

研究種目：基盤研究（C）  
 研究期間：2006～2008  
 課題番号：18500052  
 研究課題名（和文） 階層間協調設計による無線センサネットワークのための省電力通信プロトコルの開発  
 研究課題名（英文） Cross-layer Design of Low Power Communication Protocols for Wireless Sensor Networks  
 研究代表者 太田 能 (OHTA CHIKARA)  
 神戸大学 大学院工学研究科 准教授  
 研究者番号：10272254

研究成果の概要：無線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無線通信によりマルチホップ接続した無線センサネットワークであり、センサから得られる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として期待されている。本研究では、無線センサネットワークのための低消費電力通信プロトコルの開発をおこない、プロトタイプにおいて消費電力を81%削減した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
18年度	1400,000	420,000	1820,000
19年度	1300,000	390,000	1690,000
20年度	900,000	270,000	1170,000
総計	3600,000	1080,000	4680,000

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：情報ネットワーク、センサネットワーク、省電力通信、階層間協調設計

### 1. 研究開始当初の背景

無線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からなる無線システムであり、センサから得られる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として期待されている。この無線センサネットワークのアプリケーションとしては、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く考えられており、その実用化が期待されている。

このようなシステムは、数多くのセンサネットワークノードで構成される可能性があり、その製造コストを抑えるとともに、長期間、電池の交換を必要としないよう低消費電力化を進め、メンテナンスコストを削減することも求められていた。

### 2. 研究の目的

研究開発時に発表されているMoteやNi3が数十mW級の消費電力を有するのに対し、本研究では、無線センサネットワークノード用LSI設計を念頭に、省電力通信プロトコルをクロスレイヤ設計により開発することで、mW級の消費電力を達成可能できるセンサノードシステムのための通信プロトコルの実現を目指した。

### 3. 研究の方法

本研究の学術的特色は、レイヤ間協調設計により通信プロトコルを開発する点にあり、またシステムLSI化の準備が同時に達成されるというメリットも兼ね備えている。

本研究は、通信プロトコルを専門とする代表者（太田）とRF回路を含むシステムLSIを専門とする研究連携者（吉本・川口）

により研究グループを構成して進められた。

通信プロトコル開発にあたっては、RF回路設計者と密な議論のもと検討を進めることが可能であり、またRF回路シミュレーション（スパイスシミュレーション）により、メディアアクセス層以上のシミュレーションをおこなう際により正確なRF回路の消費電力パラメータを得て進めることができた。

こうして得られた各モジュールの消費電力データに基づき、センサネットワーク用通信プロトコルとして、メディアアクセス制御、経路制御の方式検討ならびに、シミュレーション評価をおこなった。

経路制御方式については、センサノードの製造ばらつきを考慮した方式、ならびに定期情報収集型スケジューリング方式の基礎検討をおこない、シミュレーションによって有効性を明らかにした。シミュレーションにあたっては、フェージングなどの無線チャネル特有の環境を組み込んでおこなうことで、ロバスト性の高い方式を選択した。

#### 4. 研究成果

##### (1) メディア制御関係

外部同期信号による同期周期起動型メディアアクセス制御方式 **Isochronous-MAC (I-MAC)** を提案し、シミュレーション評価によって有効性を確認した。外部信号としては、長波標準電波時刻同期を想定し、時刻同期に必要な消費電力を考慮しておこなった。従来方式である **Low Power Listening** 方式に比べ、31%の消費電力削減を実現した。

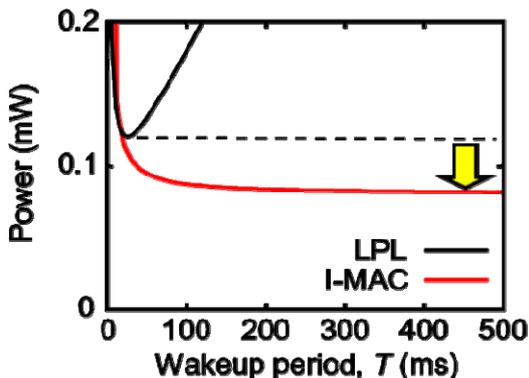


図1：I-MACとLPLの起動周期に対する消費電力統計

##### (2) 経路制御関係

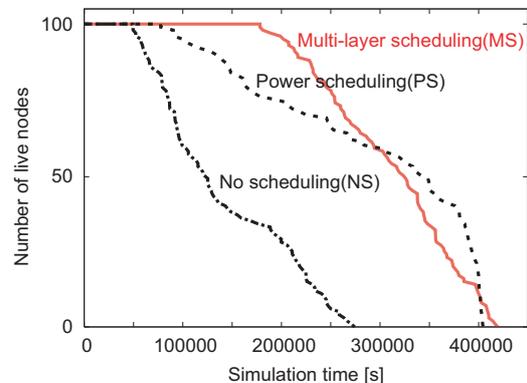
###### ① データ集約率を考慮した経路制御方式

センサネットワークにおいては、中継ノードにおいて不要なデータを削除するデータ集約により送信データ量を削減することが低消費電力化に貢献することが期待されている。本研究では、多様なデータ集約方式に

対応できる集約率適応型 **AGIT (Aggregation efficiency-aware Greedy Incremental Tree)** 経路制御方式を考案し、10ソースノードの場合で最大8%の消費電力削減を達成できることを示した。

###### ② データ送信スケジューリング方式

センサノードの低消費電力化にあたっては、アイドルリスニング状態の間をできるだけ短くすることが有効である。アプリケーションの多い定期収集型センサネットワーク（各センサノードから定期的に情報を収集するシステム）を対象として、各センサノードのデータ送信タイミングをスケジューリングするための **Multi-layer Scheduling** 方式を提案した。本方式では、周辺ノードのデータ送信をイベントととらえ、このイベントの発生順序にもとづいて送信スケジュール管理する方式であり、従来方式である **Power Scheduling** 方式に対してシステム可用時間



を約2.2倍に改善できることを示した。

図2：M-Scheduling方式とPS方式の稼働ノード数時間特性

###### (3) 評価モデル関係

###### ① 送信電力制御における送信電力モデル

送信電力制御によるデータ送信のための消費電力は、従来はアンテナからの放射電力の減衰に基づいてモデル化されていた。しかし、このようなモデル化では送信パワーアンプの効率劣化の影響が考慮されておらず、モデルの正確さに問題があった。この効率劣化の影響を考慮した **Efficiency degradation model** を提案した。これにより、実システムに近いモデル化が可能となり、また送信電力制御の効果が従来モデルでは高く見積もられていることを明らかにした。

###### ② ノード製造ばらつきを考慮したノード消費電力モデル

LSIにおける閾値電圧ばらつきに基づいたノード消費電力ばらつきモデル (**TV (Threshold-voltage Variation)** モデル) を提案し、ノード消費電力のばらつきがシステム可用時間に与える影響を評価した。この結果、ノード消費電力が一定である従来よく用

いられているモデル (TC (Threshold-voltage Constant) モデル) では、システム可用時間を 11%ほど長く見積もる可能性があることを明らかにした。

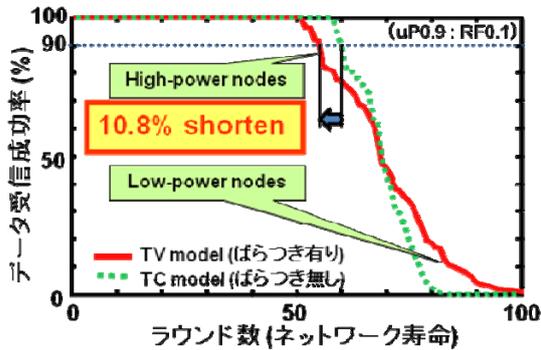


図 3 : ノード消費電力ばらつきのシステム可用時間への影響

#### (4) ノードアーキテクチャ関係

センサノードは、受信したデータ等を保持しておくメモリが必要となる。センサノード用 1 チップ LSI を開発するにあつて、不揮発メモリによるメモリの実現は高コストとなる。一方、SRAM は製造コストを抑えることができる半面、データ保持のための待機電力がかかる。この待機電力は、SRAM 容量に応じて大きくなる。そこで、2 種類の分割構成 SRAM ( Equal-size divided SRAM 、 Equal-ratio divided SRAM) を提案し、ネットワークシミュレーションによりその有効性を評価した。

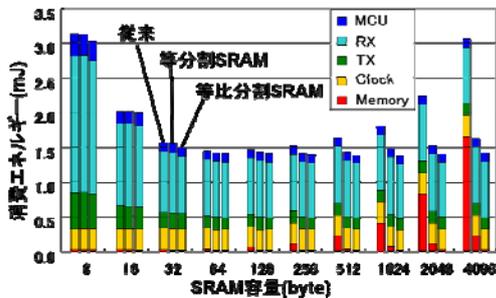


図 4 : SRAM 容量と消費エネルギーの関係

#### (5) 実装関係

MAC 層に I-MAC を採用したセンサノード用 LSI の実現にむけて、マイコンを用いたプロトタイプ実装をおこなった。センサノードには、Ymatic 社製 S-node を使い、時刻同期には長波標準電波時刻用 OKI ML6191 を用いた。この実装においては、連携研究者が温度変化から時間誤差を予想し RTC (Real Time Clock) の基準周波数を修正する修正同期時刻補正方式と低消費電力水晶発振器回路設計をおこなっている。これらにより、従来の LPL 方式に比べ、消費電力を 81%削減することができた。



図 5 : 開発プロトタイプシステム外観

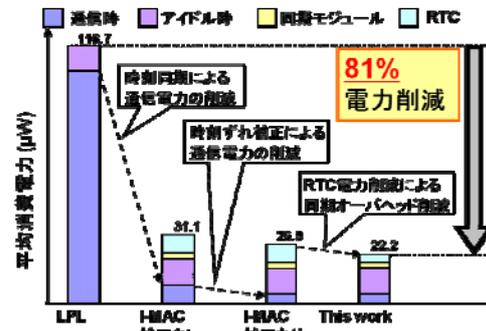


図 6 : プロトタイプシステムにおける消費電力削減効果

#### 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 24 件)

- ① 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、E92-B、815-821、2009、査読有
- ② Augusto Foronda, Chikara Ohta, and Hisashi Tamaki、Scheduling Algorithm to Provide QoS over a Shared Wireless Link、IEICE Transaction on Communications、E92-B、2160-2167、2009、査読有
- ③ Shintaro Izumi, Takashi Takeuchi, Takashi Matsuda, Hiroshi Kawaguchi, Chikara Ohta, and Masahiko Yoshimoto、Counter-based Broadcasting with Hop Count Aware Random Assessment Delay Extension for Wireless Sensor Networks、IEICE Transaction on Communications、E91-B、3489-3498、2008、査読有

- ④ Takashi Takeuchi, Yu Otake, Masumi Ichien, Akihiro Gion, Hiroshi Kawaguchi, Chikara Ohta, and Masahiko Yoshimoto、Cross-Layer Design for Low-Power Wireless Sensor Node using Wave Clock、IEICE Transaction on Communications、E91-B、3480-3488、2008、査読有
- ⑤ Augusto Foronda, Chikara Ohta, Hisashi Tamaki、An Enhanced Proportional Fair Algorithm to Provide QoS over a Shared Wireless Link、Proc. the 2008 International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC2008)、106-109、2008、査読有
- ⑥ Augusto Foronda, Chikara Ohta, and Hisashi Tamaki、Scheduling Algorithms for Maximizing Throughput with Zero-Forcing Beamforming in a MIMO Wireless System、IEICE Transaction on Communications、E91-B、1952-1961、2008、査読有
- ⑦ Ken-ichiro Yagura, Yusuke Kato, Takayuki Kitada, Kazuhiro Yamaguchi, Yumi Takaki, Mitsuhiro Kuwano, and Chikara Ohta、Implementation of Publish/Subscribe System on Wireless Mesh Networks -Word-mouth Information Distribution Service-、Proc. 7th Asia-Pacific Symposium on Information and Telecommunication Technologies (APSITT 2008)、168-172、2008、査読有
- ⑧ Takashi Matsuda, Shintaro Izumi, Takashi Takeuchi, Hidehiro Fujiwara, Hiroshi Kawaguchi, Chikara Ohta, and Masahiko Yoshimoto、Impact of Divided Static Random Access Memory Considering Data Aggregation for Wireless Sensor Networks、Proc. 7th Asia-Pacific Symposium on Information and Telecommunication Technologies (APSITT 2008)、130-134、2008、査読有
- ⑨ Shintaro Izumi, Takashi Matsuda, Hiroshi Kawaguchi, Chikara Ohta, and Masahiko Yoshimoto、Hop Count Aware Broadcast Algorithm with Random Assessment Delay Extension for Wireless Sensor Networks、Proc. 7th Asia-Pacific Symposium on Information and Telecommunication Technologies (APSITT 2008)、30-35、2008、査読有
- ⑩ Takashi Matsuda, Masumi Ichien, Hiroshi Kawaguchi, Chikara Ohta, and Masahiko Yoshimoto、Data Transmission Scheduling based on RTS/CTS Exchange for Periodic Data Gathering Sensor Networks、IEICE Transaction on Communications、E90-B、3410-3417、2007、査読有
- ⑪ Augusto Foronda, Chikara Ohta, Masahiko Yoshimoto, and Yoji Okada、Service Interval Optimization with Delay Bound Guarantee for HCCA in IEEE 802.11e WLANs、IEICE Transaction on Communications、E90-B、3158-3169、2007、査読有
- ⑫ Augusto Foronda, Chikara Ohta, Hisashi Tamaki、A Fair Scheduling Algorithm to Improve Stability Region with Zero-Forcing Beamforming、Proc. IEEE International Symposium on Wireless Communication Systems 2007 (ISWCS2007)、814-818、2007、査読有
- ⑬ Takashi Matsuda, Takafumi Aonishi, Takashi Takeuchi, Hiroshi Kawaguchi, Chikara Ohta, and Masahiko Yoshimoto、Multipath Routing Using Isochronous Medium Access Control with Multi Wakeup Period for Wireless Sensor Networks、Proc. IEEE International Symposium on Wireless Communication Systems 2007 (ISWCS2007)、718-721、2007、査読有
- ⑭ Shintaro Izumi, Takashi Matsuda, Hiroshi Kawaguchi, Chikara Ohta, and Masahiko Yoshimoto、Improvement of Counter-based Broadcasting by Random Assessment Delay Extension for Wireless Sensor Networks、Proc. International Conference on Sensor Technologies and Applications (SENSORCOMM 2007)、76-81、2007、査読有
- ⑮ Yu Otake, Masumi Ichien, Takashi Takeuchi, Akihiro Gion, Shinji Mikami, Hidehiro Fujiwara, Hiroshi Kawaguchi, Chikara Ohta, and Masahiko Yoshimoto、Cross-Layer Design for Low-Power Wireless Sensor Node using Long-Wave Standard Time Code、Proc. International Conference on Sensor Technologies and Applications (SENSORCOMM 2007)、341-346、2007、査読有
- ⑯ Fumio Ishizaki and Chikara Ohta、

- Analysis of the Statistical Time-Access Fairness Index under a Scheduler Exploiting Multiuser Diversity, Proc. IEEE Wireless Telecommunications Symposium 2007, CD-ROM, 2007, 査読有
- ⑰ Yuhi Higuchi, Augusto Foronda, Chikara Ohta, Masahiko Yoshimoto, and Yoji Okada, Delay Guarantee and Service Interval Optimization for HCCA in IEEE 802.11e WLANs, Proc. IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC 2007), 2080-2085, 2007, 査読有
- ⑱ Shinzi Mikami, Masumi Ichien, Takashi Takeuchi, Hiroshi Kawaguchi, Chikara Ohta, and Masahiko Yoshimoto, A 356- $\mu$ W, 433-MHz, Rail-to-Rail Voltage Amplifier with Carrier Sensing Function for Wireless Sensor Networks, Proc. IEEE 2007 Radio and Wireless Symposium (RWS 2007), 451-454, 2007, 査読有
- ⑲ Shinzi Mikami, Takashi Takeuchi, Hiroshi Kawaguchi, Chikara Ohta, and Masahiko Yoshimoto, An Efficiency Degradation Model of Power Amplifier and the Impact against Transmission Power Control, Proc. IEEE 2007 Radio and Wireless Symposium (RWS 2007), 447-450, 2007, 査読有
- ⑳ Sinji Mikami, Takafumi Aonishi, Hironori Yoshino, Chikara Ohta, Hiroshi Kawaguchi, and Masahiko Yoshimoto, Aggregation Efficient-Aware Greedy Incremental Tree Routing for Wireless Sensor Networks, IEICE Transaction on Communications, E89-B, 2741-2751, 2006, 査読有
- ㉑ Takashi Matsuda, Masumi Ichien, Shinji Mikami, Hiroshi Kawaguchi, Chikara Ohta, and Masahiko Yoshimoto, Data Transmission Scheduling based on RTS/CTS Exchange for Periodic Data Gathering Sensor Networks, Proc. First International Conference on Communications and Electronics (ICCE 2006), CD-ROM, 2006, 査読有
- ㉒ Masumi Ichien, Takashi Takeuchi, Shinji Mikami, Hiroshi Kawaguchi, Chikara Ohta, and Masahiko Yoshimoto, Isochronous MAC using Low Frequency Radio Wave Time Synchronization for Wireless Sensor Networks, Proc. First International Conference on Communications and Electronics (ICCE 2006), CD-ROM, 2006, 査読有
- ㉓ Augusto Foronda, Leandro Correa Pykosz, Chikara Ohta, and Masahiko Yoshimoto, A New Framework to Provide Quality of Service in MPLS Network, Proc. International Telecommunications Symposium (ITS2006), 765-769, 2006, 査読有
- ㉔ Takafumi Aonishi, Takashi Matsuda, Shinji Mikami, Chikara Ohta, Hiroshi Kawaguchi, and Masahiko Yoshimoto, Impact of Aggregation Efficiency on GIT Routing for Wireless Sensor Networks, Proc. the 2006 International Conference on Parallel Processing Workshops (ICPPW'06), CD-ROM, 2006, 査読有
- [学会発表] (計12件)
- ① 和泉慎太郎, 松田隆志, 竹内隆, 川口博, 太田能, 吉本雅彦, 低消費電力センサノードVLSIのための時刻同期型MACプロトコルの研究, 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, 2009年3月3日 沖縄
- ② 酒井康晴, 松田隆志, 和泉慎太郎, 竹内隆, 藤原英弘, 川口博, 太田能, 吉本雅彦, ワイヤレスセンサネットワークのためのデータ集約を考慮した部分起動メモリの電力削減効果に関する研究, 2008年電子情報通信学会通信ソサイエティ大会 通信講演論文集2, 2008年9月18日 川崎市
- ③ 大竹優, 一圓真澄, 竹内隆, 祇園昭宏, 三上真司, 藤原英弘, 川口博, 太田能, 吉本雅彦, 長波帯標準電波を用いた低電力センサノードのための垂直統合設計, 電子情報通信学会技術研究報告, 集積回路研究会, 2007年7月26日 神戸市
- ④ 李赫鍾, 三上真司, 竹内隆, 一圓真澄, 川口博, 太田能, 吉本雅彦, ワイヤレスセンサネットワーク応用キャリアセンス機能を持つ433MHz帯, 356- $\mu$ W電圧増幅器, 電子情報通信学会技術研究報告, 集積回路研究会, 2007年7月26日 神戸市
- ⑤ 和泉慎太郎, 松田隆志, 三上真司, 川口博, 太田能, 吉本雅彦, ワイヤレスセンサネットワークのためのタイマ制御によるカウンターベースブロードキャスティング方式の改良, 2007年電子情報通信学会総合大会講演論文集, 2007年3月22日 神戸市

- ⑥ Masumi Ichien, Takashi Takeuchi, Shinji Mikami, Hiroshi Kawaguchi, Chikara Ohta, and Masahiko Yoshimoto, Isochronous MAC using Low Frequency Radio Wave Time Synchronization for Wireless Sensor Networks (Encouragement Talk)、IEICE Tech. Report, NS, 2006年10月25日 桐生市
- ⑦ Yuhi Higuchi, Augusto Foronda, Chikara Ohta, Yoji Okada, and Masahiko Yoshimoto、A New Scheduler to Guarantee Delay Bound with Bandwidth Optimization for HCCA in IEEE 802.11e WLANs、IEICE Tech. Report, IN、2006年6月23日 北海道
- ⑧ 三上真司, 竹内隆, 川口博, 太田能, 吉本雅彦、送信電力制御による効率劣化の影響、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、2006年4月20日 高知
- ⑨ Hironori Yoshino, Takeuchi Takashi, Masumi Ichien, Takashi Matsuda, Shinji Mikami, Hiroshi Kawaguchi, Chikara Ohta, and Masahiko Yoshimoto、Impact of Node Power Variation against Life Time of Sensor Networks、IEICE Tech. Report, NS、2006年4月20日 高知
- ⑩ 松田隆志, 一圓真澄, 三上真司, 太田能, 川口博, 吉本雅彦、定期情報収集型センサネットワークのためのRTS/CTS交換に基づくデータ送信スケジューリング、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、2006年4月20日 高知
- ⑪ Masumi Ichien, Takashi Takeuchi, Shinji Mikami, Hiroshi Kawaguchi, Chikara Ohta, and Masahiko Yoshimoto、Isochronous MAC using Low Frequency Radio Wave Time Synchronization for Wireless Sensor Networks、IEICE Tech. Report, NS、2006年4月20日 高知
- ⑫ Takafumi Aonishi, Hironori Yoshino, Shinji Mikami, Chikara Ohta, Hiroshi Kawaguchi, and Masahiko Yoshimoto、Evaluation of GIT Routing Considering Aggregation Ratio in Sensor Networks (Encouragement Talk)、IEICE Tech. Report, NS、2006年4月20日 高知

[産業財産権]

○出願状況 (計4件)

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: 特願 2006-279760

出願年月日: 平成 18 年 10 月 13 日

国内外の別: 日本

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, 三上真司, 川口博, 太田能, 吉本雅彦

権利者: 神戸大学

種類: 特許

番号: 特願 2006-279761

出願年月日: 平成 18 年 10 月 13 日

国内外の別: 日本

名称: センサネットワークにおける無線トラシーバ用電圧増幅器

発明者: 三上真司, 川口博, 太田能, 吉本雅彦

権利者: 神戸大学

種類: 特許

番号: 特願 2007-35223

出願年月日: 平成 18 年 12 月 5 日出願

国内外の別: 日本

名称: 温度補償バイアス回路

発明者: 吉本雅彦, 太田能, 川口博, 竹内隆

権利者: 神戸大学

種類: 特許

番号: 特願 2007-264523

出願年月日: 平成 19 年 10 月 10 日

国内外の別: 日本国

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

太田 能 (GAKUSHIN TARO)

神戸大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 10272254

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

吉本 雅彦 (YOSHIMOTO MASAHIKO)

神戸大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 30324099

川口 博 (KAWAGUCHI HIROSHI)

神戸大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 00361642