

科学研究費補助金研究成果報告書

平成 24 年 4 月 23 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2009～2011

課題番号：21360185

研究課題名(和文) 無線ネットワークコーディングの研究

研究課題名(英文) Study of Wireless Network Coding Schemes

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

研究成果の概要(和文)：

本研究により基礎的なスロット付きアロハ方式を用いたネットワークコーディング技術による多段中継システムについて、送信権に関して優先度をつけることにより、スループットが最適化される事を計算機シミュレーションおよび理論的に明らかにした。さらに、物理レイヤの熱雑音や電波干渉が無線中継システムに与える影響について理論的に明らかにした。また広く用いられている IEEE 802.11 規格による無線 LAN を用いた場合の宅内無線中継システムにおいて、CWmin 制御や AIFSN 制御を用いた新しい考案方式により、ネットワークコーディングを用いた場合のスループット特性の改善や、音声信号に対する QoS 制御が可能であることを計算機シミュレーションにより示した。

研究成果の概要(英文)：

This study showed that transmission priority control achieves optimal throughput performances of slotted ALOHA multi-hop wireless communication systems with network coding methods by computer simulations and theoretical analyses. Furthermore, computer simulations and theoretical analyses reveal the effects of thermal noise and radio interferences from other radio systems on the throughput performances of our systems. For home area multi-hop wireless networks, which are composed of the IEEE 802.11 standard based wireless LANs, the throughput performances and delay performances are improved by the novel control schemes of CWmin and AIFSN. Moreover, these schemes enable the QoS control of VoIP (Voice over IP). Computer simulations show the good performances of the proposed QoS control scheme.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	4,200,000	1,260,000	5,460,000
2010年度	4,700,000	1,410,000	6,110,000
2011年度	3,900,000	1,170,000	5,070,000
年度			
年度			
総計	12,800,000	3,840,000	16,640,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・通信・ネットワーク工学

キーワード：ネットワーク・LAN

1. 研究開始当初の背景

ネットワークコーディングの研究は当初、マ

ルチキャスト通信や複数マルチキャストのフローを向上させるため、大規模な有線系通

信システムにおいてネットワーク層以上の技術として研究されてきた。その後、無線系通信システムへネットワークコーディング技術を適用する場合、複数の無線ノードが同時に同じパケットを受信可能であるという無線通信の広域性とブロードキャスト性を利用する研究が進められていた。

しかしながらランダムアクセス方式をメディアアクセス制御層に用いた場合の多段中継無線ネットワークコーディングシステムについて動作メカニズムが未解明の部分も多く、システム特性を改善するためには新たなプロトコルの創出が必要と考えられた。

2. 研究の目的

環境にやさしく安心安全で貧困のない社会を構築するために、センサネットワークや災害対策用ネットワーク、デジタルデバイドを解消するルーラルエリアネットワークの実現が重要である。これらのネットワークでは多種多様な端末を収容しつつ、経済的に迅速かつ広範囲に展開できることが必要となり、無線 LAN 等を多段中継で用いる場合のシステム検討が行われている。この場合、多段中継によるシステム特性（スループット、伝送遅延）の劣化が研究課題となる。本研究では、この課題を解決するためにネットワークコーディング技術を軸に IP 層、MAC 層、PHY 層のパラメータの相互関係を明確化し、パケット制御技術に着目して新たな伝送制御プロトコルの創出を目指す。

3. 研究の方法

無線ネットワークコーディングの研究を進めるにあたり、研究計画上で取り扱う手法は以下の2点である。

- (1) マルコフ過程を基本とする待ち行列理論を用いて、特性解析を行う理論的研究
- (2) 無線ネットワークコーディングをモデル化し MATLAB 言語や C 言語を用いて、忠実に計算機シミュレーションにより特性解析を実験的に行う研究

4. 研究成果

(1年目) Slotted ALOHA 方式を用いた 2 ホップ中継システムにネットワークコーディングを適用した場合のスループット特性・遅延特性について理論・計算機シミュレーションの両面から特性を明らかにした。具体的には双方向の非対象トラヒックの場合におけるスループット特性と遅延特性を入力トラヒックが飽和・非飽和にいずれでも適用可能な理論式を世界で初めて導出し、計算機シミュレーションによりその妥当性を検証した。特にスループット特性については、中継局の送信確率が非常に重要で、この値を最適化することにより、スループットを最大化できる

ことを理論的に示した。これらの結果を論文としてまとめ、IEEE の論文誌に採録された。また、物理レイヤと MAC サブレイヤの複合技術であるクロスレイヤ技術として、物理レイヤにおける電波干渉や熱雑音によるパケット誤り率が 2 ホップ中継ランダムアクセスシステムに与える特性の影響について定量的な評価を行った。これらの結果は電子情報通信学会において複数の発表を行った。

(2年目) 当該年度における研究では家庭内の種々の機器を無線 LAN によるマルチホップ伝送で接続する場合についてネットワーク符号化技術と組み合わせ、伝送容量を最適化するパケット送信確率を優先的に制御する技術を開発し、端末台数が決まれば一意的に最適なパケット送信確率を制御できるパラメータを理論的に導出し、計算機シミュレーションとほぼ一致することを確認した。これらの結果は電子情報通信学会の英文論文誌に採択された。また昨年度の研究内容であるスロット付きアロハ方式によるランダムアクセスの場合にダブルホップ無線中継システムのスループットについて、ネットワークコーディングを適用した場合の動作特性について理論的に解明し、システムスループットや遅延特性に与える影響について明らかにした。これらの結果は欧州における学術論文誌に採択された。

(3年目) 当該年度における研究では家庭内の種々の機器を無線 LAN によるマルチホップ伝送で接続する場合についてネットワーク符号化技術を基礎に、IEEE 802.11e 規格で定められている最小コンテンション・ウィンドウ制御や AIFS 制御を用いて、中継局や端末局の MAC パラメータを最適化し、中継によるスループットの劣化を改善し、データの遅延特性を従来方式と比べて飛躍的に改善する方式を考案した。これらのアイデアを用いた方式の性能を計算機シミュレーションにより特性を明らかにし、その有用性を示した。これらの結果は電子情報通信学会の和文論文誌に採択された。

また、家庭内の無線中継を行う場合に、単純なインフラモードの無線 LAN システムと異なり、隠れ端末問題がスループット特性に致命的に劣化を与えることを明らかにし、その改善策として、ネットワークに帰属する無線 LAN 端末でどの端末同士が隠れ端末の関係になっているかを明確化する方法を提案した。隠れ端末の関係が既知となった状況で、MAC パラメータを最適化すると、スループット特性の劣化を大きく改善できる事を計算機シミュレーションにより示した。これらの結果は査読のある国際会議にて発表を行った。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 4 件)

- (1) 中戸裕基, 守倉正博, 梅原大祐, 大槻暢朗, 杉山隆利, “無線LAN中継ネットワークコーディングにおけるQoSを保証するMACプロトコル,” 信学論(D), J95-D, 5, pp. -, 2012-5. (採録決定)
 - (2) D. Umehara, S. Denno, M. Morikura, and T. Sugiyama, “Performance analysis of slotted ALOHA and network coding for single-relay multi-user wireless networks,” Elsevier Ad Hoc Networks, vol. 9, no. 2, pp. 164-179, March 2011.
 - (3) C. Huang, D. Umehara, S. Denno, M. Morikura, and T. Sugiyama, “Enhancement of CSMA/CA and network coding in single-relay multi-user wireless networks,” IEICE Trans. Commun., vol. E93-B, no. 12, pp. 3371-3380, Dec. 2010.
 - (4) D. Umehara, T. Hirano, S. Denno, M. Morikura, and T. Sugiyama, “Wireless network coding in slotted ALOHA with two-hop unbalanced traffic,” IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 27, no. 5, pp. 647-661, June 2009.
- [学会発表] (計 43 件)
- (1) 梅原大祐, 山本高至, 村田英一, 田野哲, 守倉正博, 吉田進, チャネル・ネットワーク符号化QAM信号の達成可能ビット誤り率, 2012年電子情報通信学会総合大会, B-8-41, 岡山, March 20-23, 2012.
 - (2) 三軒谷勇貴, 守倉正博, 梅原大祐, 大槻暢朗, 杉山隆利, 隠れ端末存在下における中継CSMA/CAのリンク保証スループット改善, 2012年電子情報通信学会総合大会, B-20-24, 岡山, March 20-23, 2012.
 - (3) 梅原大祐, 山本高至, 村田英一, 田野哲, 守倉正博, 吉田進, PNC-OFDMのマルチプルアクセスリンクにおけるプレコーディングの一考察, 電子情報通信学会技術研究報告, 通信方式研究会, CS2011-116, 新潟, pp. 97-102, March 8-9, 2012.
 - (4) 三軒谷勇貴, 守倉正博, 梅原大祐, 大槻暢朗, 杉山隆利, 隠れ端末存在下における中継CSMA/CAのCW最適化, 電子情報通信学会技術研究報告, アドホックネットワーク研究会, AN2011-66, 鳥羽, pp. 65-70, January 19-20, 2012.
 - (5) Y. Sangenya, D. Umehara, M. Morikura, N. Otsuki, and T. Sugiyama, “Novel Length Aware Packet Aggregation and Coding Scheme for Multi-hop Wireless LANs,” Proceedings of 5th international conference on signal processing and communication systems (ICSPCS), Hawaii, USA, Dec.12-14, 2011.
 - (6) 梅原大祐, 山本高至, 村田英一, 田野哲, 守倉正博, 吉田進, 多値CoMP物理層ネットワークコーディングによる双方向中継通信路のスループット解析, 電子情報通信学会技術研究報告, 通信方式研究会, CS2011-48, 北海道, pp. 7-12, November 17-18, 2011.
 - (7) 藤井陽平, 守倉正博, 梅原大祐, 大槻暢朗, 杉山隆利, WLANとWSN共存時の双方向VoIP伝送特性, 電子情報通信学会技術研究報告, 情報ネットワーク研究会, IN2011-93, 福岡, pp. 1-6, November 17-18, 2011.
 - (8) 中戸裕基, 守倉正博, 梅原大祐, 大槻暢朗, 杉山隆利, 2ホップ無線LANシステムにおける仮想グループ化CSMA/CA方式, 電子情報通信学会技術研究報告, 情報ネットワーク研究会, IN2011-94, 福岡, pp. 7-12, November 17-18, 2011.
 - (9) M. Tanaka, D. Umehara, M. Morikura, N. Otsuki, and T. Sugiyama, “New Throughput Analysis of Long-Distance IEEE 802.11 Wireless Communication System for Smart Grid,” Proceedings of the second IEEE International Conference on Smart Grid Communications (IEEE SmartGridComm) Brussels, Belgium, pp. 90-95, Oct. 17-20, 2011.
 - (10) 藤井陽平, 守倉正博, 梅原大祐, 田野哲, 大槻暢朗, 杉山隆利, 無線LANと無線センサネットワークとの共存方式の提案, 電子情報通信学会技術研究報告, 無線通信システム研究会, RCS2011-31, 東京, pp. 65-70, May 26-27, 2011.
 - (11) 中戸裕基, 守倉正博, 梅原大祐, 田野哲, 大槻暢朗, 杉山隆利, 無線中継CSMA/CAシステムのネットワークコーディング及びQoS制御による特性改善, 電子情報通信学会技術研究報告, 無線通信システム研究会, RCS2011-31, 東京, pp. 71-76, May 26-27, 2011.
 - (12) 梅原大祐, 田野哲, 守倉正博, 山本高至, 村田英一, 吉田進, コヒーレントCoMPによる物理層ネットワークコーディングの一考察, 2011年電子情報通信学会総合大会, B-8-31, 東京, March 14-17, 2011.
 - (13) 田中政晃, 梅原大祐, 田野哲, 守倉

- 正博, 大槻 暢朗, 杉山 隆利, 長距離無線通信におけるCSMA/CAプロトコルの評価, 2011 年 電子情報通信学会 総合大会, B-21-21, 東京, March 14-17, 2011.
- (14) 中戸 裕基, 梅原 大祐, 田野 哲, 守倉 正博, 大槻 暢朗, 杉山 隆利, 無線中継CSMA/CAシステムのネットワークコーディングによるVoIP伝送特性の改善, 2011 年 電子情報通信学会 総合大会, B-21-19, 東京, March 14-17, 2011.
- (15) 藤井 陽平, 梅原 大祐, 田野 哲, 守倉 正博, 大槻 暢朗, 杉山 隆利, 無線LANと無線センサネットワークとの共存方式の提案, 2011 年 電子情報通信学会 総合大会, B-20-25, 東京, March 14-17, 2011.
- (16) 三軒谷 勇貴, 梅原 大祐, 田野 哲, 守倉 正博, 大槻 暢朗, 杉山 隆利, パケットアグリゲーションとネットワークコーディングを統合したCSMA/CAの一考察, 2011 年 電子情報通信学会 総合大会, B-21-20, 東京, March 14-17, 2011.
- (17) 梅原 大祐, 田野 哲, 守倉 正博, 山本 高至, 村田 英一, 吉田 進, CoMP物理層ネットワークコーディングによる双方向中継通信路の通信路容量, 電子情報通信学会 技術研究報告, 通信方式研究会, CS2010-73, 石垣島, pp. 7-12, March 3-4, 2011.
- (18) 三軒谷 勇貴, 梅原 大祐, 田野 哲, 守倉 正博, 大槻 暢朗, 杉山 隆利, パケットアグリゲーションとネットワークコーディングを統合したCSMA/CAの性能解析, 電子情報通信学会 技術研究報告, 短距離無線通信研究会, SRW2010-28, 横須賀, pp. 15-20, March 3, 2011.
- (19) D. Umehara, C. Huang, S. Denno, M. Morikura, and T. Sugiyama, "Enhancement of IEEE 802.11 and network coding for single-relay multi-user wireless networks," Proceedings of 4th international conference on signal processing and communication systems (ICSPCS), Gold coast, Australia, Dec.13-15, 2010.
- (20) D. Umehara, S. Denno, M. Morikura, and T. Sugiyama, "Coded packet immediate access for contention-based wireless relay networks," Proceedings of 4th international conference on signal processing and communication systems (ICSPCS), Gold coast, Australia, Dec.13-15, 2010.
- (21) 梅原 大祐, 田野 哲, 守倉 正博, 大槻 暢朗, 杉山 隆利, IEEE 802.11 DCFの性能解析モデルに関する簡易補償方式, 電子情報通信学会 技術研究報告, 通信方式研究会, CS2010-42, 七尾, pp. 29-34, November 11-12, 2010.
- (22) 田中 政晃, 梅原 大祐, 田野 哲, 守倉 正博, 大槻 暢朗, 杉山 隆利, 無線アクセスにおけるCSMA/CAプロトコルの性能解析, 電子情報通信学会 技術研究報告, アドホックネットワーク研究会, AN2010-40, 大阪, pp. 97-102, October 27-29, 2010.
- (23) 梅原 大祐, 田野 哲, 守倉 正博, 杉山 隆利, [招待講演] ランダムアクセス型無線ネットワークコーディングの研究 - スロットアロハからCSMA/CAへ -, 電子情報通信学会 技術研究報告, アドホックネットワーク研究会, AN2010-22, 函館, pp. 69-74, July 15-16, 2010.
- (24) 田中 政晃, 梅原 大祐, 田野 哲, 守倉 正博, 杉山 隆利, IEEE 802.11 CSMA/CAを用いた長距離アクセスにおける伝搬遅延の影響の解析, 電子情報通信学会 技術研究報告, アドホックネットワーク研究会, AN2010-10, 函館, pp. 1-6, July 15-16, 2010.
- (25) M. Tanaka, D. Umehara, S. Denno, M. Morikura, and T. Sugiyama, "Impacts of propagation delay on long distance access with IEEE 802.11 CSMA/CA," Proceedings of the 25th International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications, Pattaya, Thailand, pp. 508-511, July 4-7, 2010.
- (26) Y. Nakato, D. Umehara, S. Denno, M. Morikura, and T. Sugiyama, "Throughput enhancement with AIFS control in single-relay wireless networks," Proceedings of the 25th International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications, Pattaya, Thailand, pp. 740-743, July 4-7, 2010.
- (27) Y. Fujii, D. Umehara, S. Denno, M. Morikura, and T. Sugiyama, "Saturated throughput analysis of unslotted CSMA-CA networks," Proceedings of the 25th International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications, Pattaya, Thailand, pp. 688-691, July 4-7, 2010.
- (28) D. Umehara, S. Denno, M. Morikura,

- and T. Sugiyama, "Throughput analysis of two-hop wireless CSMA network coding," Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Communications, Capetown, South Africa, 6 pages, May 23-27, 2010.
- (29) 武井 香織, 梅原 大祐, 田野 哲, 守倉 正博, 杉山 隆利, ネットワークコーディングを用いた無線中継 Slotted ALOHAシステムにおける回線品質を考慮したスループットの最大化, 2010年 電子情報通信学会 総合大会, B-21-18, 仙台, March 16-19, 2010.
- (30) 田中 政晃, 梅原 大祐, 田野 哲, 守倉 正博, 杉山 隆利, CSMA/CAによる長距離アクセスへのRTS/CTSの効果, 2010年 電子情報通信学会 総合大会, B-21-16, 仙台, March 16-19, 2010.
- (31) Chun-Hsiang Huang, Daisuke Umehara, Satoshi Denno, Masahiro Morikura, and Takatoshi Sugiyama, Throughput analysis of wireless multihop CSMA/CA systems with network coding, Proceedings of the 2010 IEICE General Conference, B-21-17, Sendai, March 16-19, 2010.
- (32) 梅原 大祐, 田野 哲, 守倉 正博, 杉山 隆利, 2ホップ無線CSMAネットワークコーディングにおけるRTS/CTSの効果, 電子情報通信学会 技術研究報告, 情報ネットワーク研究会, IN2009-79, pp. 65-70, 福岡, November 12-13, 2009.
- (33) 黄 俊翔, 梅原 大祐, 田野 哲, 守倉 正博, 杉山 隆利, CSMA/CAネットワークコーディングにおけるコンテンションウィンドウ制御によるスループット最適化, 電子情報通信学会 技術研究報告, 情報ネットワーク研究会, IN2009-76, pp. 47-52, 福岡, November 12-13, 2009.
- (34) 武井 香織, 梅原 大祐, 田野 哲, 守倉 正博, 杉山 隆利, 回線設計を組み入れた無線中継ALOHAネットワークコーディングのスループット評価, 電子情報通信学会 技術研究報告, 情報ネットワーク研究会, IN2009-78, pp. 59-64, 福岡, November 12-13, 2009.
- (35) 田中 政晃, 梅原 大祐, 田野 哲, 守倉 正博, 杉山 隆利, マルチホップ無線ALOHAネットワークコーディングにおける中継パケット送信制御方式, 電子情報通信学会 技術研究報告, 情報ネットワーク研究会, IN2009-77, pp. 53-58, 福岡, November 12-13, 2009.
- (36) D. Umehara, S. Denno, M. Morikura, and T. Sugiyama, "Achievable region in slotted ALOHA throughput for one-relay two-hop wireless network coding," Proceedings of the First International Conference on Ad Hoc Networks, Niagara Falls, Ontario, Canada, 16 pages, September 23-25, 2009.
- (37) 梅原 大祐, 田野 哲, 守倉 正博, 杉山 隆利, 2ホップ無線CSMAシステムにおけるネットワークコーディングの性能評価, 電子情報通信学会 技術研究報告, 情報ネットワーク研究会, IN2009-44, pp. 29-34, 仙台, September 10-11, 2009.
- (38) 梅原 大祐, 田野 哲, 守倉 正博, 杉山 隆利, 2ホップ無線ALOHAシステム上のネットワークコーディングに対するバッファ容量の影響, 電子情報通信学会 技術研究報告, 情報ネットワーク研究会, IN2009-37, 札幌, pp. 73-78, July 9-10, 2009.
- (39) 黄 俊翔, 梅原 大祐, 田野 哲, 守倉 正博, 杉山 隆利, 2ホップCSMA/CA無線中継ネットワークに対するネットワークコーディングの性能解析, 電子情報通信学会 技術研究報告, 情報ネットワーク研究会, IN2009-36, 札幌, pp. 67-72, July 9-10, 2009.
- (40) 武井 香織, 梅原 大祐, 田野 哲, 守倉 正博, 杉山 隆利, 無線ネットワークコーディングを用いた非対称トラヒックモデルにおける雑音と干渉の影響, 電子情報通信学会 技術研究報告, 情報ネットワーク研究会, IN2009-38, 札幌, pp. 79-84, July 9-10, 2009.
- (41) C. Huang, D. Umehara, S. Denno, M. Morikura, and T. Sugiyama, "Performance analysis of a two-hop wireless relay network with CSMA/CA and network coding," Proceedings of the 24th International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications, Jeju Island, Korea, July 5-8, 2009.
- (42) D. Umehara, T. Hirano, S. Denno, M. Morikura, and T. Sugiyama, "Analysis of network coding in slotted ALOHA with two-hop bidirectional traffic," Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Communications, Dresden, Germany, June 14-18, 2009.
- (43) 梅原 大祐, 田野 哲, 守倉 正博, 杉山 隆利, 2ホップ双方向トラヒックにおける無線ALOHAネットワークコーディングの特性解析, 電子情報通信学会 技

術研究報告, 情報ネットワーク研究会,
IN2009-3, 東京, pp. 13-18, May 21-22,
2009.

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 8 件)

名称: 無線通信システム、無線通信装置及び
無線通信方法

発明者: 大槻暢朗, 杉山隆利, 守倉正博, 中
戸裕基

権利者: 日本電信電話株式会社, 国立大学法
人京都大学

種類: 特許

番号: 特願 2012-071850

出願年月日: 2012/3/27

国内外の別: 国内

名称: 無線通信システム、無線通信装置及び
無線通信方法

発明者: 大槻暢朗, 杉山隆利, 守倉正博, 中
戸裕基

権利者: 日本電信電話株式会社, 国立大学法
人京都大学

種類: 特許

番号: 特願 2012-071849

出願年月日: 2012/3/27

国内外の別: 国内

名称: 無線通信端末、及び無線通信方法

発明者: 大槻暢朗, 杉山隆利, 藤井陽平, 梅
原大祐

権利者: 日本電信電話株式会社, 国立大学法
人京都大学

種類: 特許

番号: 特願 2011-027090

出願年月日: 2011/2/10

国内外の別: 国内

名称: 無線通信端末、無線通信方法

発明者: 大槻暢朗, 増野淳, 杉山隆利, 梅原
大祐

権利者: 日本電信電話株式会社, 国立大学法
人京都大学

種類: 特許

番号: 特願 2011-002961

出願年月日: 2011/1/11

国内外の別: 国内

名称: アクセス制御システム、アクセス制御
方法、中継局装置、端末局装置、送信側処理
方法、受信側処理システム及び受信側処理方
法

発明者: 杉山隆利, 梅原大祐, 田中政晃

権利者: 日本電信電話株式会社

種類: 特許

番号: PCT/JP2010/066789

出願年月日: 2010/9/28

国内外の別: 外国

名称: アクセス制御システム、アクセス制御
方法、中継局装置、端末局装置、送信側処理
方法、受信側処理システム及び受信側処理方
法

発明者: 杉山隆利, 梅原大祐, 田中政晃

権利者: 日本電信電話株式会社, 国立大学法
人京都大学

種類: 特許

番号: 特開 2011-91684

出願年月日: 2009/10/23

国内外の別: 国内

〔その他〕

ホームページ等

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: 2 0 4 6 7 4 0 0

(2) 研究分担者

田野 哲 (DENNO SATOSHI)

岡山大学・自然科学研究科・教授

研究者番号: 8 0 3 7 8 8 3 5

梅原 大祐 (UMEHARA DAISUKE)

京都工芸繊維大学・工学科学研究科・准教
授 研究者番号: 5 0 3 1 4 2 5 8