

知的環境とセンサネットワーク ——アンビエントセンサネットワーク——

Ambient Intelligence and Sensor Networks

大槻知明 渡辺 尚 中澤 仁
川島英之 滑川 徹 山本高至

Abstract

アンビエントセンサネットワークは、アンビエント情報を収集するセンサネットワークと、アンビエント情報を処理して人の活動を拡張・強化あるいは補完・補助する知的環境から成り、従来にはない利便性の提供や抜本的なコスト削減が期待できるため、スマートグリッドによる電力の有効利用、効率的な交通システム、市民に優しい街環境の実現などが注目されている。そこで本稿ではまず、アンビエントセンサネットワークの概念と応用事例を述べるとともに、要素技術としてのセンシング技術、プロセッシング技術、アクチュエーション技術、ネットワーク技術について最近の研究動向と技術課題を概説する。最後にアンビエントセンサネットワークの今後の展望を述べ本稿をまとめる。

キーワード：知的環境，センサネットワーク，知的情報処理，センシング，アクチュエーション

1. アンビエントセンサネットワークとは

実空間に存在する人やもの、あるいは空間それ自体の状態をセンシングする機器同士のネットワークはセンサネットワークと呼ばれ、これまで世界中で活発な研究が進められてきており、実用化も見え始めた⁽¹⁾。センシング情報源から得られたセンサデータをネットワークを介して集めた後、処理（プロセッシング）・解析・推論し、環境を適応的に変化させたり、情報、特に予測情報・推

奨情報を提供して人の活動を拡張・強化あるいは補助・支援する系を知的環境（Ambient Intelligence）と呼ぶ。また、センサネットワークと知的環境を総称してアンビエントセンサネットワーク（Ambient Sensor Network）と呼ぶ。そのような環境の適応的变化や、予測情報・推奨情報の提供によって、人やものなどの状態は変化し、それをネットワークセンシング及び知的情報処理から成るアンビエントセンサネットワークによって認識（cognition）し、それに基づき推論（reasoning）することで、環境や予測情報・推奨情報を更新する。すなわち、図1に示すような cognition cycle を形成していると言える。

アンビエントセンサネットワークの実現には、センシング、通信・ネットワーク、機械学習・データマイニング等による認識、アクチュエーション、などの技術が重要である。以下では、アンビエントセンサネットワークの各基盤技術について解説する。

2. 知的環境におけるセンシング技術

知的環境におけるセンシングとは、実空間内の人、もの、あるいは空間自体の状態やイベント（以下、アンビエント情報と言う）を取得することを意味する。図2に概念を示す。アンビエント情報には、センサを使って機械的に取得可能なものと、そうでないものがある。前者

大槻知明 正員：シニア会員 慶應義塾大学理工学部情報工学科
E-mail ohtsuki@ics.keio.ac.jp
渡辺 尚 正員 大阪大学大学院情報科学研究科情報ネットワーク学専攻
E-mail watanabe@ist.osaka-u.ac.jp
中澤 仁 慶應義塾大学環境情報学部
E-mail jin@ht.sfc.keio.ac.jp
川島英之 正員 筑波大学システム情報系情報工学科
E-mail kawasima@cs.tsukuba.ac.jp
滑川 徹 慶應義塾大学理工学部システムデザイン工学科
E-mail namerikawa@sd.keio.ac.jp
山本高至 正員：シニア会員 京都大学大学院情報科学研究科通信情報システム専攻
E-mail kyamamot@i.kyoto-u.ac.jp
Tomoaki OHTSUKI, Senior Member (Faculty of Science and Technology, Keio University, Yokohama-shi, 223-8522), Takashi WATANABE, Member (Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University, Suita-shi, 565-0871 Japan), Jin NAKAZAWA, Nonmember (Faculty of Environment and Information Studies, Keio University, Fujisawa-shi, 252-0882 Japan), Hideyuki KAWASHIMA, Member (Faculty of Information, Systems and Engineering, University of Tsukuba, Tsukuba-shi, 305-8577 Japan), Toru NAMERIKAWA, Nonmember (Faculty of Science and Technology, Keio University, Yokohama-shi, 223-8522 Japan), and Koji YAMAMOTO, Senior Member (Graduate School of Informatics, Kyoto University, Kyoto-shi, 606-8501 Japan).
電子情報通信学会誌 Vol.96 No.7 pp.495-500 2013年7月
©電子情報通信学会 2013

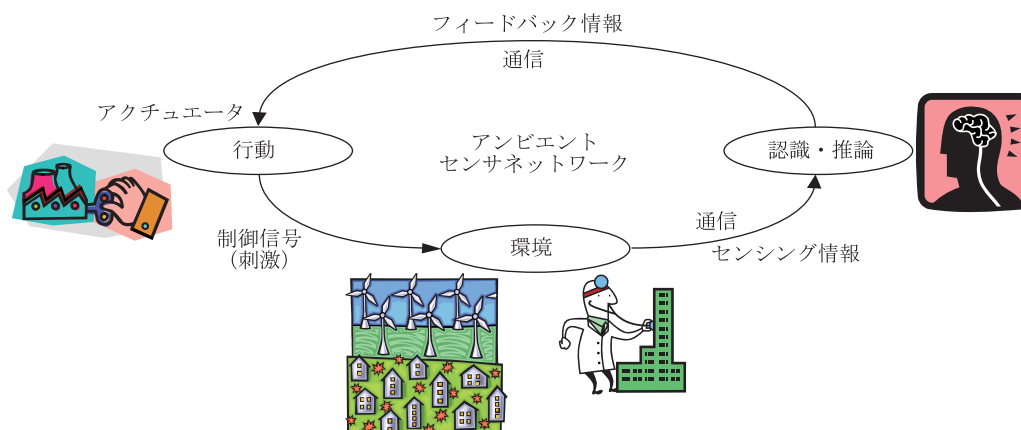


図1 アンビエントセンサネットワークの概念図

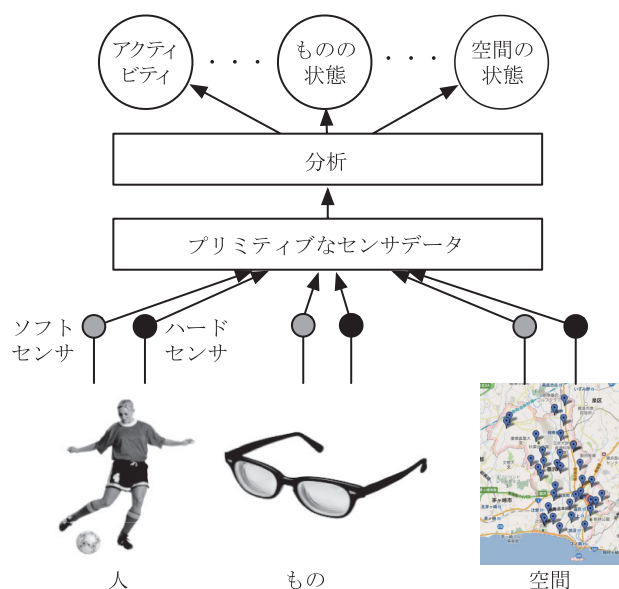


図2 知的環境におけるセンシングの概念図

は、温度や加速度、位置といったプリミティブな値を、それぞれ温度センサ、加速度センサ、あるいはGPS等の、いわゆるセンサを用いて取得する場合がその例である。後者は、人の行動や空間の雰囲気などを、一つ以上のセンサ情報から推論したり、人が自身の感覚器官を通して得た情報を計算機に入力したりして、いわば間接的に取得する。本章では、これらに必要な一連の技術を、ハードウェアとソフトウェアの観点から解説する。

2.1 ハードウェア技術

近年のセンサモジュールは小形化が進み、スマートフォンやゲーム機、小形の無線センサノード等にも、多種多様なセンサが組み込まれるようになった。表1に、様々な機器で取得可能な情報を示す。知的環境におけるセンシングでは、こうしたハードウェアを情報取得対象

表1 様々な機器で取得可能な情報

機器名	取得可能な情報
スマートフォン (Android)	加速度、照度、近接、方位、角速度、位置、温度、湿度等
ゲーム機 (Kinect センサ ^{*1})	人の位置、顔、声、動き、身長等
無線センサノード (Mote ^{*2})	照度、温度、音、加速度、地磁気、位置等

^{*1} <http://www.xbox.com/ja-JP/kinect/>

^{*2} <http://www.xbow.jp/01products/index.html>

に適宜設置し、主に、ネットワークを介してデータベースへ値を集約する。例えば建築物のヘルスマニタリングにおける事例⁽²⁾では、ビル等の建築物の要所に数十台の無線センサノードを設置して加速度を取得し、地震等の検出を行っている。また、屋外の環境観測の事例⁽³⁾では、農場等に高密度に無線センサノードを設置して、微気象観測や害獣の検出等に応用している。家屋では、ドアノブや扉、調理器具等⁽⁴⁾に無線センサノードを組み込んで、人の行動把握等に応用する事例がある。このように、現実空間に存在する無数のものにセンサを組み込んで、その情報にネットワークを介してアクセス可能とすることは、「もののインターネット (IoT: The Internet of Things)」と呼ばれ、研究開発が進んでいる。

2.2 ソフトウェア技術

人のセンサ化 (HaaS: Human as a Sensor) は、知的環境における主要なソフトウェア技術である。HaaSはまず、人が持つスマートフォン等に組み込まれたセンサで取得した情報をセンサデータベースに集約する、いわゆるモバイルセンシングの意味を持つ。また、例えば雲の形や道路の滑りやすさなど、そもそもセンサでは取得できない情報を人の五感で感じ取り、その情報を収集するという意味でも用いられる。後者では、人がTwitter

等のソーシャルメディアに入力した文字列を収集し、形態素解析や特徴語抽出等を行って特定の空間の状態やイベント、人間や空間同士の関係を検出する、ソーシャルセンシングというアプローチも研究されている。これらは、ハードウェアのセンサでは取得できない情報を、ソフトウェアのセンサで取得するという意味で、「ソフトセンサ」技術と呼ぶことができる。

3. 知的環境を実現するプロセッシング技術

様々なセンシング情報源から生成されたデータから認識・推論を行うためにプロセッシング(図3)が行われる。プロセッシングには前処理として格納が必要であり、その後、分析が行われる。なお、プロセッシングの全過程においてプライバシー保護⁽⁵⁾が求められる。

3.1 格納

センシング情報源からは膨大なセンサデータが生じる。制御機器は1,000点/秒、粒子加速器LHCは15PByte/年、天体望遠鏡LSSTは20TByte/日である。これらのデータに認識・推論を行う前準備として、格納が必要である。これにはファイルかデータベース管理システム(DBMS)が求められる。

ファイルの利点は手軽さであり、欠点は認識・推論が別に必要な点である。センサデータは膨大であるため分散ファイルシステムの利用が好ましい。ビジネスデータHadoop HDFS、科学データにはGfarm等が好まれる。

DBMSの利点はデータ管理の容易化と高性能な単純処理であり、欠点は長いローディング時間である。DBMSを用いる場合にはデータの性質に応じてデータモデルを選ぶ必要がある。データモデルにはリレーション、半構造、配列、キー／値などの選択肢がある。データ形式が入れ子のない平たんな場合にはデータをテーブルとして表現するリレーショナルモデル(MySQL等)が好ましく、これはスキーマが途中で変わらないCAN等に好適である。データ形式が一意に定まらない場合に

はXMLやJSON等の半構造モデル(MongoDB等)が好ましく、これは年月経過に伴い属性の追加が必然であるM2Mに好適である。データ形式が多次元配列構造を有する場合には配列モデル(SciDB等)が好ましく、これは天体望遠鏡などの科学的観測系に好適である。データ形式がキーと値の組で適切に表現可能な場合にはキー／値(hbase等)が好ましい。

3.2 分析

初期的な分析を行うため、格納されたデータにSQLを用いた処理が行われる。SQL的処理はDBMSには提供されるが、ファイルシステムには提供されない。なぜならファイルシステムはSQLのような複雑な問合せをサポートしないからである。HDFSを用いる場合にはMapReduceによりバッチ処理が可能である。MapReduceの弱点である低生産性を解消するため、SQL的言語を提供しつつ記述内容をMapReduceに変換するHive等の処理系も存在する。一方、応答に数分を想定するインタラクティブ処理のためにDremel等の技術も存在する。

SQLでは困難な高度な分析(マルウェア検出、商品推薦等)を行うために、先進的な分析が行われる。これには機械学習とデータマイニング(例:OLAP、回帰、分類、クラスタリング、相関規則発見、推薦、異常値検出、等々)が用いられる。先進的分析を簡単に行うツールとしてRとMATLABがあるが、これらには巨大なデータを扱えないという欠点がある。巨大データ処理を扱える先進的分析システムにはMahout、Jubatus、Vowpal Wabbit等が存在する。

分析を行うには、ファイル・DBMSのいずれかに格納されたデータを読み込む必要がある。センサデータは一般的に量が膨大であるため、先進的分析システムへのデータ読込みに長時間が必要である。これを避けるため、MADLibやSciDBではDBMS内部で種々の分析手段(行列演算、機械学習)を提供する。また、データを格納せずにオンメモリで分析処理を行う技術として

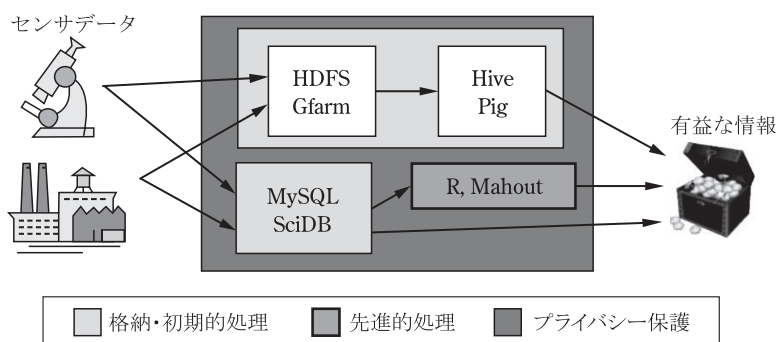


図3 プロセッシングの全体像

System S, uCSDP, STORM などのストリーム処理系がある。

4. 知的環境におけるアクチュエーション技術

ASN システムではノード間のネットワークを利用した情報の最適化を行うことが可能であり、単体のセンサによるセンシングと比較して耐故障性、多点情報の収集等の面で優れていることが知られている⁽⁶⁾。ASN は森林火災等の災害対策に対する計測や、集光型太陽電池パネルによる発電、農業施設等の制御、人体のヘルスケア等の医療・福祉にも貢献でき、社会インフラとして注目されている。また最近ではデータセンターにおける消費電力最適化のための技術や、CEMS スマートハウスなどのエネルギーマネジメントシステム (EMS) において ASN を用いたアクチュエーション技術 (制御技術) に関して研究が進んでいる。

4.1 センサスケジューリングによる ASN の省電力化

一般にモバイルエージェントとして稼動する各センサノードは演算、通信に使う電力をバッテリーから供給する必要があるため、効率的にエネルギーを利用し、省電力化、長寿命化を図る必要がある⁽⁶⁾。このため毎時間ごとにアクティブ状態とスリープ状態の切替を行い、稼動するセンサを動的に選択し、ASN システム全体の省電力化、効率化を達成する制御技術が精力的に研究されている。

観測雑音が大きい場合、制御対象の状態を直接計測することは困難であるため、複数のデータセンターを融合して精度を向上させ、推定値を基に、信頼性の高いデータを選択する必要がある。文献(7)ではこの状態 $x(k)$ を拡張カルマンフィルタを用いて予測し、推定値を用いた動的センサ選択則に置き換えることにより実システムでの検証を可能とした。しかし、センサノードが極端に多くなった場合には、ここで用いた全数比較をするこの手法は使えない。

動的センサ選択を行う際、システムの大規模化とネットワークを構成するノード数の増加に伴い、比較データ数が増大したときに全てのノードについての評価関数の比較が困難になる問題を解消する方法として、筆者らが提案した ASN の近傍比較戦略を以下に紹介する。この手法では、前述の場合にも評価関数の特性を利用し、比較範囲を観測対象の近傍に限定することでデータ数の増加を抑え、動的なスケジューリング戦略を達成できる。具体的には観測精度並びに通信コスト、データの処理速度が異なる性能特性を持つ異種混合センサ群について、観測の精度が観測距離に依存して変化するという仮定の下で、観測値の処理遅延を考慮した動的センサ選択を行う。センサスイッチングの基準としては、時変カルマン

フィルタに基づく推定誤差共分散行列をベースに観測精度と通信コストの和によって定義する評価関数を用いている。文献(8)のセンサ選択アルゴリズムでは、各プラント近傍のセンサ群から推定誤差共分散を最小化する制御入力を逐次的に決定することで誘導制御を行っている。

4.2 知的環境におけるアクチュエーション応用技術

4.2.1 データセンターにおける ASN を用いた電力最適化

ビッグデータを高信頼で管理するためには、大形のデータセンターの空調管理が必須であるが、そのための大量の電力消費を抑えることは大きな課題である。カーネギーメロン大のグループはデータセンターへ届くデータ量を ASN によって計測し、処理計算負荷を推定することによって、センター内の各ゾーンへの分配データと計算割当を最適化することにより、各ゾーン内の計算負荷を均一に保ち、それにより空調システムの消費電力を平滑化する手法を提案している⁽⁹⁾。

また富士通研究所は1本の光ファイバを温度センサとして、1万か所以上の温度分布を同時に測定し、リアルタイムに可視化する「光ファイバ温度測定システム」の開発を行っている。これにより、データセンター内の空間的温度分布が分かり、過冷却を検知することにより省エネを達成することができる⁽¹⁰⁾。

4.2.2 ASN による海洋環境計測

モバイルセンサエージェントを用いた広領域の協調的環境調査 (水、温度、湿度、風、光量)、動物生態調査、海洋観察、火山観察、地震観察などに関する研究が期待されている。例えばプリンストン大のグループは海洋調査のためのアドホックモバイルセンサネットワークの開発を行っており、複数台の小形自律移動潜水艦に各種センサを搭載し、海底内の三次元データ構築を行い、その資源開発調査への応用展開を目指している⁽¹¹⁾。

4.2.3 ASN によるスマートパーキング

駐車場に設置された無数のパーキングメータに無線センサネットワークを構築し、空いている駐車スペースがどこにあるかをドライバーへ知らせるスマートパーキングに関する研究が進んでいる。ボストン大のグループは、ボストン市街地で、スマートフォンのアプリで空き駐車場がどこにあるかを示し、その駐車場まで誘導するシステムの開発を ASN の最適制御問題として定式化した。この技術は実際に実証実験のフェーズにまで進んでいる⁽¹²⁾。

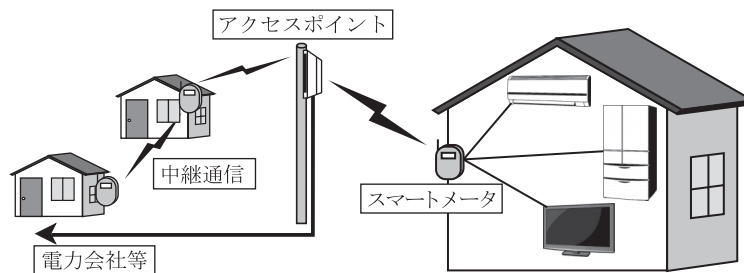


図4 IEEE 802.11ah によるスマートメータのための無線ネットワーク

5. 知的環境に融合させるネットワーク技術

知的環境として早期に実現されるであろうスマートグリッドについては、図4のように、各家庭の電力計に通信機能を持たせ、電柱などに備え付けるアクセスポイントとの間で双方向通信を持たせる、スマートメータシステムが有望である。本章では知的環境に融合させるネットワーク技術の例として、スマートメータシステムのためのアクセスネットワークについて述べる。このネットワークは、個々のトラフィックは比較的小さい一方で、膨大な数の端末を収容する無線 M2M (Machine-to-Machine) ネットワークとなろう⁽¹³⁾。スマートメータシステムをメインターゲットとする無線規格の一つとして、IEEE 802.11ah⁽¹⁴⁾がある。IEEE 802.11ah の中で検討されているスマートメータのための諸元としては、1 GHz 帯以下の免許不要無線周波数帯、端末数最大 6,000、最大伝送距離 1 km、伝送速度 100 kbit/s などが挙げられている。

無線周波数帯としては、米国の 902~928 MHz 帯に加え、日本においても 920 MHz 帯が 2012 年 7 月から利用可能となった。すなわち、無線規格標準化だけでなく帯域割当も着実に進んでおり、実利用が目前に迫っている。

また、IEEE 802.11ah では、次世代無線 LAN 規格である IEEE 802.11ac 規格のデバイスを 10 分の 1 のクロック周波数で駆動する手法を用いる。これは、伝送距離を拡大するための狭帯域化を目指す際に、無線 LAN チップ開発の効率化を図ったものである。

前述のように、スマートメータシステムは、既存の無線 LAN と比べてカバーエリアを大きくする必要がある。この際、シャドウイングによる不感地帯は避けられない。この対策としては、マルチホップ通信が有効である。前述の IEEE 802.11ah では、2 ホップに限定した中継通信のサポートが検討されている。すなわち、端末とアクセスポイント間に一つの中継局を介する通信を許容する。

6. まとめと今後の展望

本稿では、アンビエントセンサネットワークの概念、応用例に加えて、アンビエントセンサネットワークの要素技術としてのセンシング技術、プロセッシング技術、アクチュエーション技術、ネットワーク技術について概説した。文部科学省アカデミッククラウドに関する検討会では、今後の近々到来するビッグデータ時代において、「ビッグデータを効果的・効率的に収集集約し、革新的な科学的手法により知識発見や新たな価値を創造することの重要性が国際的に認識されている」としている。その他、総務省や米国大統領諮問委員会 (PCAST) 報告等においても、同様の趣旨の指摘が成されている。その意味で、本稿で述べたアンビエントセンサネットワークは、今後の多種多様なアプリケーションの情報通信・処理システムの中核を担う重要技術となる可能性が高い。アンビエントセンサネットワークは、従来の単一の研究領域では扱えない幅広い背景知識・技術が必要である。これまで扱うことが難しかった研究課題を推進するために、電子情報通信学会では平成 25 年度から、アドホックネットワーク研究会及びユビキタスセンサネットワーク研究会を母体にして新たにアンビエントセンサネットワーク研究会が発足している。本研究会を通じ、多くの研究者が多様な観点からの検討をし、今まで想像すらできなかった新たな技術が創成されることを期待する。

文 献

- (1) 小特集 “社会を支えるユビキタスセンサネットワークとその運用,” 信学誌, vol. 95, no. 9, pp. 771-808, 2012.
- (2) 鈴木 誠, 倉田成人, 猿渡俊介, 森川博之, “無線センサネットワークによる地震モニタリングシステムの実装と評価,” 信学技報, USN2007-66, pp. 65-70, Jan. 2008.
- (3) M.H.T. Fukatsu and T. Kiura, “Distributed agent system for managing a web-based sensor network with field servers,” In Proc. of 4th World Congress on Computers in Agriculture (WCCA), pp. 223-228, 2006.
- (4) S.S. Intille, K. Larson, E.M. Tapia, J.S. Beaudin, P. Kaushik, J. Nawyn, and R. Rockinson, “Using a live-in laboratory for ubiquitous computing research,” In Proceedings of the 4th international conference on Pervasive Computing, PERVASIVE'06, pp. 349-365, 2006.
- (5) 佐久間 淳, 小林重信, “プライバシー保護データマイニング,”

人工知能誌, vol. 24, no. 2, pp. 283-294, 2009.

- (6) S.C. Mukhopadhyay and H. Leung, Advance in Wireless Sensors and Sensor Networks, Springer, 2010.
- (7) T. Takeda and T. Namerikawa, "Optimal sensor network configuration based on control theory," Advance in Wireless Sensors and Sensor Networks, pp. 151-176, Springer, 2010.
- (8) 小杉和也, 滑川 徹, "近傍比較戦略に基づく異種混合センサスケジューリング," 計測自動制御学会論文集, vol. 47, no. 8, pp. 329-336, 2011.
- (9) L. Parolini, B. Sinopoli, and B.H. Krogh, "Model predictive control of data centers in the smart grid scenario," Control and Optimization Methods for Electric Smart Grids, pp. 223-238, Springer, 2012.
- (10) 武井文雄, 宇野和史, 笠嶋丈夫, "光ファイバによるリアルタイム超多点温度測定技術," ITU ジャーナル, vol. 39, no. 12, pp. 22-25, 2009.
- (11) N.E. Leonard, D. Paley, F. Lekien, R. Sepulchre, D.M. Fratantoni, and R. Davis, "Collective motion, sensor networks and ocean sampling," Proc. IEEE, vol. 95, no. 1, pp. 48-74, 2007.
- (12) Y. Geng and C.G. Cassandras, "Dynamic resource allocation in urban settings: A "Smart Parking" approach," In Proc. of IEEE International Symposium on Computer-Aided Control System Design (CACSD), pp. 1-6, 2011.
- (13) 山本高至, 守倉正博, "数万端末競合環境を実現する M2M 無線アクセスネットワーク," 信学誌, vol. 96, no. 5, pp. 330-335, May 2013.
- (14) IEEE 802.11 Task Group ah (TGah) Sub 1 GHz license-exempt operation, http://www.ieee802.org/11/Reports/tgah_update.htm

(平成 25 年 4 月 1 日受付 平成 25 年 4 月 18 日最終受付)



おつぎ ともあき
大槻 知明 (正員: シニア会員)

平 2 慶大・理工卒. 平 6 同大学院理工学研究科博士課程了. 博士 (工学). 平 7 東京理科大・理工・助手, 同大学講師, 助教授. 慶大・理工・准教授を経て, 平 20 から同大学・理工・教授. この間, 光通信, 無線通信, センサネットワークの研究開発に従事. 井上研究奨励賞, 安藤博記念学術奨励賞, エリクソン・ヤングサイエンティスト・アワード, IEEE the 1st Asia-Pacific Young Researcher Award, 船井学術奨励賞, 第 5 回国際コミュニケーション基金優秀研究賞, 2011 IEEE SPCE Outstanding Services Award, 電気通信普及財団賞 (テレコム技術賞), ETRI Journal's 2012 Best Reviewer Award 等各受賞.



わたなべ たかし
渡辺 尚 (正員)

昭 57 阪大・工・通信卒. 昭 59 同大学院博士前期課程了. 昭 62 同大学院博士後期課程了. 工博. 同年徳島大・工・情報・助手. 平 2 静岡大・工・情報知識・助教授. 平 8 同大学・情報・情報科学・教授. 平 25 阪大大学院情報科学研究科情報ネットワーク学専攻教授. 平 7 文

部省在外研究員 (カリフォルニア大アーバイン校). 計算機ネットワーク, 分散システムに関する研究に従事. 平 22 から本会アドホックネットワーク研究専門委員会副委員長, 平 23 から情報処理学会理事. 訳書「計算機設計技法」, 「802.11 無線ネットワーク管理」など. IEEE 会員.

なかざわ じん
中澤 仁



平 10 慶大・総合政策卒. 平 14 同大学院政策・メディア研究科博士課程了. 同年同大学院専任講師. 平 25 同准教授. 平 15~16 米国ジョージア工科大訪問研究員. 博士 (政策・メディア). センサネットワークシステム, ユビキタスシステム, デイペンダブルシステム等に関する研究に従事.

かわしま ひでゆき
川島 英之 (正員)



平 11 慶大・理工卒. 平 17 同大学院理工学研究科博士課程了. 同年同大学・理工・助手. 平 19 筑波大・講師. 博士 (工学). センサデータベースに関する研究に従事.

なめりかわ とおる
滑川 徹



平 3 金沢大・工・電気情報卒. 平 6 同大学院自然科学研究科システム科学専攻博士課程中退. 同年同大学助手. 平 12 同大学講師. 平 14 長岡技科大助教授. 平 18 金沢大大学院自然科学研究科准教授. 平 21 慶大・理工・システムデザイン・准教授となり現在に至る. ロバスト制御理論, 分散協調制御理論とそのネットワークロボティクス, 電力ネットワークへの応用に関する研究に従事. 博士 (工学).

やまもと こうじ
山本 高至 (正員: シニア会員)



平 14 京大・工・電気電子卒. 平 17 同大学院情報学研究科博士課程了. 同年同大学院助手. 平 23 同准教授. 平 20~21 スウェーデン王立工科大客員研究員. 博士 (情報学). M2M 無線ネットワーク, ゲーム理論の応用に関する研究に従事. 平 19 年度本会学術奨励賞, 平 22 年度本会論文賞各受賞.