

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成26年3月31日現在

機関番号：12501  
研究種目：基盤研究(B)  
研究期間：2011~2013  
課題番号：23360167  
研究課題名(和文) 大規模無線マルチホップネットワークにおけるマルチメディア通信の品質制御方式の研究  
研究課題名(英文) Study on Quality Control for Multimedia Communication in Large-scale Wireless Multi-hop Networks  
研究代表者  
阪田 史郎(SAKATA SHIRO)  
千葉大学・大学院融合科学研究科・教授  
研究者番号：80375609  
交付決定額(研究期間全体)：(直接経費)8,500,000円,(間接経費)2,550,000円

研究成果の概要(和文)：マルチメディア通信の品質制御を無線マルチホップ化するため、通信プロトコルの上下層間でのクロスレイヤ制御、アドミッション制御による送信優先制御、端末の送信範囲を動的に変更する空間利用効率制御、ARQ(自動再送要求)とFEC(前方誤り訂正)を適応的に使い分けて利用するエンド・エンド誤り制御の4つの方向から並行する形で研究を行った。4つの制御についてすべて新方式を提案し、解析、シミュレーション、実験の各側面から評価し、提案方式の有効性を示した。さらに、これらの方式を組合せて適用することによって各効果の総和以上の相乗効果を生み出すことを示した。

研究成果の概要(英文)：In order to extend multimedia communication to wireless multi-hop network, research closely related to four core technologies has been conducted in parallel, cross-layer control in seven-layer protocol hierarchy, transmission priority control using admission control, space utilization efficiency control in which communication range is adaptively changed, and routing control with appropriate combination of ARQ and FEC. In each technology, novel control scheme has been proposed. These schemes have been evaluated by analyses, simulations and experiments in an actual wireless multi-hop network. It has been demonstrated that the combined use of these four schemes attains the synergetic effects

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：無線マルチホップネットワーク，QoS制御，センサネットワーク，クロスレイヤ制御，空間利用効率

#### 1. 研究開始当初の背景

軍事研究を起源とする無線マルチホップネットワークは、M2M(Machine-to-Machine)やIoT(Internet of Things)、ユビキタスシステムの中核技術として注目され、アドホックネットワーク、センサネットワーク、車々間通信、無線LANメッシュネットワークなどの様々な形態での研究や標準化が進められている。大規模災害時の緊急連絡用、GPS(Global Positioning System)と連携した児童や老人向けの見守り、各種監視などを目的としたシステムの利用が徐々に始まりつつある。しかし、これまでの無線マルチホップネットワークでは、

物理層の特性に起因する、

- (1) 有線に比べて十分な帯域を確保することが容易でなく、通信誤り発生により安定的通信が困難。
- (2) ホップ数の増加に伴い、遅延やパケットロス率の増加等による通信品質劣化が著しい。

などの要因により、現在実用化されている無線マルチホップネットワークの多くは、その規模が高々3ホップ程度に留まっている。

通信される情報も、無線通信による画質、音質の著しい劣化のため、大部分のネットワークでは文字情報に限定されている。今

後、アドホックネットワークを通じた災害時における、被災者への被災状況の伝達や被災者の安否確認、センサネットワークによる防犯・防災用の映像監視などでは、マルチメディア情報の通信に対するニーズが高まると予想される。さらに、高々3ホップ程度では通信範囲が数百 m<sup>2</sup> 程度のため利用範囲が限られ、さらなる多ホップ化による広範囲での利用に対する期待が高まっている。

マルチメディア通信では、映像、音声情報を何らかの手法により優先的に通信し、画質、音質を一定以上に保つ品質 (Quality of Service または Quality of Experience, 以下総称して QoS) 制御が要求される。これまでインターネットを中心とする有線において QoS 制御に関する研究が多くなされてきた。しかし、無線マルチホップネットワークにおいては、これらの方式が、無線特有の性質から必ずしも有効とは限らず、実用化がなかなか進展しない状況となっていた。

また、無線ネットワークにおける QoS 制御については、シングルホップの無線 LAN に関して、IEEE 802. 11e が標準化されている。IEEE 802. 11e の EDCA (Enhanced Distributed Channel Access) では、MAC (Media Access Control) 層において通信するメディア (音声、動画、データ、ファイル等) に応じて AP (Access Point) による優先制御を行う。しかし、EDCA は MAC 層のみによる制御であり、上位層において物理層の無線特性情報を利用したクロスレイヤ制御は規定外である。このため、QoS 制御の効果が限定的であるだけでなく、シングルホップを対象としているため、マルチホップの場合の QoS 制御に対する有効性は示されていない。

IEEE 802. 11s では、最大4ホップ程度を想定した無線 LAN メッシュネットワークにおける MAC 層の各種プロトコルが規定されている。しかし、IEEE 802. 11s では、メッシュネットワーク内で輻輳が発生した時に、パケット送信側に輻輳を通知するプロトコルを規定しているのみで、アドミッション制御のような利用者の端末-端末間に対応するエンド・エンドの QoS の保証はない。

## 2. 研究の目的

無線マルチホップネットワークは、1990年代末以降 M2M や IoT, ユビキタスシステムの中核技術として注目され、将来、モバイル・アドホックネットワーク、センサネットワー

ク、車車間/路車間通信、無線 LAN メッシュネットワークなど様々な形態で利用されることが期待されている。

研究の目的は、災害時の緊急通信やスマートグリッドにおけるメータリングも想定した広範囲での利用が可能な最大20ホップ程度の大規模な無線マルチホップネットワークを通して、動画や音声を含むマルチメディア通信を行う場合に、国際品質基準を満たす動画、音声の高品質化を実現するための世界に先駆けた新方式を提案し、その有効性を理論解析シミュレーション、実験の各側面から評価し実証することにより、QoS 制御技術を確立する。

QoS 制御技術の確立を通して、無線マルチホップネットワークの実用化を加速し、M2M/IoT, ユビキタスネットワーク社会の実現に資する。

## 3. 研究の方法

マルチメディア通信の高品質化とマルチホップ化を実現する、クロスレイヤ制御、優先制御のための送信抑制制御、適応的通信距離制御による空間利用効率向上方式、ARQ (Automatic Repeat Request) -FEC (Forward Error Correction) の適切な組合せによるエンド・エンド誤り制御の4つの技術項目に関し、平成23年度と24年度はおのおのほぼ独立する形で並行して研究を進めた。

平成23年度は、申請者らによる提案も含めたこれまでの研究の詳細なレビューを行った。レビューに基づき、各方式の基礎的検討、理論的解析、一部予備シミュレーションを試み、提案方式の具体化とその後の実現可能性を追求した。

平成24年度は、数値解析や大規模な計算機シミュレーション、キャンパスに構築している無線マルチホップネットワークを利用し実験を通して、提案方式を定量的に評価した。評価結果を通して提案方式の有効性を実証し、必要な機能拡張についても具体化を図った。

平成25年度は最終目標の達成を目指し、4つの方向で研究を進めて提案を行った各方式を適切に組合せて適用することにより、相乗効果を生み出すべく、解析、シミュレーション、実ネットワーク上での実験により評価を行った。

## 4. 研究成果

大規模で高品質な無線ネットワークのマルチホップ化に向け、クロスレイヤ制御、優先フローの要求性能を保証するための送信抑制制御、空間利用効率向上方式、ARQ-FECの適切な組合せによるエンド・エンド誤り制御の4つの方向から研究を進め、以下の研究成果が得られた。

#### (1) クロスレイヤ制御

下位層から上位層への伝達については、MAC層からのフレーム衝突率やフレーム再送回数、フレーム送出待ち時間などの情報をネットワーク層、トランスポート層に伝える新方式を提案した。提案方式では、ネットワーク層ではその情報に応じて送信キューによる優先制御、トランスポート層ではTCPによるパケット廃棄を避けるべく輻輳ウィンドウの制御、非優先フローに対して受信を拒否する制御を指示する。

上位層から下位層への伝達については、ネットワーク層からは送信キューの長さ、トランスポート層からはTCPの輻輳ウィンドウサイズ、非優先フローに対する受信拒否確率をMAC層に伝える新方式を提案した。MAC層ではこれらの情報に基づき適切な送信優先制御を行う。

両提案方式について、シミュレーションによる評価を行った。その結果、ホップ数によらず、エンド・エンドの端末間でスループットと遅延を10%程度改善できることを示した。

#### (2) 優先制御のための送信抑制制御

非優先フローの受信拒否を行うことによってマルチホップ・メッシュネットワークの中継ノードにおける輻輳を防ぐ新方式を提案した。提案方式では、中継ノードにおける通信バッファ使用量と使用率を監視し、輻輳発生時はメッシュネットワークのエッジノードまで輻輳を迅速に伝達する。さらに、アドミッション制御により、ネットワークの入り口に設置された送信端末に対する受信拒否確率を適応的に調整する。

提案方式を無線LANの性能解析で従来よりよく利用されるBianchiのモデルに適用して理論解析を行うとともに、シミュレーションによる定量的な評価を行った。その結果、理論解析、シミュレーションのいずれにおいても、エンド・エンドの端末間のスループットの総和が10%強改善できることを示した。

#### (3) 空間利用効率向上方式

無線マルチホップネットワークの大規模化に対応するため、各端末の送信範囲を柔軟に変更することにより空間利用効率を向上させるルーティング制御、それに伴う送出電力制御、および送出電力に適した変調に関して新方式を提案した。さらに、フローの優先度に応じて通信距離を変化させることにより、要求QoSの達成、省電力化、空間利用効率の向上を同時に実現する新通信プロトコルを提案した。

提案方式を一部理論解析するとともに、提案方式のソフトウェアを実装し、キャンパスに構築した無線マルチホップ・ネットワークにおいて測定・実験を行った。その結果、理論解析よりやや低い数値であったが、実際のネットワーク上においても、10%弱のエンド・エンド端末間のスループットが向上することを示した。

#### (4) ARQ-FECの適切な組合せによるエンド・エンド誤り制御

これまでシングルホップネットワークでしか解明されていない、ARQ、FEC、ハイブリッド方式に関し、マルチホップネットワークにおけるこれらを組合せ(レイヤ、ホップ)た場合の誤り能力を理論的に解析し、誤り能力をほぼ最大化する近似解を求めた。さらに、ARQ-FECの適切な組合せの導出、ARQにおける最大再送回数やFECで使用する誤り提出富豪の決定、FECにおける冗長度などの最適なパラメータ設定に関する新方式を提案した。

提案方式に関して、シミュレーションによる定量的な評価を行った。さらに、提案方式のソフトウェアを実装し、キャンパス内の無線マルチホップ・ネットワーク上で実測を行い、無線リンクの品質に応じて優先フローに関して、5~15%のエンド・エンド間遅延が低減され、ジッタ(遅延のばらつき)が約50%になることを示した。

以上の4つの技術項目に関し、平成23、24年度は、それぞれ独立に並行して進め、提案方式に結びつけた。最終の平成25年度は各提案方式を組合せて適用することによる性能改善の評価を、主にシミュレーションと実験を通して行った。その結果、各提案方式による効果を単に足し合わせた効果(スループットに関して30%強)よりも

若干高い最大で 40~45%の性能改善効果が得られた。4つの方向で研究を進めて提案を行った各方式を適切に組合せて適用することにより、相乗効果を生み出しうることを示した。

#### 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] (計 11 件)

- ① 満足亮, 関屋 大雄, 馬 ジン, 眞田 耕輔, 阪田 史郎, アドホックネットワークにおいて Pulse/Tone 信号を用いた制御チャネル型マルチチャネル MAC プロトコル電子情報通信学会論文誌 B, 査読有, J97-B, 2014
- ② S. Takizawa, N. Komuro, S. Sakata, Energy Efficient Routing Control for 6LoWPAN WSN with Power-supplied and Battery-powered Nodes, 査読有, Cyber Journal on Selected Areas in Telecommunications (JSAT), Vol.3, No.11, 2013, pp.10-16
- ③ K. Sanada, H. Sekiya, N. Komuro, S. Sakata, Backoff-stage Synchronization in Three-hop String-Topology Wireless Networks with Hidden Nodes," IEICE NOLTA, 査読有 Vol.E95-N, No.4, 2012, pp.210-214
- ④ 黄重陽, 塩田茂雄, "マルコフ連鎖と待ち行列モデルを組み合わせた無線LAN用性能評価モデル," 電子情報通信学会論文誌 B, 査読有, Vol.J95-B, No.2, 2012, pp.119-129
- ⑤ 高瀬琢磨, 小室信喜, 阪田史郎, 塩田茂雄, 村瀬勉, 関屋大雄, 無線マルチホップネットワークにおけるトークン生成レートに基づく QoS 保証のための受信器制御方式," 電子情報通信学会論文誌 B, 査読有, Vol.J95-B, No.2, 2012, pp.188-198
- ⑥ H. Saito, S. Shioda, S. Tanaka, Stochastic Geometric Filter and its Application to Shape Estimation for Target Objects," IEEE Trans. Signal Processing, 査読有, Vol.59, No.10, 2011, 4971-4984
- ⑦ N. Komuro, H. Sekiya, S. Sakata, Energy Efficient Wireless Random Access Network with Code based Multi-level Modulation Scheme," Journal of Signal Processing, 査読有, Vol.15, No.6, 2011, 461-468

- ⑧ 高橋淳, 小室信喜, 阪田史郎, 塩田茂雄, 村瀬勉, 無線マルチホップメッシュネットワークにおける受信機会制御プロトコルを用いる流量制御方式," 電子情報通信学会論文誌 B, 査読有, Vol.J94-B, No.8, 2011, pp.988-991
- ⑨ S. Y. Chin, N. Komuro, H. Sekiya, S. Sakata, Analytical Expressions RTS/CTS-used Wireless Multihop Networks, Journal of Signal Processing, 査読有, Vol.15, No.4, 2011, pp.267-270
- ⑩ K. Sato, S. Sakata, L-DRAND: A Localized Distributed TDMA Scheduling Algorithm with Distance-Measurement for Sensor Networks, Journal Selected Areas in Telecommunications (JTAT), 査読有, Vol.2, No.11, 2011, pp.287-293
- ⑪ J. Ma, N. Komuro, S. Sakata, Sensor Deployment for Location-Estimation Coverage," Key Engineering Materials, 査読有, Vol.4, No.8, 2011, pp.1161-1166

[学会発表] (計 3 2 件)

- ① 阿部成美, 阪田史郎, 小室信喜, 原誠一郎, 無線センサネットワークを利用したスマートメータリング広域メータ情報収方式, 電子情報通信学会情報ネットワーク研究会, IN2013-168, 2013.3.7
- ② 阿部憲一, 長谷川晃朗, 阪田史郎, 池永全志, 四方博之, 無線センサー・アクチュエーター・ネットワーク (WSAN) におけるオンデマンド型省電力方式の提案と評価, 電子情報通信学会ネットワークシステム研究会, NS2013-221, 2013.3.7
- ③ 山谷彬人, 阪田史郎, 小室信喜, 阿部憲一, 6LoWPAN/RPL無線センサネットワークにおける位置情報クラスタリングを用いたデータ収集方式と評価, 電子情報通信学会情報ネットワーク研究会, IN 2013-169, 2013.3.7
- ④ 篠原佑介, 阪田史郎, 小室信喜, スマートメータリングにおける電力残量を考慮した中継ノード選択方式と評価, 電子情報通信学会情報ネットワーク研究会, IN 2013-170, 2013.3.7
- ⑤ 松田祐輝, 阪田史郎, 小室信喜, 阿部憲一, オンデマンド型省電力機構を備えた無線センサ・アクチュエーター・ネットワークにおける経路制御方式の提案と評価, 電子情報通信学会ネットワークシステム研究会, NS2013-222, 2013.3.6
- ⑥ 市川潤紀, 阪田史郎, 小室信喜, アドホックネットワークにおける通信量を考慮した消費電力公平化経路制御, 電子情報

- 通信学会情報ネットワーク研究会, IN 2013-171, 2013.3.6
- ⑦ 海津悠輝, 阪田史郎, 小室信喜, 指向性無線通信における適応的バックオフ制御を用いるQoS向上方式, 電子情報通信学会情報ネットワーク研究会, IN2013-200, 2013.3.6
- ⑧ 小松洵, 阪田史郎, 小室信喜, 塩田茂雄, 村瀬勉, テザリング環境における受信機会制御を用いた輻輳制御方式, 電子情報通信学会情報ネットワーク研究会, IN 2013-149, 2013.3.6
- ⑨ 阪田史郎, M2M アドホックネットワーク, センサネットワークの今後の展開, 電子情報通信学会通信方式研究会, CS2013-47, 2013.11.13
- ⑩ J. Komatsu, S. Sakata, N. Komuro, T. Murase, S. Shioda, Relay Access Point Congestion Control Scheme using Buffer Control in Wireless LAN Mesh Networks, Int'l Symp. Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC), 査読有, 2013.6.21
- ⑪ K. Sanada, H. Sekiya, N. Komuro, S. Sakata, Analytical Method of Maximum UDP Throughput for One-Way Wireless Multi-Hop Networks using Markov Chain Model, Proc. NCSP, 査読有, 2012.3.8
- ⑫ 渡部公介, 小室信喜, 阪田史郎, 関屋大雄, 塩田茂雄, 村瀬勉, IEEE 802.11e と DCF の混在無線 LAN 環境への受信機会制御適用による動的 QoS 保証, 電子情報通信学会情報ネットワーク研究会, IN2011-186, 2012.3.8
- ⑬ 山下豊, 小室信喜, 阪田史郎, 塩田茂雄, 村瀬勉, 複数無線 LAN の合計スループット最大化するための受信機会制御によるアクセスポイント選択方式-無線端末の接続状態変化への対応, 電子情報通信学会情報ネットワーク研究会, IN2011-185, 2012.3.8
- ⑭ 滝澤慎也, 小室信喜, 阪田史郎, 電源供給ノードを考慮した 6LoWPAN 準拠ホームセンサネットワーク長寿命化方式とその評価, 電子情報通信学会情報ネットワーク研究会, IN2011-161, 2012.3.8
- ⑮ D. T. Tuan, S. Sakata, N. Komuro, Admission Control for Assuring Communication Quality in VANETs integrated with Wireless Mesh Networks, 電子情報通信学会ネットワークシステム研究会, NS2011-204, 2012.3.7
- ⑯ 高瀬琢磨, 小室信喜, 阪田史郎, 関屋大雄, 塩田茂雄, 村瀬勉, 無線マルチホップネットワークにおけるトークン生成レートに基づく複数優先フローQoS 保証のための受信機会制御方式, 電子情報通信学会情報ネットワーク研究会, IN2011-141, 2012.3.7
- ⑰ 針生健, 小室信喜, 阪田史郎, モバイルアドホックネットワークにおけるマルチフローを考慮した QoS 向上ルーティング方式電子情報通信学会情報ネットワーク研究会, IN2011-142, 2012.3.7
- ⑱ 富田和宏, 小室信喜, 阪田史郎, センサノード数に応じたアクティブ期間の動的変更による低遅延・低消費電力センサネットワーク制御方式, 電子情報通信学会情報ネットワーク研究会, IN2011-139, 2012.3.7
- ⑲ 御園恵子, 川本良太, 小室信喜, 阪田史郎, 原誠一郎, 監視センサネットワークにおける画像情報優先制御方式, 電子情報通信学会ユビキタスセンサネットワーク研究会, USN2011-80, 2012.1.17
- ⑳ S. Takizawa, N. Komuro, S. Sakata, Routing Control Scheme Prolonging Network Lifetime in a 6LoWPAN WSN with Power-supplied and Battery-powered Nodes, IEEE CCNC, 査読有, 2012.1.13
- ㉑ K. Watanabe, N. Komuro, S. Sakata, S. Shioda, T. Murase, Receiving-Opportunity Control-employed QoS Guarantee Scheme in DCF and EDCA Stations Coexisting WLAN, IEEE CCNC, 査読有, 2012.1.12
- ㉒ S. Shioda, M. Yoshihara, A. Izumi, Y. Tachikawa, Markov Property of Correlated Random Networks and its Application to the Analysis of the Internet Topologies," ITC workshop CNET, 査読有, 2011.10.23
- ㉓ K. Sanada, H. Sekiya, N. Komuro, S. Sakata, Coupling Effect in IEEE 802.11 DCF Wireless Multi-hop Networks, IEEE NOLTA, 査読有, 2011.9.19
- ㉔ D. Lumbantoruan, N. Komuro, S. Sakata, RSSI Based Rate Adaptation for QoS aware Ad Hoc Networks, 電子情報通信学会ネットワークシステム研究会, NS2011-75, 2011.9.2
- ㉕ 香川翔一, 阿部憲一, 伊藤哲也, 小室信喜, 阪田史郎, 無線 LAN アクセスポイントにおける起動時間を考慮したスリープ制御, 電子情報通信学会ネットワークシステム研究会, NS2011-76, 2011.7.29
- ㉖ 五味なぎさ, 馬ジン, 和田育実, 小室信喜, 阪田史郎, 電波状況を考慮した重み付け RSSI ベース屋内測位手法とその評

価, 電子情報通信学会ユビキタスセンサネットワーク研究会, USN2011-14, 2011.7.13

- ⑳ 山下豊, 渡部公介, 小室信喜, 阪田史郎, 塩田茂雄, 村瀬勉, マルチ伝送レート無線LAN環境におけるチャネル占有時間公平化のための受信機会制御方式, 情報処理学会マルチメディア, 協調, 分散とモバイルシンポジウム, 査読有, 1H-2, 2011.7.8
- ㉑ 高瀬琢磨, 小室信喜, 阪田史郎, 塩田茂雄, 村瀬勉, 無線マルチホップネットワークにおけるレートに基づく受信機会制御方式によるQoS保証, 情報処理学会マルチメディア, 協調, 分散とモバイルシンポジウム, 査読有, 1H-4, 2011.7.8
- ㉒ 長井亮介, 廣瀬文哉, 小室信喜, 阪田史郎, 川本良太, 原誠一郎, 無線マルチホップセンサネットワークにおけるタイムスロット割当て方式のトポロジの違いによる性能評価, 情報処理学会マルチメディア, 協調, 分散とモバイルシンポジウム, 査読有, 7G-3, 2011.7.7
- ㉓ K. Sato, S. Sakata, A Distance Measurement-Oriented Distributed TDMA Scheduling Algorithm for Sensor Networks, IEEE International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS), 査読有, 2011.6.21
- ㉔ 眞田耕輔, 関屋大雄, 小室信喜, 阪田史郎, 無線アドホックネットワークにおけるフレーム破棄を考慮した解析, 電子情報通信学会非線形問題研究会, NLP2011-31, 2011.6.18
- ㉕ J. Ma, N. Komuro, S. Sakata, Sensor Deployment for Location-Estimation Coverage, ICAMCS, 査読有, 2011.5.4

[図書] (計1件)

- ① 阪田史郎, 科学技術出版, M2M無線ネットワーク技術と設計法, 2013, 227

[産業財産権]

○出願状況 (計2件)

名称: 無線通信システム, 無線通信方法, 無線通信装置, 無線通信装置制御方法, 及び, 無線通信装置制御プログラム

発明者: 阿部憲一, 伊藤哲也, 阪田史郎,

阿部成美, 松田祐輝, 小室信喜

権利者: 日本電気通信システム

種類: 特許

番号: 特願 2012-041881

出願年月日: 2012年2月28日

国内外の別: 国内

名称: データ転送装置, スリープ制御方法, プログラム

発明者: 飯塚宏之, 阿部憲一, 伊藤哲也,

香川翔一, 阪田史郎, 小室信喜

権利者: 日本電気通信システム

種類: 特許

番号: 特願 2011-181265

出願年月日: 2011年8月24日

国内外の別: 国内

[その他]

ホームページ

<https://sites.google.com/site/sakatakomurolab/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

阪田 史郎 (SAKATA SHIRO)

千葉大学・大学院融合科学研究科・教授

研究者番号: 80375609

### (2) 研究分担者

関屋 大雄 (SEKIYA HIROO)

千葉大学・大学院融合科学研究科・准教授

研究者番号: 20334203

### (3) 研究分担者

小室 信喜 (KOMURO NOBUYOSHI)

千葉大学・大学院融合科学研究科・助教

研究者番号: 70409796

### (4) 研究分担者

塩田 茂雄 (SHIODA SHIGEO)

千葉大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 70334167