

平成 29 年 6 月 19 日現在

機関番号：17701

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26330108

研究課題名(和文) センサネットワークの稼働時間改善および低コスト実装に関する研究

研究課題名(英文) Operating Time Improvement and Low-Cost Implementation of Wireless Sensor Network

研究代表者

重井 徳貴 (Shigei, Noritaka)

鹿児島大学・理工学域工学系・准教授

研究者番号：90294363

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：第一に、無線センサネットワーク(WSN)の稼働時間の改善のために、複数の基地局を用いるモデルにおいて基地局の配置決定と収集スケジューリングの効果的な手法、および、移動型センサノードを導入したモデルにおいてバッテリー残量を考慮した手法などを開発した。第二に、信号処理ユニットを安価、省電力、高性能に実現するために、ニューラルネットに基づく複雑な判別を行う比較器とそのアナログ回路を開発した。第三に、移動型センサノードを、市販の安価なデバイスを活用して安価に実装し、位置推定の精度について検証した。最後に、能動的なWSNの応用として、ユーザの感覚に基づく強化学習を用いたエアコンの適応的制御を提案した。

研究成果の概要(英文)：Firstly, in order to improve the operating time of WSN (Wireless Sensor Network), this research developed an effective algorithm for determining the arrangement of the base stations (BSs) and an effective data collection scheduling algorithm for WSN model with multiple BSs. Secondly, as low-cost, power-efficient and high-performance implementation of signal processing unit, comparators with multiple input signals based on neural network and their analog circuit implementation were developed. Thirdly, mobile sensor nodes were cheaply implemented by using commercially available cheap devices and the accuracy of its location estimation is investigated. Finally, as applications with active operation, the controller of air conditioners based on user sensations was developed by using reinforcement learning, which is one of the machine learning methods.

研究分野：情報通信

キーワード：無線センサネットワーク 移動型センサノード 稼働時間の改善 ニューラルネットワーク 判別回路  
位置推定法 強化学習 エアコン制御

## 1. 研究開始当初の背景

無線センサネットワーク (Wireless Sensor Network: WSN) はスマート社会実現のための基盤技術の一つであるが、WSNの構築法と活用法の両面において進展が望まれている。WSNの構築法においては、長期間稼働が求められている。センサ端末は容量が有限のバッテリーで稼働するため、WSNの稼働時間延長のためには、個々のノードが独立に省電力性を追求するのではなく、全ノードの稼働時間を均一にすることが必要である。一方、活用法に関しては、見える化など受動的な活用法だけでなく、収集データを能動的に活用し実環境にフィードバックできるような枠組みの実現が望まれている。

WSNにおいて、自律的に移動可能なモバイルノードを導入した MWSN (Mobile WSN) 注目されている。モバイルノードの導入は、従来の WSN の能力を強化し、通信環境のサポートによる固定ノードの省電力化やセンシングエリアの改善などのメリットがある。省電力化に関しては、移動と通信にかかる消費エネルギーを最小化することで、総消費電力の低減を行うモバイルリレーが提案されている [El-Moukaddem 他 2010]。また、少ないノードで広い観測領域をカバーする場合に、観測データ転送のためのネットワークを少ない電力で構築する手法が検討されている [岩成他 2011]。しかしながら、これらの手法では、バッテリー残量が考慮されておらず、必ずしも WSN の稼働時間が最大化されるとは限らない。

ZigBee に準拠したセンサ端末が多く量産化されている。これらは、処理ユニットとしてマイコンを搭載しているが、その処理能力は高くない。一方、処理ユニットを、低消費電力かつ安価なデバイスで回路化し実装することは、コスト面、消費電力、処理能力、全ての面で魅力的である。しかしながら、これまで、回路化による実装に関しては、処理能力の改善が主であり、コスト面や消費電力の観点からのアプローチは少ない。モバイルノードは、センシングと通信の機能に加え、移動のための位置推定や移動制御の機能が必要となる。そのため、その実装は固定ノードのものに比べ高コストとなることから、安価な実装の実現が望まれる。

## 2. 研究の目的

前述のように、スマート社会実現の基盤技術であるセンサネットワークにおいては、稼働時間を改善する技術、低コスト・省電力・高性能な実装法の実現、および能動的な WSN アプリケーションの実現が望まれている。これらのことに鑑み、本研究では、以下を具体的な目的として、研究を遂行した。

### (1) WSN の稼働時間改善に効果的なネットワーク構成および通信手法の実現

固定のセンサノードのみから構成されるモデルにおいて、稼働時間が従来法よりも優

れた手法を実現する。

### (2) MWSN の稼働時間改善に有効なモバイルノードの制御・通信手法の実現

自律的に移動可能なセンサノードを導入したモデルにおいて、稼働時間が従来法よりも優れた手法を実現する。

### (3) センシングデータ処理ユニットの安価、省電力、高性能な実装法の実現

アナログのセンサ信号の処理において、マイコンよりも効果的な実装法を回路化により実現する。

### (4) 移動型センサノードの安価な実装法の実現

安価な市販のデバイス等を用いた移動型センサノードの安価な実装法について検討し、有効性を示す。

### (5) 能動的な WSN アプリケーションの実現

アプリケーションとして、エアコンの適応的制御を実現する手法、および通行・個人判定を行うシステムについて検討する。

## 3. 研究の方法

前述の(1)~(5)のそれぞれの目的について、以下のように研究を遂行した。

### (1) WSN の稼働時間改善に効果的なネットワーク構成および通信手法の実現

シンク周辺の消費電力が大きくなる問題に対処するために複数のシンクを用いるモデルを考え、シンクの配置、データ収集のスケジューリングに関して効果的な手法を検討した。

### (2) MWSN の稼働時間改善に有効なモバイルノードの制御・通信手法の実現

(2-1) データを集積する「シンク」と観測ノードである「ソース」は固定であり、その他のノードが移動可能なモデルについて検討した。移動と通信にかかる消費エネルギーを最小化することで総消費電力の低減を行うモバイルリレーにおいて、バッテリー残量を考慮した手法および転送経路の初期構築法について検討した。

(2-2) シンクのみ固定でそれ以外のノードはソースであり移動可能なモデルについて検討した。従来法である仮想レールの改善手法、仮想レールと理想移動方式のハイブリッド手法、パラメータ最適化へのメタヒューリスティクスの導入について検討した。

### (3) センシング信号処理ユニットの安価、省電力、高性能な実装法の実現

ニューラルネットワークに基づく比較回路およびそのアナログ回路による実装について検討し、センシングデータを用いた応用問題に適用し、有効性について検証した。また、焦電型赤外線センサのセンシングデータを省電力で送信するデジタル回路による処理方式について検討した。

### (4) 移動型センサノードの安価な実装法の実現

安価な市販のモデルカー、センサ、無線通信デバイス、FPGA などを用いて、自律移動

機能を有するセンサノードを作成し、位置推定の性能について検証した。

#### (5) 能動的な WSN アプリケーションの実現

環境情報に加えユーザからの感覚的入力に基づき快適性と省エネを両立させる制御の方策を適応的に獲得する手法について検討し、数値実験によりその有効性を検証した。

### 4. 研究成果

前述の(1)～(5)のそれぞれに関する研究成果は次の通りである。

#### (1) WSN の稼働時間改善に効果的なネットワーク構成および通信手法の実現

複数のシンクを活用するモデルにおいて、シンクの効果的な配置を決定するためにメタヒューリスティクスの一つである ABC (Artificial Bee Colony) アルゴリズムの改善手法、効果的な目的関数、および複数のシンクのための収集スケジューリングを提案した。停止ノードの増加により配送率が低下する稼働時間において 47%の配送率の改善を達成した(学会発表②, ⑭, ⑳)。

#### (2) MWSN の稼働時間改善に有効なモバイルノードの制御・通信手法の実現

(2-1) 移動型ノードを活用し、移動と通信にかかる消費エネルギーを最小化することで総消費電力の低減を行うモバイルリレーの従来法は、バッテリー残量や負荷の集中を考慮していないため、稼働時間が必ずしも最大とまらない問題があった。はじめに、バッテリー残量を考慮した経路の初期構築法を提案し、40～50%の稼働時間の改善が可能であることとダイクストラ法を用いた手法では初期構築の成功確率を 100%にできることを示した(雑誌論文)。次に、初期構築の実装面を考慮し通信量を削減した分散アルゴリズムを提案し、ダイクストラ法と同様の結果が得られることを示した(学会発表)。更に、複数のソースがある場合に負荷が集中する問題を改善する手法を提案し、ソースの数が 2～15 の場合において、12～33%の改善が可能であることを示している(雑誌論文, 学会発表)。

(2-2) ノード全てが移動することでデータ収集時にネットワークを構築するモデルにおいて、効果的なネットワーク構築アルゴリズムを複数提案した。バッテリー残量を考慮した仮想レールを用いた手法(雑誌論文)、仮想レールを用いた手法と理想移動方式のハイブリッド手法(学会発表, )を提案し、最大で約 90%の稼働時間の改善を達成した。また、仮想レールを用いた手法に分岐レールを導入し、レールの傾きなどのパラメータの決定にメタヒューリスティクスの一つである PSO (Particle Swarm Optimization)を適用し、バッテリー残量を考慮することなく約 50%の稼働時間の改善が可能であることを示した(学会発表)。

#### (3) センシング信号処理ユニットの安価、高性能、省電力な実装法の実現

ニューラルネットワークに基づく比較回路に関して、まず、従来の比較器より複雑な判別ができるニューラルネットワークを用いた比較器とオペアンプを用いた安価に実装可能なアナログ回路を提案し、物体のサイズを高速に判別できることを示している(学会発表, )。そして更に、この手法を重心位置の判定に適用し、一般的に用いられているマイコンと AD 変換器を用いた手法と比較して約 140 倍高速に処理可能なことを示した(学会発表, , , )。

アナログ出力の焦電型赤外線センサの信号を送信する無線センサデバイスにおいて、非検出時にデータの送信を抑制するとともに無線デバイスをスリープさせるデジタル回路を設計し、約 70%の消費電力の削減が可能であることを確認した(学会発表)。

#### (4) 移動型センサノードの安価な実装法の実現

安価な市販のモデルカー、センサ、無線通信デバイス、FPGA などを用いて移動型センサノードを作成した(学会発表)。電波強度に基づく位置推定法において、教師なしニューラルネットワークの一種である Kohonen の自己組織化マップを用いた手法を提案し、従来法に比べ位置推定精度が高いことを示した(学会発表)。

#### (5) 能動的な WSN アプリケーションの実現

省エネアプリケーションに関しては、既存のエアコンに適用可能である省エネと快適性の両立を目指した強化学習に基づくユーザの感覚尺度を学習するエアコン制御システムを提案し、数値実験によりその有効性を示した(雑誌論文②, 学会発表⑥, ⑪, ⑳)。

プライバシーに配慮した手法として、焦電型赤外線センサを用いた通行方向・人物判定のためのシステムを作成し、ストリーミングデータを加工し認識を行う手法について、認識精度の評価を行った(学会発表)。

### 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 4 件)

N. Shigei, K. Matsumoto, Y. Nakashima, H. Miyajima, Improved Network Construction Methods Based on Virtual Rails for Mobile Sensor Network, International Journal of Computer, Electrical, Automation, Control and Information Engineering, 査読有, vol.10, pp.86-92, 2016.

N. Shigei, Y. Yamaguchi, H. Miyajima, Air Conditioner Control Learning Users' Sensations Based on Reinforcement Learning and Its Scalability Improvement, IAENG International Journal of Computer Science, 査読有, vol.42, pp.288-295,

2015.

Y. A. S. Yudo, N. Shigei, H. Miyajima, Multiple Route Construction with Path-overlap Avoidance for Mobile Relay on WSN, Engineering Letters, 査読有, vol.23, pp.299-306, 2015.

Y. A. S. Yudo, N. Shigei, H. Miyajima, Effective initial route construction for mobile relay on wireless sensor network, Artificial Life and Robotics, 査読有, vol.20, pp.49-55, 2015.

〔学会発表〕(計2件)  
査読付き国際会議論文

M. Teramura, N. Shigei, H. Miyajima, Design of hardware circuit based on a neural network model for rapid detection of center of gravity position, Proc. of the 2016 IEEE Region 10 Conference (TENCON), pp.251-254, Singapore, 2016年11月22日~25日.

N. Shigei, J. Kawasaki, H. Miyajima, Multiple-sink approach for prolonging network lifetime of Wireless Sensor Network, Proc. of the 2016 IEEE Region 10 Conference (TENCON), pp.2796-2800, Singapore, 2016年11月22日~25日.

M. Teramura, N. Shigei, H. Miyajima, Design of Distinction Circuit Using Neuron-Based Comparators, International Workshop on Fundamental Research for Science and Technology, Pattaya (Thailand), 2016年8月22日~23日.

Y. Nakashima, N. Shigei, H. Miyajima, Hybrid of Ideal Movement Method and Virtual Rail Method for Network Construction in Mobile Sensor Network, Proc. of the 2016 IEEE International Conference on Consumer Electronics-Taiwan, pp.281-282, Nantou (Taiwan), 2016年5月27日~28日.

Y. A. S. Yudo, N. Shigei, H. Miyajima, Path-overlap Avoidance in Multiple Route Construction for Mobile Relay on WSN, Proc. of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2015. vol.I, pp.107-112, Hong Kong, 2015年3月18日~20日.

Y. Yamaguchi, N. Shigei, H. Miyajima, Air Conditioning Control System Learning Sensory Scale Based on Reinforcement Learning, Proc. of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2015. vol.I, pp.1-6, Hong Kong, 2015年3月18日~20日.

Y. A. S. Yudo, N. Shigei, H. Miyajima, A\* Algorithm-Based Initial Route Construction for Mobile Relay on WSN, Proc. of Joint 7th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems and 15th International Symposium on Advanced Intelligent Systems, pp.323-328, 北九州国際会議場(福岡県・北九州市), 2014年12月3日~6日.

国内学会発表

中島芳樹, 重井徳貴, 宮島廣美, PSOを用いた移動型センサネットワークのネットワーク構築法, 日本知能情報ファジィ学会九州支部学術講演会, 熊本高等専門学校(熊本県・合志市), 2016年12月10日.

寺村正広, 重井徳貴, 宮島廣美, ニューロンの動作を参考にした比較器を用いた判別回路の演算時間の検討, 電気・情報関係学会九州支部連合大会, 宮崎大学(宮崎県・宮崎市), 2016年9月29日~30日.

今村祥太, 重井徳貴, 宮島廣美, 中村喜寛, 移動型センサデバイスのための電波強度を用いた位置推定に関する検討, 電気・情報関係学会九州支部連合大会, 宮崎大学(宮崎県・宮崎市), 2016年9月29日~30日.

坂元浩太, 重井徳貴, 宮島廣美, 強化学習を用いたユーザの感覚的指示に基づくエアコン制御, 第32回ファジィシステムシンポジウム, 佐賀大学(佐賀県・佐賀市), 2016年8月31日~9月2日.

寺村正広, 重井徳貴, 宮島廣美, 高速に重心位置を判別できるニューラルネットワーク回路, 電子情報通信学会総合大会, 九州大学伊都キャンパス(福岡県・福岡市), 2016年3月15日~18日.

馬場将太, 重井徳貴, 宮島廣美, 焦電型赤外線センサを用いた通行・個人判定, 情報処理学会九州支部 火の国情報シンポジウム, 宮崎大学(宮崎県・宮崎市), 2016年03月2日~3日.

川崎丈, 重井徳貴, 宮島廣美, 無線センサネットワークにおけるABCアルゴリズムを用いたシンクノード群の配置最適化, 日本知能情報ファジィ学会九州支部学術講演会, 東海大学熊本キャンパス(熊本県・熊本市), 2015年12月12日.

寺村正広, 重井徳貴, 宮島廣美, ニューラルネットワーク比較器を利用した直線上の重心位置判別, 電気・情報関係学会九州支部連合大会, 福岡大学(福岡県・福岡市), 2015年09月26日~27日.

中島芳樹, 重井徳貴, 宮島廣美, 理想

移動方式と仮想レール方式を組み合わせた移動型センサネットワークのネットワーク構築法, 電気・情報関係学会九州支部連合大会, 福岡大学(福岡県・福岡市), 2015年09月26日~27日.

今村祥太, 重井徳貴, 宮島廣美, 焦電型赤外線センサを用いたセンサデバイスの作成, 電子情報通信学会九州支部学生会講演会, 福岡大学(福岡県・福岡市), 2015年9月4日.

中島芳樹, 重井徳貴, 宮島廣美, 残余電力を考慮した移動型センサネットワークのネットワーク構築法, 日本知能情報ファジィ学会夏季ワークショップ, 海と夕やけ(熊本県・水俣市), 2015年8月27日~28日.

今村祥太, 宮島廣美, 重井徳貴, 無線センサネットワークのための移動型センサデバイスの開発, 日本知能情報ファジィ学会九州支部春季ワークショップ, 東海大学阿蘇キャンパス(熊本県・南阿蘇村), 2015年6月20日~21日.

寺村正広, 重井徳貴, 宮島廣美, 従来の比較器より複雑な判別ができるニューラルネットワークを用いた比較器, 電気・情報関係学会九州支部連合大会, 鹿児島大学郡元キャンパス(鹿児島県・鹿児島市), 2014年9月18日~19日.

⑳ 山口洋平, 重井徳貴, 宮島廣美, 強化学習に基づく感覚尺度を学習するエアコン制御システム, 電気・情報関係学会九州支部連合大会, 鹿児島大学郡元キャンパス(鹿児島県・鹿児島市), 2014年9月18日~19日.

㉑ 川崎文, 重井徳貴, 宮島廣美, 無線センサネットワークのためのシンクノード群の配置手法, 日本知能情報ファジィ学会九州支部春季ワークショップ, サンピア福岡(福岡県・福津市), 2014年6月21日~22日.

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

取得状況(計 0件)

〔その他〕

ホームページ等

[http://ris.kuas.kagoshima-u.ac.jp/html/100005060\\_ja.html](http://ris.kuas.kagoshima-u.ac.jp/html/100005060_ja.html)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

重井 徳貴 (SHIGEI, Noritaka)

鹿児島大学・理工学域工学系・准教授

研究者番号: 90294363

### (2) 研究分担者

宮島 廣美 (MIYAJIMA, Hiromi)

鹿児島大学・理工学域工学系・教授

研究者番号: 60132669

寺村 正広 (TERAMURA, Masahiro)

佐世保工業高等専門学校・

電気電子工学科・教授

研究者番号: 20713481

### (3) 連携研究者

なし

### (4) 研究協力者

なし