

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 1 日現在

機関番号：21602

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23500095

研究課題名(和文) 不安定な通信環境下で使用可能なセンサノード投げ込み型無線センサネットワークの研究

研究課題名(英文) Wireless Sensor Network Using Throw-in Type Sensor Nodes Applicable to Unstable Wireless Communication Environment

研究代表者

宮崎 敏明 (MIYAZAKI, Toshiaki)

会津大学・コンピュータ理工学部・教授

研究者番号：70404895

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円、(間接経費) 1,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、不安定な通信環境下でも確実なセンサ情報の取得ができるために、複数基地局の存在を前提とし、各センサノードがセンシングデータを搭載したバケットを、どの基地局に、どの経路を使用して送達すべきかを決定する自律分散型ジオメトリックルーティング法を考案した。また、上記アルゴリズムの実装基盤となるプログラマブルセンサノードの開発を行った。同センサノードは、省電力FPGA(論理回路がカスタマイズ可能なLSI)を搭載することにより、従来のセンサノードと比べ、高性能かつ低消費電力を両立した。

研究成果の概要(英文)：In this study, we proposed an autonomous geometric routing method that can decide a suitable base station (sink) and a route to reach the sink among multiple sinks and routes in a multi-sink wireless sensor network, in order to acquire sensed data from sensor nodes even if the wireless communications are unstable. In addition, a programmable wireless sensor node was developed as an implementation base to realize the proposed geometric routing. By introducing an ultra-low power FPGA (an LSI whose logic circuit can be customized by the user), it realizes both high-performance and low-power consumption, compared to the conventional wireless sensor nodes.

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：ユビキタスコンピューティング 無線センサネットワーク 経路制御 省電力センサノード FPGA  
ジオメトリックルーティング 0-1整数線形計画

### 1. 研究開始当初の背景

我々は、平成 19 年度より、災害現場の迅速な状況把握を目的に投げ込み型センサノードを用いた無線センサネットワークシステムの開発を行っている。当初より、災害現場では投入した複数のセンサノードの一部が突然使用不能になる場合や障害物により電波が遮蔽されるなど、安定したデータ取得が困難であることが想定された。そのため、災害現場の周囲に複数の可搬型基地局を設ける構成とした。しかし、実際にプロトタイプを試作し、屋外実証実験を試みると、予想以上にデータ取得率が悪いことが判明した。原因は、データ取得率の向上を狙い、複数基地局へのデータ転送には Flooding を使用したが、パケット衝突によるパケットロスと、想定以上の冗長パケットが各基地局に到来し、その処理能力の限界を超えたためであった。

### 2. 研究の目的

上記背景を鑑み、センサノードの増減や電波障害などにより通信品質が安定しない状況でも、個々のセンサノードが取得した観測データを確実に収集可能な、複数の基地局と多数の投げ込み型センサノードから構成される無線センサネットワークシステムを実現する。

### 3. 研究の方法

(1) 本研究では、不安定な通信環境下でも確実なセンサ情報の取得ができるために、複数基地局（シンク）の存在を前提とし、各センサノードが観測データを搭載したパケットを、どの基地局に、どの経路を使用して送達すべきかを決定する自律分散型ジオメトリックルーティング法を考案した。また、それに先立ち、同条件で最適データ転送経路を見いだすことが可能な 0-1 整数線形計画法に基づく定式化も行った。

(2) また、本研究の最終適用先である災害現場監視用無線センサネットワークを想定し、複数の赤外線（IR）センサの反応パターンから、観測領域内にいる人の数と各人の移動軌跡を自動推定するアルゴリズムの開発も並行して進めた。

(3) さらに、上記アルゴリズムの実装基盤となるセンサノードの開発を行った。具体的には、搭載している低性能な 16bit CPU では、その処理が困難な複数の観測データの処理を扱う省電力 FPGA (Field Programmable Gate Array) を搭載し、サンプリングレート 2KHz で取得した観測データでも処理可能とした。これは、センサノードに搭載した CPU では処理出来ないデータ量であり、しかも FPGA の消費電力は、当該 CPU のそれよりも小さい。また、試作したセンサノードの機能を容易に

カスタマイズ出来るように、近隣センサノードの存在の有無や、それらの状態などを取得する関数ライブラリを用意した。ユーザは、それら関数ライブラリを呼ぶ形で、周囲の環境によってセンサノードの振る舞いを動的に変更するアプリケーションプログラムを容易に開発できる。

### 4. 研究成果

(1) センサノード（以下、ノード）から基地局（シンク）へのデータ転送に、Time Division Multiple Access (TDMA) を用いる場合、近隣ノードとのパケット衝突を回避するように、各ノードがパケット送信するタイムスロットを割り当てる必要がある。本研究では、タイムスロットの割り当てとパケット転送経路の確保を同時に最適化するために、{ノード、タイムスロット、シンク} の組み合わせに対してバイナリ変数を設け、0-1 線形計画問題として、本問題を定式化し、二分決定グラフ (BDD) を用いて最適解を得る方法を提案した。なお、本定式化は、タイムスロットをチャンネルと読み替えれば Frequency Division Multiple Access (FDMA) を用いたデータ転送にも対応可能である。

次に、我々が過去に提案したマルチシンク対応のパケット転送方式 NMDT を改良して、自律分散型ジオメトリックルーティング方式を提案した。NMDT は、各ノードの通信環境の安定度合いに応じて、データパケットの flooding 方向を全方向からユニキャストまでシームレスかつ動的に変更するマルチシンク対応のルーティング法であり、いわゆる Selective Flooding 方式に属する。そのパケット方向を絞り込むメトリックとして、今回は、ノードの位置情報を用いた。すなわち、シンクにより近い位置に存在する近隣ノード群にパケットを Flooding すると云うものである。本パケット転送方式により、従来の NMDT よりもさらに、パケット衝突を回避しつつ、効率的なシンクへのデータ転送が可能となった。

(2) 人の存在の有無を  $\{1, 0\}$  の 2 値で知らせる人感 (IR) センサを観測領域に複数個設置し、それらセンサの反応パターンから観測領域内にいる人の移動軌跡を、準リアルタイムに推定する手法を開発した。シミュレーションによる実験では、10m×10m の観測領域において、平均 1.3 m 以内で複数人の移動軌跡を推定できることが分かった。図 1 に評価結果の一例を示す。図中、TruPath1 と TruPath2 は、2 名がそれぞれ別時刻に”Door” の位置から入室し、室内を移動した後、再び”Door” から外室した軌跡を表している。それに対する推定移動軌跡が、それぞれ、EstPath1 と EstPath2 である。図から分かるように、開発手法によって各人の移動軌跡が精度良く推定されている。

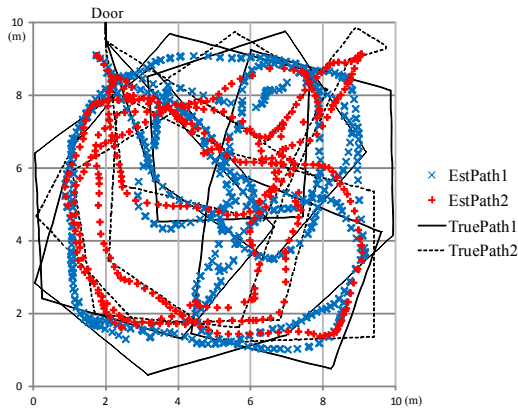


図1 移動軌跡推定例(2人の場合)

(3) 前述したアルゴリズムの実装基盤として、図2に示すプログラマブルセンサノードを開発した。図3は、同センサノードの回路ブロック図である。本センサノードは、ユーザがセンサノードの振る舞いをC言語風の言語で記述すると、そこから生成されるプログラムや、FPGAで実現する回路の情報が生成される。それらを、無線通信を介して、本センサノードに送り込むことにより、センサノードの動作を容易にカスタマイズできる。



図2: プログラマブルセンサノード外観

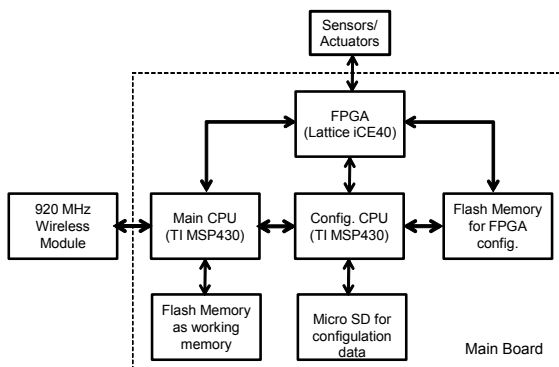


図3: プログラマブルセンサノードの回路ブロック図

本機構を用いると、周囲状況を勘案して、環境に適応するセンサネットワークが実現できる。これは、本研究の目的であった不安定な通信環境でも適切にデータ収集を可能と

するセンサネットワークの実現を意味する。今後は、上記カスタマイズ機能の充実を図り、実用化を目指す。

### 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 10件)

- ① D. Zeng, P. Li, S. Guo, and T. Miyazaki, "Minimum-Energy Reprogramming with Guaranteed Quality-of-Sensing in Software-Defined Sensor Networks," IEEE International Conference on Communications (ICC) 2014, June 10-14, 2014. (Accepted) 査読有.
- ② T. Miyazaki, S. Yamaguchi, K. Kobayashi, J. Kitamichi, S. Guo, T. Tsukahara, T. Hayashi, "A Software Defined Wireless Sensor Network," IEEE International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC2014), pp.847-852, Honolulu, Feb. 3-6, 2014. 査読有. DOI:10.1109/ICNC.2014.6785448
- ③ T. Miyazaki, H. Iwata, K. Kobayashi, S. Yamaguchi, D. Zeng, S. Guo, J. Kitamichi, T. Hayashi, T. Tsukahara, "DASN: Demand-addressable Sensor Network for Active Information Acquisition," ACM the 8th International Conference on Ubiquitous Information Management and Communication (IMCOM2014), Siem Reap, Cambodia, Jan. 9-11, 2014. (Best Paper Award) 査読有. DOI:10.1145/2557977.2557995
- ④ D. Zeng, T. Miyazaki, S. Guo, T. Tsukahara, J. Kitamichi, T. Hayashi, "Evolution of Software-Defined Sensor Networks," IEEE 9th International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Networks (MSN 2013), pp.410-413, Dalian, China, Dec. 11-13, 2013. 査読有. DOI:10.1109/MSN.2013.60
- ⑤ S. Yamaguchi, T. Miyazaki, J. Kitamichi, S. Guo, T. Tsukahara, and T. Hayashi, "Programmable Wireless Sensor Node Featuring Low-power FPGA and Microcontroller," The 6th IEEE International Conference on Ubi-Media Computing (UMEDIA2013), Aizu-wakamatsu, Japan, pp. 596-600, Nov. 2-4, 2013. 査読有. DOI:10.1109/ICAwST.2013.6765509

- ⑥ T. Miyazaki, "Dynamic Function Alternation to Realize Robust Wireless Sensor Network," International Journal of Handheld Computing Research (IJHCR), Vol. 3, No. 3, pp.17-34, 2012. 査読有.  
DOI: 10.4018/jhcr.2012070102
- ⑦ Y. Kasama, and T. Miyazaki, "Movement Path Estimation for Multiple Humans in a Room using Binary Infrared Sensors," Proc. IEEE International Conference on Information Networking (ICOIN2013), pp. 42-47, Jan. 2013. 査読有. (Best Paper Award)  
DOI:10.1109/ICOIN.2013.6496349
- ⑧ T. Miyazaki, S. Yamaguchi, and Y. Tanno, "Dynamic Direction Control of Packet Flooding in Wireless Sensor Networks," Proc. IEEE 7th International Conference on Computing and Convergence Technology (ICCCT2012), pp. 749-752, Dec. 2012. 査読有.  
[http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs\\_all.jsp?arnumber=6530434](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6530434)
- ⑨ Y. Kasama, and T. Miyazaki, "Simultaneous Estimation of the Number of Humans and their Movement Loci in a Room using Infrared Sensors," Proc. 2012 IEEE Workshops of International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA2012 Workshop, HWISE2012), pp.508-513, Fukuoka, March 2012. 査読有.  
DOI: 10.1109/WAINA.2012.27
- ⑩ T. Miyazaki, and Y. Kasama, "Estimation of the Number of Humans and their Movement Paths in a Room using Binary Infrared Sensors," Proc. ACM International Conference on Ubiquitous Information Management and Communication (ICUIMC2012), 7 pages in CDROM, Kuala Lumpur, Malaysia, Feb., 2012. 査読有.  
DOI: 10.1145/2184751.2184858
- [学会発表] (計 13 件)
- ① 岩田寛生, 末松直樹, 宮崎敏明, "大規模センサネットワーク構築のためのシームレスなデータ共有," 情報処理学会第 76 回全国大会(東京), 6W-2, March 2014.
- ② 小林広治, 宮崎敏明, "シナリオ記述による無線センサネットワークの機能割り当て法," 情報処理学会第 76 回全国大会(東京), 6W-3, March 2014. (学生奨励賞受賞)
- ③ 馬場大輔, Deze Zeng, 宮崎敏明, "大規模センサネットワークのためのエミュレーション環境の構築," 情報処理学会第 76 回全国大会(東京), 6W-4, March 2014.
- ④ 山口翔一, 宮崎敏明, "無線センサノードにおける省電力FPGAを用いたセンサデータ処理の提案," 情報処理学会第 76 回全国大会(東京), 6W-5, March 2014.
- ⑤ 末松直樹, 岩田寛生, 宮崎敏明, "大規模センサネットワークに好適なデータベースの比較検討," 情報処理学会第 76 回全国大会(東京), 6W-8, March 2014.
- ⑥ 伊藤隼佑, Deze Zeng, 宮崎敏明, "大規模センサネットワーク向けユーザインタフェースとマッシュアップサーバの検討," 情報処理学会第 76 回全国大会(東京), 3X-1, March 2014. (学生奨励賞受賞)
- ⑦ H. Iwata, T. Miyazaki, and N. Suematsu, "Schema in Cassandra for Large-scale Sensor Networks," IEEE student session in 2013 Tohoku-Section Joint Convention of Institutes of Electrical and Information Engineers, Japan, (Aizu-Wakamatsu), 1B10, Aug. 2013.
- ⑧ K. Kobayashi, and T. Miyazaki, "A Dynamic Role Assignment for Wireless Sensor Nodes," IEEE student session in 2013 Tohoku-Section Joint Convention of Institutes of Electrical and Information Engineers, Japan, (Aizu-Wakamatsu), 1B11, Aug. 2013.
- ⑨ S. Yamaguchi, and T. Miyazaki, "Development of Wireless Sensor Node using FPGA," IEEE student session in 2013 Tohoku-Section Joint Convention of Institutes of Electrical and Information Engineers, Japan, (Aizu-Wakamatsu), 2B04, Aug. 2013.
- ⑩ 五十島洋, 宮崎敏明, "マルチシンク無線センサネットワークにおける通信の信頼性を考慮したジオメトリックルーティングの提案," 情報処理学会第 75 回全国大会(仙台), 2Y-7, March 2013.
- ⑪ 笠間勇輝, 宮崎敏明, "室内における赤外線センサを用いた複数人の移動軌跡推定法の提案," 情報処理学会第 75 回全国大会(仙台), 4V-1, March 2013.

- ⑫ 笠間勇輝, 宮崎敏明, “赤外線センサを用いた室内の人数と移動軌跡の同時推定,” 情報処理学会第 74 回全国大会(名古屋), 1X-5, March 2012.
- ⑬ 五十島洋, 宮崎敏明, “マルチシンク無線センサネットワークにおけるパケット送出手のスケジューリング,” 情報処理学会第 74 回全国大会(名古屋), 1X-7, March 2012.

[産業財産権]

○取得状況 (計 1 件)

名称: センサ装置、センシング情報収集システム、センシング機能代替方法およびセンシング機能代替プログラム,

発明者: 宮崎敏明

権利者: 会津大学

種類: 特許

番号: 特許第 5099777 号

取得年月日: 2012 年 10 月 5 日

国内外の別: 国内

[その他]

ホームページ等

<http://coll.u-aizu.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

宮崎 敏明 (MIYAZAKI, Toshiaki)

会津大学・コンピュータ理工学部・教授

研究者番号: 70404895