

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 (2)

—電力システムおよびワイヤレスセンサネットワークへの応用—

A Survey of Multi-Agents Research That Supports Future Societal Systems (2)
—Power Systems, and Wirelss Sensor Networks—

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/

チャクラボルテイ シャンタヌ Shantanu Chakraborty
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.
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

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

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, power systems, wireless sensor networks.

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である。

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]。後半の本稿では、1章で電力システムとマルチエージェントシステ

ムの研究動向について述べる。2章では電力システムにおける需要スケジューリングや価格戦略に関する研究動向について述べる。3章ではマルチエージェ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、第4章でまとめる。前半[伊藤 13]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た。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た。第4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、まとめた。

2. 電力システムとマルチエージェント

2.1 概要

近年、持続性のエネルギー社会・低炭素社会の実現に向けて環境負荷を低減可能な太陽光発電 (Photovoltaic generation: PV) や風力発電など自然エネルギーを利用した発電技術が注目されている。また、2011年の東日本大震災以降、電力不足を背景に電力の供給信頼性の向

上が求められており、大規模集中型の電力供給形態から脱却するために、将来の電力供給源として分散型電源 (Distributed Generation : DG) が期待されている。将来的には電力システムに大量の DG が導入されることも予想される。

DG が大量に電力システムに連系されると電力システムの運用に悪影響を及ぼすことが懸念されている。主なものとして、DG の発電電力による逆潮流に伴う配電システムの電圧上昇、DG の激しい出力変動に起因するシステムの周波数変動、短絡、地絡事故の保護機能低下、単独運転検出機能低下などがあげられる。特に、小容量 DG が配電システムへ大量連系するような場合、逆潮流の発生に伴い電圧の適正值への維持が困難となる。

電力システム分野において電力自由化が進展中であり、電力自由化の対象がすべての特別高圧需要家と高圧需要家に拡大している。電力システムの複雑さは、大規模化に従って増加してきたが、近年では規模だけにとどまらず、電力自由化によりこれまでとは異なる要素が電力システムに組み込まれることが予想されている。電力自由化で、電力ビジネスへの参入や撤退が自由な状況下においても、電力システムは電力エネルギーの信頼性を確保する必要がある。複数のプレーヤが自由に参入や撤退する電力システムにおいては情報の収集が困難になるため、市場参入者を含む関係者全員の協調が必要となる。このような状況では、情報の不確実性が増大するため、コントロールセンタにすべての情報を収集し、センタ内の計算機を用いた集中処理では適切にコントロールするのが難しくなる。すなわち、電力システム設備を所有する主体間での局所的な相互作用を繰り返すことで、電力システム全体として望ましい運用・制御が実施されるような自律分散型 (マルチエージェント型) システムへ移行する必要がある。したがって、今後の電力システムの計画・運用・制御において複数のエージェントから構成されるマルチエージェント技術について関心が高まっている。例えば、マルチエージェントシステムを適用した研究としては、電圧無効電力制御や配電システムの事故復旧問題などについて研究が実施ある [Colson 11, Conte 09]。

2.2 電圧・無効電力制御システム

ここでは電圧・無効電力制御システムについて述べる。電力システムは全体として一つの巨大なシステムであり、電力の発生、輸送および分配の各機能を有する設備と電力の安定供給を維持するための保護装置、制御装置、通信装置などにより構成されており、システムの目的は需要家に対して良質の電力 (周波数変動が少ない、電圧変動が少ない、停電が少ないなど) を効率的に供給することである。

電力システムでは現在、電力を定電圧送電方式で供給しており、すべての電圧機器は、おのおのの定格電圧のもとで正常な機能の発揮するように製作されていることから、受電端において電圧を規定値に維持できるように運

用する必要がある。需要家の受電電圧の許容変動範囲は、電気事業法第 26 条 (電圧と周波数) により、低圧系では $101 \pm 6 \text{ V}$ 、 $202 \pm 20 \text{ V}$ と目標電圧値が定められており、特別高圧需要家に関しては、特に省令で定められていないが、低圧目標値を維持するために、一般に $\pm 5\%$ 、 110 kV 以上の送電システムについては $\pm 13\%$ に抑えるように制御を行っている。

配電システムにおいては、配電用変電所において定格電圧 (一般的に、 6600 V とされる) に降圧された電力は、電柱に設置された柱状変圧器により定格 100 V の低電圧に変換され各需要家に供給される。配電システムの電圧は、配電線路には抵抗やリアクタンスといったインピーダンスが存在するため電圧は降下する。そのため、現行の配電システムではさまざまな電圧制御機器を用いて電圧を適正範囲に管理している。しかし、電圧制御機器は配電システムの電圧が降下するという前提のもとで設計されているため、電圧が上昇してしまうと適切に電圧を維持することができなくなる場合がある。DG が電力システムに大量に連系されると逆潮流などの電圧上昇を引き起こし、電圧が適正範囲の上限を逸脱することが懸念されている。また、PV や風力発電などの DG の出力は気象に影響されることから出力変動が速く、電圧を適切に制御するためには、制御動作が高速な機器が必要となってくる。このような電力制御をマルチエージェントを導入して解決を試みる研究が数多く行われている。[Mishra 13] では周波数に焦点を当ててカルマンフィルタを実装することで電力制御を行っている。

2.3 マイクログリッドに関する研究

マイクログリッドとは、分散型電源と需要設備から構成される小規模システムを商用システムと一点で連系、あるいは商用システムから独立させて、この中で需給制御を行うことが可能なシステムのことである。マイクログリッドには以下のような用途や効果が期待できる。

【供給信頼度と電力品質を向上したシステムの構築】

商用システムで大規模停電が発生した場合には、マイクログリッドを単独システムとすることで重要負荷に継続した電力供給が可能となる。

【経済的なエネルギー供給システムの構築】

コージェネレーションの排熱を有効に活用することでエネルギーの総合利用効率を高め、さらに地域内での相互融通により一層経済性に優れたエネルギー供給システムの構築が可能となる。

【システムに優しい分散型電源システムの構築】

自然エネルギーには出力が不安定であるという欠点があるが、同種あるいは異種の電源を組み合わせることで平均化効果や相互補完効果が期待できる。さらには蓄電池などとの結合により一層出力変動の少ない電源とすることができる。

【離島や辺地向けの電力供給システムの構築】

商用システムとの連系が不可能な地域向けの電力供給シス

テムとして適用できる。

マルチエージェントに基づくマイクログリッドに関する研究が数多く行われている。[Motamedi 12, Rose 12]ではマイクログリッドにおいて需要予測に基づき資源分配を最適化している。マイクログリッドにおいて、需給バランスを維持することは重要である。[Kim12, Shao 11, Shao 12, Tyagi 11, Venkatesan 11, Wang 11]ではデマンドレスポンスに基づいて電力需給の調整を行っている。デマンドレスポンス (Demand Response: DR) とは、電力需要の価格弾力性を活用して、一時的に購入電力を調整する技術・システムである。デマンドレスポンスにより電力系統の状態に応じて時々刻々と変動する価格情報を需要家に提供し、需要家側はその情報に応じて電気機器の使用を調整し、電力需給のバランスを保つ [Conejolo 10b, Jiang 11]。[Cai 12]では、経済負荷に焦点を当てて電力需給の調整を行っている。マイクログリッド内におけるエージェント間交渉に関する研究は数多く行われている。[Logenthiran 11]では、分散電源システムの資源のスケジューリング手法を提案している。本文の手法では、エネルギー市場において各エージェントが自身の需要を満たすように入札を行い資源分配を試みており、最小の運用コストで効率的な資源分配が可能となっている。[Logenthiran 10]では、エネルギー資源の管理をトップダウンではなくボトムアップにより行い、集中型エネルギーマネジメント (EMSs) にも対応可能なことを示している。

2.4 実証実験

スマートグリッドに関する研究は計算機によるシミュレーションだけではなく、大規模な実証実験がこれまでに数多く行われている。例えば、沖縄電力が宮古島で行っている離島向けマイクログリッドの実証事業では、人口5万5000人規模で実際に運用している系統網において、蓄電池による系統安定化の効果が確認されている。本実証事業は、資源エネルギー庁の「離島独立型系統新エネルギー導入実証事業」の一環で進められており、電源のほとんどをディーゼル発電機に頼る離島で、低炭素化を図るために太陽光発電などの再生可能エネルギーを大量導入する際の問題点を洗い出し、解決に向けた技術開発を目的としている。具体的には、蓄電池やEMS (エネルギーマネジメントシステム) の導入によって、再生可能エネルギーの出力変動が系統に及ぼす影響を低コストで抑える。[Yoo 12]では、ハードウェアにエージェントを実装することで直流電源のマイクログリッドのモデルを作成しシミュレーションしている。[Yoo 12]では、シミュレーションツールとして、工業製品の開発過程で最も使われている Hardware-In-the-Loop (HIL) を用いている [Ren 11]。HIL シミュレーションは、組込制御システムをより効率的にテストできる高機能なテスト方式であり [Conejolo 10a, Li 10], リアルタイムプロセッ

サ、I/O インタフェース、およびオペレータインタフェースの三つの主要コンポーネントで構成されている。ここでは直流電源のマイクログリッドモデル (マイコンと Zigbee により構成) を Matlab/Smulink と OPAL-RT を用いることで実装しており、実装上の注意点について詳しく言及している。ここではエージェント同士のコミュニケーションを Zigbee を通して通信しており、マイクログリッドにおいて協調的に電力需給を調整している。

3. 電力消費スケジューリングとスマートグリッド価格戦略

3.1 概要

本節では電力消費スケジューリングと電力系統における価格戦略の最近の研究動向をまとめる。近年では、スマートグリッドやスマートハウスに代表されるような電力消費や電力供給をマネジメントする研究が多い。そのため、消費者の電力消費を管理することにより電気事業者の電力供給価格を変化させるさまざまな価格決定モデルが提案されている。代表的な価格決定モデルには、電力消費量によって価格をリアルタイムに変動させる Real-Time Pricing (RTP), 一日前の電力消費量をもとに価格を決定する Day-Ahead Pricing (DAP), 時間ごとによって価格を設定する Time-Of-Use Pricing (TOUP), 電力消費のピーク時間によって価格を決定する Critical-Peak Pricing (CPP) などがあげられる。以上に述べた代表的な価格決定モデルは二つの情報をもとに構築されている。一つ目は電力が消費される時間を考慮しており時間ごとに価格を設定している。二つ目は電力消費量のピークを減少させることで全体のコストを下げる方法であり、主に Peak-To-Average ratio (P2A) を考慮することでピーク時の負荷を分散させる。現在ではさまざまな価格決定モデルが提案されており、消費者の電力使用時間をスケジューリングすることにより負荷を軽減する研究も行われている。

3.2 TDP における価格決定に関する研究

【電力消費スケジューリングとスマートメータ】

スマートグリッドの目的は電力事業者と電力消費者において電力需要を双方向に共有することで需要やピーク負荷を減少させることにある。具体的には、家庭に設置されたスマートデバイスが家庭内の時間帯ごとの電力消費量を可視化し、それらのデータを電力事業者や電力供給事業者と共有することで、利用時間帯ごとに電気料金を設定する Time Dependent Pricing (TDP) に生かされている。

また、スマートメータの情報による電力価格の変動をデータベース化し、電力価格の低い時間帯を考慮して家庭内の電気機器を制御する Energy Consumption Controller (ECC) という機器がある。ECC はスマートメータに内蔵されており、電力事業者が設定した時間帯ご

との電力価格情報をもっており、時間帯ごとの電気料金によって湯沸かし機や空調機器などの制御を自動もしくは手動で行うことができる。ECCにより、消費者は自らスイッチを操作することなく、電気料金の低い時間帯に消費電力の高い機器を動作させることで電気料金を削減できる。同時に、電力事業者にとってはピーク時間帯などの集中負荷が分散されピーク電力に対応する発電コストを減少できるというメリットがある。

近年のTDPに関する研究では、時間帯ごとに設定される電気料金を1日または2日ごとに予測することで電気機器の制御スケジューリングを行う研究 [Sachenbacher 11] がある。また、異なる消費者が電力供給源を共有する状況を想定し、電力需要をシミュレーションによってスケジューリングすることにより電力配分を最適化する研究 [Storandt 12] もある。また、気温に応じて消費される電力需要を予測することで電気料金を決定するメカニズムに関する研究 [Apple 11] や、電力価格の決定を最適化するために2002年には実際の電力消費データを分析する試験研究 [Vogel 02] がある。 [Dresner 08] ではリアルタイムに取得された電力消費データをもとにした電力消費量の予測が行われている。さらに、消費者の電力消費量に応じて動的に電気料金を変化させる研究 [Au 11] も行われている。電気料金が動的に変化した場合を想定し、電力事業者の選択に関する研究 [National Academies 07, National Academies 12] もある。類似した研究としてスマートグリッドにおける電力事業者の選択に焦点を当てた研究 [Karlaftis 12] も存在する。さらに、電力料金をオークションによって決定するメカニズムに関する研究 [Abbas 12] や、一部の消費者から得られた電力消費データをもとにして全体の電力消費予測を行い、ゲーム理論を用いて電力価格を解析する研究 [Chen 10] もある。

多くの研究は実時間に取得した電力消費データをもとに時間帯ごとの電力価格を設定する。例えば、実データから需要曲線を構築することで価格決定を行う研究 [Wells 04] や、実際に得られたデータからシミュレーションによりピーク時とそうではない時間帯に電力料金を設定する研究 [Narzt 10] もある。また、実データを用いて過負荷による電力供給の停止を防止する研究 [Ando 05] もある。さらに、現実世界にTDPを導入し実際に運用することで社会的効用を最適化を目的とする研究 [Claes 11, Yamashita 05] も行われている。

3.3 RTPにおける価格決定に関する研究

【動的な価格決定とは】

電力消費量に合わせて動的に価格を変動させるメカニズムについては古くから研究がなされており、最も古いものでは半世紀以上にさかのぼり、ピーク時の電力量を削減することを目的とした研究 [Houthakker 51, Steiner 57] として始まっている。現在の研究ではRTP

を電力事業者の利益を最適化する経済的利点に焦点を当て、広く研究されている [Alexander 07, Borenstein 04, Burke 09, Centolella 09, Wolak 06]。代表的なものでは、システム全体をシミュレートするために、詳細な料金モデルを設計することでRTPおよびCPPを決定する研究 [Burke 09, Centolella 09] がある。一方で、環境負荷を最小化するためにRTPが用いられており、SO₂、NO₂、およびCO₂の減少を目的としてピーク電力を水力発電を代表とした、石油を用いない供給源を用いる研究 [Holland 08] がある。近年、北米ではDAPによる価格決定を実際に運用している電力事業者があり、イリノイ電力 [Co 10] では実際にDAPにより価格決定を行っている。また、カナダのトロントにあるオンタリオハイドロ社 [Residents 09] では一定量の規定を設定し一日の電力消費量を on-peak, mid-peak, および off-peak の三つに分け、電力価格を決定している。

RTPにおける価格決定メカニズムについてはさまざまなモデルが提案されている。 [Reiss 05] では消費電力の上昇率である Inclining Block Rates (IBR) を用いて価格決定を行うことにより全体的な消費量を制御する。 [Mohsenian-Rad 10b] では日ごと、月ごとおよび時間帯ごとの総電力消費量をアパートや住居ごとに設定し、超過した電力料金については高額に設定することで消費者にインセンティブを与えることで平均的に電力負荷を分散させる。

1980年代以降に登場したプラグインハイブリッド車 (PHEVs) は新たに電力負荷を生むことが予想されている。近年では、PHEVsが一般化してきており、通常の走行では1マイル当たり0.2~0.3kWの電力を消費することがわかっており [Ipakchi 09]、PHEVの充電に必要な電力負荷が加わることで、平均的な世帯当たりの消費電力量は倍になるといわれている [Ipakchi 09]。一方で、PHEVsの利点は、充電した電力を消費者のバッファとして利用できる点である。

また、RTPやIBRに代表される動的な電力価格決定においてのPHEVsの充電開始時間を最適化する研究 [Ann-Piette 09, Mea-surement 05] も行われている。しかし、RTPを運用するうえでの問題点は二つあげられる。一つ目は現在の家庭内で用いられる一般的な電気機器は手動でon/offされることにある。そのため、消費者は価格帯に合わせて電気機器のスイッチを操作する必要がある。二つ目は時間ごとに更新される電力価格をリアルタイムに入手する必要がある。例えば、米国シカゴではRTPが導入されており、消費者が現在の電力価格を知るためには電話かインターネットを利用して価格を知る必要がある。電力価格の監視には常に電力価格を問い合わせることで最新の電力料金を入手するデバイスを用いた [Allcott 09] もある。以上のようにRTPにおける研究が行われているが、リアルタイムに価格が変動するため問題点も存在する。これらの問題点を解決するため、

家庭内やコミュニティでのバッファとしての蓄電池を用いた研究も近年では行われている。

3.4 インセンティブを用いた電力負荷制御

【デマンドレスポンスによる価格決定】

近年、電力価格決定の研究において、新しい分野が開拓されている。各家庭や消費者が“デマンド”すなわち必要な電力量を電力供給者に伝えることで電力供給を最適化するもので demand response (DR) と呼ばれている。DR はインテリジェントな電力制御が可能となっており、電力負荷の軽減に対して有効である。DR は多くの利点があり、RTP における問題点の解決に役立つと考えられている。最近の研究では、住居の電力使用料を事前に決定し、電力供給者に伝達する load commitment (LC) により電力料金を最小化する研究 [Rastegar 12] も行われている。また、DR の研究では RTP における問題点を解決するため、バッファとしての蓄電池が用いられることが多い。さらに、蓄電池における充放電回数の制御の最適化や PHEVs の蓄電池を利用し、局所的な電力要求に対応することで電力供給網全体の電力負荷のピークを分散させることを目的としている。以上により、各家庭が LC の最適化を行うことにより総電力量のピークを平均化した値である peak to average ratio (PAR) を用いることで合理的な電力供給を行うことを目標としている。さらに発展した研究として、各家庭に設置された制御ユニットと電気機器が直接通信し、制御することで消費電力量を制御する Direct Load Control (DLC) という方法も提案されている。以上の技術が実現することでさらに精度の高い電力消費量の算出が可能になる。

【電力制御におけるインセンティブメカニズムデザイン】

デマンドレスポンスの分野において、通常とは異なるアプローチの研究もある。それらは、消費者にインセンティブを与えることで需要をコントロールするインセンティブメカニズムデザインを用いている。インセンティブメカニズムデザインの一例として、消費者が利用する機器の時間帯を確率的に求めることで家庭用電力機器の消費電力を予測し、需要の予測を行っている。消費者が家庭用電力機器を使用する確率は、スコアリングルールによって求められ、電力の消費予測に反映される [Boutilier 12]。さらにエージェントを用い、真実申告を行うことにより正確な需要予測を可能としている研究 [Ivanovski 11] もある。これらの研究は、スマートグリッドの分野でも適用されており、電力消費量の予測に応用した研究 [Harry 12] や、発電機を分散して配置し、真実申告による電力の割当てをシミュレーションした研究 [Robu 12] などがある。また、インセンティブによる価格決定メカニズムの研究には [Mohsenian-Rad 10a, Samadi 10] もあげられる。また、スコアリングルールを用いた興味深い研究として電力網における価格決定を最適化した研究 [Chakraborty 12] では、一日の電力消

費予測を決定するために、電力事業者の発電コストのスコアリングルールを用いる。そして、電力事業者が発電量を制限したい時間帯には消費する電力量を減少させ、電力需要が減少している時間帯に電気機器の使用をシフトすることを実現している。そのため、電力事業者は電力需要が減少している時間帯に電力を消費する消費者に対してはインセンティブとして電力料金の割引を行うことで、消費者と電力事業者双方の利得を最適化することが可能となっている。

本節では、近年の電力供給網における価格決定メカニズムに焦点を当てて論じた。消費者と電力事業者のどちらかが利得を得るメカニズムではなく、双方にとって利得が得られるデマンドレスポンスを用いてインセンティブを与えるメカニズムが研究されている。スマートメータやプラグインハイブリッドの技術の発展により、今後はさらに精度の高い電力供給制御や価格決定メカニズムが実現できる。

3.5 電力マネジメントのマルチエージェントシミュレーション

電力マネジメントに関するマルチエージェントシミュレーションの関連研究について述べる。

[Vytelingum 10b] では、エージェントに基づく蓄電池のマネジメント手法を提案している。[Vytelingum 10b] では、電力の自由化の進んだイギリスの実際の電力消費データや、リアルタイムで変化する電気料金モデルを用いてシミュレーションが行われている。[Vytelingum 10b] のモデルでは再生可能エネルギーは想定されておらず、リアルタイム料金制におけるより経済的な蓄電池の有効利用や電力購入戦略に主眼が置かれている。[Ramchurn 11] では、住宅内部の需要コントロールに関して述べられている。[Ramchurn 11] は、家庭内の電力需要をいくつかに分類して、電力使用のタイミングを変化させることで需要のピークの回避している。[Voice 11] は、[Vytelingum 10b] を発展させたモデルに関する論文である。[Vytelingum 10b] では電力の経済的な購入戦略を提案していたが、[Voice 11] では家庭からの余剰電力の売却も扱っている。そのため、家庭だけでなく電力事業所にも戦略を定義して、家庭、電力事業所および市場における電力の価格決定モデルを提案している。[Voice 11] は、スマートグリッドの主要な課題の一つである電力の価格決定を扱う点が優れている。

[Reddy 11] は、PowerTAC におけるブローカーエージェントによる電力売買モデルを提案しており、家庭と電力事業所の両者が電力の購入も売却もできる。そして家庭と電力事業所間に、Tariff Market と呼ばれる関税を用いた市場を定義して、市場においてブローカーエージェントが電力の売買を仲介している。[Reddy 11] は、電力売買に対して市場やブローカーエージェントを定義したメカニズムを提案している。[Sathyanarayana 10] は

多目的最適化による電力マネジメントに関する論文である。多目的最適化分野のノウハウをスマートグリッドに適用するための基本的なアプローチがまとめられており、多目的最適化分野からの電力マネジメントに対する関連研究も豊富に調査されている。また、多目的最適化分野の技術を使うことで、最適化の結果に対してパレート最適性を保証できる手法を提案している。

[Vytelingum 10a] は、分散した小型蓄電池の需給バランス調整のためのオークションに基づくメカニズムを提案している。[Vytelingum 10a] では、Continuous Double Auction (CDA) を用いて市場において異なるエージェント同士のバランス調整を行い、電力の需給バランスを適切に整えている。[Lot 12] は、規制緩和された市場の中期的な電力立案のために確率的な MILP を開発した。特徴としては、全国的な電力グリッド内のさまざまな地域の違いおよび、テイクオアペイ契約や燃料キャップアンドトレードの排出規制がモデル化していることである。[Sichao 10] は、2008年11月に日本卸電力取引所内の新市場として開始されたパイロット取引をエージェントシミュレーションによって評価している。シミュレーション結果から、厳密なCO₂排ガス規制のもとで、市場の価格が通常の電力為替市場のそれよりも高いにもかかわらず、新たなCO₂の自由市場からより多くの電力を購入する傾向があることを明らかにした。

4. ワイヤレスセンサネットワークに関する研究動向

4.1 照明、空調のフィードバック制御に関する研究

【通信可能なセンサとその利点】

近年、スマートフォンに代表される情報端末が広く普及している。通信モジュールや各種センサ類の小型化が進むとともに、通信モジュールとセンサを組み合わせた無線通信によるセンサネットワークの研究が多く行われている。従来型のセンサを用いた研究では少数の高価なセンサを特定の場所に据え付けて測定を行う。測定値はセンサ近傍に出向かなければ得ることができない。近年のワイヤレスセンサネットワークは安価なセンサを任意の場所に大量にばらまくことで“点”の情報ではなく“面”で情報を捉えることで実用上十分な精度を得るというアプローチが多い。

また、ワイヤレスセンサネットワークの特徴としてリアルタイムの情報を取得可能という点があげられる。代表的な例として、橋梁や高速道路などの建造物における健全性をモニタリングする構造センシングや温度や湿度を大規模に計測して可視化を行う環境センシングなどがあげられる。さらに、取得した情報を照明や空調システムのフィードバック制御に用いることで電力消費量を減少させる研究も行われている。また、内蔵したプロセッサにより搭載した各種センサ情報によるフィードバック

制御もある。ほかのユニットと相互通信を行うことで自律動作を行うロボット群もワイヤレスセンサネットワークであり広く研究が行われている。しかし、大規模にセンサ情報を取得する際には通信の集中によるネットワークのスタック対策や無線通信の品質への対策が重要である。そのため、電波強度によって通信先を自動判断するアルゴリズムや通信の傍受を防ぐためのアルゴリズムについても研究されている。

以下ではまず、エネルギー消費量を削減するためのフィードバック制御のためのセンサネットワーク研究、ワイヤレスセンサネットワークにおける通信制御の最適化に関する研究および、外部からの攻撃に対するセキュリティ対策の研究について述べる。また、主にロボティクス分野で用いられているセンサネットワークについて論じる。そして最後にセンサネットワーク研究の動向についてまとめる。

【環境情報のセンシング】

環境情報とは、気温や室温、人が存在するなどの空間情報をセンサにより電気信号に変換することで得られるデータのことを指す。我々の生活の中ではさまざまな環境情報のセンサが実際に運用されているが、意識をしない限り見ることは少ない。例えば身近な例では自動水栓やセンサライトおよび空調装置が例としてあげられる。現行の自動水栓やセンサライトや空調装置のセンサはネットワーク化されていない。センサネットワークでは、生活環境に設置されたセンサ技術がネットワークで統合されることで、生活が少しずつ手軽に便利になる。センサネットワークでは温度センサや湿度センサといった環境情報を統合し、効率的に空調機器や照明機器をコントロールすることでエネルギー消費量を減少させることを目的とした研究が広く行われている。代表的な研究として大学内に設置された照度（明るさ）センサ、温度センサ、および人感センサの情報から、人が多く集まっている部屋では空調や照明を稼働させ、そうでない部屋や時間帯には空調の設定温度を下げたり、照明を間引きするなどのコントロールを行うアルゴリズムに関する研究 [Kwak 12, Mamidi 12] などがある。これらの研究はスマートグリッドやスマートシティの実証実験にも応用されており、一般家庭向けには個別の住人の生活パターンを学習することで最適な空調パターンに調整する機器 [http://www.nest.com/] なども実用化されている。

【センサ情報を利用した研究】

センサ情報を解析、分析することで実世界での応用を目的としたアプリケーションの開発を行う研究は現在最も盛んに行われている。例えば人が多く集まっている部屋では空調や照明を稼働させ、そうでない部屋や時間帯には空調の設定温度を下げたり、照明を間引きするなどのコントロールを行うアルゴリズムに関する研究 [Kwak 12, Mamidi 12] がある。海上に設置されたセンシングブイの位置を周囲にある少量のビーコン情報から

特定するアルゴリズムに関する研究 [Hrotenok 10], 気温のセンシングを目的としたロボット群において, 最も効率的にセンサノードを配置するアルゴリズムに関する研究 [Lowy 12] もある. 人体に装着した加速度, 体温, 脈拍センサの情報から正確な運動強度を算出するための研究 [Vyas 11] もある. 高齢者のみまもりを目的とし, 人体に装着した加速度センサからの情報をもとに卒倒などの異常動作を検知するための研究 [Lustrek 11] もある.

4.2 WSNsにおける通信方法の最適化

【通信制御の必要性】

センサネットワークは通常, アドホック (ad hoc) 機能と, 各ノードから中枢ノードへデータを送るためのルーティング機能をもつ. つまり, ノード間の通信に障害が発生すると別の通信経路を自律的に再構築する機能がある. ノードがグループとして連携するため分散処理の要素もある. 特に, 無線ノード数が大幅に増加した際に, それら無線ノードをいかに管理・運用するかは, 大きな課題である. 無線ノードの数が増加すると, それら無線ノードの集中的な管理や運用が困難になる. 携帯電話システムや無線 LAN システムなどでは, 基地局やネットワーク管理装置で集中的に無線ノードの管理を行っているが, センサネットワークシステムでは数千~数万といった膨大な数の無線ノードに対応するため, それら管理装置を必要としない管理や運用手法が求められる. その他にも, 無作為な無線ノードの配置, 無線ノードの故障, 無線ノードのシステムへの追加, 削除に柔軟に対処できる手法など, 従来の集中管理の手法からマルチエージェントモデル (自律分散的) 手法への転換により解決が期待されている.

また, センサネットワークではバッテリー駆動が基本となるため, 省電力を目的とした通信制御も必要である. 無線通信では送信距離の2~4乗に比例した送信電力が必要となるため, 長距離を1ホップで通信する代わりに, 複数の無線ノードを中継するマルチホップ通信を利用した通信により, 1ホップを短くすることで, 消費電力の節約につなげようとする手法もある. しかし, マルチホップ通信を用いる場合, 自律分散的なアクセス制御方式として広く用いられている CSMA (Carrier Sense Multiple Access) などのプロトコルでは, マルチホップ通信によるパケットの増加に伴い通信衝突が頻繁に発生し, スループットの著しい低下が生じるという問題がある. そのためスループットの低下を目的として電波強度が高いノードの最短経路を自動で通信経路とするアルゴリズムの研究 [Le 10, Stranders 10] もある. また, 衝突の起こらない通信方式として TDMA (Time Division Multiple Access) 方式がある. TDMA は時間分割の多重化技術であり, 1フレームの特定スロットを各無線ノードが通信するタイミングとして割り当てることによって通信タイミングの重複を避ける研究 [Lisy 10] も行わ

れている. また, マルチホップ通信においては非同期の通信となっているが, ノード間の通信距離によって同期速度を変更する研究 [Mihaylov 11] などもある. さらに, エージェントを用いて通信量をノードごとに最適化することで無線通信の信頼性を確保する研究 [An 11, Stein 12] なども行われており, 大規模なセンサネットワークの運用の信頼性を確保するための多くの研究が行われている. 不正なパケットを排除する技術に関しても研究されている. 通信環境などの外的要因により不正なパケットが観測された際に, う回するノードを自動で設定する研究 [Vaneky 12] もある.

4.3 フィードバック制御のための WSNs

【ロボティクス分野における WSNs】

ロボットは動作の自律性から, いくつかのタイプに分けることができる. タイプの一つとして, センサによる視覚および聴覚を備え外部からの情報提供がなくとも自律的に環境を認識し行動する自律型ロボットがある. 空間内を移動するロボットには人間が指示や命令を伝えることが必要である. さらに, 通信によってロボットを動かすプログラムをダウンロードしたり入れ換えたりすることによって, 環境や状態の変化に柔軟に対応したり, 一つのロボットを多目的に利用することが可能になる.

以上のようにロボット研究で必要となる技術と, センサネットワーク研究で必要となる技術には多くの共通点がある. さらに, 操作者だけでなく外部センサ, ほかのロボットなど, さまざまな相手と通信を行うことで性能の向上を実現している. つまり, 従来型の1対1の通信ではなく, 1対複数, 複数対複数の通信により獲得したセンサ情報を共有するセンサネットワークとしてのロボティクス技術が多く存在する. 現在では, ワイヤレスセンサネットワーク技術を用いて, 通信の対象がほかのロボットにも広がり, ロボット間通信によって情報交換しながら動作するロボットが多く研究されている.

自律型ロボットであっても自らのセンサだけでなく外部との通信による情報も取得したほうがよりの確な行動が可能となるため, 空間情報を広く認識するロボットと局地的な空間情報を認識するロボットを組み合わせる移動経路を最適化する研究 [Mathews 12] も行われている. ロボットの移動経路探索については iRobot 社の販売する Roomba が有名だが, Roomba は単純な接触スイッチを用いるのみで部屋全体の空間認識を行わずに, 環境に対してリアクティブに探査を行う包摂アーキテクチャを採用している [http://www.irobot.com/us/]. ただし Roomba の方法では空間認識を行わないために, 空間全体の移動パスを最適化することができないため, すべての箇所を移動するには大きな時間がかかるといったデメリットが存在する. そのため, 目的に応じてロボットの移動経路を最適化するために各種センサ情報を用いて最短経路での移動や目的に適した移動経路を導き出す

ための研究が広く行われている。具体的には、センシングユニットを搭載したロボット群をマルコフモデルを用いた移動経路を指定することで、センシング対象に応じたセンサノードのメッシュを構築する研究 [Low 11] や、限られた視界情報の中で探索を行い、自律的に建物内部を探索し、マッピングを行うアルゴリズム [Fazli 10] などあげられる。

また、センシング情報を特定の場所に送信するのみのセンサノードと異なり、自律ロボット群の通信においては大量の相互通信を行うため、大規模な相互通信ロボット同士の通信において通信の最適化が必要となるが、すべてのロボットが相互通信を行うのではなく通信圏内にいる無作為のロボットが代表して他の通信圏内にある最も近いロボットを自動的に判別して通信を行う研究 [Ducatelle 12] も行われている。

以上のようにセンサネットワークと昨今の自律ロボットに関する研究は共通点が多く、ロボットそのものがセンサノードの役割をしている研究も多く存在する。単にその場所のセンサ情報を読み取るだけでなく、情報が必要な場所に自ら移動し、センシングを行うことも可能となり、災害や防犯分野においての活用が期待されている。

5. ま と め

本稿では、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。社会システムへの応用は、マルチエージェントコミュニティの中の研究者が想像する以上に進んでおり、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、またか応用研究などに、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。

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,

- Transportation Research Circular E-C168: Artificial Intelligence Applications to Critical Transportation Issues*, pp. 58-64 (2012)
- [Alexander 07] Alexander, B.: Smart meters real time pricing and demand response programs: Implications for low income electric customers, Tech. Rep., Oak Ridge Natl. Lab. (2007)
- [Allcott 09] Allcott, H.: Real Time Pricing and Electricity Markets, Harvard Univ., WorkingPaper (2009)
- [An 11] An, B., Lesser, V., Westbrook, D. and Zink, M.: Agent-mediated Multi-step optimization for resource allocation in distributed sensor networks, *10th Int. Conf. on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS 2011)*, pp. 609-616 (2011)
- [Ando 05] Ando, Y., Fukazawa, Y., Masutani, O., Iwasaki, H. and Honiden, S.: Performance of pheromone model for predicting traffic congestion, *Proc. 5th Int. Joint Conf. on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS)*, pp. 478-485 (2005)
- [Ann-Piette 09] Ann-Piette, M., Ghatikar, G., Kiliccote, S., Watson, D., Koch, E. and Hennage, D.: Design and operation of an open, interoperable automated demand response infrastructure for commercial buildings, *J. Comput. Inf. Sci. Eng.*, Vol. 9, pp. 1-9 (2009)
- [Apple 11] Apple, J., Chang, P., Clauson, A., Dixon, H., Fakhoury, H., Ginsberg, M. L., Keenan, E., Leighton, A., Scavozze, K. and Smith, B.: Green Driver: AI in a Microcosm, *Proc. 25th AAAI Conf. 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)
- [Borenstein 04] Borenstein, S.: The long-run effects of real-time electricity pricing, *Center for the Study of Energy Markets, WorkingPaper 133* (2004)
- [Boutilier12] Boutilier, C.: Eliciting forecasts from selfinterested experts: scoring rules for decision makers, *AAMAS '12: Proc. 11th Int. Conf. on Autonomous Agents and Multiagent Systems* (2012)
- [Burke 09] Burke, W. and Auslander, D.: Residential electricity auction with uniform pricing and cost constraints, *presented at the North Amer. Power Symp.*, Starkville, MS (Oct. 2009)
- [Cai 12] Cai, N. and Nga, N. T. T.: Multi-agent system theory for resource management in home automation systems, *North American Power Symposium (NAPS2012)*, pp. 1-5 (2012)
- [Centolella 09] Centolella, P.: The integration of price responsive demand into regional transmission organization (RTO) wholesale power markets and system operations, *Energy* (2009)
- [Chakraborty 12] Chakraborty, S. and Ito, T.: Smart house load management scheme using scoring rule based optimal time dependent pricing, *Joint Agent Workshops and Symposiums (JAWS2012/iJAWS2012)* (2012)
- [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)
- [Claes 11] Claes, R., Holvoet, T. and Weyn, D.: A decentralized approach for anticipatory vehicle routing using delegate multi-agent systems, *IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 12, pp. 364-373 (2011)
- [Co 10] Co, A. I. P.: Real-time pricing for residential customers (2010) [Online]
- [Colson 11] Colson, C. and Nehrir, M. H.: Algorithms for distributed decision-making for multi-agent microgrid power management, *Proc. IEEE Power and Energy Society General Meeting* (2011)
- [Conejo 10b] Conejo, A. J., Morales, J. M. and Baring, L.: Real-time demand response model, *IEEE Trans.*, Vol. 1, pp. 236-242 (2010)
- [Conte 09] Conte, G., Morganti, G., Perdon, A. M. and Scaradozzi, D.: Multi-agent system theory for resource management in home automation systems, *J. Physical Agents*, Vol. 3, pp. 15-19 (2009)

- [Dresner 08] Dresner, K. and Stone, P.: Amultiagent approach to autonomous intersection management, *J. Artificial Intelligence Research*, Vol. 31, pp. 591-656 (2008)
- [Ducatelle 12] Ducatelle, F., Caro, G. A. D. and Gambardella, L. M.: Spatial awareness in robotic swarms through local wireless communications, *11th Int. Conf. on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS2012)*, pp. 1205-1206 (2012)
- [Fazli 10] Fazli, P., Davoodi, A., Pasquiter, P. and Mackworth, A. K.: Multi-robot area coverage with limited visibility, *9th Int. Conf. on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS2010)*, pp. 1669-1670 (2010)
- [Harry 12] Harry, R., R., A. and Gerding, E. H.: A scoring rule-based mechanism for aggregate demand prediction in the smart grid, *AAMAS 12: Proc. 11th Int. Conf. on Autonomous Agents and Multiagent Systems* (2012)
- [Holland 08] Holland, S. and Mansur, E.: Is real-time pricing green? The environmental impacts of electricity demand variance, *Rev. Econ. Stat.*, Vol. 90, No. 3, pp. 550-561 (2008)
- [Houthakker 51] Houthakker, H.: Electricity tariffs in theory and practice, *Econ. J.*, Vol. 61, No. 241, pp. 1-25 (1951)
- [Hrotenok 10] Hrotenok, B., Luke, S., Sullivan, K. and Vo, C.: Collaborative Foraging using Beacons, *9th Int. Conf. on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS2010)*, pp. 1197-1204 (2010)
- [http://www.irobot.com/us/] <http://www.irobot.com/us/>
- [http://www.nest.com/] <http://www.nest.com/>
- [Ilanovski 11] Ilanovski, E., Yu, L., Elkind, E. and C. Wilson, M.: The complexity of safe manipulation under scoring rules, *IJCAI* (2011)
- [Ipakchi 09] Ipakchi, A. and Albuyeh, F.: Grid of the future, *IEEE Power Energy Mag.*, Vol. 8, No. 4, pp. 52-62 (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: (1) 経済パラダイムと交渉エージェント, *人工知能学会誌*, Vol. 28, No. 3, pp. 360-369 (2013)
- [Jiang 11] Jiang, B. and Fei, Y.: Dynamic residential demand response and distributed generation management in smart Micro-grid with hierarchical agents, *Energy Procedia*, Vol. 12, pp. 76-90 (2011)
- [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)
- [Kim 12] Kim, D.-M. and Kim, J.-O.: Design of emergency demand response program using analytic hierarchy process, *Smart Grid, IEEE Transactions*, Vol. 3, pp. 635-644 (2012)
- [Kwak 12] Kwak, Y. J., Varakantham, P., Maheswaran, R., Tambe, M., Jazizadeh, F., Kavulya, G., Klein, L., Becerik-Gerber, B. and Timothy Hayes, W. W.: SAVES: A sustainable multiagent application to conserve building energy considering occupants, *11th Int. Conf. on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS2012)*, pp. 21-28 (2012)
- [Le 10] Le, T. P., Norman, T. J. and Vasconcelos, W.: Adaptive negotiation in managing wireless sensor networks, *13th Int. Conference, PRIMA 2010*, pp. 121-136 (2010)
- [Li 10] Li, W., Joós, G. and Bélanger, J.: Real-time simulation of a wind turbine generator coupled with a battery supercapacitor energy storage system, *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 57, pp. 1137-1145 (2010)
- [Lisy 10] Lisy, V., Zivan, R., Sycara, K. and Pechoucek, M.: Deception in networks of mobile sensing agents, *9th Int. Conf. on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS2010)*, pp. 1031-1038 (2010)
- [Logenthiran 10] Logenthiran, T., Srinivasan, D. and Khambadkone, A.: A multi-agent system for energy management of distributed power sources, *Renewable Energy*, Vol. 35, pp. 174-182 (2010)
- [Logenthiran 11] Logenthiran, T., Srinivasan, D. and Khambadkone, A.: Multi-agent system for energy resource scheduling of in-tegrated microgrids in a distributed system, *Electric Power Systems Research*, Vol. 80, pp. 138-148 (2011)
- [Lot 12] Lot, M. and Ghaderi, S.: Possibilistic programming approach for mid-term electric power planning in deregulated markets, *Int. J. Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 34, No. 1, pp. 161-170 (2012)
- [Low 11] Low, K. H., Dolan, J. M. and Khosla, P.: Active Markov information-theoretic path planning for robotic environmental sensing, *10th Int. Conf. on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS2011)*, pp. 753-760 (2011)
- [Lowy 12] Lowy, K. H., Cheny, J., Dolan, J. M., Chienz, S. and Thompson, D. R.: Decentralized active robotic exploration and mapping for probabilistic field classification in environmental sensing, *11th Int. Conf. on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS2012)*, pp. 105-112 (2012)
- [Lustrek 11] Lustrek, M., Gjoreski, H., Kozina, S., Cvetkovi, B., Mirchevska, V. and Gams, M.: Detecting Falls with location sensors and accelerometers, *23rd Innovative Applications of Artificial Intelligence Conference (AAAI 2011)*, pp. 1662-1667 (2011)
- [Mamidi 12] Mamidi, S., Chang, Y.-H. and Maheswaran, R.: Improving building energy efficiency with a network of sensing, learning and prediction agents, *11th Int. Conf. on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS2012)*, pp. 45-52 (2012)
- [Mathews 12] Mathews, N., Stranieri, A., Scheidler, A. and Dorigo, M.: Supervised morphogenesis -morphology control of ground-based self-assembling robots by aerial robots, *11th Int. Conf. on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS2012)*, pp. 97-104 (2012)
- [Measurement 05] Measurement, L. G., Committee, E. and Company, C. E.: Demand response program evaluation: Final report Quantum Consulting Inc. and Summit Blue Consulting (2005)
- [Mihaylov 11] Mihaylov, M., Borgne, Y.-A. L. and Tuyls, K.: Distributed cooperation in wireless sensor networks, *10th Int. Conf. on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS 2011)*, pp. 249-256 (2011)
- [Mishra 13] Mishra, S., Mallesham, G. and Sekhar, P. C.: Biogeography based optimal state feedback controller for frequency regulation of a smart microgrid, *Smart Grid, IEEE Transactions*, pp. 1-10 (2013)
- [Mohsenian-Rad 10a] Mohsenian-Rad, A. H., V. W. S. Wong, J. J. and Schober, R.: Optimal and autonomous incentive-based energy consumption scheduling algorithm for smart grid, *Innovative Smart Grid Technologies*, pp. 1-6, IEEE (2010)
- [Mohsenian-Rad 10b] Mohsenian-Rad, A. H., Wong, V., Jatskevich, J. and Schober, R.: Optimal and autonomous incentive-based energy consumption scheduling algorithm for smart grid, Gaithersburg, presented at the *IEEE Pes Conf. Innov. Smart Grid Technol.* edition (2010)
- [Motamedi 12] Motamedi, A., Zareipour, H. and Rosehart, W. D.: Electricity price and demand forecasting in smart grids, *Smart Grid, IEEE Transactions*, Vol. 3, pp. 664-674 (2012)
- [Narzt 10] Narzt, W., Willingseder, 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 Science, ed.: Transportation research circular E-C113, *Artificial Intelligence in Transportation: Information for Application*, National Academy Transportation Research Board (2007)
- [National Academies 12] National Academies Science, ed.: Transportation research circular E-C168, *Artificial Intelligence Applications to Critical Transportation Issues*, National Academy Transportation Research Board (2012)
- [Ramchurn 11] Ramchurn, S. V. D., Vytelingum, P., Rogers, A., and Jennings, N.: Agent-Based Control for Decentralised Demand Side Management in the Smart Grid, *Proc. 10th Int. Joint Conf. on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems (AAMAS-2011)* (2011)

- [Rastegar12] Rastegar, M., Fotuhi-Firuzabad, M. and Aminifar, F.: Load commitment in a smart home, *Applied Energy*, Vol. 96, pp. 45-54 (2012)
- [Reddy 11] Reddy, P. P. and Veloso, M.M.: Learned behavior of multiple autonomous agents in smart grid markets, *Proc. 25th Conference on Association for the Advancement of Artificial Intelligence (AAAI-2011)* (2011)
- [Reiss 05] Reiss, P. and White, M.: Household electricity demand re-visited, *Rev. Econ. Studies*, Vol. 72, No. 3, pp. 853-883 (2005)
- [Ren 11] Ren, W., Sloderbeck, M., Steurer, M., Dinavahi, V., Noda, T., Filizadeh, S., Chevrefils, A. R., Matar, M., Iravani, R., Dufour, C., Belanger, J., Faruque, M. O., Strunz, K. and Martinez, J. A.: Interfacing issues in real-time digital simulators, *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 26, pp. 1221-1230 (2011)
- [Residents 09] Residents, O.N.F.: Smarter electricity pricing coming to Ontario: McGuinty government rolls out time-of-use rates (2009)
- [Robu 12] Robu, V., Kota, R., Chalkiadakis, G., Rogers, A. and Jennings, N. R.: Cooperative virtual power plant formation using scoring rules, *26th Conference on Artificial Intelligence, AAAI* (2012)
- [Roscoe 10a] Roscoe, A. J., Mackay, A., Burt, G. M. and McDonald, J. R.: Architecture of a network-in-the-loop environment for characterizing AC power-system behavior, *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 57, pp. 1145-1145 (2010)
- [Rose 12] Rose, H., Rogers, A. and Gerding, E. H.: A scoring rule-based mechanism for aggregate demand prediction in the smart grid, *Proc. 11th Int. Conf. on Autonomous Agents and Multi-agent Systems (AAMAS 2012)* (2012)
- [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)
- [Samadi 10] Samadi, P., Mohsenian-Rad, A., Schober, R., Wong, V. W. S. and Jatskevich, J.: Optimal real-time pricing algorithm based on utility maximization for smart grid, *Conf. on Smart Grid Communications, IEEE* (2010)
- [Sathyanarayana 10] Sathyanarayana, B. R. and Heydt, G. T.: A roadmap for distribution energy management via multi objective optimization, *Power and Energy Society General Meeting* (2010)
- [Shao 11] Shao, S., Pipattanasomporn, M. and Rahman, S.: An approach for demand response to alleviate power system stress conditions, *Power and Energy Society General Meeting (IEEE2011)*, pp. 1-7 (2011)
- [Shao 12] Shao, S., Pipattanasomporn, M. and Rahman, S.: Grid Integration of Electric Vehicles and Demand Response With Customer Choice, *Smart Grid, IEEE Transactions*, pp. 543-550 (2012)
- [Sichao 10] Sichao, K., Yamamoto, H. and Yamaji, K.: Evaluation of CO₂ free electricity trading market in Japan by multi-agent simulations, *Energy Policy*, Vol. 38, No. 7, pp. 3309-3319 (2010), Large-scale wind power in electricity markets with Regular Papers
- [Stein 12] Stein, S., Williamson, S. A. and Jennings, N. R.: Decentralised channel allocation and information sharing for teams of cooperative agents, *11th Int. Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS2012)*, pp. 231-238 (2012)
- [Steiner 57] Steiner, P.: Peak loads and efficient pricing, *Q.J. Econ.*, Vol. 71, No. 4, pp. 585-610 (1957)
- [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)
- [Stranders 10] Stranders, R., Rogers, A. and Jennings, N. R.: A decentralised coordination algorithm for minimising conflict and maximising coverage in sensor networks, *9th Int. Conf. on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS 2010)*, pp. 1165-1172 (2010)
- [Tyagi 11] Tyagi, R., Black, J. W. and Petersen, J.: Optimal scheduling of demand response events using options valuation methods, *Power and Energy Society General Meeting (IEEE2011)*, pp. 24-29 (2011)
- [Vanecky 12] Vanecky, O., Yin, Z., Jain, M., Bosanskyy, B., Tambe, M. and Pechoucek, M.: Game-theoretic resource allocation for malicious packet detection in computer networks, *11th Int. Conf. on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS 2012)*, pp. 905-912 (2012)
- [Venkatesan 11] Venkatesan, N., Solanki, J. and Solanki, S. K.: Market optimization for microgrid with Demand Response model, *North American Power Symposium (NAPS)*, pp. 1-6 (2011)
- [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)
- [Voice 11] Voice, T. D., Vytelingum, P., Ramchurn, S. D., Rogers, A., and Jennings, N. R.: Decentralized control of micro-storage in the smart grid, *Proc. 25th Conf. on Association for the Advancement of Artificial Intelligence (AAAI-2011)* (2011)
- [Vyas 11] Vyas, N., Farringdon, J., Andre, D. and Stivoric, J. I.: Machine learning and sensor fusion for estimating continuous energy expenditure, *23rd Innovative Applications of Artificial Intelligence Conference (AAAI 2011)*, pp. 55-66 (2011)
- [Vytelingum 10a] Vytelingum, P., Ramchurn, S. D., Voice, T. D., Rogers, A. and Jennings, N. R.: Trading agents for the smart electricity grid, *9th Int. Joint Conf. on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems (AAMAS-2010)* (2010)
- [Vytelingum 10b] Vytelingum, P., Voice, T. D., Ramchurn, S. V. D., Rogers, A. and Jennings, N. R.: Agent-based micro-storage management for the smart grid, *Proc. 9th Int. Joint Conf. on Autonomous Agents and Multi-agent Systems (AAMAS-2010)* (2010)
- [Wang 11] Wang, Y., I. R., P. and W., X.: An event-driven demand response scheme for power system security enhancement, *Smart Grid, IEEE Transactions*, Vol. 2, pp. 23-29 (2011)
- [Wells 04] Wells, J. and Hans, D.: Electricity Markets: Consumers Could Benefit from Demand Programs, but Challenges Remain, DIANE Publishing (2004)
- [Wolak 06] Wolak, F. A.: Residential customer response to real-time pricing: The Anaheim critical peak pricing experiment, *Center for the Study of Energy Markets*, Working Paper 151 (May 2006)
- [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)
- [Yoo 12] Yoo, C.-H., Choi, W.-J., Chung, I.-Y., Won, D.-J., Hong, S.-S. and Jang, B.-J.: Hardware-in-the-loop simulation of dc microgrid with multi-agent system for emergency demand response, *IEEE Power and Energy Society General Meeting, San Diego* (2012)

2013年3月21日 受理

—— 著 者 紹 介 ——

- 伊藤孝行 (正会員) は, 前掲 (Vol. 28, No. 3, p. 369) 参照.
- Shantanu Chakraborty (正会員) は, 前掲 (Vol. 28, No. 3, p. 369) 参照.
- 大塚孝信 (正会員) は, 前掲 (Vol. 28, No. 3, p. 369) 参照.
- 金森 亮 (正会員) は, 前掲 (Vol. 28, No. 3, p. 369) 参照.
- 原 圭佑 (学生会員) は, 前掲 (Vol. 28, No. 3, p. 369) 参照.