

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 11 日現在

機関番号：32612

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2010～2013

課題番号：22240004

研究課題名(和文)分散プロトコルと並列プロセッサによる高度エネルギー制御ネットワークの研究

研究課題名(英文) A study of Noble Energy Control Network by distributed protocol and parallel processing.

研究代表者

山中 直明 (Yamanaka, Naoaki)

慶應義塾大学・理工学部・教授

研究者番号：80383983

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 23,700,000円、(間接経費) 7,110,000円

研究成果の概要(和文)：スマートネットワークをキーワードに、分散処理のICT技術を活用した仮想電力会社(EVNO: Virtual Network Operator)を提案し、電力の需給調整と平滑化手法、自然エネルギー発電量の予測、電力削減要請時の公平な電力削減手法について研究した。

具体的には、電力価格は需要が多い時は高価格となる価格変動制へ移行する事を考慮して、電力需給マッチング方式、電力需要のピーク低減手法、太陽光発電量の予測手法、地産地消を目指す電力源の分散/並列協調型探索手法、ユーザの満足度を考慮した電力削減手法、HGW間でユーザの意向に従って自律的に電力の需給調整を行うM2Mプラットフォームについて研究した。

研究成果の概要(英文)：In this research, we proposed the EVNO (Energy Virtual Network Operator) utilizing distributed ICT technologies for the Smart Network. To realize the EVNO, we have studied the demand response control between power supply and demand, the smoothing of power demand, the prediction method of power generation amount using natural energy, and the fair reduction method of demand.

Considering that the electricity fee becomes expensive in high power demand period, we have studied the matching method between power demand and supply, reduction of peak demand, prediction of generating solar power amount, the search method of localized power source. Finally, M2M platform that performs power supply and demand autonomously between HGWs in accordance with the user's policy is also developed.

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・計算機システム・ネットワーク

キーワード：ネットワークアーキテクチャ スマートグリッド EVNO M2M 電力スケジューリング 電力需給制御
ベストミックスエネルギー ネガワット

1. 研究開始当初の背景

世界規模で、電力消費の拡大と CO2 排出量の増大継続しており、消費電力の削減と自然エネルギー活用の拡大が最重要課題となっている。また、電力需要のピークとボトムの比 (PBR: Peak Bottom Ratio) が拡大しており、電力会社はピークに合わせて発電設備を設置せざるを得ず、発電設備の運用効率が悪化するという問題も発生している。

そこで、情報通信技術 (ITC: Information and Communication Technology) 技術を使って、消費電力の削減、電力のピークシフト、自然エネルギー活用の拡大による低炭素化を図る、スマートグリッドに注目が集まっている。しかし、電力の見える化による消費電力の削減に主眼がおかれ、電力網全体での需要と供給制御については考えられていない。

2. 研究の目的

本研究では、通信プロトコル技術を応用した電力の需給制御技術による PBR の最小化と、広域最適化の技術を時間的予約やエネルギーの QoS (環境に対するインパクトや再生可能か、変動可能か) を考慮して高速に高度に研鑽する技術を確認して、従来にないエネルギーの効率化技術の基盤研究を行うことを目的とする。

3. 研究の方法

研究を進めるに当たって、(1)仮想エネルギーネットワーク事業者の提案、(2)電力需要のピーク低減手法、(3)自然エネルギーを活用した発電量の予測手法、(4)分散型電力需要スケジューリング手法、(5)ユーザの満足度を考慮した消費電力削減手法、(6) M2M (Machine to Machine) プラットフォームの構築方法、について研究する。

4. 研究成果

(1) 仮想エネルギーネットワーク事業者の提案

図 1 に示すように、スマートグリッド内のユーザ (発電、消費) の電力の需給制御はプールの水の入水量 (給電、発電) と、出水量 (消費) を常時同時同量で制御し、水位を一定に保つことに例えることができる。そこで、仮想電力会社 EVNO (Energy Virtual Network Operator) は発電源 (太陽光発電、

風力発電、蓄電池、ガスタービン等) と送電網を借用して、電力の需給制御を行い、その手数料で利益を得る。そして、同図に示すように様々な電力需給制御ポリシー (自然エネルギー優先、価格優先等) を持った EVNO が出現し、ユーザは自分のポリシーに合致した EVNO を選択できる。

(2) 電力需要のピーク低減手法

電力需要シフトに対するインセンティブ付与による電力ピーク低減方式

現在の電力単価は、電力を消費する時刻に応じて一意に決定しているが、需要が多い時は高価格となる RTP (Real Time Pricing) に移行する。そこで、電力需要のシフトに応じてインセンティブを与えるフェアな電力割当アルゴリズムをシミュレーション評価した。最適化前の図 2 の PBR 15.80 が最適化後は図 3 の 1.55 と大幅に改善できることが確認できた。

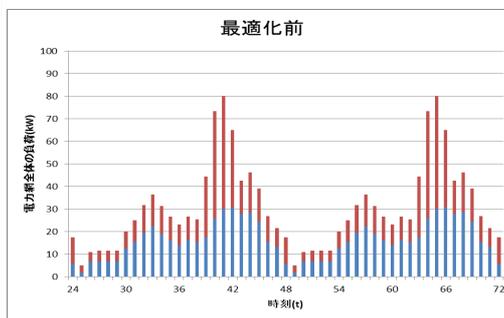


図 2 最適化前の電力網全体の負荷状況

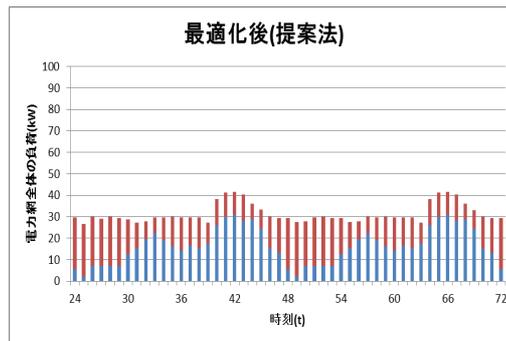


図 3 最適化後の電力網全体の負荷状況

PHEV の充電ピークシフトアルゴリズム電力需要のピークシフト、出発時の SoC (State of Charge) の最大化、充電料金の最小化を目的とした遺伝アルゴリズムを用いた手法について、線形計画法により形式化してシミュレーション評価した。評価結果より、提案方式は通勤時間帯の電力需要のピークを避けた充電により、電力需要のピークを低減できることが確認できた。更に、要求 SoC 85% に対して 93% を達成し、充電コストも従来方式 20.77 円/kWh に対し、13.74 円/kWh と 31% 低減出来ていることが確認できた。

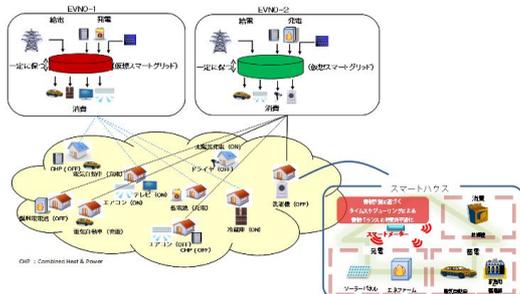


図 1 EVNO の電力マッチング制御概念図

EV の充放電制御による電力需要の平滑化手法

EV のバッテリー容量は一般家庭の約 2 日分の需要に相当する大容量であり、EV の普及に伴いバッテリーの充放電は電力網に多大な影響を与える。そこで、図 4 に示す EV バッテリーの仮想化プールと、EV が離脱中あるいは電力網の制限により物理的に EV から系統へ電力を放電できない時には EV バッテリーの販売予定の電力量を論理的に EVNO に所有権を譲渡する供託の概念を用いて、EVNO と EV 保有者が大容量蓄電器プールを介して電力の仮想取引をし、電力需要の平滑化を行う手法を研究した。具体的には、遺伝アルゴリズムの JGG-REX (Just Generation Gap Real-coded Ensemble Crossover) を用いた電力需要の制御手順を形式化して、目的関数と制約式を定義し、シミュレーション評価した。

評価結果より、提案方式は電力価格の高い時間帯 (8~9:00、16~17:00) に論理的に放電し、電力需要のピークを下げ、EV 所有者が EV 離脱中にも関わらず売電価格が高い時間帯に売電でき、電力料金の低減にも寄与していることが確認できた。

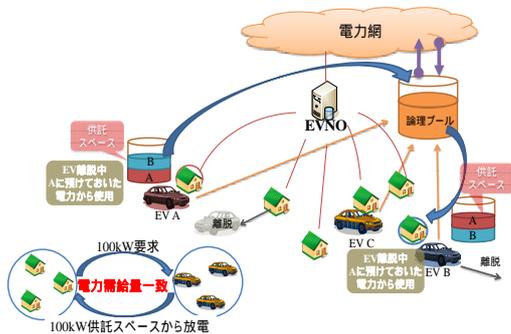


図 4 EV バッテリーの仮想化プールと供託の概念図

(3) 自然エネルギーを活用した発電源の発電量の予測手法

太陽光発電設備の出力変動要因は、雲の濃淡によるものと想定し、将来の発電量は雲の動きにより予測する手法、つまり、各家庭の太陽光発電出力情報をサンプリング点として太陽光発電設備がない場所の雲の濃淡を補間し、前周期の収集データと今周期の収集データから雲の動きを推定し、将来の発電量の予測を行う手法について研究した。

具体的には、各家庭の太陽光発電出力情報をサンプリング点として、太陽光発電設備の設置されていない地域のデータ補間を行い、地域全体をカバーする雲の濃淡マップを生成する。次に、過去に生成された雲の濃淡マップと今回生成した濃淡マップを比較して、雲の動きベクトルを検出する。そして図 5 に示すように、雲の濃淡マップと動きベクトル (flow vector) から将来の発電量を予測する。

データ補間手法として Triangulations

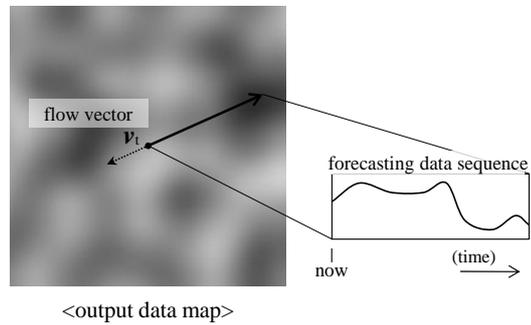


図 5 雲の濃淡マップと動きベクトルによる発電量の予測

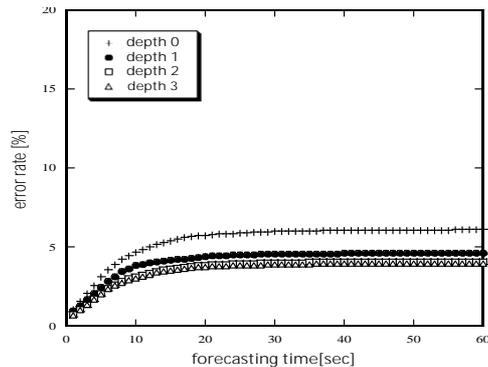


図 6 深さによる平均予測誤差率の変化 (144 ノードの場合)

with Linear Interpolation を、動きベクトル検出手法として Block Matching を用い、マップ生成範囲は 1.0km^2 、 1.0m^2 でグリッドに分割し、60 秒間隔で予測計算し、1800 秒間のシミュレーションを各 50 回ずつ行った。雲の移動は、初期風速を 3.0m/s とし、毎秒あたりの風速変動を $-0.01 \sim 0.01\text{m/s}$ 、風向変動を $-0.001 \sim 0.001\text{rad}$ の正規分布で与えた。

図 6 に、深さ d (過去の雲の濃淡データ活用数) の平均予測誤差への影響を示す。深さ d の増加に伴い予測誤差率が小さくなっている。また、64 ノードと 144 ノードの結果を比較してノード数が少ない場合の方が深さ d の増加による予測誤差の改善がより顕著にみられることが確認できた。

(4) 分散型電力需要スケジューリング手法 目的曲線を用いた分散電力スケジューリング手法

家庭を複数のグループに分割し、遺伝的アルゴリズムにより、グループ毎に 1 日の電力の需要予測を基に作成した目的曲線に向けて、電力需要時間を調整し、電力料金を低減する手法について研究した。

図 7 に、電力網全体の需要予測から算出される電力価格と電力価格に反比例して導出する目的曲線を示す。即ち、電気料金が安い時刻は目的曲線の値は大きく、電気料金が安い時刻は目的曲線の値は小さくなる。同様の方法で得られた目的曲線を各グループがそれぞれ持ち、各グループの電力

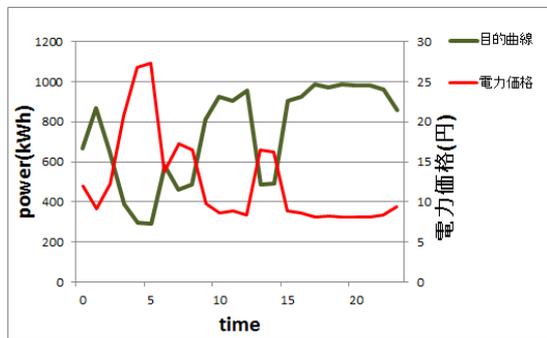


図7 電力網全体の目的曲線と電力価格

需要時間を調整する。遺伝アルゴリズムを用いたシミュレーション結果では、グループ分割しない場合と比較して目的曲線に近づく適合度が大きく改善でき、電気料金も1家庭あたり3.3円削減できることが確認できた。

トークンリングを活用した電力スケジューリング手法

家庭用CHPを対象にHGWを介したトークンリング型トポロジを用いた通信により、トークンを保有する家庭の発電を優先させる協調制御により、公平性を保ちながら廃棄電力を抑制する手法についてシミュレーション評価した。提案方式は従来方式(各CHP保有家庭が電力価格を基に、発電するか否かを判断する方式)と比較して廃棄電力を約1/30に削減し、CHP有効発電量を20%改善できることが確認できた。

地産地消を目指す電力供給元探索手法

まず、電力の供給源を仮想IPアドレスの付与により3つのエリア(狭域、中域、広域)に分割し、自分に近い狭いエリアから検索を開始して、順次広域エリアへと検索範囲を拡大していき電力供給源を発見する。次に、各需要元は互いの検索情報を交換して電力供給源を交換した方が良い場合は交換する。

シミュレーション条件は、家庭の分散範囲1km四方(一様分布)、エリア分割数16、エリア階層数3、1ブロックあたりの電力100W、1ノードあたりのブロック数平均5分散5の正規分布、需要/供給ノード数は25~250kW、総ブロック数125~1250、とした。図8の送電距離の比較結果より、提案方式は距離未考慮のランダムマッチングと比較して、送電距離が大幅に短縮でき、最適

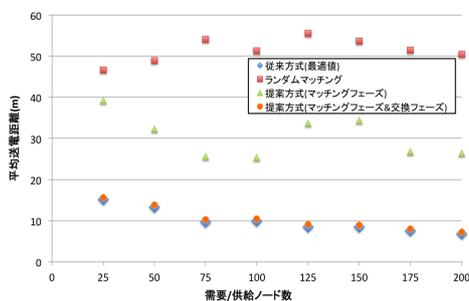


図8 送電ロスの比較

値にほぼ一致する結果が得られた。

(5) ユーザの満足度を考慮した消費電力削減手法

電力会社からの電力削減が要請された時、家電が持つ3つの特性(需要シフト可能性、気温依存性、定格電力以下での使用可能性)を図9に示すように定義し、これら3特性と使用状況により、動的に電力供給の優先度を変更して、電力の削減を実行する手順をシミュレーション検証した。図10に示すように、QoS劣化率(QoS劣化回数÷電力削減回数)は、従来方式が平均52%に対し、提案方式が平均21%と、劣化率が約31%改善されている。

(6) M2M(Machine to Machine)プラットフォームの構築方法

ユーザのポリシーに従ってHGW間でP2P通信により、自律的に電力の需給制御を実行するM2Mプラットフォームで課題となるHGW間のM2Mサービスの処理タスク(バンドル)のライブマイグレーションによる処理負荷分散手法についてシミュレーションにより検証した。

シミュレーション条件は、HGWノード数は100又は100~1000ノード(100ノード刻み)シミュレーション期間は24時間(1分周期)バンドルマイグレーション発生/バンドル終了確立は0~1の一様分布、

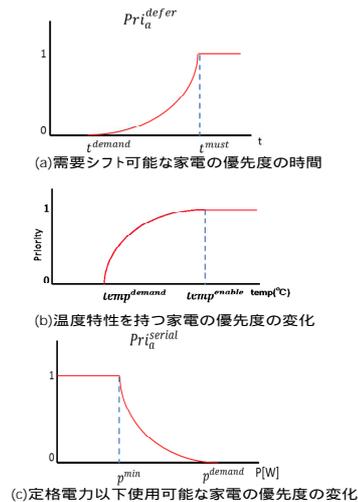


図9 家電の3特性の定義

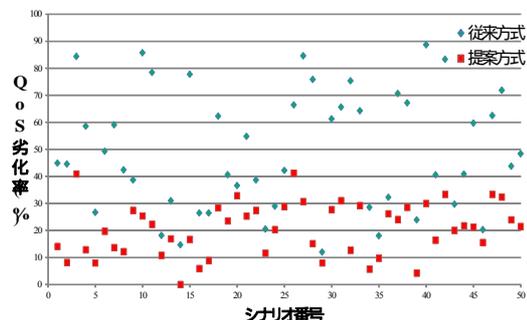


図10 QoS劣化率の比較

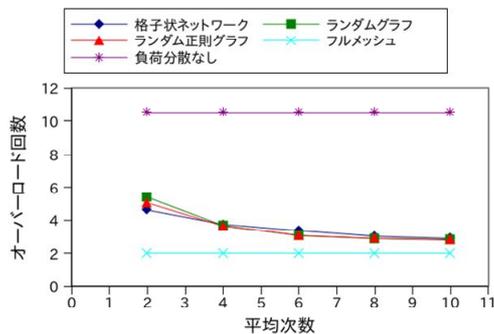


図 11 オーバーロード回数(トポロジー比較)

言語は Java を用いた。

図 11 に示すように、負荷分散なしと比較して、大幅にオーバーロード回数を削減出来ることが確認できた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 3 件)

松原大輔、藪崎仁史、岡本聡、山中直明、高橋達郎、“Proposal of Data-centric Network for Mobile and Dynamic Machine-to-Machine Communication,” 電子情報通信学会英文論文誌 B、査読有、Vol. E96-B No. 11、2013 年 11 月
 松本隼、石井大介、岡本聡、大木英司、山中直明、“スマートグリッド環境において気象観測情報を用いない高精度な短期的太陽光発電出力予測手法の提案,” 電子情報通信学会論文誌 B、査読有、Vol. J94-B No. 10、2011 年 10 月
山中直明、“通信技術が生むスマートネットワークの新しいビジネスチャンス,” CIAJ Journal、査読無、Vol.51 No. 6、2011 年 6 月

[学会発表](計 2 1 件)

Julien Thieffry、Soushi Yamamoto、Tetsuhiro Uchida、Satoru Okamoto、Naoaki Yamanaka、“A Benchmark of Service Lifetime Dependence in the Next-Generation NVF Component,” 10th International Conference on IP + Optical Network(iPOP2014)、2014 年 5 月 22 日、東京
 恩田悠永、田添崇士、山本草詩、竹下秀俊、岡本聡、山中直明、“電気自動車のバッテリー仮想化による電力需要のピークシフト実現および電気料金削減手法,” 電子情報通信学会インターネットアーキテクチャ研究会、2014 年 1 月 30 日、東京
 Harunaga Onda、Soushi Yamamoto、Hidetoshi Takeshita、Satoru Okamoto、Naoaki Yamanaka、“Peak load Shifting and Electricity Charges Reduction Realized by Electric Vehicle Storage

Virtualization,” 2013 2nd AASRI Conference on Power and Energy Systems (PES 2013)、2013 年 12 月 27 日、Korea Jeju

山本草詩、浅見康介、岩崎陽介、遠藤光泰、岡本聡、山中直明、“PIAX を用いた Machine-to-Machine(M2M) プラットフォームの検討,” 第 6 回光ネットワーク研究会、2013 年 12 月 2 日、熱海市

浅見康介、岩崎陽介、山本草詩、岡本聡、山中直明、“電力の需要供給マッチングにおける分散制御による複数ノード間のリソース取得手法の検討,” 第 6 回光ネットワーク研究会、2013 年 12 月 2 日、熱海市

岩崎陽介、浅見康介、山本草詩、岡本聡、山中直明、“ホームゲートウェイクラウドを利用した M2M ネットワークにおける処理負荷分散手法,” 第 6 回光ネットワーク研究会、2013 年 12 月 2 日、熱海市

Akiyuki Imamura、Soushi Yamamoto、Takashi Tazoe、Harunaga Onda、Hidetoshi Takeshita、Satoru Okamoto、Naoaki Yamanaka、“Distributed Demand Scheduling Method to Reduce Energy Cost in Smart Grid,” Humanitarian Technology Conference 2013、2013 年 8 月 27 日、仙台

Naoki Maruichi、Soushi Yamamoto、Takashi Tazoe、Harunaga Onda、Hidetoshi Takeshita、Satoru Okamoto、Naoaki Yamanaka、“Distributed Control Method for Micro Combined Heat and Power System on Logical Token-Ring Model in Real-Time Pricing,” Humanitarian Technology Conference 2013、2013 年 8 月 27 日、仙台

Takashi Tazoe、Jun Matsumoto、Daisuke Ishi、Satoru Okamoto、Naoaki Yamanaka、“Novel Scheduling Method to Reduce Energy Cost by Cooperative Control of Smart Houses,” IEEE PES International Conference on Power Systems Technology、2012 年 10 月 31 日、Auckland New Zealand

田添崇士、山本草詩、恩田悠永、竹下秀俊、岡本聡、山中直明、“EDA に基づく電力ピークシフトのための PHEV 充電アルゴリズム,” 電子情報通信学会情報ネットワーク研究会、2012 年 9 月 20 日、仙台

恩田悠永、田添崇士、山本草詩、竹下秀俊、岡本聡、山中直明、“仮想ホームネットワークの構築による EV バッテリーのポータビリティの実現法の

提案。”電子情報通信学会通信方式研究会、2012年4月19日、沖縄 石垣島

山中直明、[特別招待講演]“フォトリックとIPが作るスマートなネットワーク、”電子情報通信学会通信方式研究会、2012年3月8日、新潟市

山本草詩、石井 大介、岡本 聡、山中 直明、“電力需要平滑化型スマートグリッドネットワークアーキテクチャとそのスケジューリングアルゴリズムの提案、”電子情報通信学会フォトリックネットワーク研究会、2011年8月2日、函館市

山本草詩、石井 大介、岡本 聡、山中 直明、“スマートグリッドにおける送電ロスが最小となる発電源選択法の一検討、”電子情報通信学会第6回PN研究会学生ワークショップ、2011年8月2日、函館市

Jun Matsumoto、Daisuke Ishii、Satoru Okamoto、Eiji Oki、Naoaki Yamanaka、“Highly-accurate Short-term Forecasting Photovoltaic Output Power Architecture without Meteorological Observations in Smart Grid、”1st International Symposium on Access Spaces、2011年6月19日、横浜市

山中直明、[招待講演]“通信技術・フォトリックが作るスマートなネットワークへの新しい展開、”第27回ネットワークシステム・情報ネットワーク研究ワークショップ、2011年3月2日、宜野湾市

〔図書〕(計 2件)

山中直明、他執筆者52名、“スマートエネルギーネットワーク最前線:第五章 通信技術を利用した新しいスマートグリッドサービス、”エヌ・ティー・エス出版、2012年4月

山中直明、“スマートネットワークの未来、”慶應義塾大学出版、2012年11月

〔産業財産権〕

○出願状況(計 5件)

名称:電力ネットワークシステム
発明者:山中直明、山本草詩、今村旭志、丸一尚己

権利者:学校法人慶應義塾

種類:特許

番号:特願 2013-099773

出願年月日:2013年5月10日

国内外の別: 国内

名称:電力ネットワークシステム

発明者:山中直明

権利者:学校法人慶應義塾

種類:特許

番号:特願 2013-005372

出願年月日:2013年1月16日

国内外の別: 国内

名称:電力ネットワークシステム

発明者:山中直明

権利者:学校法人慶應義塾

種類:特許

番号:特願特願 2012-007212

出願年月日:2012年1月17日

国内外の別: 国内

名称:電力網制御ネットワーク

発明者:山中直明、石井大介、清水翔、山本草詩、松本隼

権利者:学校法人慶應義塾

種類:特許

番号:特願 2010-195577

出願年月日:2010年9月1日

国内外の別: 国内

名称:仮想エネルギートレードシステム

発明者:山中直明、石井大介、清水翔

権利者:学校法人慶應義塾

種類:特許

番号:特願 2010-090086

出願年月日:2010年4月9日

国内外の別: 国内

○取得状況(計 0件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

取得年月日:

国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.yamanaka.ics.keio.ac.jp/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

山中 直明 (YAMANAKA NAOAKI)

慶應義塾大学・理工学部・情報工学科・教授

研究者番号: 80383983

(2)研究分担者

岡本 聡 (OKOMOTO SATORU)

慶應義塾大学・理工学研究科・特任教授

研究者番号: 10449027

山口正泰 (YAMAGUCHI MASAYASU)

慶應義塾大学・理工学研究科・特任准教授

研究者番号: 60509967

(3)連携研究者

該当なし