

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 5 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2014

課題番号：24650026

研究課題名(和文) 自然環境負担の小さいサステイナブルセンサーネットワークの構築法

研究課題名(英文) Methodology of Building Sustainable Sensor Networks with Less Nature Damage

研究代表者

渡辺 尚 (WATANABE, TAKASHI)

大阪大学・情報科学研究科・教授

研究者番号：90201201

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：自然環境の負担が小さいセンサネットワークを構築する基礎技術の開発を目的とし、A) バッテリー駆動ノードを用い省電力化等によりノードの交換回数を少なくする手法、B) エネルギーハーベスティング駆動ノードを用いバッテリー交換を不要とする手法を開発した。具体的には、A1) 集約方式の省電力化、データ正確さ、遅延の間のトレードオフ関係を明らかにした。A2) 複数シンクに分配送信する方式、および複数のネットワークを相補的に用いる方式を開発した。B1) パケット到達率を増加させるための確率的送信制御、およびレートレス符号化方式を提案した。B2) 無線電力搬送の基礎となる方式などを開発した。

研究成果の概要(英文)：This project developed fundamental technologies for the sustainable sensor networks to mitigate burden to Nature. It included 2 approaches; A) development of power saving protocols for sensor networks with battery driven nodes only to reduce the number of exchanges of nodes, and B) development of data transmission protocols for networks with energy harvesting nodes. For more detail, A1) tradeoff between energy, accuracy and delay was discussed to show the applicability of methods, A2) protocols to disseminate data to several sinks and schemes employing different networks coexisting in the same area to reduce power consumption were proposed, B1) for increasing delivery rate, probabilistic and rateless-coding scatterings were proposed, and B2) basic discussion on wireless power transfer was done.

研究分野：計算機ネットワーク

キーワード：センサーネットワーク 計算機ネットワーク 省電力化

1. 研究開始当初の背景

無線センサネットワーク (WSN) は、近年橋脚やビルに振動センサを取り付けた構造物モニタリングなどに応用されつつある。また日本においてもトキ等の生態観測にも応用されつつあり、効果的な環境問題対策の重要な基礎技術として期待されている。WSN 技術としては、国内外で省電力化の観点からルーティングや MAC プロトコルなどを中心に活発に機論されている。しかし、自然への負荷を小さくするためのサスティナブルセンサネットワークの構築方法を通信工学的な観点から検討する研究は国内外でなされていない。

2. 研究の目的

本研究では、自然環境への負荷が小さいサスティナブルセンサネットワークを構築する基礎技術を開発することを目的とする。本研究では、まず「人が自然領域に立ち入ることによって自然破壊が生じる」と捉え、自然領域に人が立ち入ることを極力少なくしつつ所望のセンシング機能を達成する方式を開発する。

3. 研究の方法

本研究では、以下の 3 つのアプローチによって開発を進める。

(1) 通常のバッテリー駆動 (BT) ノードを用い、省電力化等により自然領域中のノードの交換回数を少なくするアプローチ。

(2) エナジーハーベスティング駆動 (EH) ノードを用い、バッテリー交換を不要としつつ不安定な電力供給でも効率的通信を可能とするアプローチ。

(3) BT ノードと EH ノードを混在させネットワークの構築に必要なノード数を最小限にするアプローチ。

各アプローチでは、ルーティング、メディアアクセス制御、ノード同期などの通信工学的手法を開発する。

4. 研究成果

(1) 平成 24 年度の成果

H24 年度は以下の通信工学的アプローチを行った。A) バッテリー駆動 (BT) ノードを用いた場合の自然環境への負荷軽減アプローチ、B) エナジーハーベスティング駆動 (EH) ノードを用いた自然環境への負荷低減アプローチ。

① BT ノードを用いる方法

A1) 自然量の定義：バイオマスなどの非負の数値を前提として定義することとした。

A2) センサネットワークの省電力化の手法としてデータアグリゲーションやルーティングなどを考察し、特にパーシャルデータアグリゲーション (図 1) の消費電力、データ正確さ、遅延の間のトレードオフ関係を明らかにした。また、トレードオフインデックスを定義し (図 2)、消費電力、正確さ、遅延によってどのようなアプリケーションが適応できるかを考察した。(図 3)

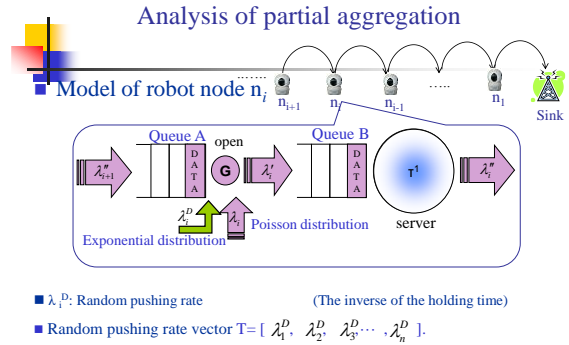


図 1 Partial aggregation

Discussions on Tradeoffs

Trade Off Index (TOI)

$$TOI = \frac{(Energy)^\beta * (Delay)^\gamma}{(Accuracy)^\alpha}$$

$\alpha, \beta$  and  $\gamma$  denote the significance of accuracy, energy and delay.

The smaller TOI value is the better.

図 2 Tradeoff Index

Total delay

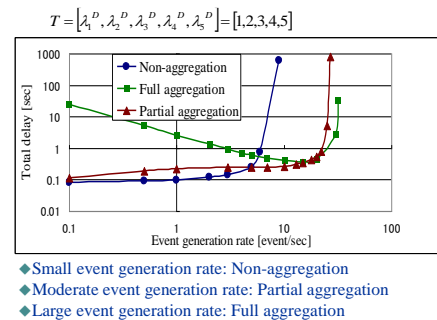


図 3 遅延に関する Tradeoff

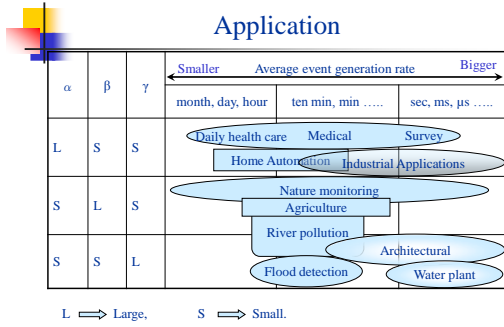


図4 Applications

② EH ノードを用いる方法

B1) 確率的にデータを収集する手法: ① エナジーハーベスティングを用いて電力供給を行うセンサノードの動作をモデル化した. ② シンクに到達するパケット数を増加させるために送信制御などを用いた方式を開発した. 特に, 送信電力を制御する方式, レートレス符号を用いる方式の基礎を考案した.

B2) 同期通信を用いてデータを収集する手法: EH ノードの発電量は小さく不安定で, 充電時間に対する通信可能な時間は非常に短く, 不安定である. この点を考慮した方式の検討を行った.

(2) 平成25年度の成果

H25年度は, 引き続き

A) バッテリー駆動 (BT) ノードを用いた場合の自然環境への負荷軽減アプローチ B) エナジーハーベスティング駆動 (EH) ノードを用いた自然環境への負荷軽減アプローチについて以下を行った.

① BT ノードを用いる方法 複数シンクに分配して送信する方式の評価検討を行い, その成果をジャーナル論文として発表した. また, データアグリゲーションの省電力化, データ正確さ, 遅延の間のトレードオフ関係を議論し, ジャーナルで発表した.

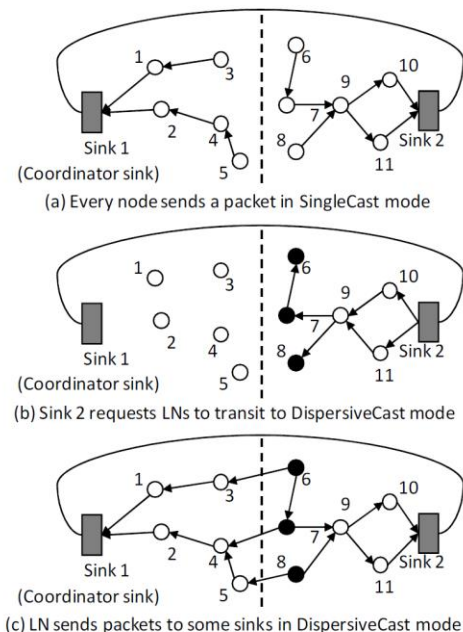


図5 複数シンクを用いる方式

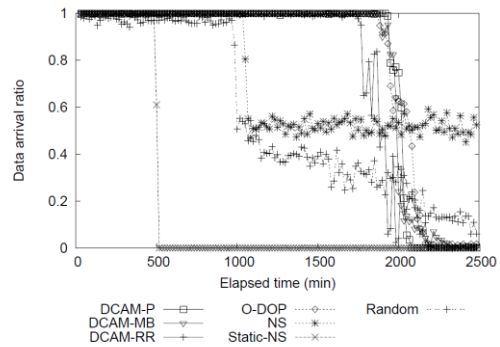


図6 複数シンクによる長寿命化

② EH ノードを用いる方法として, レートレス符号化を利用した方式を考案した. エナジーハーベスト型無線センサネットワークでは, 得られる電力が環境に依存して不安定になる問題が発生する. 本研究では, 電源が不安定な環境下でも高いデータ収集率を実現するレートレス符号化を用いたデータ収集プロトコル「Burnet」を提案した. Burnet では, 過去に発生したセンサデータや他ノードから受信したセンサデータを複数選択して XOR 演算することで符号可パケットを生成して送信する. シンクノードでは, 経路の途中で得られる電力が急激に変化して一部のセンサデータが損失したとしても, 受信した複数の符号化パケットから損失したセンサデータを復元する. 計算機シミュレーションによって Burnet を評価した結果として, 既存のエナジーハーベスト型無線センサネットワーク向けのデータ収集プロトコルよりも高いデータ収集率を達成できることを示した.

想定する環境発電型無線センサネットワーク

• 電力の充電と消費のサイクル

- 1パケットの送受信可能電力まで充電
- 受信状態を一定期間も受ける
- パケットをブロードキャスト送信
- 充電の再開
- ACKは使用しない

• 送信ノードは受信ノードがパケットを受信したかどうか分からない

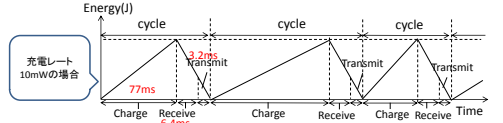


図7 EH センサーネットワーク

## 提案方式 Burnet

### ・レートレス符号化を用いたデータ収集方式 Burnet

- センサードは各パケットを一度のみ送信
- センサードのキューが空の時、送信済みパケットから複数のパケット情報を持つレートレス符号化パケットを生成し、送信

- ACKは使用しない

- 利点

- ・符号化パケットから損失パケットの復号が可能
- ・重複パケットによる無駄な通信を削減

図 8 Burnet

### (3) 平成 26 年度の成果

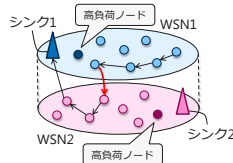
平成 26 年度は、バッテリー駆動 (BT) ノードからなるセンサーネットワーク (BT ネットワーク) に関しては、複数の BT ネットワークが混在する環境下において両者を相補的に用いて省電力化を図るルーティング方式を考案した。また、エナジーハーベスティング駆動 (EH) ノードからなるセンサーネットワーク (EH ネットワーク) に関しては、無線電力搬送の基礎となる方式などを検討した。さらに、単純なセンサーからのデータだけではなく、各種機器からのデータを配信する M2M ネットワークへの適応を検討し、輻輳を回避し無駄な電力消費を削減する方式を開発した。これらについて、2014 IEEE International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), 2015 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 電子情報通信学会ネットワークシステム研究会, 電子情報通信学会総合大会などで発表し、成果を社会的に公表した。

## 複数WSN間協調

- ・同一領域内に複数のWSNが存在
- ・他WSNのパケットを転送し負荷を分散
- ・互いに寿命を延長 [1]

### ■問題点

- 異なる周波数帯を使用しているWSN間では通信できない
- WSNとWSNを繋ぐためのインターフェースが必要



[1] "Prolonging network lifetime with multi-domain cooperation strategies in wireless sensor networks," K. Benkei, et al., *Ad Hoc Networks*, 2010

2014/12/16

研究進捗報告

3

図 9 複数の BT ネットワークを利用する方式

## 基本性能評価結果

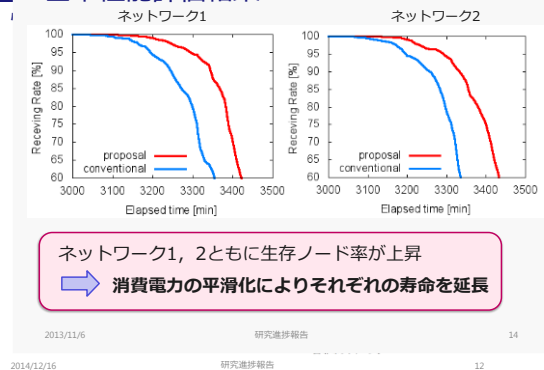


図 10 複数 BT ネットワークによる省電力化

### (4) 期間全般にわたる成果

本研究期間全体としては、自然領域に人が立ち入る可能性を少なくする BT ネットワークルーティング、メディアアクセス制御方式、エナジーハーベストを用いる EH ネットワークルーティング、メディアアクセス制御などの技術を開発し、自然環境への負荷を抑制するセンサーネットワークの基礎的知見が得られた。また、近年注目されつつある M2M や IoT への展開をも検討できた。その一方で、BT ノードと EH ノードが混在する BT-EH ネットワークについては、机上検討に留まった。今後は、BT-EH ネットワークの検討に加え、実用性を考えた画像や映像など大きなデータサイズを扱う方式の開発が必要であることが分かった。

## 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 3 件)

- ① Yuta Aoki, Tadao Oishi, Masaki Bandai, Munehiro Fukuda, Takashi Watanabe, "Load Balancing of Multi-Sink Sensor Networks with Asymmetric Topology and Traffic Patterns," *IEICE TRANSACTIONS on Communications*, 査読有, vol. E96-B, no. 10, pp. 2601-2614, 2013. 10. 1, [http://search.ieice.org/bin/summary.php?id=e96-b\\_10\\_2601](http://search.ieice.org/bin/summary.php?id=e96-b_10_2601)
- ② Wuyungerile Li, Shunsuke Saruwatari, Masaki Bandai, Takashi Watanabe, "Discussions on Tradeoffs of Data Aggregation in Wireless Sensor Networks," *International Journal of Computer Systems Science & Engineering*, 査読有, vol. 29, pp. 1-13, 2013. 10. 1, [http://cat.inist.fr/?aModele=affich\\_eN&cpsidt=28245020](http://cat.inist.fr/?aModele=affich_eN&cpsidt=28245020)

- ③ Masaya Yoshida, Tomoya Kitani, Masaki Bandai, Takashi Watanabe, Pai Chou, Winston Seah, "Probabilistic Data Collection Protocols for Energy Harvesting Wireless Sensor Networks" International Journal of Ad Hoc and Ubiquitous Computing, 査読有, Vol. 11, No. 2/3, pp.82-96, 2012. 6. 27, DOI : 10.1504/IJAHUC.2012.050272

[学会発表] (計12件)

- ① Keita Yamazaki, Yusuke Sugiyama, Yoshihiro Kawahara, Shunsuke Saruwatari, Takashi Watanabe, "Preliminary Evaluation of Simultaneous Data and Power Transmission in the Same Frequency Channel," the IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC2015), 2015. 3. 12, (New Orleans, USA)
- ② 荒巻敏彦, 木下和彦, 谷川陽祐, 戸出英樹, 渡辺尚, "M2M ネットワークにおける要求パケット到達率を考慮した輻射回避手法," 電子情報通信学会総合大会, 2015. 3. 10, 立命館大学(滋賀県草津市)
- ③ 井上夏樹, 木下和彦, 谷川陽祐, 戸出英樹, 渡辺尚, "不均質な無線センサネットワークにおける共有ノードを用いた協調ルーティング," 電子情報通信学会技術研究報告, NS2014-114, 2014. 10. 9, 松江テルサ(島根県松江市)
- ④ Natsuki Inoue, Yosuke Tanigawa, Kazuhiko Kinoshita, Hideki Tode, Koso Murakami and Takashi Watanabe, "Cooperative Routing Method with Shared Nodes for Overlapping Wireless Sensor Networks," Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), 2014 International, 2014. 8. 7, (Nicosia, Cyprus)
- ⑤ 稲葉友紀, 猿渡俊介, 渡辺尚, "エネルギーハーベストによって駆動する無線センサネットワークのためのレートレス符号化," DICOM02013 シンポジウム, 2013. 7. 10, 十勝川温泉ホテル大平原(北海道河東郡)
- ⑥ 荒木拓也, 猿渡俊介, 渡辺尚, "RFチップの消費電力が環境発電型WSNのデータ収集率に与える影響の考察", 2013. 3. 6, 東北大学川内キャンパス(宮城県仙台市)
- ⑦ 稲葉友紀, 猿渡俊介, 渡辺尚, "電源供給が不安定な環境発電型無線センサネットワークへのレートレス符号の適用について", 2013. 3. 6, 東北大学川内キャンパス(宮城県仙台市)
- ⑧ 稲葉友紀, 猿渡俊介, 渡辺尚, "環境発

電型シングルホップ無線通信における送信完了時間のモデル化", 2012. 9. 14, 富山大学五福キャンパス(富山県富山市)

- ⑨ Yuta Aoki, Munehiro Fukuda, Takashi Watanabe, "A Method Transmitting Data to Manage Crops Using WSNs on a Large-Scale Farm", 2012. 8. 29, Hotel Ramada Plaza Budapest (Budapest, Hungary)
- ⑩ 稲葉友紀, 猿渡俊介, 渡辺尚, "環境発電型 WSNs におけるデータ到達率向上のための送信電力制御方式について", 2012. 7. 5, 山代温泉ホテル百万石(石川県加賀市)
- ⑪ 河合佑介, 稲葉友紀, 渡辺尚, "環境発電型無線センサネットワークの送信電力制御について", 2012. 5. 17, 豊橋技術科学大学(愛知県豊橋市)
- ⑫ Wuyungerile LI, Takashi Watanabe, "Data Aggregation for Wireless Sensor Networks based on Information Criteria", 2012. 5. 17, 豊橋技術科学大学(愛知県豊橋市)

[図書] (計2件)

- ① 白鳥則郎監修, 渡辺尚・他著, "シミュレーション 第3, 4, 5章, 付録2," 共立出版, 2013, 243
- ② Wuyungerile LI, Ziyuan Pan, Takashi Watanabe, "Wireless Sensor Networks - Technology and Protocols- CHAPTER4: Tradeoffs among Delay, Energy and Accuracy of Data Aggregation in Multi-View Multi-Robot Sensor Networks," InTech, 2012, 308

[産業財産権]

- 出願状況 (計0件)  
○取得状況 (計0件)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

渡辺 尚 (WATANABE, Takashi)  
大阪大学・情報科学研究科・教授  
研究者番号：90201201

### (2) 研究分担者

萬代 雅希 (BANDAI, Masaki)  
上智大学・理工学部・准教授  
研究者番号：90377713

### (3) 連携研究者

猿渡 俊介 (SARUWATARI, Shunsuke)  
静岡大学・情報学研究科・講師  
研究者番号：50507811