

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月 1日現在

機関番号：14501
 研究種目：基盤研究(C)
 研究期間：2009～2011
 課題番号：21500074
 研究課題名（和文） 無線センサネットワークのためのディペンダブル省電力通信プロトコル開発
 研究課題名（英文） Development of Dependable Low-power Protocols for Wireless Sensor Networks
 研究代表者
 太田 能 (OHTA CHIKARA)
 神戸大学・大学院システム情報学研究科・准教授
 研究者番号：10272254

研究成果の概要（和文）：無線センサネットワークは、河川氾濫や森林火災の監視など幅広い応用が考えられている。センサネットワークは、長時間に渡って情報収集をより確実に行うことが求められる。本研究では、消費電力について考慮しながら情報転送において信頼性の高い通信プロトコル実現にむけたブロードキャスト方式、適応変調方式、データ収集経路構築方式を提案し、シミュレーションならびに実証実験により、提案方式の有効性を検証した。

研究成果の概要（英文）：Wireless sensor networks are expected to realize various monitoring systems such as disaster monitoring for river floodplain, forest fire and so on. Sensor networks need to collect sensed data reliably as long time as possible. In this study, we developed network protocols such as reliable broadcasting schemes, adaptive modulation schemes, and path construction schemes to realize reliable data gathering considering power consumption, and verified their effectiveness by means of network simulations and demonstration experiments.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
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：センサネットワーク、省電力、信頼性

1. 研究開始当初の背景

センサネットワークは、センシング機能を有する小型ノードを介して実世界情報を収集し、アクチュエータを介して実世界へ関与するための基盤システムであり、その応用としては、河川氾濫や森林火災の監視、圃場における作物の育成状態や環境モニタリング、ビルオートメーションなど幅広い応用が考えられている。センサネットワークは、UCB Smart Dust プロジェクトコンセプトの発表

以来、約10年経つにもかかわらず、申請時（2008年10月）のIEEE Computer Magazine においても紙面が割かれているように、技術課題は山積していた。

2. 研究の目的

マルチホップ無線センサネットワークは、いったん敷設した後は長期間稼働する必要がある。このため、低消費電力であることが求められ、通信プロトコルもできるだけ簡素

であることが望ましい。その一方で、情報を収集するという目的のためには、見通し害通信が発生したり、ノードが途中で消失したりするような劣悪な環境においても、情報転送の確実性（ディペンダビリティ）を実現しなければならない。そこで本研究では、消費電力についても考慮しながら情報転送において信頼性の高い通信プロトコルを開発する。

3. 研究の方法

(1) ディペンダブル通信プロトコル提案

フェージング等の電波環境が動的に変化するような環境や見通し外となるような環境においても高効率かつ高信頼となる通信方式を提案し、シミュレーションにプロトコルモデル実装し、有効性検証を行う。

(2) 実証実験用テストベッド構築

実験環境を構築し、提案方式の有効性検証を行う。

4. 研究成果

(1) 通信プロトコル方式提案

① ブロードキャスト方式

センサネットワークでは、情報収集経路構築にフラディング方式が用いられることが多い。そこで、高信頼ブロードキャスト方式として、フレーム受信強度に応じてブロードキャスト実行遅延を制御する手法（DISCOUNT-SJ 方式）を提案し、これと、従来方式の DISCOUNT-RS 方式をネットワークシミュレータ QualNet にプロトコルモデル実装し、シミュレーション実験により、DISCOUNT-SJ 方式が配信率を保ちつつ配信遅延と制御オーバーヘッドを削減できることを明らかにした。

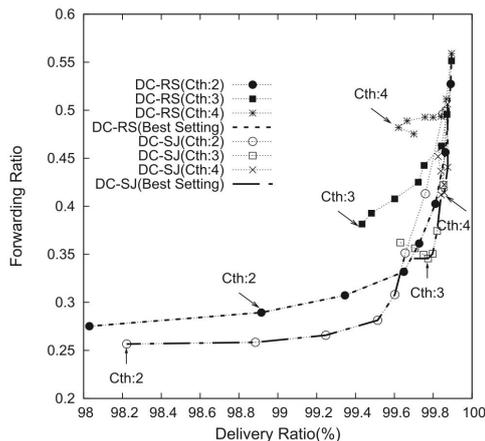


図1 DISCOUNT-SJ方式の情報配信特性

高信頼性を実現するために、TDP (Total Dominant Pruning) アルゴリズムをベースに再配信ノードを限定し、かつパッシブ ACK を利用することでわずかな制御オーバーヘッドの増加だけでメッセージ配信率を改善でき

ることを明らかにした。

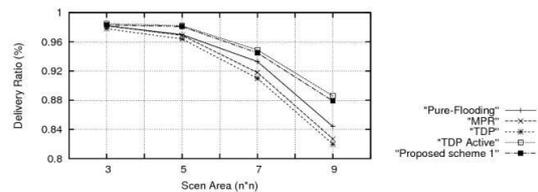


図2 Passive-ACK TDP方式の情報配信特性

② 適応変調方式

フラディングにおいて低品質リンクをもつノード間でたまたま通信が成功すると、以後のセンシング情報収集時にこのリンクが使用されることになり、高信頼通信を実現できない。そこで、MAC (Media Access Control) 層におけるブロードキャスト通信の変調レートを高くすることで、低品質リンクを介した経路発見が行われないようにする BROCA (BROadcast rate Control Algorithm) を提案した。BROCA は、隣接ノード数に応じてブロードキャスト変調レートを制御することで、網が分断されることを避けつつ、高いエンド間ユニキャストスループットを実現する。ネットワークシミュレータ QualNet にプロトコルモデル実装し、性能評価を行い、BROCA の有効性を確認した。

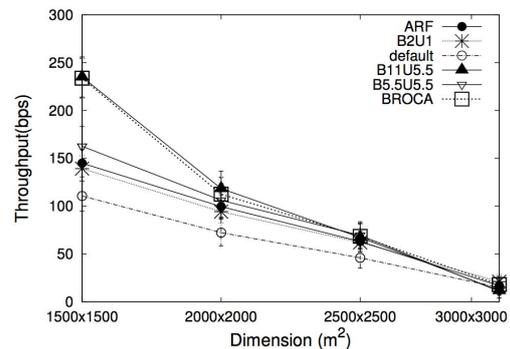
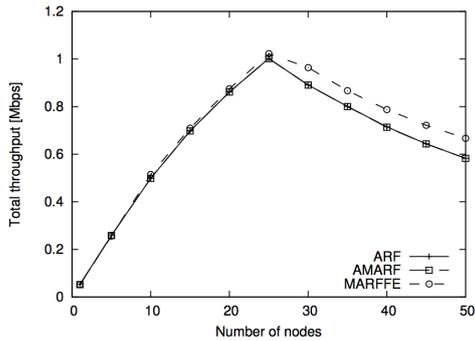


図3 BROCA方式のスループット特性

ユニキャスト通信実行時における高効率通信を実現するために、フェード区間範囲推定を行う MARFFE (Multi-rate Adaptive Auto Rate Fallback with Fade-duration Estimation) を提案し、ネットワークシミュレータ Scenargie 上に、既存方式である ARF (Auto Rate Fallback)、AMARF (Adaptive Multi-rate Auto Rate Fallback) とあわせてプロトコルモデル実装し、比較実験を行った。これにより、MARFFE が無線資源を効率よく利用し、高スループットを実現できることを明らかにした。



(b) Doppler frequency = 8.9Hz
図4 MARFFE方式のスループット特性

③ センサノード用低消費電力メモリ開発
 低消費電力化技術としてセンサネットワークノードに適した分割型SRAM (Static Random Access Memory) を提案し、ネットワークシミュレータ QualNet に情報収集プロトコルモデルを実装し、低消費電力化による効果について、ネットワーク寿命を尺度としてシステムレベルで評価した。改善分割型SRAMは、実装が容易なSRAMを分割し、必要に応じてメモリセルブロックをオンにすることで、リーク電流を削減するもので、これにより大容量メモリをもつセンサノードであっても低消費電力化を図ることが可能である。シミュレーション実験により、システム寿命を改善できることをシミュレーション実験により明らかにした。

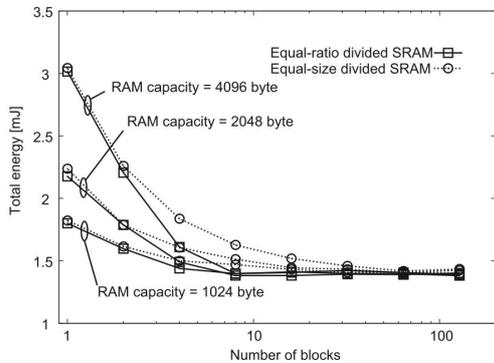


図5 分割SRAM消費電力特性

④ データ収集経路構築方式
 定期収集型マルチホップ無線センサネットワークのための、マルチパス方式、固定組合せ型ネットワークコーディング方式 (FPNC: Fixed Pair Network Coding) 方式、任意組合せ型ネットワークコーディング (APNC: Any Pair Network Coding) によるパス構築アルゴリズムをシミュレーションテストベッドに実装し、情報収集率特性の評価を行った。これにより、APNC方式は、オーバーヘッドが小さく、システム寿命への影響を押しえつつ、耐障害性を高めることができることを明らかにした。

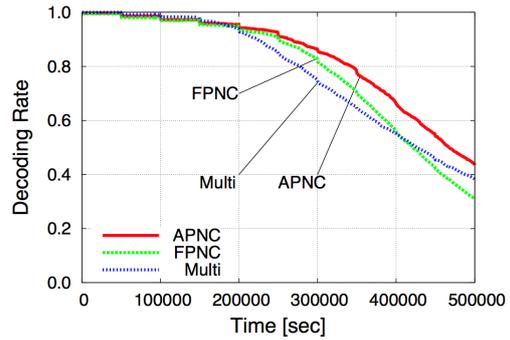


図6 APNC方式の情報収集率特性

(2) 実証実験用テストベッド構築

① テストベッド構築

実環境下での実験で得られる知見は、通信プロトコル開発にあたってきわめて有用である。そこで、Android 端末 (Google Nexus S) を用いて、情報収集通信プロトコル評価のための実機実験評価基盤の開発を行った。

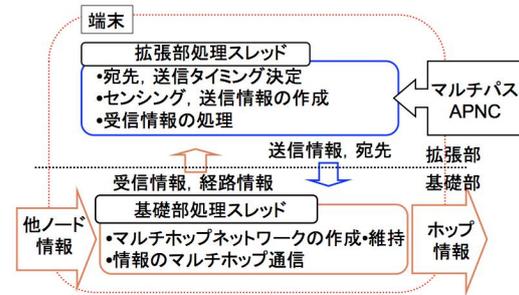


図7 実装概要

② 実証実験

データ収集経路構築方式として、既存のシングルパス方式、マルチパス方式、そして提案した APNC 方式をテストベッド拡張部に実装し、端末 12 台を用いて実証実験を行った。情報収集中に経路中の端末 1 台の動作を停止させ、その他の端末からの送信受信パケット数、情報収集率を測定した。その結果、APNC はパケット通信量の増加を抑えつつ、ノード故障耐性を高めることができることを明らかにした。

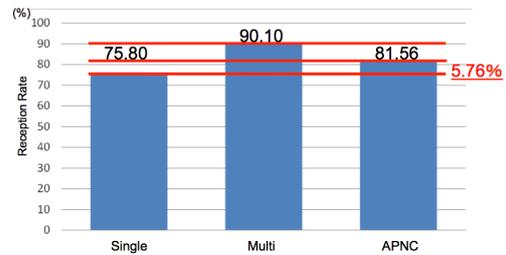


図8 実証実験結果

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8件)

- ① Takashi Matsuda, Shintaro Izumi, Yasuharu Sakai, Takashi Takeuchi, Hidehiro Fujiwara, Hiroshi Kawaguchi, Chikara Ohta, and Masahiko Yoshimoto, "Divided Static Random Access Memory for Data Aggregation in Wireless Sensor Nodes," IEICE Transaction on Communications, vol. E95-B, no. 1, pp. 178-188, January 2012. (査読有)
- ② 高木由美, 太田能, 玉置久, "MANETにおける距離情報にもとづくRAD制御を用いたブロードキャスト方式の提案と評価," 電子情報通信学会論文誌, vol. J94-B, no. 6, pp. 765-770, 2011年6月. (査読有)
- ③ Shintaro Izumi, Takashi Takeuchi, Takashi Matsuda, Hyeokjong Lee, Toshihiro Konishi, Koh Tsuruda, Yasuharu Sakai, Hiroshi Kawaguchi, Chikara Ohta, and Masahiko Yoshimoto, "A 58-uW Single-Chip Sensor Node Processor with Communication Centric Design," IEICE Transactions on Electronics, vol. E93-C, no. 3, pp. 261-269, March 2010. (査読有)
- ④ Takashi Matsuda, Takashi Takeuchi, Takefumi Aonishi, Masumi Ichien, Hiroshi Kawaguchi, Chikara Ohta, and Masahiko Yoshimoto, "A Power-Variation Model for Sensor Node and the Impact against Life Time of Wireless Sensor Networks," IEICE Electronics Express, vol. 7, no. 3, pp. 197-202, March 2010. (査読有)
- ⑤ Takashi Takeuchi, Shintaro Izumi, Takashi Matsuda, Hyeokjong Lee, Toshihiro Konishi, Koh Tsuruda, Yasuharu Sakai, Hiroshi Kawaguchi, Chikara Ohta, and Masahiko Yoshimoto, "A Single-Chip Sensor Node LSI with Synchronous MAC Protocol and Divided Data-Buffer SRAM," Proc. 2009 International SoC Design Conference, pp. 202-207, November 2009. (査読有)
- ⑥ Nhy Nguyen Tu Pham, Yiyuan Diao, Yusuke Kato, Kenichiro Yagura, Yumi Takaki, and Chikara Ohta, "A Simple Approach on Mitigating the Gray Zone Effect to Improve Throughput in IEEE802.11 Based Ad-Hoc Network," Proc. the Second International Conference on Advances in Mesh Networks, pp. 7-11, June 2009. (査読有)

- ⑦ Takashi Takeuchi, Shintaro Izumi, Takashi Matsuda, Hyeokjong Lee, Yu Otake, Toshihiro Konishi, Koh Tsuruda, Yasuharu Sakai, Hidehiro Fujiwara, Chikara Ohta, Hiroshi Kawaguchi, and Masahiko Yoshimoto, "A 58- μ W Single-Chip Sensor Node Processor Using Synchronous MAC Protocol," Proc. 2009 Symposia on VLSI Technology and Circuits, pp. 290-291, June 2009. (査読有)
- ⑧ Takashi Takeuchi, Shinji Mikami, Hyeokjong Lee, Hiroshi Kawaguchi, Chikara Ohta, and Masahiko Yoshimoto, "A 433-MHz Rail-to-Rail Voltage Amplifier with Carrier Sensing Function for Wireless Sensor Networks," IEICE Transactions on Electronics, vol. E92-C, no. 6, pp. 815-821, June 2009. (査読有)

〔学会発表〕(計7件)

- ① 藤田圭佑, 高木由美, 太田能, 玉置久, "情報収集型無線センサネットワークのための任意組み合わせ型ネットワークコーディングに関する一検討," 電子情報通信学会2012年総合大会講演論文集, pp. 107, 2012年3月.
- ② 三島千恵, 高木由美, 太田能, 玉置久, "IEEE802.11のための平均フェード範囲区間推定にもとづく適応変調方式の提案," 電子情報通信学会技術研究報告, 無線ネットワークシステム研究会, vol. 111, no. 94, pp. 153-158, 2011年6月.
- ③ Yiyuan Diao, Yumi Takaki, Chikara Ohta, and Hisashi Tamaki, "A Total Dominant Pruning-based Scheme with Passive ACK and Active NACK for Reliable Broadcasting in MANETs," IEICE Tech. Report, NS, vol. 110, no. 339, pp. 149-153, December 2010.
- ④ 渡邊俊介, 高木由美, 太田能, 玉置久, "マルチホップ無線ネットワークにおける受信SINRの均等化を目指した送信電力制御," 電子情報通信学会技術研究報告, ネットワークシステム研究会, vol. 110, no. 339, pp. 191-196, 2010年12月.
- ⑤ Shintaro Izumi, Takashi Takeuchi, Takashi Matsuda, Hyeokjong Lee, Toshihiro Konishi, Kou Tsuruda, Yasuharu Sakai, Chikara Ohta, Hiroshi Kawaguchi, and Masahiko Yoshimoto, "A 58-uW Sensor Node LSI with Synchronous MAC Protocol," Proc. 2010 Asia-Pacific Radio Science

Conference, CD-ROM(1 page),
September 2010.

- ⑥ Toru Yoshikawa, Shinichiro Kawasaki,
Masahiro Takase, Yasushi Hiraoka,
Yumi Takaki, Chikara Ohta, and
Takeshi Inoue, "Development of
27MHz/40MHz Bands Maritime Wireless
Ad-hoc Networks," Proc. 2010 IEEE
ICUFN2010, pp.177-182, June 2010. (招
待)
- ⑦ Nhy Nguyen Tu Pham, Yiyuan Diao,
Yusuke Kato, Yumi Takaki and Chikara
Ohta, "Proposal on Rate Control
Algorithm to Mitigate Gray Zone
Effect in Wireless Ad-hoc Networks,"
IEICE, Proc. the 2009 IEICE General
Conference, pp.658, March 2010.

[産業財産権]

○取得状況 (計2件)

名称：センサネットワークシステム及びメ
ディアアクセス制御方法

発明者：一圓真澄，川口博，太田能，吉本
雅彦

権利者：神戸大学

種類：特許

番号：特許第 4919204 号

取得年月日：2012年2月10日

国内外の別：国内

名称：データ通信スケジューリング方式お
よびそれを用いたセンサネットワークシス
テム

発明者：松田隆志，川口博，太田能，吉本
雅彦

権利者：神戸大学

種類：特許

番号：特許第 4863069 号

取得年月日：2011年11月18日

国内外の別：国内

[その他]

<http://www.al.cs.kobe-u.ac.jp/~ohta/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

太田 能 (OHTA CHIKARA)

神戸大学・大学院システム情報学研究科・
准教授

研究者番号：10272254

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし