

機関番号：12501
 研究種目：基盤研究(C)
 研究期間：2008～2010
 課題番号：20500062
 研究課題名(和文) ハイブリッドノード構成型アドホックネットワークの高信頼化・省電力化方式の研究
 研究課題名(英文) Study on Hybrid Node Configuration Network with High Reliability and Low Energy Consumption
 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

研究成果の概要(和文)：外部電源供給型の固定ノードとバッテリー駆動で無線中継機能を有する移動ノードが混在するハイブリッドノード構成型アドホックネットワークに関し、混在構成の特徴を活かした高信頼化・省電力化・高寿命化技術を確立し、その有効性を定量的に示すことにより、センサネットワーク、ホームネットワーク、VANET(車車間/路車間通信)、無線LANメッシュネットワーク、DTN(Delay/Disruption Tolerant Network)など多様な各マルチホップ・アドホックネットワークの共通的な技術課題を横断的に解決した。

研究成果の概要(英文)：Hybrid-node-configured ad hoc network, which consists of power-supplied fixed nodes and battery-powered mobile nodes, has been emerging in recent years. In this research, novel schemes achieving high reliability, low power consumption and prolonging network lifetime have been proposed and validated, making use of the characteristics of each hybrid configuration. The technologies invented in this research provide a comprehensive solution to cross multihop ad hoc network problems such as sensor network, home network, VANET, wireless LAN mesh network and DTN(Delay/Disruption Tolerant Network).

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
平成20年度	1,100,000	330,000	1,430,000
平成21年度	1,000,000	300,000	1,300,000
平成22年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

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：ユビキタスネットワーク、アドホックネットワーク、センサネットワーク、P2Pネットワーク、省電力ルーティング

1. 研究開始当初の背景

軍事用の無線通信技術に端を発するアドホックネットワークは、1990年代後半以降はユビキタスシステムの中核技術としても注目されてきたが、その具体的なアプリケ

ーションは必ずしも明確でなく、研究は机上の解析やシミュレーションが中心であった。しかし、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、また災害時の緊急用ネットワークなど、その

用途が具体化するにつれ、従来型の研究に加えて、現実の利用環境を考慮した実践的な研究が進み、それぞれの用途に対応した新たな技術課題も浮かび上ってきた。

用途例からわかるように、アドホックネットワークの利用形態は極めて多様であり、また技術課題も様々である。例えば、センサネットワークでは通常はノードにあたるセンサは移動せず、バッテリー駆動であることから、消費電力を抑えることによる各センサの長寿命化が重要な技術課題となる。

車車間アドホックネットワーク (Vehicular Ad-hoc NETWORK: VANET) では、各車両は強力なバッテリーを持つものの、高速で移動するため、省電力性よりも高信頼化 (通信切断頻度の低減化など) が主たる技術課題となる。無線 LAN メッシュネットワークは、シングルホップ無線 LAN の広域化手段の一つとして捉えられていることから、シングルホップ無線 LAN 並みの信頼性や通信品質の確保が解決すべき課題の一つになると考えられる。

センサネットワークの長寿命化対策の一つとして、電源供給型のノードを少数設置し、当該ノードにデータの中継処理を集中させる手法が考えられうる。電源供給型固定ノードを少数設置することは高信頼化の観点からも有効である。一例として、一部の交差点に固定中継ポイントを設置し、VANET における車々間の接続確率の向上を図るものがある。これら固定ノードの設置例は、通常ノードの機能補完的な意味合いが強い。

一方、無線 LAN メッシュネットワークでは、これとは対照的に、電源供給型固定ノードにあたるアクセスポイントが中継ノードとして全面的に機能する。しかし、アクセスポイント故障時には、一般端末が無線中継を行い、アクセスポイントの機能補完を果たすことが有効になるケースも考えられる。

以上のように、多様なアドホックネットワークのそれぞれに応じた問題が顕在化してきた。

2. 研究の目的

- (1) 多様なマルチホップ・アドホックネットワークの中で、ハイブリッドノード構成型アドホックネットワークという共通的なネットワークの形態に着目し、その高信頼化・高寿命化・省電力化技術を確立し、アドホックネットワークの個別の利用形態に反映させる。
- (2) ハイブリッドノード構成型アドホックネットワークの高信頼化・高寿命化・省電力化という視点から、これまでの研究成果を横断的かつ総合的に俯瞰することにより、既存研

究成果や標準方式のより効率的な活用を図り、アドホックネットワーク研究の進展を促進する。

以上を通して、アドホックネットワークの実用化を加速し、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

2. で述べた研究目的を達成するため、下記の、(1) ハイブリッドノード構成型アドホックネットワークにおける局所修復機能を適用した最適ユニキャストルーティング・プロトコル、(2) アドホックネットワークのマルチキャスト通信におけるハイブリッド ARQ-FEC 誤り回復方式、(3) マルチホップセンサネットワークにおける上下トラフィックの同時通信を可能にするタイムスロット割当方式、(4) マルチホップセンサネットワークにおける経路切替、動的タイムスロット割当て、バックオフタイム制御を適用した QoS 保証および省電力方式、の提案とその評価による技術確立を図ったが、ほぼ以下の共通の方法により実施した。

無線通信・伝搬理論、組合せ幾何・最適化理論、グラフ理論、複雑ネットワーク理論、待ち行列 (トラフィック) 理論、情報理論、確率統計理論などの各種原理を駆使した理論的解析、サーバ上で動作するシミュレータ上に想定するネットワークと制御方式をプログラムにより仮想的に実装しその動作や性能などを評価する計算機シミュレーション、さらに必要に応じ大規模なマルチホップネットワーク特有の隠れ端末やさらし端末の振る舞いを解明するため、パソコンや携帯電話端末を固定ノードとし無線 LAN メッシュネットワークや ZigBee ネットワークと実際に接続して行う測定実験、の 3 つを軸にこれらを時系列的あるいは並列的に実施した。測定実験では、大学キャンパス内に約 40 ノードのアドホックネットワークのテストベッドを構築し、できるだけ実際の利用環境に近い状況での実測評価を行った。

これらの 3 つの結果を比較評価しながら技術課題を探り、提案方式の有効性の実証を図った。

4. 研究成果

- (1) ハイブリッドノード構成型アドホックネットワークにおける局所修復機能を適用した最適ユニキャストルーティング・プロトコル

無線 LAN メッシュネットワークにおいて、緊急時などに端末が無線中継を行うことで高信頼化したり、車車間通信において交差点などに固定ノードを設置することで接続確率を高めたり、センサネットワークにおいて

外部電源供給型ノードを配置して各ノードの電力消費を抑制し長寿命化を図ったりする場合に、経路切断時に経路の再構築による通信オーバーヘッドを抑えた局所修復機能を適用した新ルーティングアルゴリズムを提案した。このアルゴリズムでは、局所修復機能の効果により、車のようなバッテリー供給型の高速移動ノードが多い場合には、制御オーバーヘッドは大きい低遅延のプロアクティブ型プロトコル、外部電源供給型固定ノードが多い歩行者のような場合には制御オーバーヘッドが小さく省電力化に有効なリアクティブ型プロトコルをそれぞれ利用することにより、用途に適応した最適なアルゴリズムになっていることが示された。

例えば、移動のないセンサや歩行速度に相当する 2m/sec 以下の低移動速度のノードに対しては AODV (Ad hoc On-demand Distance Vector routing protocol) などの従来方式に比べて 12~15%程度の省電力、車のような 10m/sec 以上の高速な移動ノードに対しては従来方式に比べて 16~20%強の高配信率を達成した。

(2) アドホックネットワークのマルチキャスト通信におけるハイブリッド ARQ -FEC 誤り回復方式

一般に通信の高信頼化を実現するための誤り回復技術については、ARQ (Automatic reRepeat Request)、FEC (Forward Error Correction)、およびこれらを組合せたハイブリッド方式があり、様々な研究がなされてきたが、無線ネットワークを対象とした従来研究ではシングルホップを想定し、マルチホップに対するこれらの誤り回復技術に関する検討は十分になされていない。本研究では、無線マルチホップネットワークにおけるARQ、FEC、ハイブリッド方式の性能を表す一般式をトラフィック理論と確率統計理論を駆使して理論的に導出し、link-by-link とend-to-end、およびレイヤ間で各方式を組合せて適用した場合の通信品質に応じた性能を、シミュレーションにより定量的に評価した。さらに、この理論解析に基づき、配信率や遅延などのアプリケーションの要求を満たす最適な方式を選択するための新評価方式を提案し、その有効性を示した。

アプリケーションの要求を満たす最適な方式を選択するための評価方式については、配信率、遅延、スループット、消費電力に対応する重みづけを可能にする総評価関数を定義した。その結果、通信品質のBER (Bit Error Rate)が 10^{-5} ~ 10^{-7} 程度の比較的安定した環境ではARQが他の方式に比べて16%以上の配信率を実現し、 10^{-3} ~ 10^{-4} 程度の比較的不安定な環境ではハイブリッドARQ-FECが他の方式に比べて22%以上の低遅延、低消費電力を

実現できるという結果が得られた。この結果は、キャンパスに構築したアドホックネットワークのテストベッドを用いた実験によっても実証された。

(3) マルチホップセンサネットワークにおける上下トラフィックの同時通信を可能にするタイムスロット割当方式

センサネットワークでは、シンクノードが全てのセンサデータを収集するトラフィックが主体であり、代表的なマルチホップセンサネットワーク標準規格である ZigBee の MAC プロトコル IEEE 802.15.4 ノンビーコンモードでは、親ノードによるブロードキャストで周期的に送信されるデータ送信要求に対し、センサノードからユニキャスト応答が一斉に返信されるため、パケット衝突によるパケットロスが生じやすい。その結果、遅延と消費電力が増大する。本研究では、無干渉で最大限の同時通信を行うことにより空間利用率を高め、パケット衝突を抑えつつ、低遅延を実現するタイムスロット割当てアルゴリズムを新規に提案した。提案方式では、各ノードは2ホップ範囲内の近隣ノードの情報に基づいてタイムスロットを予約し、空間的に離れたノードを同じタイムスロットに割当ててすることで同時通信を行い、End-to-End 遅延を抑える。遅延の低減に応じて消費電力も抑えられることを示した。

例えば、SOHO や家庭内のネットワークを想定した最大5ホップ、30ノードを平均的に配置したセンサネットワークにおいて、提案方式を適用した結果、標準規格である ZigBee の MAC プロトコル IEEE 802.15.4 に比べて、end-to-end 遅延を最大50%低減し、消費電力も最大40%程度抑えられることを達成した。

(4) マルチホップセンサネットワークにおける経路切替、動的タイムスロット割当て、バックオフタイム制御を適用した QoS 保証および省電力方式

マルチホップセンサネットワークでは多様な利用形態が想定されているため、ネットワーク内に優先度の異なる各種データが混在する環境が考えられる。このような環境では、QoS 制御の実現が課題となる。本研究では IEEE 802.15.4 ビーコンモードにおいて、経路切替、タイムスロット割当て、フレーム衝突回避時のバックオフタイム制御を用いて、高優先データのQoS 保証と省電力化を実現する新方式を提案した。

経路切替では複数経路方式を応用しデータの優先度に応じて経路を切替えることによる QoS 保証、動的タイムスロット割当てでは IEEE 802.15.4 で規定された GTS (Guaranteed Time Slot) を用いた輻輳緩和

による省電力、バックオフタイム制御ではセンサから生じるデータの優先度に応じたバックオフタイムの設定によるQoS制御を実現した。

提案方式については、待ち行列の性質を適用した理論解析の結果とシミュレーション結果がほぼ一致した。例えば、SOHOや家庭内のネットワークを想定した最大5ホップ、30ノードを平均的に配置したセンサネットワークにおいて、5ノードを画像配信ノード、25ノードをセンサデータ(数値)配信ノードとした時、画像に関しては、IEEE 802.15.4を用いた場合に平均18kbpsであったのに対し80kbps以上という高スループットの通信が可能となった。省電力化についても、輻輳緩和によるフレーム衝突の低減で総消費電力が約34%低減された。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計6件)

- ① 松本直文、関屋大雄、阪田史郎、柳生健吾、“直線状無線マルチホップネットワークにおける指向性アンテナを用いた高スループット化方式,” 情報処理学会論文誌、査読有、vol. 51、no.6、2010、1320 – 1329.
- ② S. Shioda and M. Komatsu, “Queueing-model-based analysis for IEEE802.11 wireless LANs with non-saturated nodes,” IEEE Radio Communications、査読有、vol.23、no.7、2010、221-226.
- ③ T. Murase, Y. Hirano, S. Shioda and S. Sakata, “MAC-Frame receiving-opportunity control for flow QoS in wireless LANs,” IEICE Trans. Commun., 査読有、vol.E92-B、no.1、2009、102-113.
- ④ 松本真沙樹、関屋大雄、呂建明、谷萩隆嗣、阪田史郎、“マルチホップネットワークにおけるバッファ使用量を考慮することによりQoSを保証するMACプロトコル,” 電子情報通信学会論文誌 B、査読有、vol.J92-B、no.2、2009、390 – 399.
- ⑤ M. Inaba, Y. Tsuchiya, H. Sekiya, S. Sakata, and K. Yagyu, “Analysis and experiments of maximum throughput in wireless multi-hop networks for VoIP application,” IEICE Trans. Commun., 査読有、vol.E92-B、no.11、2009、3422-3431.

[学会発表] (計32件)

- ① D. Lumbantoruan, N. Komuro, and S. Sakata, “Cross layer approach to OLSR performance improvement considering link quality,” Proc. IJSS, 査読有、2010. (バリ、インドネシア)
- ② A. Takahashi, N. Komuro, S. Sakata,

S. Shioda, and T. Murase, “Receiving opportunity control used admission control scheme for wireless multi-hop networks,” Proc. IEEE ICCCE, 査読有、2010. (クアラルンプール、マレーシア)

③ Y. Harada, M. Komatsu, T. Nakamura, S. Shioda, S. Sakata, and T. Murase, “Cross-layer approach for supporting QoS in IEEE 802.11 DCF wireless LANs,” Proc. ACM Q2SWinet, 査読有、2010. (ボドゥラム、トルコ)

④ S. Shioda, H. Iijima, T. Nakamura, S. Sakata, Y. Hirano, and T. Murase, “ACK pushout to achieve TCP fairness under the existence of bandwidth asymmetry,” Proc. ACM PM2HW2N, 査読有、2010. (ボドゥラム、トルコ)

⑤ Y. Harada, M. Komatsu, T. Nakamura, S. Shioda and S. Sakata, “Cross-layer approach for supporting QoS in IEEE 802.11 DCF Wireless LANs,” Proc. Q2SWinet, 査読有、2009. (カナリア諸島、スペイン)

⑥ S. Shioda, H. Iijima, T. Nakajima, S. Sakata and Y. Hirano, “ACK pushout to achieve TCP Fairness under the existence of bandwidth asymmetry,” Proc. Q2SWinet, 査読有、2009. (カナリア諸島、スペイン)

⑦ H. Sekiya, Y. Tsuchiya, N. Komuro and S. Sakata, “Analytical expressions of maximum throughput for long-frame communications in one-way string wireless multihop networks,” Proc. ICUFN, 査読有、2010. (済州島、韓国)

⑧ T. Sugimoto, N. Komuro, H. Sekiya, S. Sakata and K. Yagyu, “Maximum throughput analysis for RTS/CTS-used IEEE 802.11 DCF in wireless multi-hop networks,” Proc. IEEE ICCCE, 査読有、2010. (クアラルンプール、マレーシア)

⑨ 廣瀬文哉、小室信喜、阪田史郎、“無線センサネットワークにおける複数経路を用いたQoS制御方式,” 情報処理学会 マルチメディア・分散・協調・モバイルシンポジウム、査読有、8E-1, 2010. (岐阜)

⑩ 関屋大雄、小室信喜、阪田史郎、“IEEE 802.11マルチホップネットワークにおけるスループット解析,” 電子情報通信学会 アドホックネットワーク研究会、AN2010-13, 2010. (函館)

⑪ 長崎篤、関屋大雄、小室信喜、阪田史郎、“指向性アンテナを用いた無線マルチホップネットワークにおける難聴問題を回避するMACプロトコル,” 電子情報通信学会情報ネットワーク研究会、IN2009-180, 2010. (宮崎)

- ⑫ H. Iizuka, T. Ito and S. Sakata, "Development and experiments of highly reliable multicast in wireless multihop networks," Proc. IEEE WCNC, 査読有、2010. (カンクン、メキシコ)
- ⑬ 佐藤裕介, 飯塚宏之, 伊藤哲也, 阪田史郎, "無線マルチホップネットワークにおける高信頼マルチキャストプロトコルの開発と実験," 電子情報通信学会 アドホックネットワーク研究会, AN 2010-52, 2010. (広島)
- ⑭ 加藤悟, 小室信喜, 阪田史郎, "アドホックマルチキャストにおける局所回復を適用した制御パケット抑制方式とその評価," 電子情報通信学会 情報ネットワーク研究会 IN 2010-186, 2010. (沖縄)
- ⑮ 針生健, 飯塚宏之, 小室信喜, 阪田史郎, "無線マルチホップネットワークにおける ARQ-FEC ハイブリッド誤り回復方式とその評価" 電子情報通信学会 アドホックネットワーク研究会, AN 2010-83, 2010. (千葉)
- ⑯ A. Nagasaki, H. Sekiya, S. Sakata, and K. Yagyu, "QoS-based routing in multichannel multihop WLANs," Proc. WPMC, 査読有、2009. (仙台)
- ⑰ Tsuchiya, M. Inaba, M. Matsumoto, H. Sekiya, S. Sakata and K. Yagyu, "Analysis of maximum UDP throughput of short-hop string networks for VoIP applications," Proc. WPMC, 査読有、2009. (仙台)
- ⑱ 高橋淳, 小室信喜, 阪田史郎, 塩田茂雄, 村瀬勉, "無線マルチホップネットワークにおける動的受信機会制御による流量制御方式の QoS 保証効果," 電子情報通信学会 情報ネットワーク研究会, IN2009-146, 2009. (宮崎)
- ⑲ 高橋淳, 小室信喜, 阪田史郎, 塩田茂雄, 村瀬勉, "無線マルチホップネットワークにおける受信機会制御を用いたアドミッション制御方式," 電子情報通信学会 アドホックネットワーク研究会, AN2009-26, 2009. (仙台)
- ⑳ 増井浩, 阪田史郎, 塩田茂雄, 平野由美, 村瀬勉, "無線 LAN における CTS を利用した端末優先制御方式とその評価," 電子情報通信学会 情報ネットワーク研究会, IN2009-6, 2009. (東京)
- ㉑ 中村環樹, 小松真弓, 原田裕一, 塩田茂雄, 阪田史郎, 村瀬勉, "適応的クロスレイヤ制御による無線 LAN 品質保証法," 電子情報通信学会 情報ネットワーク研究会, IN2009-144, 2009. (宮崎)
- ㉒ 原田裕一, 小松真弓, 塩田茂雄, 阪田史郎, 平野由美, 村瀬勉, "VoIP 品質を保証するための動的 MAC フレーム受信機会制御," 電子情報通信学会 情報ネットワーク研究会, IN2009-62, 2009. (仙台)
- ㉓ M. Komatsu and S. Shioda, "A cross-layer analysis for evaluating the

voice conversation performance over wireless LANs," Proc. IEEE PIMRC, 査読有、2009. (東京)

㉔ 小松真弓, 塩田茂雄, "IP/MAC レイヤ間のインタラクションを考慮した無線 LAN 用性能評価モデルの提案," 電子情報通信学会 ネットワークシステム研究会, NS2009-15, 2009. (東京)

㉕ 高橋淳, 後藤康宏, 阪田史郎, 柳原健太郎, 福永茂, "センサネットワークにおけるバッファ使用量を考慮した QoS 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 USN2008-78, 2008. (名古屋)

㉖ 飯塚宏之, 阪田史郎, 江連裕一郎, 松本晃, 伊藤哲也, "アドホックマルチキャストにおけるフィードバック型 FEC を用いた高画質化方式," 電子情報通信学会 アドホックネットワーク研究会, AN2008-50, 2008. (仙台)

㉗ S. Shioda, J. Harada, Y. Watanabe, T. Goi, H. Okada, and K. Mase, "Fundamental characteristics of connectivity in vehicular ad hoc networks," Proc. IEEE PIMRC, 査読有、2008. (カンヌ、フランス)

〔図書〕 (計 1 件)

① 阪田史郎、他、電気学会出版、情報家電ネットワークと通信放送融合 - IPTV で実現する家庭内ユビキタス、2008、254

〔産業財産権〕

○ 出願状況 (計 4 件)

名称: 無線通信装置、無線ネットワークシステム、データ転送方法及びプログラム
 発明者: 飯塚宏之、伏見聡、阪田史郎、小室信喜、松本晃、伊藤哲也
 権利者: 日本電気通信システム
 種類: 特許
 番号: 特願 2009-295870、特願 2009-071048
 出願年月日: 2009 年 12 月 25 日、2009 年 3 月 23 日
 国内外の別: 国内

名称: 通信タイミング制御装置及び方法
 発明者: 辻川良輔、阪田史郎、福永茂、柳原健太郎
 権利者: 沖電気工業
 種類: 特許
 番号: 特願 2008-221922
 出願年月日: 2008 年 8 月 29 日
 国内外の別: 国内

名称: 無線通信ネットワーク、無線通信装置、通信選択方法、情報配信プログラム および記録媒体

発明者：飯塚宏之、阪田史郎、大野優樹、熊谷佑紀、伏見聡
権利者：日本電気通信システム
種類：特許
番号：特願 2008-046942
出願年月日：2008年4月27日
国内外の別：国内

〔その他〕

ホームページ：
<http://www.network.tj.chiba-u.jp/>

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

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