

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 5 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24360149

研究課題名(和文) 数万端末競合環境を実現するバッテリーレスM2Mネットワーク

研究課題名(英文) Batteryless M2M networks consisting of enormous number of terminals

## 研究代表者

守倉 正博 (MORIKURA, Masahiro)

京都大学・情報学研究科・教授

研究者番号：20467400

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,600,000円

研究成果の概要(和文)：多種多様なシステム要求条件(数百台から数万台に及ぶ端末数、数kbit/sから数Mbit/sに及ぶ伝送速度、エネルギーハーベストからマイクロ波による給電等)を持つすべての監視制御アプリケーションの要求を、統一的に一つの無線ネットワークで満足するMachine-to-Machine(M2M)ネットワークを構築するため、マイクロ波電力伝送と無線LANデータ伝送の共存が可能な条件の明確化及び共存方式、大規模M2Mネットワークのための同時通信数制御の提案に加え、応用研究としてスマートグリッドの解析手法、予測的ミリ波通信制御の提案を行った。

研究成果の概要(英文)：To develop a single unified wireless machine-to-machine (M2M) networks satisfying a wide variety of requirements of supervisory control systems, i.e., the number of terminals, data rate, and electric supply, a feasibility study of coexistence of wireless power and wireless LAN data transmissions and a proposal of the control scheme of the simultaneous number of transmissions were conducted. In addition, as applied researches, an analytical framework of smart grid and a proactive communication control method for millimeter wave communications were proposed.

研究分野：無線ネットワーク

キーワード：M2Mネットワーク バッテリーレス

### 1. 研究開始当初の背景

ZigBee や Z-WAVE といったセンサネットワークと比較し、セル半径が数 km と大きく、1 セルあたりに収容する端末数も数百～数万台となりうる Machine-to-Machine (M2M) ネットワークが、IEEE 802.11ah や 802.15.4k で新たな標準化規格に向けて議論が開始された段階であった。

また、無線端末数が膨大になると、端末に一次電池を用いることは、電池消費時の交換の点で運用上の問題が生じる。従って、電力線以外の何らかの形でその場で充電するキャパシタないし二次電池の利用がより現実的と考えられた。

### 2. 研究の目的

環境に優しく安全安心な社会を構築するために、様々な分野に情報通信技術を駆使した社会インフラを構築することが重要である。特に仮想空間の情報通信技術を実空間に結びつけたスマートグリッド、自然災害予防システム等の早期実現が必要である。これらのシステムでは、携帯電話や無線 LAN といったより高速のデータ通信速度を目指した研究とは異なり、1 端末あたりは低速であるが、端末数が莫大に多くなりかつメンテナンスフリーのためにバッテリーレスが望まれる。また、監視制御するアプリケーション毎に要求条件が大きく幅を持つシステムに対して、統一的な社会プラットフォームが必要となる。このプラットフォームのコアネットワークは光ファイバを中心に構築されるが、アクセス網は経済性、利便性、サービス展開の早さから M2M 無線ネットワークが中心になると考えられる。

本研究では、無線 LAN・PAN で用いられている自律分散制御プロトコル方式を拡張し、多種多様なシステム要求条件（数百台から数万台に及ぶ端末数、数 kbit/s から数 Mbit/s に及ぶ伝送速度、エナジーハーベストからマイクロ波による給電等）を持つ全ての監視制御アプリケーションの要求を、統一的に一つの無線ネットワークで満足する ENTERPRICE M2M ネットワーク (M2M network consisting of Enormous Number of TERminals without PRImary CElls) を構築することを目的とした。

### 3. 研究の方法

(1) アクセス制御として無線 LAN と同様に CSMA/CA を想定する。通信距離を 1km 程度とする場合、1 世帯 1 端末を仮定すると都市部では通信範囲内に数万台オーダーの端末が共存する可能性がある。これらが同時に通信を試みると衝突により通信完了までの時間が著しく長くなることが懸念され、同時送信数を抑える必要がある。多数の端末を収容する際の同時通信数制御に検討する。また CSMA/CA における同時通信数制御を行うために仮想的な時間グループを複数個設け、パケ

ット衝突確率を制御する方式についても理論検討を行う。加えて、無線通信端末が密集して存在する環境において高効率なアクセス制御を実現する同時通信数制御についても検討する。

(2) 無線端末のバッテリーレス動作を実現する手段として、比較的遠距離からの電力伝送が可能なマイクロ波電力伝送技術に着目する。また、無線通信規格としては標準化段階の IEEE 802.11ah を考慮して無線 LAN を採用する。本研究は、共有周波数帯域で電力伝送及びデータ伝送を行うものとする想定のもと、以下の手順で検討を進める。まず、無線 LAN 端末に向けてマイクロ波電力を放射する際の問題点を明確にする。その後、その問題に対する解決策について検討する。

(3) M2M ネットワークの応用研究を行う。スマートグリッドにおける電力調停や第五世代移動通信の通信方式として注目を集めているミリ波通信におけるセンサの応用を検討する。ミリ波通信では人や車による遮蔽が通信品質を大きく劣化させる。この劣化要因をセンサ、特にカメラを用いて予測し、予測に基づく通信制御を行う方式を検討し、テストベッドに実装し、実現可能性を実証する。

### 4. 研究成果

(1) マイクロ波電力伝送及び無線 LAN データ伝送の共存に関する実験

無末のバッテリーレス動作を実現することで、特に端末数の多いシステムにおける電源管理コストを大幅に削減することができる。本研究においては、無線 LAN 端末のバッテリーレス動作を実現する手段としてマイクロ波電力伝送技術に着目し、無線 LAN 端末に向けて給電用マイクロ波（給電波）を放射した際の問題点を明確化するための実験を実施した。

この実験により次の二つの知見が得られた。一つは、隣接帯域を用いて双方を同時運用した場合であっても、センサ端末を給電する程度の電力を伝送する場合には、マイクロ波電力伝送によるデータ伝送への干渉が発生することである。図 1 には、2.457 GHz 前後の帯域を用いてデータ送信を実施している無線送信局に向けて、様々な送電電力及び中心周波数の給電波を放射した際の通信側のスループットを示している。

もう一つは、無線 LAN 送信局に向けて間欠的に給電波を放射する場合に、無線機側の適応レート制御機構に起因するスループットの低下が発生することである。

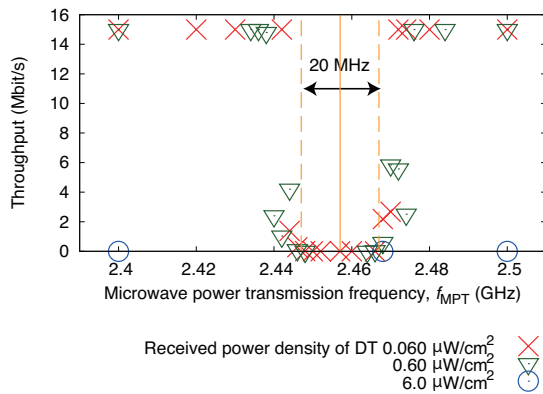


図 1 給電波の中心周波数に対するスループット

(2) マイクロ波電力伝送及び無線 LAN データ伝送の時分割共存法

(1) に述べたように、隣接帯域を用いて双方を同時運用した際にも、マイクロ波電力伝送によるデータ伝送への干渉が確認された。この結果を基に、同一帯域を用いてマイクロ波電力及び無線 LAN データ伝送を運用する前提のもと、本研究では双方の時分割運用法を提案した。本提案法においては、無線データ伝送のタイミング情報をマイクロ波電力伝送側と共有し、その期間における給電波の放射を停止することで、電力及びデータ伝送の同時運用を回避する。そこで、無線 LAN 通信における定期的な通信動作に着目し、このタイミングで給電波放射を止めるように送電タイミングを設計した。

本提案法の性能評価に関して、商用の無線 LAN 機器を用いた送電システムを電波暗室内に実装し、マイクロ波送電実験を実施した。図 2 に実装した時分割システムの動作状況を示す。無線 LAN 端末の消費電力が一時的に上昇しているタイミングでデータ伝送が行われており、給電波の非放射期間にデータ伝送が行われていることがわかる。また本実験では、所望の時分割運用に加えて無線 LAN 端末への無線給電の成功を確認した。

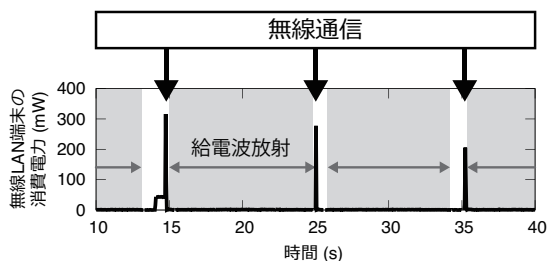


図 2 実装したマイクロ波送電システムの動作

(3) レクテナ出力を用いた給電波放射判定に基づく適応レート制御法

(1) に述べたように、無線 LAN 送信局に向けて間欠的に給電波を放射する際、無線機側

の適応レート制御機構に起因する放射再開直後におけるスループットの低下が確認された。そこで、給電波の放射状態に応じた適切な伝送レートの使用を目的とする、レクテナ出力を用いた給電波の放射判定に基づく適応レート制御法の提案を行った。レクテナは給電用の電波を受電し直流電力として出力する素子である。本方式では、このレクテナの出力電力を無線機上で観測して給電波にさらされているか否かの状態を判定し、その状態毎の履歴情報を用いて伝送レートの決定を行う。

本提案法の性能評価に関して、電波暗室内でマイクロ波送電実験を実施した。図には既存方式及び提案方式それぞれを用いたときのスループット推移を示す。この図 3 より、提案方式により既存方式における給電波放射停止後のスループット低下の回避に成功していることがわかる。本実験より、給電波が放射されていない期間における伝送レートを高く維持することに成功し、所望のスループット低下回避の実現を確認した。

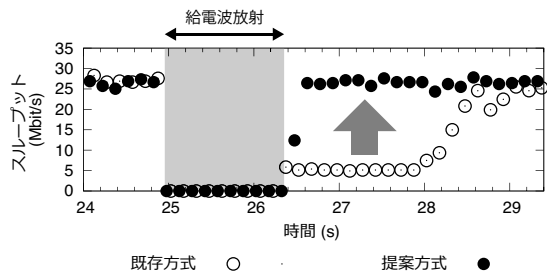


図 3 送信局に給電波を放射した際のスループットの推移

(4) 大規模 M2M ネットワークのための同時通信数制御

数千数万の端末が同時に通信を行う環境ではフレーム衝突率が著しく増加する。本研究は CSMA/CA ベースの無線通信において、自律分散的に同時通信数を制御する方式としてランダム AIFSN 方式を提案した。本方式はバックオフ制御開始前の待ち時間を送信ごとにランダムに設定することで、仮想的な時間グループを複数設けることができ、同時通信数を大きく削減することができる。図 4 に数千端末が通信する環境を想定したシミュレーション評価結果を示す。本方式により、数千端末が存在する環境におけるスループットが劇的に向上することを確認した。

また、本研究の応用として、モバイルアクセスポイントやテザリング端末などを想定し、無線アクセスポイントが稠密に展開された環境での検討を行った。データ通信に広く用いられる TCP 通信を想定し、ランダム AIFSN 方式の改良を行い、スループット性能を向上した。さらに実証実験に向け小型 Linux OS 端末へ実装を行い、本方式が動作することを確認した。

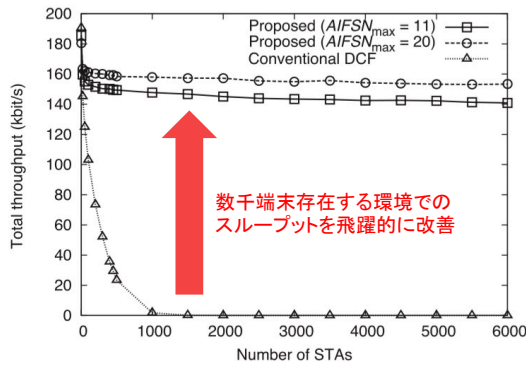


図 4 同時通信数制御によるスループット向上効果

(5) 無線端末稠密環境に向けた新たな同時通信数制御

先に述べたように多数の端末が同時送信を試みるとフレーム衝突が発生し、通信時間が長くなり帯域利用効率が低下する。本研究では無線端末が非常に密に存在する環境を想定し、図に示すカメラとLEDによる可視光通信を応用した新たな無線アクセス方式を提案した。無線端末がLEDによりアクセス要求信号を送信し、基地局はカメラを用いてカメラ視野内に存在する端末からの信号を複数同時受信することで効率よくアクセス要求を収集する。また、アクセス要求に基づき無線帯域を割り当て、同時通信数を制御することで無線通信帯域におけるアクセス制御によるオーバーヘッドの削減、および、フレーム衝突ゼロを実現し、無線通信の帯域利用効率を向上した。

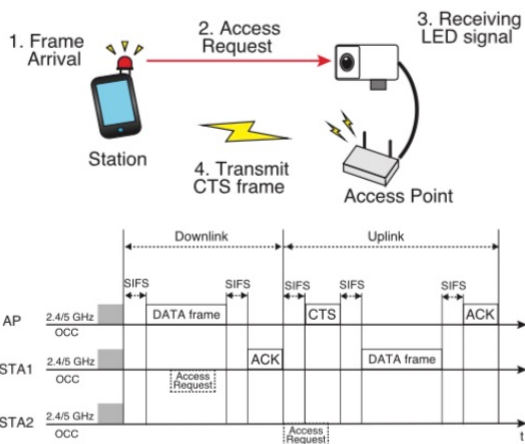


図 5 可視光通信を用いた無線アクセス

(6) スマートグリッドのための電力調停

応用研究として、図 6 のように複数の建物間で電力調停を行う際に、通信状態に応じた制御に関して微分ゲームを用いて議論を行うフレームワークを提案した。電力供給状態を各需要家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評価を可能とした。

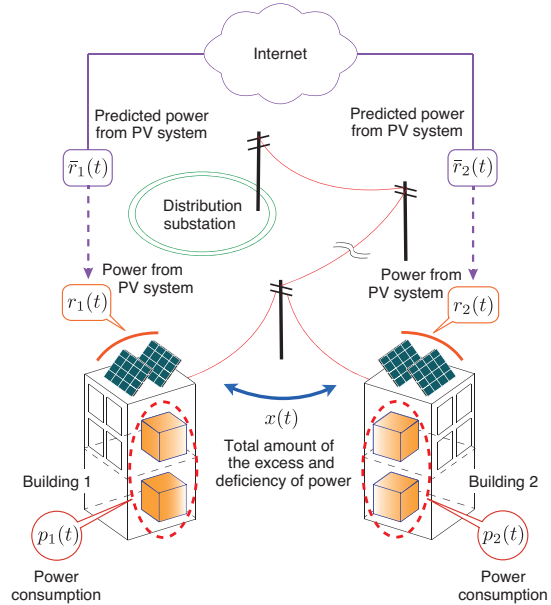


図 6 複数の建物間での電力調停

(7) カメラを用いた予測的ミリ波通信制御

M2M ネットワークの応用研究として、図 7 に示すカメラ画像をもとにしたミリ波通信制御を提案した。ミリ波通信は第五世代移动通信や次世代無線 LAN の大容量化の重要技術であるが、人や車が見通し通信路を遮蔽すると通信品質が大きく劣化する。本研究ではカメラ画像から遮蔽物の位置や移動を推定し遮蔽予測する手法、カメラ画像から機械学習により通信品質を予測する手法、予測情報をもとに遮蔽発生前にハンドオーバーやトラフィック制御を行うことで遮蔽による通信品質低下を回避し、高い通信品質を維持するプロアクティブ通信制御を実現した。最新のミリ波無線 LAN 機器を用いて図 8 に示すテストベッドを実装し、世界に先駆け、カメラを用いたミリ波通信制御の実現可能性と有効性を実証した。

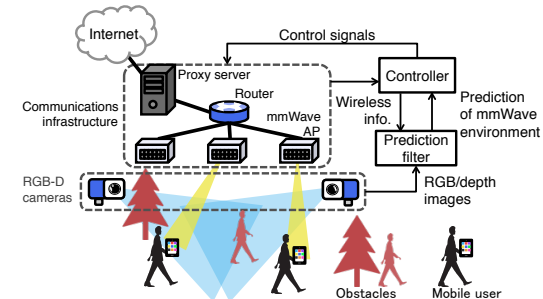


図 7 カメラ画像に基づくミリ波通信制御システム

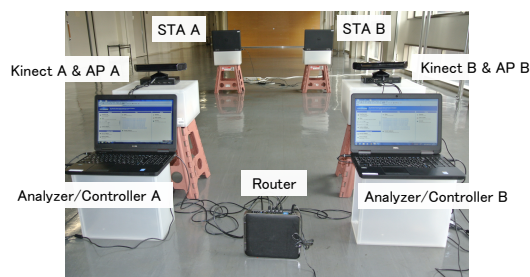


図 8 カメラ画像に基づくミリ波通信制御のテストベッド

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 11 件)

- ① K. Yamamoto, "[Invited Survey Paper] A comprehensive survey of potential game approaches to wireless networks," *IEICE Trans. Commun.*, vol. E98-B, no. 9, pp. 1804-1823, Sept. 2015. 査読有.  
DOI: 10.1587/transcom.E98.B.1804,  
<http://hdl.handle.net/2433/200768>
- ② S. Yamashita, K. Sakaguchi, Y. Huang, K. Yamamoto, T. Nishio, M. Morikura, and N. Shinohara, "Rate adaptation based on exposure assessment using rectenna output for WLAN station powered with microwave power transmission," *IEICE Trans. Commun.*, vol. E98-B, no. 9, pp. 1785-1794, Sept. 2015. 査読有.  
DOI: 10.1587/transcom.E98.B.1785,  
<http://hdl.handle.net/2433/200767>
- ③ R. Nishioka, T. Nishio, M. Morikura, and K. Yamamoto, "A camera and LED-based medium access control scheme for wireless LANs," *IEICE Trans. Commun.*, vol. E98-B, no. 5, pp. 917-926, May 2015. 査読有.  
DOI: 10.1587/transcom.E98.B.917,  
<http://hdl.handle.net/2433/200765>
- ④ F. Inoue, M. Morikura, T. Nishio, K. Yamamoto, F. Nuno, and T. Sugiyama, "Novel coexistence scheme between wireless sensor network and wireless LAN for HEMS," *IEICE Trans. Fundamentals*, vol. E98-A, no. 2, pp. 578-588, Feb. 2015. 査読有.  
DOI: 10.1587/transcom.E97.A.578,  
[http://www.imc.cce.i.kyoto-u.ac.jp/papers/150201\\_IEICE\\_EA\\_inoue.pdf](http://www.imc.cce.i.kyoto-u.ac.jp/papers/150201_IEICE_EA_inoue.pdf)
- ⑤ S. Yamashita, N. Imoto, T. Ichihara, K. Yamamoto, T. Nishio, M. Morikura, and N. Shinohara, "Implementation and feasibility study of co-channel operation system of microwave power transmissions to IEEE 802.11-based battery-less sensors," *IEICE Trans. Commun.*, vol. E97-B, no. 9, pp. 1843-1852, Sept. 2014. 査読有.

DOI: 10.1587/transcom.E97.B.1843,  
<http://hdl.handle.net/2433/193083>

- ⑥ N. Imoto, S. Yamashita, T. Ichihara, K. Yamamoto, M. Morikura, and N. Shinohara, "Experimental investigation of co-channel and adjacent channel operations of microwave power and IEEE 802.11g data transmissions," *IEICE Trans. Commun.*, vol. E97-B, no. 9, pp. 1835-1842, Sept. 2014. 査読有.  
DOI: 10.1587/transcom.E97.B.1835,  
<http://hdl.handle.net/2433/193082>
- ⑦ R. Arai, K. Yamamoto, T. Nishio, and M. Morikura, "Differential game-theoretic analysis on information availability in decentralized demand-side energy management systems," *IEICE Trans. Commun.*, vol. E97-B, no. 9, pp. 1817-1825, Sept. 2014. 査読有.  
DOI: 10.1587/transcom.E97.B.1817,  
<http://hdl.handle.net/2433/193081>
- ⑧ K. Ogawa, M. Morikura, K. Yamamoto, and T. Sugihara, "IEEE 802.11ah based M2M networks employing virtual grouping and power saving methods," *IEICE Trans. Commun.*, vol. E96-B, no. 12, pp. 2976-2985, Dec. 2013. 査読有.  
DOI: 10.1587/transcom.E96.B.2976,  
<http://hdl.handle.net/2433/193078>
- ⑨ 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," *電子情報通信学会誌*, vol. 96, no. 5, pp. 330-335, May 2013. 査読有.  
<http://hdl.handle.net/2433/193085>

[学会発表] (計 50 件)

- ① Y. Oguma, R. Arai, T. Nishio, K. Yamamoto, and M. Morikura, "Proactive base station selection based on human blockage prediction using RGB-D cameras for mmWave communications," *Proc. the 2015 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, pp. 1-6, サンディエゴ (米国), Dec. 9, 2015.  
DOI: 10.1109/GLOCOM.2015.7417432
- ② S. Kamiya, K. Nagashima, K. Yamamoto, T. Nishio, M. Morikura, and T. Sugihara, "Joint range adjustment and channel assignment for overlap mitigation in dense WLANs," *Proc. the 26th IEEE International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC 2015)*, pp. 1974-1979, 香港 (中国), Sept. 2015.  
DOI: 10.1109/PIMRC.2015.7343622
- ③ 山本高至, 山下翔大, 西尾理志, 守倉正博, "[招待講演] 数万端末競合環境を実現する ENTERPRICE M2M ネットワーク," *信学技報 SR2015-10*, May 25, 2015. 明石市立産業交流センター (兵庫県・明石市)



- ④ T. Nishio, R. Arai, K. Yamamoto, and M. Morikura, "Proactive traffic control based on human blockage prediction using RGBD cameras for millimeter-wave communications," Proc. the 2015 IEEE 12th Consumer Communications and Networking Conference (CCNC), pp.152-153, ラスベガス (米国) , Jan. 2015.  
DOI: 10.1109/CCNC.2015.7157963

[その他]

ホームページ等

<http://www.imc.cce.i.kyoto-u.ac.jp/ja/research/enterprise-m2m-network/>

<http://www.imc.cce.i.kyoto-u.ac.jp/ja/research/wptschedule/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

守倉 正博 (MORIKURA, Masahiro)

京都大学・大学院情報学研究科・教授

研究者番号：20467400

### (2) 研究分担者

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

西尾 理志 (NISHIO, Takayuki)

京都大学・大学院情報学研究科・助教

研究者番号：80711522