

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 5 月 31 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2012～2016

課題番号：24246069

研究課題名(和文) 無線分散ネットワークを活用した分散型制御システム理論の構築

研究課題名(英文) Decentralized and Scalable Wireless Connection for Control Systems using  
Wireless Distributed Networks

研究代表者

三瓶 政一 (SAMPEI, SEIICHI)

大阪大学・工学研究科 ・教授

研究者番号：50252599

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,900,000円

研究成果の概要(和文)：本プロジェクトでは、無線分散ネットワーク技術をベースに、これまで情報通信ネットワークと接続されていなかったシステムを接続するための技術開発を目的としている。具体的には、リンクレベルの高信頼化、階層構造で構成されるメッシュネットワークにおける双方向フローの高性能化と、上下階層間での自律的制御方式の確立、分散制御のためのゲーム理論と機械学習アルゴリズムの開発、複数の独立したネットワーク間での自律的リソースマネージメント、照明制御ネットワークを前提とした実証試験を実施した。

研究成果の概要(英文)：This project aims to develop technologies for connecting vertical sectors to wireless distributed network (WDN) based networks, thereby achieving flexible and scalable vertical sector connections, where vertical sector means control systems, transport systems and so on that are not currently connected to information and communication technology networks. Specifically, this project consists of the following 6 part, improvement of wireless link level performances, performance improvements of layered mesh networks using MIMO based bi-directional flows and network coding, as well as distributed control based inter-layer resource control, development of game theory and machine learning based distributed control techniques, wireless resource management between adjacent-networks, and development of experimental electrical light networks to evaluate a part of developed technologies.

研究分野：無線通信工学

キーワード：無線分散ネットワーク 分散制御システム ネットワーク制御 スマートグリッド

1. 研究開始当初の背景

通信システムと制御ネットワークは、これまで異なる学問体系として進展してきたが、第5世代セルラシステム(5G)の開発において、情報通信ネットワークと自動運転などの制御システム(これらは **Vertical Sector** と呼ばれる)との接続が必須課題となっている。本プロジェクトの開始当初は、5Gの議論が始まる前であったのでこのような理念は明確ではなかったが、本プロジェクトは、その先駆けとして、ネットワークと **vertical sector** との接続を意識し、「無線分散ネットワーク」という概念をベースにした情報通信ネットワークと **vertical sector** の融合を目指したものである。

**Vertical Sector** をネットワークに接続する際には、スケーラビリティも必須である。そのため本プロジェクトは以下の7つのタスクを設定し、推進した。

- (1) 中継伝送を前提としたメッシュネットワーク内の中継伝送で発生する **End-to-End** の遅延時間の短縮化を実現(課題1)
- (2) 階層化されたメッシュネットワークを想定し、同一階層内では **MIMO (Multiple-Input Multiple-Output)** とネットワーク符号化の協調により双方向伝送を実現し、階層間では上位レイヤーの状況に応じた下位レイヤーの制御を実施(課題2)
- (3) 階層化されたネットワーク内での無線リソース制御として、分散処理に基づくアルゴリズムを確立(課題3)
- (4) 高度な制御技術実現のための機械学習を用いた制御アルゴリズムを実現(課題4)
- (5) ネットワーク制御理論の構築として、無線LANベースで隣接ネットワーク空間との協調制御技術を確立(課題5)
- (6) 本プロジェクトの実証試験として、自律的照明制御ネットワークを用いた実証を実施(課題6)
- (7) 研究の社会還元として、国際会議を中心とした本プロジェクト分野を発信(課題7)

次章以降では、課題1から課題6の各項目を中心に説明する。

2. 研究の目的

(1) 課題1

メッシュネットワークの基本単位は送信ノードと受信ノード各1台及び2台の中継器で構成され、伝送品質制御を検討する。ここでは情報源符号化と階層型多重アクセス通信の信路符号化の複合構成と見なし、受信信号処理を行う手法を検討する。

(2) 課題2

ここでは、**MIMO** 通信路とネットワーク符号化を適用した階層化ネットワークの設計手法を確立する。具体的には、1つの経路上の双方向フローに対し、送信前にネットワーク符号化を適用することで送信ストリーム数を削減するとともに、受信側ではネットワーク符号化された信号を **MIMO** 検出で分離する。

更に、刻々と変化するピーク消費電力をリアルタイムで制御するための分散処理アルゴリズムとして、ネットワーク全体を階層化するとともに、上位層で決定された供給電力の範囲内で階層の電力分配先に対して、優先順位に応じて分配するアルゴリズムを検討する。

(3) 課題3

分散処理を用いたリソース制御として、ゲーム理論のネットワーク制御への適用を検討する。本課題では、ネットワーク制御を適用するアプリケーションとゲーム理論に基づく分散制御をエネルギーマネジメントに適用した際の性能評価を目的とする。

(4) 課題4

各種制御に対するアルゴリズムの高度化のため、機械学習の適用を検討する。具体的には、**NB-IoT (Narrow-Band Internet of Things)** における非直交スケジューリングでの信号分離技術の検討を行う。**NB-IoT** ではより大きなパスロスに対応するため、1, 3, 6, 12本のサブキャリアが選択可能であるが選択できるサブキャリアには制約があるため、無線リソースの効率的活用が阻害される。本研究では、この効率の高効率化を狙うものである。

(5) 課題5

ネットワーク制御理論の構築では、アンライセンストスペクトルを用いて各プライベート空間において、各プライベート空間内で無線リソースの共用を認められたユーザだけが占有された時間通信を可能とする媒体予約方式を検討する。

(6) 課題6

分散型制御システムは多数のセンサとアクチュエータから構成される。ここでアクチュエータは、天井に取り付けられる大型機器となるのに対して、センサは、屋内空間に設置された照度センサや温度センサなど、小型の構成で空間に散在するが多い。本プロジェクトでは、無線分散ネットワークを活用し、センサとのデータ通信だけでなく、センサへの電力供給も分散配置された給電局で行う方法を提案し、バッテリーレスセンサの試作実験を行うことでその有効性を検証する。

3. 研究の方法

(1) 課題1

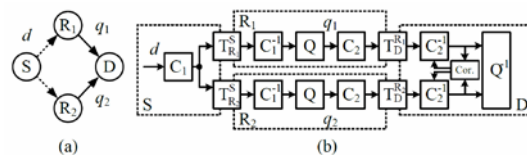


図1. 想定するシステムモデル

(a) ネットワークトポロジー, (b)システム全体のモデル

本項目では、図1(a)に示されるネットワークトポロジーと同図(b)に示されるシステム全体のモデルを考える。情報源Sにおいて、情報ビットdの系列は通信路符号化され、変調が施された後、中継局R1とR2に送られ、

各中継局  $R_i$  ( $i \in \{1, 2\}$ ) では、受信信号に対して復調と復号が行われた後、 $d$  の対数尤度比 (LLR) が算出される。得られた LLR が 1 ビットの硬判定がなされることでビット判定が行われる。その結果、各中継局からは、ビット誤り率の影響を含んだ相関係数  $\rho_{12}$  を有するビット  $q_i$  の系列が、直交チャネルを経由して  $D$  へ転送される。 $D$  では、統合復号器を用いて  $q_1$  と  $q_2$  の結合確率  $P[q_1, q_2]$  を算出する。結合確率と  $\rho_{12}$  の情報に基づき結合確率の周辺化を行うことで情報ビット系列  $d$  を検出する。

## (2) 課題 2

消費電力の変動は個々の負荷機器のオン・オフ状態によって総合的に決められる。ここでは実消費電力変動を模擬するために、オン・オフ事象をそれぞれポアソン過程に従って発生することとし、大型負荷機器 (例: エアコン) は数個の小型負荷機器 (例: テレビ) を連続してスイッチをオン (又はオフ) することでモデル化する。一方負荷機器の重要度は場所と時間によって変化するので、中断が許されない機器 (サーバ等) に優先度 1, できるだけ消さないほうが良い機器 (パソコン等) に優先度 2, 消しても構わない機器 (照明機器等) に優先度 3 を設定し、優先度を考慮した電力配分を行う。

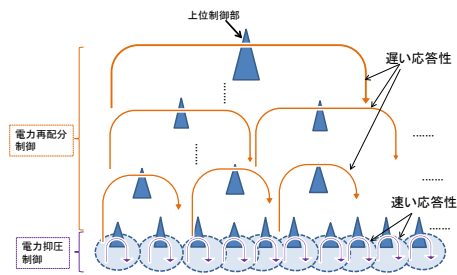


図 2. 階層化された制御系の役割分担

ネットワークは、図 2 に示されるように階層化されたものを想定する。ここで、最下位レイヤー制御系は 1 つ上の上位レイヤーによって決められた閾値に応じて、自レイヤー内の機器の消費電力量を負荷機器の優先度に応じて割り当てることでピーク消費電力の抑圧を実現する。一方、中間レイヤー以上では、直下のレイヤーの電力需要量と上位レイヤーからの配分量を考慮して下位レイヤーへの配分量を決定する。この制御によって、制御系にスケラビリティを与えることができ、中間レイヤーにおける電力再配分の応答性 (オレンジループ) が遅くなったとしても、最下位レイヤーでの消費電力の応答性 (紫ループ) は維持できる。

## (3) 課題 3

本プロジェクトでは、微分ゲーム理論を適用し、電力供給状態を各ユーザが共有できる場合とそうでない場合を、クローズドループ分散制御とオープンループ分散制御に対応させ、実際に測定された太陽光発電データや予測精度も加味したアルゴリズムを検討する。

また、マイクロ波電力伝送による無線 LAN 向けのエネルギーマネジメントシステムの実験も実施する。

## (4) 課題 4

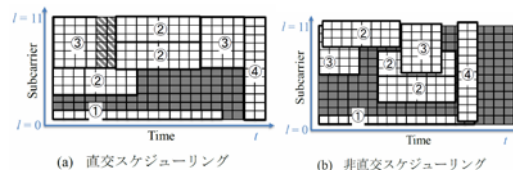


図 3. スケジューリングの例

図 3 に、(a) 直交スケジューリングと、(b) 非直交スケジューリングの場合の無線リソース割当例を示す。白の部分が各ユーザに割り当てられたリソースを示す。1 スロットで占有可能な最大のサブキャリアや伝送に要する時間に制限が存在するため、図 3(a) の斜線で示される未割当無線リソースが増し、無線リソースの利用効率が低下する。そこで、図 3(b) に示されるように、ユーザ間で帯域の一部が重なる非直交スケジューリングで柔軟なスケジューリングの実現を目指す。

## (5) 課題 5

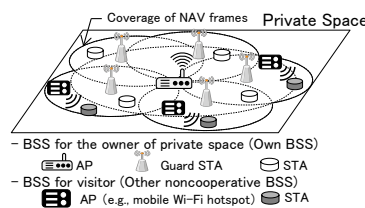


図 4. 仮想専用チャンネル構築法の構成

仮想専用チャンネル構築法に基づく複数ユーザのネットワーク構成例を図 4 に示す。ここでは、AP および守衛端末は他者の BSS に媒体占有期間が記載された NAV フレーム伝送で媒体占有期間を通知した後、データ伝送期間を実施するものとし、これを一定周期  $T$  毎に繰り返すことでプライベート空間内の外来 BSS に対して当該空間内での無線リソースの利用が抑制できる。一方空間外に存在する第三者の BSS の伝送を妨げることは許容されないため、それも実現できる仮想専用チャンネル構築法を検討する。

## (6) 課題 6

図 5 に、本研究開発で想定するセンサへの電力供給システムの概念図を示す。屋内空間に散在するマルチセンサに対して、天井に分散配置されたワイヤレスグリッド (電波照明) を介して無線給電を行うことで全てのセンサをバッテリーレスで駆動する。

multi-point 給電において均一なカバレッジを実現するために、搬送波シフトという給電方式を提案する。図 6 に提案した multi-point 給電方式 (搬送波シフトあり) とその他の給電方式との比較を示す。従来の single-point 給電方式 (図 6(a) では、受信電力の距離減衰によりセンサの駆動カバレッジが限定される。

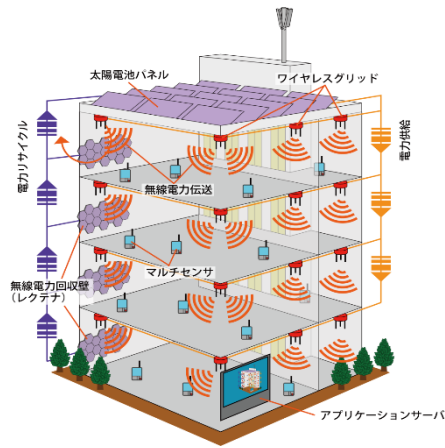


図5. センサへの電力給電システム

一方、multi-point給電では、カバレッジは拡大できるものの、両給電局からの信号の干渉により、図6(b)に示される、定在波分布に起因するデッドスポットが発生する。これに対して、搬送波シフト方式(図6(c))では、multi-point給電局間の周波数を周波数差 $\Delta f$ だけ変化させることにより、定在波分布に時間変動を与えることが可能となり、その結果として空間的に均一なカバレッジが実現できる。本研究開発では、その効果を実験的に確認する。

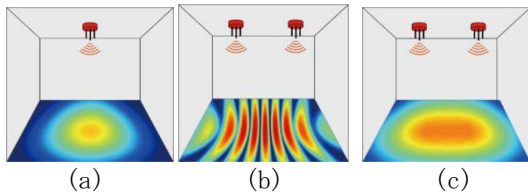


図6. 各給電方式のカバレッジのイメージ (a)single-point 給電, (b)multi-point 給電 (搬送波シフトなし), (c) multi-point 給電 (搬送波シフトあり)

本システムで適用されるセンサは、レクテナ整流器、DC/DCコンバータ、蓄電キャパシタ、人感センサ、マイコンモジュール、RF送信機で構成される。受信したRF信号はレクテナ整流器でDC信号に変換され、蓄電キャパシタに蓄えられる。蓄えられた電力はマイコンモジュール、RF送信機に対応した電圧に変換され各素子に供給される。

#### 4. 研究成果

##### (1) 課題1

図7に、課題1で検討したシステムのビット誤り率(BER)特性を示す。変調方式はBPSK(Binary Phase Shift Keying)、通信路符号化は符号化率1/2のLDPC符号を適用した。提案する相関処理と2ビット量子化を用いることで、エラーフロアが1ビットの量子化適用の場合と比較して約1/4となっている。また繰返し処理の適用で、1ビット量子化、2ビット量子化いずれの場合も、エラーフロアに達する所要 $E_b/N_0$ が約2dB改善する。

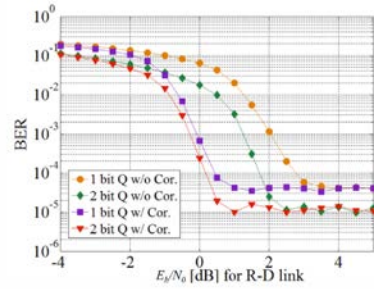


図7. 有相関統合復号器のビット誤り率特性

##### (2) 課題2

消費電力のリアルタイム抑圧効果を示すために、簡単な2階層制御ネットワークを考える。最下層は16個の機器があり、4つにグループ化されている。

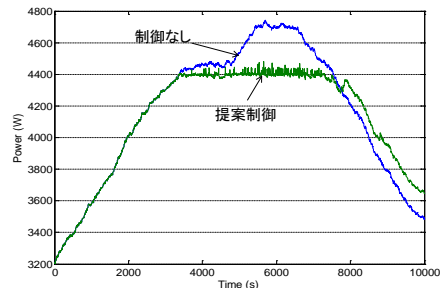


図8. 提案する優先制御を適用した場合の消費電力発生モデル

図8に、ピーク設定値を4400Wとした場合の提案方式の消費電力を、従来方式(制御無し)と併せて示す。提案手法の場合、消費電力のピーク値は設定値にほぼ制御されている。

##### (3) 課題3

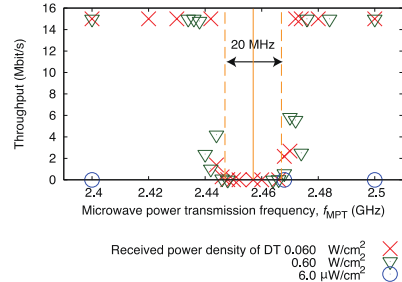


図9. 給電波の中心周波数に対するスループット

図9に、給電波の中心周波数に対するスループット特性を示す。これは電力給電と無線LANを同一周波数帯で運用した際の干渉の影響を示したものである。このことより、現状では干渉の影響が大きいことを明らかとした。その結果を基に、現行無線LAN機器に大きな影響を及ぼさないための共存手法について、ゲーム理論において単一主体の場合に相当する最適化理論を用いた方式提案ならびに実験評価を実施した。

##### (4) 課題4

図10に、非直交アクセスを適用したNB-IoTのスループット特性を示す。ここでスループットは、データが生起から伝送が終了するまでの時間で、単位時間あたり伝送されたり

ソースユニット数とし、伝搬路は LTE の ETU (Extended Typical Urban) モデル、リソースユニット数は 1、全ユーザ数は 50、各ユーザの信号においてオーバーラップ可能なユーザ信号数は 1 ユーザまでとする。

破線はパケットロスが無いとした場合の理想的特性、実線は実際に伝送を行った場合の特性である。パラメータは、割り当てられたリソースにおいて干渉を受けるサブキャリアの割合である。なお許容干渉割合が 75% 以上の場合には、受信機で適用されているターボ等化アルゴリズムが収束しないので、それより低い許容干渉割合の領域を見ると、全体として許容干渉量の増加に従い特性改善が確認できる。また、直交スケジューリングより良好な特性が得られるのを確認できる。

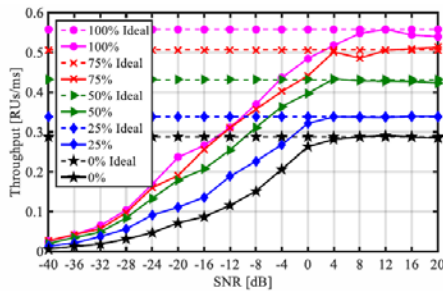


図 10. 最大許容干渉割合をパラメータとした受信 SNR に対するスループット特性

#### (5) 課題 5

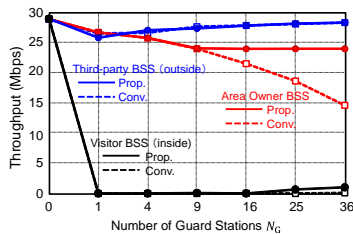


図 11. 守衛端末数对各 BSS のスループット

仮想専用チャネル構築法において、個々の守衛端末が順次媒体予約を行う方式（従来方式）、および、本研究課題で提案する高効率媒体予約方式（提案方式）、それぞれを用いた場合の、空間所有者 BSS、外来者 BSS（プライベート空間中央に存在）、第三者 BSS（空間外に存在）、それぞれが単独に存在した場合の最大スループットを評価した結果を図 11 に示す。外来者 BSS および第三者 BSS の伝送特性を見ると、従来方式と提案方式は同程度のスループットとなっている。この結果から、従来方式と提案方式は同程度に他者（外来者、第三者）が運用する BSS に NAV を通知することがわかる。次に、空間所有者 BSS のスループットの観点から比較すると、守衛端末数が少ない場合 ( $N_G \leq 9$ ) は、守衛端末が互いに干渉しない位置から NAV フレームを同時に伝送することはできないため、従来方式と提案方式は同程度のスループットとなっている。一方、より多くの守衛端末が用いられる場

合、( $N_G \geq 16$ ) は従来方式では NAV 通知に要する時間率が増大し、スループットが低下するのに対し、提案方式では NAV 通知に要する時間率の増大が抑制されるため、スループットの低下を抑制できている。

#### (6) 課題 6

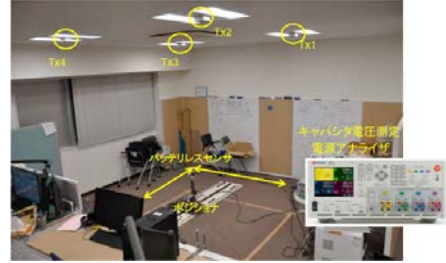


図 12. 実験環境の様子

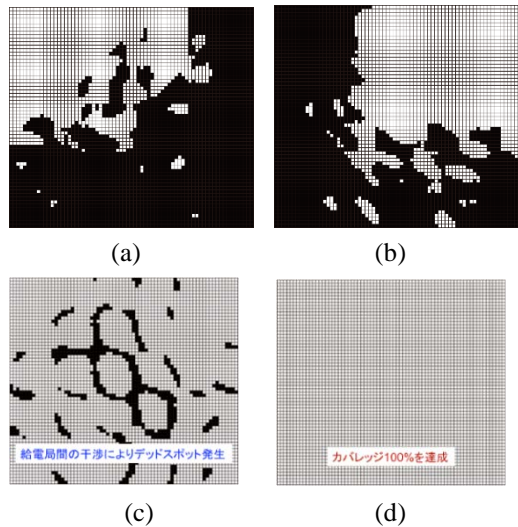


図 13. 各給電方式のカバレッジの様子（黒がカバーされていない領域）  
(a) Tx1 の single-point 給電 (coverage = 36.5%),  
(b) Tx2 の single-point 給電 (coverage = 46.6%),  
(c) 搬送波シフト未適用時の multi-point 給電 (coverage = 88.2%), (d) 搬送波シフト適用時の multi-point 給電 (coverage = 100%)

図 12 に実験環境を示す。実験では LED 照明に組み込まれた 4 台の給電局 (Tx1~Tx4) を用い、給電局が作る 1.91 m × 2.13 m の平面上に設置されたバッテリーレスセンサの駆動可否を評価する。センサはポジション上に設置され、3 cm 刻みで移動させて面的な測定を行う。床からのセンサ設置高は、実際に部屋で使用されている机と同じ高さの 72 cm とした。

図 13 に、(a) single-point 給電で Tx1 から送信の場合、(b) single-point 給電で Tx2 から送信の場合、(c) multi-point 給電で搬送波シフトを適用しない場合、(d) multi-point 給電で搬送波シフトを適用した場合、におけるセンサ駆動カバレッジエリアの結果を示す。single-point 給電の場合、給電局からの距離によって受信電力が減衰し、センサ駆動カバレッジが制限されていることが確認できる。また、その際に反射波による定在波に起因してデッドスポット

が発生している。一方multi-point給電で搬送波シフトを適用しない場合、複数の給電局を配置した効果により、距離減衰に起因するカバレッジ制限は緩和されているが、両極からの信号の干渉に起因するデッドスポットは残っていることが確認できる。それに対して搬送波シフトを適用すると、デッドスポットエリアは完全に解消され、カバレッジは100%となっている。これは、搬送波シフトの適用により、受信信号の位相関係が時間的に変化するので、それによってデッドスポットが解消されるためである。結果として100%のカバレッジが達成されている、すなわちmulti-point給電と搬送波シフトの適用でカバレッジ100%が達成できるように制御することが可能であることが確認できた。

#### (7) 課題7

本プロジェクトでは初年度は、シドニー大学、ジョージア工科大学等の研究機関を訪問し、本プロジェクトの概要を説明するとともに、IEEEにおけるWDN-CN (International WDN workshop on Cooperative and Heterogeneous Cellular Networks)は本プロジェクトと関連が深いので、寄与した。またIEEE RFID-TA 2015は本プロジェクトとの関連性が高いので会議の運営に協力した。

#### 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〕(下記を含めて計24件)

- [1] Tao Yu, Yusuke Kuki, Gento Matsushita, Daiki Maehara, Seiichi Sampei and Kei Sakaguchi, "Deployment of LED Light Control System using Battery-Less Wireless Human Detection Sensor Networks," IEICE Trans. Commun., 査読有, vol. E100-B, pp. 2017 (to appear).
- [2] Daiki Maehara, Gia Khanh Tran, Kei Sakaguchi and Kiyomichi Araki, "Experimental Study on Battery-Less Sensor Network Activated by Multi-Point Wireless Energy transmission," IEICE Trans. Commun., 査読有, vol. E99-B, no. 4, pp. 506-916, April 2016.
- [3] Gento Matsushita, Daiki Maehara, Yusuke Kuki, Kei Sakaguchi, Seiichi Sampei and Kiyomichi Araki, "Wireless Grid to realize Battery-less Sensor Networks in Indoor Environments," 査読有, IEEE APMC2014, pp. 690 - 692, Nov. 2014.
- [4] Shinichi Miyamoto, Naoya Ikeshita, Seiichi Sampei and Wenjie Jiang, "Multi-Stage DCF-Based Channel Access Scheme for Throughput Enhancement of OFDMA WLAN Systems," 査読有, vol. E97-B, no. 10, pp. 2230-2242, Oct. 2014.
- [5] Ryohei Araki, Koji Yamamoto and Masahiro Morikura, "Differential game-theoretic Analysis on Information Availability in

Decentralized Demand-Side Energy Management Systems," IEICE Transactions on Communications, 査読有, vol. E97-B, no. 9, pp. 2230-2242, Sept. 2014.

[学会発表](下記を含めて60件)

- [1] 寺本 弦生, 衣斐 信介, 三瓶 政一, "NB-IoTにおける非直交スケジューリングとその信号検出に関する一検討," 2017年電子情報通信学会総合大会, 2017年3月.
- [2] 小坂 亮太, タン ザカン, 阪口 啓, 荒木 純道, "Wi-Fi位置指紋法と歩行者デッドレコニングを用いた屋内測位システム," 電子情報通信学会第2回基礎講座ワークショップ, 2016年10月.
- [3] 山下 翔太, 坂口 晃一, 黄 勇, 山本高至, 西尾 理志, 守倉 正博, 篠原 真毅, "マイクロ波電力伝送を伴う無線LANシステムのための共存法に関する実験," 電子情報通信学会無線電力伝送研究会, 2016年3月.

#### 6. 研究組織

##### (1)研究代表者

三瓶 政一 (SAMPEI, Seiichi)  
大阪大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号：50252599

##### (2)研究分担者

宮本 伸一 (MIYAMOTO, Shinichi)  
和歌山大学・システム工学部・教授  
研究者番号：50252614

阪口 啓 (SAKAGUCHI, Kei)  
東京工業大学・理工学研究科・准教授  
研究者番号：80323799

山本 高至 (YAMAMOTO, Koji)  
京都大学・大学院情報学研究科・准教授  
研究者番号：30423015

衣斐 信介 (IBI, Shinsuke)  
大阪大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号：10448087

タン ザカン (TAN, Zakan)  
東京工業大学・理工学研究科・助教  
研究者番号：80599340