

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 8 日現在

機関番号：14701

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H02691

研究課題名(和文)低い管理コストで長期運用できる実用的な省電力無線センサネットワークの研究開発

研究課題名(英文) A Study on Low-power Wireless Sensor Networks that Operates with Low Administrative Cost

研究代表者

吉廣 卓哉 (Yoshihiro, Takuya)

和歌山大学・システム工学部・准教授

研究者番号：80362862

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,000,000円

研究成果の概要(和文)：本課題では、センサネットワークにおいて大きな消費電力を占める通信プロトコルを改良し、比較的密に配置されたセンサネットワークにおいて、限られた少数のセンサノードのみのバッテリーを定期的に交換する程度の現実的な管理コストで維持・運用できる実用的なセンサネットワーク実現技術を開発した。ノードの残存電力状況に応じて動的に経路を変更するセンサネットワークプロトコルを開発すると同時に、センサネットワークを適切に監視し、異常時には適切に対応できるセンサネットワーク管理システムを設計・開発した。

研究成果の概要(英文)：We developed a new communication protocol in combination with MAC and Routing protocols for sensor networks that enables us to maintain sensor networks with practical cost such as replacing batteries of a partial sensor nodes periodically. Our protocol dynamically and adaptively changes the collecting path of sensor data being aware of residual power of nodes to prolong the lifetime of sensor networks. Also, we designed a software that help administrators of sensor networks by collecting required data items periodically from the sensor networks and visualize it. The software enables us to watch networks and to find out the main causes of incidents in case of abnormal events.

研究分野：情報ネットワーク

キーワード：センサネットワーク MACプロトコル 経路制御プロトコル 低消費電力 ネットワーク管理

### 1. 研究開始当初の背景

近年、環境センシングをはじめとした広い応用範囲を持つことから、センサネットワーク技術が広く研究され、IEEE802.15.4 (Zigbee) 等の標準化技術もなされた。これらは、比較的低い消費電力で長期間にわたりセンサデータを収集できる。しかし、一般的に、高々1~2年程度の寿命しか持たず、実運用にあたっては頻繁なバッテリー交換が必要であるなど高い管理コストがかかる。環境センシングなど、社会を支えるインフラとしてセンサネットワークを運用するためには、現実的な低い管理コストで数年以上の長期間にわたって運用・維持できるセンサネットワークの実現が望ましいと考えるが、これを実現できる技術は現れていない。

学術においても、省電力センサネットワークに関する膨大な研究がある。一般に、センサ端末の主な電力消費は通信であり、通信方式においてはMACプロトコルが消費電力を大きく左右する。このため、多数の省電力MACプロトコルが提案されている。中でも、受信ノードが定期的にウェイクしてビーコンを送信し、これに呼応して送信ノードがフレームを送信する受信ノード主導型MACプロトコルが、高い省電力性を持つため注目されている[1]。しかし、全てのノードが同じ動作をするため、全ノードの寿命がある程度均一になる傾向があり、結果として、全ノードに対して定期的なバッテリー交換の管理コストが必要になる問題がある。また、これらのMACプロトコルはブロードキャストをサポートしないため、データ配送木を構築する既存の経路制御プロトコルとの連携が難しく、配送木を手動設定するコストも問題となる。現段階では、センサネットワークを自律的に制御してデータを定期的に集約する、管理コストの低い仕組みは実現できていない。

上記背景に対して、代表者は、受信ノード主導型MACプロトコルの無駄を極限まで省き、フレームの衝突を原則として生じないようにすると、データ配送木の葉ノードに関しては、ノード寿命を大幅に延長できることを見出した。また、本MACプロトコルに適した自律的な配送木構築プロトコルを設計することで、配送木設定の手間を省くことが可能であり、データを中継する少数のノード(以後、中継ノードと呼ぶ)のみの定期的なバッテリー交換を行うという現実的な管理コストで、社会を支える無線センサネットワークを実現できるという確信に至った。

### 2. 研究の目的

本提案では、センサネットワークにおいて大きな消費電力を占める通信プロトコルを最大限に工夫することにより、比較的密に配置されたセンサネットワークにおいて、限られた少数のセンサノードのみのバッテリーを定期的に交換する程度の現実的な管理コストで維持・運用できる実用的なセンサネットワ

ーク実現技術を開発する。

### 3. 研究の方法

本研究は、3つの技術要素(i)~(iii)の組み合わせにより実現する。

(i)MACプロトコルの設計：乾電池やボタン電池などの一般的な電源で数年以上の寿命を実現するために、MACプロトコルを設計する。現時点で最も電力効率が良い受信ノード主導型のMACプロトコルの一つRC-MACでも、20[秒]に一度、送信電力10[dbm]のビーコンを送る場合には、ノード寿命は最大1年程度となる。本研究では、RC-MACを拡張し、配送木の葉ノードではビーコン等の不要な通信を極限まで省略することにより、数年以上の寿命を達成する。一方、中継ノードでは、データの受信のための処理が必要であり、寿命の延伸には限界があるが、上記条件において1年程度の寿命を維持する。また、別途開発する経路制御プロトコルと連携させる仕組みを導入することで、配送木の自動構築を実現できる設計とする。

また、本研究で想定するノード密度が高いセンサネットワークでは、データフレームの衝突が発生すると通信性能が低下し、ノード寿命も短くなるため、衝突を避ける仕組みが必要である。受信ノード主導型MACプロトコルでは、受信ノードが定期的にビーコンを送信し、これに応じてデータフレームが送信される。従って、近隣ノードのビーコンが十分に時間をおいて送信される場合には、原則として衝突が発生しない。オーバーヘッドが低く、収束が早いビーコン送信タイミングの自律分散学習アルゴリズムを設計・開発することで、フレーム衝突を解消する。

(ii)経路制御プロトコルの設計(配送木の自律的な構築)：(i)で設計するMACプロトコルに適した経路制御プロトコルを設計することで、バッテリー交換を要する中継ノードの数をできるだけ少なくするような配送木を自律的に構築する。その結果として、配送木にかかる初期設定コストや、ノード故障時の配送木管理コストを低く抑える。経路制御プロトコルは、ネットワークの起動時やトポロジ変化時などに動作し、近隣ノードとの定期的なブロードキャスト通信により適切な配送木に収束させ、動作を終える。中継ノード数を低く抑えた配送木に短時間で収束させる経路制御プロトコルを設計し、配送木の管理・構築にかかる管理コストを最低限に抑える。

(iii)センサネットワークの運用に必要な管理ツールの開発：本研究では、センサネットワークの実用化までを目指す。実運用においては、種々の現実的なトラブルに対応するための管理ツールが必要である。管理ツールを用いて、収集されたデータや配送木トポロジ、各端末の情報(バッテリー残量等)を解析し可視化することで、ネットワーク内部の輻輳や

配送木の異状等の、管理に必要な状況把握や自動検知が可能になる。このような管理上重要なイベントを自動的に、或いは手動で検知できる管理ツールを設計・開発し、センサネットワークの実運用を可能にする。

#### 4. 研究成果

長寿命センサネットワークを実現する MAC プロトコルおよび経路制御プロトコルを設計し、シミュレーションにより性能評価を行った。MAC プロトコルの設計においては、経路制御プロトコルと連携をするために、定常状態と配送木構築状態の2状態を設けた。通常は定常状態で動作するが、ノード故障や一部ノードのバッテリー残量低下時には配送木構築状態となり、動的に経路を変更できる機能を持たせた。配送木の構築においては、一般的なセンサネットワークの配送木構築戦略とは異なり、できるだけ一部のノードに負荷を集中させ、パケットを中継するノードの数が最小になるような自律分散型の経路制御機能を設計した。つまり、ネットワーク中の葉ノードの数を最大化することで、ネットワーク全体の消費電力をできるだけ抑えた。本方式では、ネットワーク内に残存電力が少ない中継ノードが現れた場合には、適応的に経路木を再構築することで、そのノードを葉ノードに移行させ、ネットワーク内で電力を使い切るノードができる限り出ないように制御することで、ネットワーク寿命を延命した。

ネットワークシミュレータに提案手法を実装し、省電力性能を評価した。最新のセンサ端末のスペックを想定した電力モデルを構築し、本モデルを適用して消費電力性能を推定した。250~1000 ノードでの評価の結果、提案手法は従来手法である RI-MAC と比較して、大幅なネットワーク寿命の延長が可能であることを示した。また、RI-MAC ではネットワーク寿命の到来時に全ノードが均一に電力を消費しているのに対して、提案手法では中継ノードの役割を担ったノード以外は大幅に電力を残存できることがわかった。つまり、提案手法では、定期的に一部ノードのバッテリーを交換する程度の管理作業でネットワークを維持でき、管理コストを大幅に低減できることが示された。

また、MAC プロトコルの設計においてフレーム衝突および性能低下の原因となるビーコンタイミングの同期問題を解決するために、自律分散的にビーコンタイミングを調整するプロトコルの設計を行った。シンクノードからの距離に応じてビーコン送信スロットを決定し、スロット内の送信タイミングをランダム設定するアプローチを用いることで、センサネットワークにおいてビーコンの競合が少なくなり、隠れ端末等に起因するフレーム衝突が大幅に低減するプロトコルを設計した。シミュレーション評価の結果、従来手法を上回る性能を確認した。

センサネットワークの運用に必要な管理ツールの開発においては、インターネットにおけるネットワーク管理の知見をセンサネットワークに適用し、管理に必要な作業がセンサネットワークでも実施可能であることを保証できる管理ツールの開発を試みた。センサネットワークでは多くの場合、ノードがスリープするため、SNMP のような動的にクエリを発行する方式を用いることはできない。このため、管理に必要な情報（管理情報）を常時データパケットに付与して収集しておき、これらの情報を用いて異常検知や障害対応を行うことが求められる。本管理ツールのデザインにおいては、ネットワーク管理に必要な管理項目を満たすために必要十分な管理情報を特定し、最小限の負荷で管理条件を満たすことを試みた。本課題で提案した MAC・経路制御プロトコルを数年間にわたりシミュレーションした結果を、開発した管理ツールに投入して評価を行った結果、提案ツールを用いることで、インターネットにおいて必須となる管理項目の全てを管理者が実施可能であることを示した。

#### 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)

1. Akihiro Fujimoto, Yukari Masui, and Takuya Yoshihiro, Scheduling Beacon Transmission to Improve Delay for Receiver-initiated-MAC Based Wireless Sensor Networks, IPSJ Journal of Information Processing (JIP), pp. 140-147, 2018. (査読有)
2. 横谷晟人, 吉廣卓哉, 受信ノード主導型 MAC プロトコルのビーコン削減に基づいた長寿命センサネットワーク, 情報処理学会論文誌, 58(2), 473-485, 2018. (査読有)
3. Yuki Urata, Takuya Yoshihiro, Yutaka Kawahashi, Visualizing Wireless Sensor Networks for Practical Network Management, International Journal of Informatics Society (IJIS), 9(2), 53-61, 2017 (査読有)
4. 小島祥平, 吉廣卓哉, 受信ノード主導型 MAC プロトコルに基づいた管理コストが低い無線センサネットワーク, 情報処理学会論文誌, 57(2), 480-493, 2016. (査読有)

[学会発表] (計14件)

1. 浦田 佑貴, 吉廣卓哉, 川橋 裕, 情報

- ネットワーク管理運用要求に基づいた WSN の状態可視化手法の提案, 情報処理学会第 86 回モバイルコンピューティングとパーベイシブシステム (MBL) 研究会, 2018. 3. (査読無)
2. 中野雄太, 藤本章宏, 吉廣卓哉, 内尾文隆, 受信者主導型無線センサーネットワークにおける収集時間短縮のための転送負荷を考慮したビーコンスケジューリングに関する一検討, 電子情報通信学会 NS 研究会, 2018. 2. (査読無)
  3. 横谷 晟人, 吉廣 卓哉, 受信ノード主導型 MAC プロトコルに基づいた WSN のビーコン削減による長寿命化, 第 25 回 マルチメディア通信と分散処理ワークショップ (DPSWS2017), 2017. 10. (査読有)
  4. Akihiro Fujimoto, Yukari Masui, Takuya Yoshihiro, Fumitaka Uchio, Beacon Scheduling in Receiver-initiated MAC Protocols for Low-delay and Energy-efficient WSNs, IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC2017), 2017. 3. (査読有)
  5. 浦田佑貴, 吉廣 卓哉, 川橋裕, 低消費電力 MAC プロトコルのための無線センサーネットワーク管理システム, 第 50 回ユビキタスコンピューティングシステム研究発表会, 2016. (査読無)
  6. 小島 祥平, 横谷 晟人, 吉廣 卓哉, 低管理コスト無線センサーネットワークのシミュレーションによる消費電力評価, 第 50 回ユビキタスコンピューティングシステム研究発表会, 2016. (査読無)
  7. Yuki Urata, Takuya Yoshihiro, and Yutaka Kawahashi, Visualizing Wireless Sensor Networks for Practical Network Management, International Workshop on Informatics (IWIN2016), 2016. (査読有)
  8. Akihiro Fujimoto, Yukari Masui, Takuya Yoshihiro, and Fumitaka Uchio, Scheduling Beacon Transmissions in Receiver-Initiated MAC Protocols for Low-Delay Wireless Sensor Networks, The Ninth International Conference on Mobile Computing and Ubiquitous Networking (ICMU2016), 2016. (査読有)
  9. Masato Yokotani, Shouhei Kojima, Takuya Yoshihiro, Constructing Delivery Tree for Low-cost Management Sensor Networks, The Ninth International Conference on Mobile Computing and Ubiquitous Networking (ICMU2016), 2016. 10. (査読有)
  10. 横谷 晟人, 吉廣 卓哉, 受信ノード主導型 MAC プロトコルのビーコン削減に基づいた長寿命センサーネットワーク, マルチメディア通信と分散処理ワークショップ (DPSWS2016), 2016. (査読有)
  11. 横谷晟人, 吉廣卓哉, 管理コストセンサーネットワークにおける障害発生時の部分的な配送木再構築手法, マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2016) シンポジウム, 2016. 7. (査読無)
  12. 榎井優香里, 藤本章宏, 吉廣卓哉, 内尾文隆, 無線センサーネットワークの受信者主導型 MAC プロトコルにおける遅延を低減するビーコンスケジューリング手法, 電子情報通信学会ネットワークシステム研究会, 2016. 3. (査読無)
  13. 横谷 晟人, 吉廣 卓哉, 管理コストが低い長寿命な無線センサーネットワークにおけるトポロジ変化時の部分的な配送木の再構築手法, 第 23 回 マルチメディア通信と分散処理ワークショップ (DPSWS2015), 2015. 10. (査読無)
  14. 小島祥平, 吉廣卓哉, 低管理コストな無線センサーネットワークに向けた中継ノードの少ないデータ配送木の構築手法, マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2015) シンポジウム, 2015. 7. (査読無)
- [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://www.wakayama-u.ac.jp/~tac/>
6. 研究組織
    - (1) 研究代表者  
吉廣 卓哉 (YOSHIHIRO, Takuya)  
和歌山大学・システム工学部・准教授  
研究者番号: 80362862
    - (2) 研究分担者  
川橋 裕 (KAWAHASHI, Yutaka)  
和歌山大学・学術情報センター・講師  
研究者番号: 50304192

藤本 章宏 (FUJIMOTO, Akihiro)  
和歌山大学・学術情報センター・助教  
研究者番号：30711551

(3) 連携研究者  
該当なし

(4) 研究協力者  
該当なし