、交通工学・交通計画の主要国際会議を運営するTRB (Transportation Research Board) にはArtificial Intelligence and Advanced Computing Committeeがあり、交通分野におけるAI技術の適用動向としてArtificial Intelligence in Transportation: Information for Application [National Academies 07] に続いて、最近、Artificial Intelligence Applications to Critical Transportation Issues [National Academies 12] を発刊した。ここでは、交通分野におけるAI技術の適用をa) Traffic Operations, b) Travel Demand Modeling, c) Transportation Safety and Security, d) PublicTransportation, e) Infrastructure Design and Constructionにて整理している。ただし、AI技術としてエージェントモデル、エージェントシミュレーションのほか、Machine Learning, Neural Network, Genetic Algorithm, Fuzzy Logicなども含まれる。AI技術はさまざまな交通関連の観測データがリアルタイムに膨大に収集される時代における交通システムのデザイン検討に必要不可欠であり [Karlaftis 12]、特にエージェントモデルにはBelief-Desire-Intention (BDI) frameworkなど意思決定過程の記述、計算量が多くなる交通問題に対するより最適な解決策として協調的な分散制御の検討が求められている [Abbas 12]。

4.2 交通情報提供手法に関する研究

逐次収集される観測データをいかに処理し、どの情報を誰に提供するかは今後の重要な交通マネジメント手法の一つと考える。Chen and Cheng [Chen 10] はAgent Technologyを適用した事例を包括的にレビューしており、動的経路情報提供は重要な研究分野であることを示している。経路情報提供に関する既存研究は数多いが、その多くは過去の所要時間の実績データの利用を対象としている。ここで、交通情報は間接的に混雑・渋滞解消を全体目標とする協調性を促進するものとしてStigmergy [Dorigo 97] と呼ぶ。[Narzt 10] では各車両のリンク (特定の道路区間) 通過所要時間をStigmergyとしている。[Ando 05] ではリンク通過速度をStigmergyとして取り扱っている。また、[Claes 11, Yamashita 05] は、近未来の位置情報をStigmergyとして取り扱っているが、情報提供に従ったドライバーが偏るハンチング現象を回避するための割当て戦略は導入されていない。

ネットワーク利用における割当ては効率的な交通マネジメントとして有力視されており、赤松 [赤松 07] は、渋滞が発生する道路区間の通行権 (Tradable Bottleneck Permits) を市場取引させるシステムを導入することで、ネットワークのシステム最適が達成できることを理論的に示している。また、著者ら [Kanamori 12b] は従来の所要時間の実績データの利用だけでなく、数分後の各車

両の予測位置情報を収集し、到着予定車両数を収集することで近未来の交通状況を **Anticipatory Stigmergy** として取り扱い、混雑・渋滞を未然に回避する予見的経路情報の有用性、割当て戦略の必要性を示し、さらに一定期間の工事実施による交通容量減少の影響などを分析している。今後は機械的に判断を行うエージェントのみを対象とした戦略のみではうまく機能せず、ドライバなど最終判断を下す人間との協調行動を考えていく必要性は高い。例えば人間とエージェントとのコミュニケーションコストを考慮した協調行動に関する研究 [Frieder 12] もある。

4.3 交通システムの評価モデルに関する研究

交通システムの導入効果を適切に評価するには、個々人の交通行動を再現できるエージェントモデルを精緻化していくとともに、エージェント間の相互関係や道路ネットワークの混雑に応じて異なるサービスレベルとの関係を把握することが求められる。マルチエージェントシミュレータは、このような複雑な関係性をモデル化することができるが、その関係性を記述するパラメータを推定するための詳細な交通行動の観測データを入手することは困難である場合があり、また実行するためのプログラミング能力と計算能力が必要とされる [Bernhardt 07]。

MATSim (Multi-Agent Transport Simulation) [Balmer 06, MATSim] はドイツやスイスの都市を対象に開発が進められ、近年はオープンソースの都市交通シミュレータとして各地で適用が進んでいるが [Bekhorll 11, Gao 10, Wang 13]、それは汎用性の高い Java で構築されたプログラミングが公開されているため、プログラミング能力と計算能力の問題が少ないことを示している。MATSim は都市圏レベルの個々の市民の活動スケジュール (何時に何処で何を行うか) を算出するため、時間帯によって変化する交通サービスレベルや滞在箇所など多くの制約があるため GA を適用している。また、個々の活動・交通行動を操作可能なため、複雑な交通システムの導入評価を行うことができ、駐車場料金施策 [Waraich 13] やカーシェアリング [Dubernet 13] に関する研究がある。

今後の都市交通システムの評価はスマートシティに関連するものが増えると予想されるため、実際の導入検討にはこれまで以上に多くの利害関係者との調整が必要となる。各関係者の意見を細かに反映することは困難であるが、マルチエージェントモデルのパラメータの組合せで解釈可能な意見は多く、相互理解に役立つ強力な評価ツールであると考えている。著者らも都市圏を対象としたスマートシティ関連施策の評価として、約 800 万人の住民の活動・交通行動を推計可能なシミュレータを開発中であり [金森 12a]、今後の持続可能な社会の実現に向けて研究を行っている。

5. ま と め

マルチエージェントの研究動向とその応用として最近注文されている社会システムへの応用に関する俯瞰的なサーベイを示した。特に本稿では、前半として、経済パラダイム、交渉エージェント、および交通マネジメントに関する研究について示した。

社会システムへの応用は、めざましい速さで進んでおり、関連分野の研究者からマルチエージェントのコンセプト、理論、または応用研究などに、強い関心が寄せられている。マルチエージェントの研究分野は、過去には、分散した複数の (人工的な) 主体を想定し、計算という観点からの分散問題解決、情報共有、資源分配、合意形成などが議論されてきた。近年は、人間自体もエージェントのコンセプトと取り入れることで、実社会に現実的に応用できる研究開発が急速に進んでいる。現状は、マルチエージェントの多くの研究者が望んでいた、実用的な応用分野の拡大と発展の段階に入っている。応用分野が広がることで、エージェント指向ソフトウェア工学で過去に行われたいくつかの標準化が現実的に意味をもちつつある。一方で、理論研究やコンセプトモデル研究の主戦場は、経済学、数学、実験心理学などの分野に及んでおり、単純に“おもしろい”話をするだけではコミュニティに受け入れられない状況でもある。具体的には、マルチエージェント分野の理論研究者は、所属機関においてコンピュータサイエンスの部署に所属すると同時に、経済学や経営戦略などの部署に関わることが一般的である。

最後に、関連論文誌や研究会誌について紹介する。論文誌は、JAAMAS, AI Journal, JAIR などがメインである。Decision Support Systems や Negotiations and Group Decision は、自動交渉エージェントに係る。経済学系の論文誌 (例えば、Games and Economic Behavior) でも、マルチエージェントの理論系の研究は採択されている。また、電力マネジメントや交通マネジメントに関しては、IEEE の Transaction が主な論文誌になる場合が多いが、マルチエージェント研究も多く採択されている。

国際会議については、AAMAS, IJCAI, AAIL, PRIMA, PRICAI, IAT, ICAART などが総合的なマルチエージェント研究のコミュニティがある。一方で、本稿であげたような分野 (電力マネジメント、交通マネジメント、ワイヤレスセンサネットワーク) の IEEE の関連国際会議でもマルチエージェントシステムによるモデル化やシステム開発などが受け入れられている。

国内会議については、JAWS がメインで毎年活発である。その他、各学会の研究会 (情報処理学会知能システム研究会や電気情報通信学会「人工知能と知識処理」研究会など) でも活発な意見交換が行われている。

さらに, 近年はAAMASなどの各種ワークショップが非常に盛んに行われている. 論文として完成していなくても, 将来的に, 新規性がある, おもしろい, 重要性がある研究や開発に関する発表が多く, 個々のコミュニティでは研究議論に加えて国際的な研究交流が進んでいる. AAMASに参加する場合はどこかのワークショップで実際に発表すると良い. 2013年のワークショップには, 例えば, AMEC, ACAN, ATT, WEIN, MASSなどがあるが, 主催する組織の研究者を調べて, 適切なワークショップを選択するとよい. 普段は直接議論できないような研究者と直接議論できるチャンスが多い.

謝辞

本稿をまとめるための調査研究の一部は, 内閣府の先端研究助成基金助成金(最先端・次世代研究開発プログラム)により助成を受けている.

◇ 参考文献 ◇

- [Abbas 12] Abbas, M.: Agent-based modeling and simulation, In Transportation Research Circular E-C168, *Artificial Intelligence Applications to Critical Transportation Issues*, pp. 58-64 (2012)
- [赤松 07] 赤松 隆: 一般ネットワークにおけるボトルネック通行権取引制度, 土木学会論文集 D, Vol. 63, pp. 287-301 (2007)
- [ANA 10] *1st Automated Negotiating Agents Competition (ANAC 2010)*, <http://mmi.tudelft.nl/negotiation/tournament> (2010)
- [ANA 11] *2nd International Automated Negotiating Agents Competition (ANAC 2011)*, <http://www.anac2011.com/> (2011)
- [ANA 12] *3rd International Automated Negotiating Agents Competition (ANAC2012)*, <http://anac2012.ecs.soton.ac.uk/> (2012)
- [Ando 05] Ando, Y., Fukazawa, Y., Masutani, O., Iwasaki, H. and Honiden, S.: Performance of pheromone model for predicting traffic congestion, *Proc. 11th Int. Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS)*, pp. 478-485 (2005)
- [Apple 11] Apple, J., Chang, P., Clauson, A., Dixon, H., Fakhoury, H., Ginsberg, M. L., Keenan, E., Leighton, A., Scavezze, K. and Smith, B.: Green driver: AI in a Microcosm, *Proc. 25th AAAI Conference on Artificial Intelligence (AAAI-11)*, pp. 1311-1316 (2011)
- [Au 11] Au, T.-C., Shahidi, N. and Stone, P.: Enforcing liveness in autonomous traffic management, *Proc. 25th AAAI Conference on Artificial Intelligence (AAAI-11)*, pp. 1317-1322 (2011)
- [Baarslag11] Baarslag, T., Hindriks, K. V. and Jonker, C. M.: Acceptance conditions in automated negotiation, *Proc. 4th Int. Workshop on Agent-based Complex Automated Negotiations (ACAN 2011)* (2011)
- [Baarslag 12] Baarslag, T., Hindriks, K., Catholijn Jonker, S. K. and Lin, R.: *1st Automated Negotiating Agents Competition (ANAC 2010)*, *New Trends in Agent-Based Complex Automated Negotiations* (2012)
- [Bacon 12] Bacon, D. F., Parkes, D. C., Chen, Y., Rao, M., Kash, I. and Sridharan, M.: Predicting your own effort, *Proc. 11th Int. Conf. on Autonomous Agents and Multiagent Systems, Volume 2, AAMAS' 12*, pp. 695-702 (2012)
- [Balmer 06] Balmer, M., Axhausen, K. W. and Nagel, K.: Agent-based demand-modeling framework for large-scale microsimulations, transportation research record, *J. Transportation Research Board*, pp. 125-134 (2006)
- [Barbuceanu 00] Barbuceanu, M. and Lo, W.-K.: Multi-attribute utility theoretic negotiation for electronic commerce, *Proc. Int. Workshop on Agent-mediated Electronic Commerce (AMEC2000)* (2000)
- [Bar-Yossef 02] Bar-Yossef, Z., Hildrum, K. and Wu, F.: Incentive-compatible online auctions for digital goods, *Proc. 13th Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete algorithms (SODA2002)*, pp. 964-970 (2002)
- [Bekhor 11] Bekhor, S., Dobler, C. and Axhausen, K.: Integration of Activity-Based with Agent-Based Models: an Example from the Tel Aviv Model and MATSim, *Proc. 90th Annual Meeting of the Transportation Research Board* (Jan. 2011)
- [Bikhchandani 06] Bikhchandani, S., Chatterji, S., Lavi, R. and Mualem, A.: Weak monotonicity characterizes deterministic dominant-strategy implementation, *Econometrica*, Vol. 74, No. 4, pp. 1109-1132 (2006)
- [Blum 04] Blum, A., Kumar, V., Rudra, A. and Wu, F.: Online learning in online auctions, *Theor. Comput. Sci.*, Vol. 324, No. 2-3, pp. 137-146 (2004)
- [Boutilier 12] Boutilier, C.: Eliciting forecasts from self-interested experts: scoring rules for decision makers, *Proc. 11th Int. Conf. on Autonomous Agents and Multiagent Systems -Volume 2, AAMAS' 12*, pp. 737-744 (2012)
- [Bredin 05] Bredin, J. and Parkes, D. C.: Models for truthful online double auctions, *Proc. 21st Conf. on Uncertainty in Artificial Intelligence (UAI 2005)*, pp. 50-59 (2005)
- [Brier 50] Brier, G. W.: Verification of Forecasts Expressed in terms of probability, *Monthly Weather Review*, Vol. 78, No. 1, pp. 1-3 (1950)
- [Chen 10] Chen, B. and Cheng, H. H.: A review of the applications of agent technology in traffic and transportation systems, *IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 11, pp. 485-497 (2010)
- [Chen 11] Chen, Y. and Pennock, D. M.: Designing markets for prediction, *AI Magazine*, Vol. 31, No. 4, pp. 42-52 (2011)
- [Claes 11] Claes, R., Holvoet, T. and Weyn, D.: A decentralized approach for anticipatory vehicle routing using delegate multiagent systems, *IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 12, pp. 364-373 (2011)
- [Constantin 07] Constantin, F., Ito, T. and Parkes, D. C.: Online auctions for bidders with interdependent values, *Proc. 6th Int. Joint Conf. on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS2007)*, pp. 1-3 (2007)
- [Dash 03] Dash, R. K., Jennings, N. R. and Parkes, D. C.: Computational-mechanism design: A call to arms, *IEEE Intelligent Systems*, Vol. 18, No. 6, pp. 40-47 (2003)
- [Dorigo 97] Dorigo, M. and Gambardella, L.: Ant colony system, A cooperative learning approach to the traveling salesman problem, *IEEE Trans. on Evolutionary Computation*, Vol. 1, pp. 53-66 (1997)
- [Dresner 08] Dresner, K. and Stone, P.: A multiagent approach to autonomous intersection management, *J. Artificial Intelligence Research*, Vol. 31, pp. 591-656 (2008)
- [Dubernet 13] Dubernet, T., Rieser-Schssler, N. and Axhausen, K. W.: Using a multi-agent simulation tool to estimate the carpooling potential, *Proc. 92th Annual Meeting of the Transportation Research Board* (Jan. 2013)
- [Faratin 02] Faratin, P., Sierra, C. and Jennings, N. R.: Using similarity criteria to make issue trade-offs in automated negotiations, *Artificial Intelligence*, Vol. 142, pp. 205-237 (2002)
- [Fatima 06] Fatima, S., Wooldridge, M. and Jennings, N. R.: Multi-issue negotiation with deadlines, *J. Artificial Intelligence Research* (2006)
- [Fatima 07] Fatima, S., Wooldridge, M. and Jennings, N. R.: Approximate and online multi-issue negotiation, *Proc. 6th Int. Conf. on Autonomous Agents and Multiagent Systems* (2007)
- [Frieder 12] Frieder, A., Lin, R. and Kraus, S.: Agent-human coordination with communication costs under uncertainty, *Proc. 26th AAAI Conf. on Artificial Intelligence (AAAI-12)*, pp. 1557-1563 (2012)

- [Friedman 03] Friedman, E. J. and Parkes, D. C.: Pricing WiFi at starbucks: Issues in online mechanism design, *Proc. 4th ACM Conference on Electronic commerce (EC03)*, pp. 240-241 (2003)
- [Fujita 13] Fujita, K., Ito, T. and Klein, M.: The effect of grouping issues in multiple interdependent issues negotiation between exaggerator agents, *New Trends in Agent-Based Complex Automated Negotiations* (2013)
- [Gao 10] Gao, W., Balmer, M. and Miller, E.: Comparisons between MATSim and EMME/2 on the Greater Toronto and Hamilton area network, transportation research record, *J. Transportation Research Board*, pp. 118-128 (2010)
- [Gerding 11] Gerding, E. H., Robu, V., Stein, S., Parkes, D. C., Rogers, A. and Jennings, N. R.: Online mechanism design for electric vehicle charging, *Proc. 10th Int. Joint Conf. on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS2011)*, pp. 811-818, *International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems* (2011)
- [Gneiting 07] Gneiting, T. and Raftery, A. E.: Strictly proper scoring rules, *Prediction, and Estimation*, Vol. 102, No. 477 (2007)
- [Hajiaghayi 05] Hajiaghayi, M. T., Kleinberg, R. D., Mahdian, M., and Parkes, D. C.: Online auctions with reusable goods, *Proc. 6th ACM Conference on Electronic Commerce (EC05)*, pp. 165-174 (2005)
- [Hajiaghayi 07] Hajiaghayi, M. T., Kleinberg, R. and Sandholm, T.: Automated online mechanism design and prophet inequalities, *Proc. 22nd National Conf. on Artificial Intelligence (AAAI2007)*, AAAI Press (2007)
- [Hindriks 06] Hindriks, K., Jonker, C. M. and Tykhonov, D.: Eliminating interdependencies between issues for multi-issue negotiation, *Proc. 10th Int. Conf. on Cooperative Information Agents*, pp. 301-316 (2006)
- [Hoz 13] Hoz, E., Lopez-Carmona, M. A., Klein, M. and Marsa, I. M.: Consortium formation using a consensus policy based negotiation framework, *Complex Automated Negotiations: Theories, Models, and Software Competitions*, pp. 3-22 (2013)
- [Ito 07] Ito, T., Hattori, H. and Klein, M.: Multi-issue Negotiation protocol for agents: exploring nonlinear utility spaces, *Proc. of 20th Int. Joint Conf. on Artificial Intelligence (IJCAI-2007)*, pp. 1347-1352 (2007)
- [Ito 08a] Ito, T., Klein, M. and Hattori, H.: A multi-issue negotiation protocol among agents with nonlinear utility functions: A preliminary report, *J. Multiagent and Grid Systems*, Vol. 4, No. 1, pp. 67-83 (2008)
- [伊藤 08b] 伊藤孝行: 計算論的メカニズムデザイン, 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), Vol. 25, pp. 20-32 (2008)
- [Ito 09] Ito, T., Zhang, M., Robu, V., Fatima, S. and Matsuo, T.: *Advances in Agent-Based Complex Automated Negotiations*, Springer (2009)
- [伊藤 13] 伊藤孝行, 金森亮, Chakraborty, S., 大塚孝信, 原圭祐: 未来の社会システムを支えるマルチエージェントシステム研究: (2) 交通, 電力, および WSN への応用, 人工知能学会誌, Vol. 28, No. 3, pp. 360-369 (2013)
- [岩崎 13] 岩崎 敦, 東藤大樹: ゲーム理論・メカニズムデザインに関する研究動向, 人工知能学会誌, Vol. 28, No. 3, pp. 389-396 (2013)
- [Jennings 01] Jennings, N. R., Faratin, P., Lomuscio, A. R., Parsons, S., Sierra, C. and Wooldridge, M.: Automated negotiation: Prospects, methods and challenges, *J. Group Decision and Negotiation*, Vol. 10, Issue2, pp. 199-215, Springer (2001)
- [Jonker 07] Jonker, C. M., Robu, V. and Treur, J.: An agent architecture for multi-attribute negotiation using incomplete preference information, *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, Vol. 15, No. 2, pp. 221-252 (2007)
- [金森 12a] 金森 亮, 森川高行, 奥宮正哉, 山本俊行, 伊藤孝行: 電気自動車の普及による都市交通と電力需要への影響分析, 土木学会論文誌 D3, pp. 1243-1252 (2012)
- [Kanamori 12b] Kanamori, R., Takahashi, J. and Ito, T.: Evaluation of anticipatory stigmery strategies for traffic management, *Proc. IEEE Vehicular Networking Conference 2012*, pp. 33-39 (2012)
- [Karlaftis 12] Karlaftis, M. G., Easa, S. M., Jha, M. K. and Vlahogianni, E. I.: Design and Construction of Transportation Infrastructure, *Artificial Intelligence Applications to Critical Transportation Issues*, pp. 121-133 (2012)
- [Kawaguchi 11] Kawaguchi, S., Fujita, K. and Ito, T.: Compromising strategy based on estimated maximum utility for automated negotiation agents competition (ANAC-10), *24th Int. Conf. on Industrial Engineering and Other Applications of Applied Intelligent Systems (IEA/AIE-2011)*, pp. 501-510 (2011)
- [Klein 02] Klein, M., Faratin, P., Sayama, H. and Baryam, Y.: Negotiating complex contracts, *IEEE Intelligent Systems Journal, Special Issue on Agents and Markets*, Vol. 18, pp. 32-38 (2002)
- [Krishna 02] Krishna, V.: *Auction Theory*, Academic Press (2002)
- [Kristen 07] Kristen, L. S. and Bernhardt, S.: Agent-based modeling in transportation, *Transportation Research Circular E-C113: Artificial Intelligence in Transportation: Information for Application*, pp. 72-80 (2007)
- [Lai 08] Lai, G. and Sycara, K.: A general model for pareto optimal multi-attribute negotiations, *Rational, Robust, and Secure Negotiations in Multi-Agent Systems* (2008)
- [Lau 05] Lau, R. Y. K.: Towards Genetically Optimised Multi-Agent Multi-Issue Negotiations, *Proc. 38th Annual Hawaii Int. Conf. on System Sciences (HICSS'05)* (2005)
- [Lavi 00] Lavi, R. and Nisan, N.: Competitive analysis of incentive compatible on-line auctions, *Proc. 2nd ACM Conference on Electronic Commerce (EC00)*, pp. 233-241, ACM (2000)
- [Lin 03] Lin, R. J. and Chou, S. T.: Bilateral multi-issue negotiations in a dynamic environment, *Proc. AAMAS Workshop on Agent Mediated Electronic Commerce (AMEC V)* (2003)
- [Luce 89] Luce, R. D. and Raiffa, H.: *Games and Decisions: Introduction and Critical Survey*, Dover Publications (1989)
- [Luo 03] Luo, X., Jennings, N. R., Shadbolt, N., Leung, H. F. and Lee, J. H. M.: A fuzzy constraint based model for bilateral, multi-issue negotiations in semi-competitive environments, *Artificial Intelligence*, Vol. 148, pp. 53-102 (2003)
- [Maestre 11] Maestre, I. M., Carmona, M. A. L., Klein, M. and Ito, T.: Addressing stability issues in mediated complex contract negotiations for constraint-based, non-monotonic utility spaces, *J. Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, (2011)
- [Marsa-Maestre 09a] Marsa-Maestre, I., Lopez-Carmona, M. A., Velasco, J. R. and Hoz, de la E.: Effective bidding and deal identification for negotiations in highly nonlinear scenarios, *Proc. 8th Int. Joint Conf. on Autonomous Agents and Multi-agent Systems (AAMAS-2009)*, pp. 1057-1064 (2009)
- [Marsa-Maestre 09b] Marsa-Maestre, I., Lopez-Carmona, M. A., Velasco, J. R., Ito, T., Fujita, K. and Klein, M.: Balancing utility and deal probability for negotiations in highly nonlinear utility spaces, *Proc. 21st Int. Joint Conf. on Artificial Intelligence (IJCAI-09)*, pp. 214-219 (2009)
- [MATSim] MATSimWeb site: <http://www.matsim.org/>
- [Narzt 10] Narzt, W., Wilfiingseder, U., Pomberger, G., Kolb, D. and Hortner, H.: Self-organising congestion evasion strategies using ant-based pheromones, *IET Intelligent Transport Systems*, Vol. 4, pp. 93-102 (2010)
- [National Academies 07] National Academies Sciences, ed.: *Transportation Research Circular E-C113, Artificial Intelligence in Transportation: Information for Application*, National Academy Transportation Research Board (2007)
- [National Academies12] National Academies Sciences, ed.: *Transportation Research Circular E-C168, Artificial Intelligence Applications to Critical Transportation Issues*, National Academy Transportation Research Board (2012)
- [Parkes 03] Parkes, D. C. and Singh, S. P.: An MDP-based approach to online mechanism Design, *Advances in Neural Information Processing Systems (NIPS)* (2003)

[Parkes 04] Parkes, D. C., Singh, S. P. and Yanovsky, D.: Approximately efficient online mechanism design, *Advances in Neural Information Processing Systems (NIPS)* (2004)

[Parkes 05] Parkes, D. C.: Computational mechanism design, *Lecture Notes of Tutorials at 10th Conf on Theoretical Aspects of Rationality and Knowledge (TARK-05)* (2005)

[Parkes 07] Parkes, D. C.: Chapter 16: Online mechanism design, in Nisan, N., Roughgarden, T., Tardos, E. and Vazirani, V. V., eds., *Algorithmic Game Theory*, pp. 411-439, Cambridge University Press (2007)

[Pita 08] Pita, J., Jain, M., Marecki, J., Ordonez, F., Portway, C., Tambe, M., Westera, C., Paruchuri, P. and Kraus, S.: Deployed AR-MOR protection: The application of a game theoretic model for security at the Los Angeles International Airport, *Proc. 7th Int. Joint Conf. on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems: Industrial Track, AAMAS'08*, pp. 125-132 (2008)

[Pita 11] Pita, J., Tambe, M., Kiekintveld, C., Cullen, S. and Steigerwald, E.: GUARDS -Game theoretic security allocation on a national scale, *Int. Conf. on Autonomous Agents and Multiagent Systems* (2011)

[Porter 04] Porter, R.: Mechanism design for online real-time scheduling, *Proc. 5th ACM Conference on Electronic Commerce (EC04)*, pp. 61-70 (2004)

[Rob 08] Rob, V. and Poutre, H. L.: Constructing the structure of utility graphs used in multi-item negotiation through collaborative filtering of aggregate buyer preferences, *New Trends in Agent-Based Complex Automated Negotiations* (2008)

[Robu 12] Robu, V., Kota, R., Chalkiadakis, G., Rogers, A. and Jennings, N. R.: Cooperative virtual power plant formation using scoring rules, *Proc. 11th Int. Conf. on Autonomous Agents and Multiagent Systems -Volume 3, AAMAS'12*, pp. 1165-1166 (2012)

[Rosenschein 94] Rosenschein, J. S. and Zlotkin, G.: *Rules of Encounter: Designing Conventions for Automated Negotiation among computers*, MIT Press (1994)

[Sachenbacher 11] Sachenbacher, M., Leucker, M., Artmeier, A. and Haselmayr, J.: Efficient energy-optimal routing for electric vehicles, *Proc. 25th AAAI Conference on Artificial Intelligence (AAAI-11)* (2011)

[Soh 04] Soh, L.-K. and Li, X.: Adaptive, confidence-based multi-agent negotiation strategy, *Proc. 3rd Int. Joint Conf. on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems (AAMAS 2004)* (2004)

[Storandt 12] Storandt, S. and Funke, S.: Cruising with a battery-powered vehicle and not getting stranded, *Proc. 26th AAAI Conf. on Artificial Intelligence (AAAI-12)*, pp. 1628-1634 (2012)

[Todo 12] Todo, T., Mouri, T., Iwasaki, A. and Yokoo, M.: False-name-proofness in online mechanisms, *Proc. 11th Int. Conf. on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS2012)*, pp. 753-762 (2012)

[Tsai 09] Tsai, J., Rathi, S., Kiekintveld, C., Ordonez, F. and Tambe, M.: IRIS -A tool for strategic security allocation in transportation networks, *8th Int. Conf. on Autonomous Agents and Multiagent Systems -Industry Track* (2009)

[Varian 08] Varian, H. R.: Designing the perfect auction, *Commun. ACM*, Vol. 51, No. 8, pp. 9-11 (2008)

[Vogel 02] Vogel, A., Ramachandran, D., Gupta, R. and Raux, A.: Using similarity criteria to make issue trade-offs in automated negotiations, *Artificial Intelligence*, Vol. 142, pp. 205-237 (2002)

[Wang 13] Wang, J., Zhang, L., Rao, Q. and Yang, W.: Large-scale agent-based transport simulation in Shanghai, China, *Proc. 92th Annual Meeting of the Transportation Research Board* (Jan. 2013)

[Waraich 13] Waraich, R., Dobler, C., Weis, C. and Axhausen, K. W.: Optimizing parking prices using agent-based approach, *Proc. 92th Annual Meeting of the Transportation Research*

Board (Jan. 2013)

[Williams 11] Williams, C. R., Robu, V., Gerding, E. H. and Jennings, N. R.: Using Gaussian processes to optimise concession in complex negotiations against unknown opponents, *Proc. 22nd Int. Joint Conf. on Artificial Intelligence (IJCAI-2011)*, pp. 432-438 (2011)

[Yamashita 05] Yamashita, T., Izumi, K., Kurumatani, K. and Nakashima, H.: Smooth traffic flow with a cooperative car navigation system, *Proc. 4th Int. Joint Conf. on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems (AAMAS)*, pp. 478-485 (2005)

2013年3月21日 受理

著者紹介



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年日本学術振興会特別研究員。2000年南カリフォルニア大学(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センター助教授。2003年名古屋工業大学大学院情報工学専攻助教授。2005年ハーバード大学およびMIT客員研究員。2006年名古屋工業大学大学院産業戦略工学専攻准教授。2008年MIT客員研究員。2009年科学技術振興機構(JST)さきがけ大挑戦型研究員。2010年東京大学政策ビジョン研究センター客員研究員(シニアリサーチャー)。名古屋工業大学グリーン・コンピューティング研究所(プロジェクト研究所)所長。現在に至る。2013年文部科学大臣表彰科学技術賞(研究部門)。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。2007年文部科学大臣表彰若手科学者賞。情報処理学会会長尾真記念特別賞。2006年国際会議AAMAS2006最優秀論文賞。2005年日本ソフトウェア科学会論文賞。2005年IPA未踏ソフトウェア創造事業スーパークリエイタ認定。第66回情報処理学会全国大会優秀賞及び奨励賞。AAMAS2013プログラム委員長。IFAAMAS理事。ACM, 情報処理学会, 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。



金森 亮 (正会員)

1999年名古屋大学卒業。2001年同大学院工学研究科修士課程修了。建設コンサルタントとして勤務後、2007年名古屋大学大学院環境学研究科博士課程修了。博士(工学)。東京大学、名古屋大学で特任助教を経て、現在、名古屋工業大学特任准教授。交通計画の研究に従事。



Shantanu Chakraborty (正会員)

Dr. Chakraborty is currently working as a Research Assistant Professor in Nagoya Institute of Technology. He received his Doctorate degree in 2012. His research interest includes smart grid, operation research, multi-agent system, intelligent system etc. He is an active member of IEEE.



大塚 孝信 (正会員)

2011年名古屋工業大学大学院博士前期課程産業戦略工学専攻修了。修士(工学)。2004年より2011年まで航空機の生産技術業務に携わる。2012年より現在、名古屋工業大学大学院しくみ領域特任助教。2013年よりカリフォルニア大学アーバイン校客員研究員。現在に至る。



原 圭佑 (学生会員)

2013年名古屋工業大学工学部機械工学科卒業。同年、同大学院工学研究科博士前期課程産業戦略工学専攻在学中。