

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月 25日現在

機関番号：13801
 研究種目：挑戦的萌芽研究
 研究期間：2009～2011
 課題番号：21650014
 研究課題名（和文）自然環境の負担の少ない高機能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）A Study on High Performance Sustainable Sensor Networks Less Damage to Nature
 研究代表者
 渡辺 尚（WATANABE TAKASHI）
 静岡大学・創造科学技術大学院・教授
 研究者番号：90201201

研究成果の概要（和文）：

本研究では、自然環境への負荷が小さいサステイナブルセンサーネットワークの実現を目指した基礎技術を開発した。より具体的には、自然へのダメージを小さくするアプローチとしてルーティング方式を、交換する場合には自然へのダメージを小さくするアプローチとして移動シンクを用いて領域外で回収する協調バッファリングを、自然を考慮しつつ高度なセンシング機能を実現するアプローチとしてエネルギーハーベストを用いる際のデータ収集率を向上させる方式をそれぞれ開発した。それらの成果を国内外で発表した。

研究成果の概要（英文）：

The purpose of the study is developing fundamental technologies for sustainable sensor networks, which burden less to nature. A sustainable routing method with less damage, a cooperative buffering method with mobile sinks, and a data collection method with energy harvesting were developed. The obtained results were published and presented in journals and at conferences.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	600,000	0	600,000
2010年度	1,200,000	0	1,200,000
2011年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
総計	3,000,000	360,000	3,360,000

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：サステナビリティ、ルーティング、メディアアクセス制御、協調バッファリング

1. 研究開始当初の背景

センサーネットワークは、近年例えば米国等においては橋脚やビルに振動センサーを取り付けた構造物ヘルスマonitoringなどに応用されつつある。また日本においてもトキなどの希少動物の生態観測にも応用され、徐々に実用化されつつあり、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。センサーネットワーク技術としては、国内外の会議等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、本研究のようにサステイナブルセンサーネットワークの構築方法を主として通信工学的な観点から検討する研究は国内外でほとんどなされていない。わずかにCO2削減を掲げた国際会

議 GreenCom2009 が計画されているが、CFP からはエネルギー効率化の議論が多くなされ、本研究のようなアプローチはないと考えられる。

センサーネットワークの適用分野は、気象観測、動物生態解明、農業、土木、災害復旧、防犯、医療等多岐に渡る。センサーノードの小型化も進んでいる。例えば、Duranode は 5mm 角であり、また数百万画素超小型のカメラも開発されている。将来さらに小型のセンサーノードが登場し、台風や地盤の状況をリアルタイムで観測するために上空から対象領域に散布することも可能になると考えられる。センサーノードは基本的にバッテリーを搭載しており、バッテリーが切れた場合や、ノードハードウェアが過酷な自然条件によって劣化した場合や、新たなテクノロジーによって低害高効率なセンサーノードが開発された場合等にも交換が必要となる。また、ノードの配置や回収の際には、森林などの自然環境に人や機械が立ち入ることになり、環境破壊を起こす可能性がある。その一方で、高品質のデータにより詳細な環境観測を実現したいという要求もある。

従って、これらの問題を解決してサステイナブルセンサーネットワークを構築するためには、ノードの交換回数を抑え、かつ交換する場合には自然へのダメージを小さくすると共に高度なセンシング機能を達成することが重要である。このためには、省電力を主目的とした従来技術だけでは解決不可能である。我々は、目的とする機能を達成しつつ環境破壊を最小限に抑えられる技術を開発できれば、通信技術が環境問題に貢献できるものと考えた。

2. 研究の目的

本研究では、環境モニタリング等自然環境で稼働するセンサーネットワークにおいて、自然環境への負荷が小さいサステイナブルセンサーネットワークの実現を目指した構築法 (Sustainable Sensor Networks with Less Impact to Nature) の基礎技術を開発する。

3. 研究の方法

本研究は以下の 3 つの通信工学的アプローチによって遂行した。

- 1) 自然領域のノードの交換回数を少なくし、自然へのダメージを小さくするアプローチ
- 2) 交換する場合には、自然へのダメージを小さくするアプローチ
- 3) 自然を考慮しつつ高度なセンシング機能を実現するアプローチ

4. 研究成果

- 1) 自然領域のノードの交換回数を少なくし、自然へのダメージを小さくするアプローチ

バッテリー切れ、新デバイスへの交換、過酷な自然条件でのノードハードウェア劣化などの理由でセンサーノードが使用不可能になった場合には、ノード交換が必要になる。このアプローチでは、ノード交換を少なくするようにトラフィックを制御する。すなわち、自然量が少ない領域のノードを集中的に利用する。生物学的なバイオマスなどを参考に非負の実数によって自然量を定義した。また、センサーネットワーク設置の影響により自然量が変動する機構をモデル化し、自然へのダメージを小さくするルーティングプロトコルを考案し、その特性を調査した。

- 2) 交換する場合には、自然へのダメージを小さくするアプローチ

回収ノードを領域外に配置してダメージを小さくする方法として移動シンクを用いる方式を考案した。ここでは、さらに高精細な動画などのバースト的に大容量のデータが発生する場合を想定し、他のノードの空いているメモリバッファを利用する方式 (Cooperative Buffering (CB) ; 協調バッファリング) を開発した。CB は、蓄積したデータの回収には移動体を利用するが、移動体の移動特性を考慮して回収が効率的になるように蓄積する方式である。評価の結果、種々の移動モデルにおいてその有効性が確認された。

- 3) 自然を考慮しつつ高度なセンシング機能を実現するアプローチ

自然に負荷をかけないセンサーネットワークの一手法として、エネルギーハーベスト技術とこれを適用する通信プロトコルの基礎設計を行った。エネルギーハーベスト (EH) は、環境発電とも呼ばれ、熱や光、振動などから電力を得る技術である。通常センサーネットワークでは、端末の電力源としてバッテリーが使用されているが、バッテリーの電力が枯渇するとメンテナンスによって自然界に侵入することが必要になる。これに対し、太陽光や振動、熱といった自然エネルギーから発電を行う EH は、充電と放電を繰り返すため半永久的に端末を交換する必要がないため自然へのダメージが小さくできる。その一方で、供給電力が小さく不安定なため、充電時間が長いことで通信期間が減少し、データ収集率が低下する。そ

ここで、EH を用いた無線センサーネットワークのデータ収集率を上げる方法として、①繰り返し送信する方式と②送信電力制御による方式を検討した。①に属する方法として、中継時のパケットの欠落に対応し、効率の良いデータ収集を行うため、パリティを用いて冗長にデータを送信する方式 (PPT, APT) と通信成功確率に基づいてパケットの再送を行う方式 (ERT) を提案した。計算機シミュレーションによる評価の結果、エネルギーハーベスティングを用いたセンサーネットワークにおいて、提案方式は従来方式と比較してシンクへのデータ到達率を向上させられることが分かった。また、②に属する送信電力制御による方式では、シンクから最大通信距離で 1 ホップの範囲をシンク近傍と定義し、シンク近傍内とシンク近傍外において異なる送信電力制御方式を提案した。詳細な評価は今後の課題となっている。

以上の成果を電子情報通信学会、情報処理学会等の論文誌や研究会、国際会議で発表した。

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)

2009 年～2011 年の 3 年間で、雑誌論文 8 件、国際会議 23 件、国内研究会等 72 件を発表した。以下に代表的な論文を示す。詳細は、<http://aurum.cs.inf.shizuoka.ac.jp/> を参照。

[雑誌論文] (計 2 件)

- 1) 吉田将也、木谷友哉、萬代雅希、渡辺尚、環境発電によって電力供給を行うセンサーネットワークでのデータ収集方式、情報処理学会論文誌、Vol. 52. No 3、2011、pp.997-1009、査読有。
- 2) Yu Takada, Masaki Bandai, Tomoya Kitani, Takashi Watanabe, Cooperative Data Buffering with Mobile Sinks for Wireless Multimedia Sensor Network, Information Processing Society of Japan (IPSJ), Vol. 3, 2010. 03, pp. 856-869、査読有。

[学会発表] (計 33 件)

- 1) 荒木拓也、杉山佑介、山崎景太、渡辺尚、エネルギーハーベストによる災害時無線 LAN 通信の基礎実験、電子情報通信学会総合大会、2012. 03. 20、岡山大学 (岡山県)
- 2) 稲葉友紀、渡辺尚、環境発電型 WSN おける送信電力制御を用いたデータ到達率向上について、電子情報通信学会総合大会、

2012. 03. 20、岡山大学津島キャンパス (岡山県)

- 3) 河合佑介、稲葉友紀、渡辺尚、環境発電型 WSN における送信電力制御に関する考察、電子情報通信学会総合大会、2012. 03. 20、岡山大学津島キャンパス (岡山県)
- 4) 稲葉友紀、渡辺尚、環境発電型 WSN におけるデータ到達率向上方式について、情報処理学会第 74 回全国大会、2012. 03. 06、名古屋工業大学 (愛知県)
- 5) Yusuke Kawai, Takashi Watanabe, An Optimal Sleeping Time for Pseudo-Synchronization Protocol in Energy Harvesting Wireless Sensor Networks, International Symposium on EcoTopia Science (ISETS' 11), 2011. 12. 11, Nagoya University (Aichi, Japan)
- 6) Masaya Yoshida, Takashi Watanabe, A Data Collection Protocol for Wireless Sensor Networks Powered by Ambient Energy Harvesting, International Symposium on EcoTopia Science (ISETS' 11), 2011. 12. 11, Nagoya University (Aichi, Japan)
- 7) 山崎景太、荒木拓也、杉山佑介、渡辺尚、エネルギーハーベストを用いた災害時 LAN 通信の実証的考察、WiNF 2011 第 9 回情報学ワークショップ、2011. 11. 25、豊橋技術科学大学 (愛知県)
- 8) Masaya Yoshida, Tomoya Kitani, Masaki Bandai, Takashi Watanabe, Pai H. Chou and Winston K. G. Seah, Probabilistic Data Collection Protocols for Energy Harvesting Sensor Networks, The 36th IEEE Conference on Local Computer Networks (LCN), 2011. 10. 04, Hilton Hotel (Bonn, Germany)
- 9) 吉田将也、渡辺尚、エネルギーハーベスティング無線センサーネットワークにおける確率的データ収集手法について、電子情報通信学会、2011. 10. 28、上智大学 (東京都)
- 10) 渡辺尚、吉田将也、千葉義人、エネルギーハーベストを用いた災害時情報通信について、日本社会情報学会 (JSIS&JASI) 合同研究大会、2011. 09. 10、静岡大学浜松キャンパス (静岡県)
- 11) 河合佑介、李烏雲格日榮、木谷友哉、萬代雅希、渡辺尚、無線センサーネットワークにおけるデータ集約方式に関する考察、情報処理学会マルチメディア、分散、協調とモバイル DICOM2011 シンポジウム、2011. 07. 06、天橋立宮津ロイヤルホテル (京都府)
- 12) 渡辺尚、[招待講演] 無線ネットワーク

- ングの現状と将来～時間空間周波数資源の極限利用を目指して～、電子情報通信学会、2011.05.26、機械振興会館（東京都）
- 13) 河合佑介, 李烏雲格日楽, 木谷友哉, 萬代雅希, 渡辺尚, 無線センサーネットワークにおけるデータ集約方式による省電力効果と遅延について、電子情報通信学会総合大会、B-20-28、2011.03.14、東京都市大学世田谷キャンパス（東京都）
 - 14) 千葉義人, 吉田将也, 萬代雅希, 渡辺尚, 無線センサーネットワークにおけるエネルギーハーベットの有効性に関する考察、情報処理学会第73回全国大会、2011.03.02、東京工業大学岡山キャンパス（東京都）
 - 15) 河合佑介, 李烏雲格日楽, 萬代雅希, 渡辺尚, 無線センサーネットワークにおけるデータ集約方式の省電力化効果と遅延について、情報処理学会第73回全国大会、2011.03.02、東京工業大学岡山キャンパス（東京都）
 - 16) Wuyungerile Li, Masaki Bandai, Takashi Watanabe, Discussion on Tradeoffs among Delay, Energy and Accuracy of Data Aggregation for Multi-Robot Sensor Networks, ICMA The International Conference on Mechatronics and Automation, 2010.08.04, Xi'an Renmin Square (Xi'an, China)
 - 17) 吉田将也, 木谷友哉, 萬代雅希, 渡辺尚, 環境発電によって電力供給を行うセンサーネットワークでのデータ収集方式、情報処理学会マルチメディア、分散、協調とモバイル(DICOMO2010)シンポジウム、2010.07.07、下呂温泉水明館（岐阜県）
 - 18) Takahiro Fujiwara, Takashi Watanabe, Bidirectional Communications for Damage Monitoring Using Sensor Networks in Emergency Conditions, IEEE The International Workshop on Ubiquitous and Mobile Computing (UMC 2010), 2010.06.07, Hyatt Regency (Newport Beach, California, USA)
 - 19) Takashi Watanabe, [招待講演] Ubiquitous networking - Medium Access and Routing View, The University of Washington 特別講演, 2010.04.29, The University of Washinton (Washinton, USA)
 - 20) K. Takahashi, M. Bandai, H. P. Tan, W. K. G. Seah and T. Watanabe, Least Impact Routing towards Sustainable Sensor Networks Enhanced by Energy Harvesting, The 5th International Conference on Mobile Computing and Ubiquitous Networking (ICMU 2010), 2010.04.26, Pan Pacific Hotel Seattle (Seattle, USA)
 - 21) Wuyungerile Li, Daisuke Okamura, Masaki Bandai, Takashi Watanabe, Tradeoff between Delay Energy and Consumption of Partial Data Aggregation in Wireless Sensor Networks, The 5th International Conference on Mobile Computing and Ubiquitous Networking (ICMU 2010), 2010.04.26, Pan Pacific Hotel Seattle (Seattle, USA)
 - 22) Wuyungerile Li, Masaki Bandai, Takashi Watanabe, Tradeoffs among Delay, Energy and Accuracy of Partial Data Aggregation in Wireless Sensor Networks, IEEE The International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA2010), 2010.04.20, City Water Perth Hotel (Perth, Australia)
 - 23) 吉田将也, 木谷友哉, 萬代雅希, 渡辺尚, 電力供給が不安定なセンサーネットワークにおけるデータ収集効率向上手法の検討、電子情報通信学会総合大会、2010.03.16、東北大学（宮城県）
 - 24) 吉田将也, 木谷友哉, 萬代雅希, 渡辺尚, エネルギーハーベストを用いたセンサーネットワークにおけるデータ収集方式、情報処理学会第72回全国大会、2010.03.08、東京大学本郷キャンパス（東京）
 - 25) 吉田将也, 木谷友哉, 萬代雅希, 渡辺尚, エネルギーハーベストを用いたセンサーネットワークにおける冗長データ収集について、電子情報通信学会（AN研）、AN2009-67、2010.01.21、アクトシティ浜松（静岡県浜松市）
 - 26) Wuyungerile Li, Daisuke Okamura, Masaki Bandai, Takashi Watanabe, Analysis of Partial Data Aggregation in Wireless Sensor Networks, 電子情報通信学会（NS研）、2009.10.15、熊本県立大学（熊本県）
 - 27) 高田悠, 萬代雅希, 木谷友哉, 渡辺尚, [奨励講演]移動シンクを用いた協調型データ蓄積方式、電子情報通信学会（NS研）、2009.10.15、熊本県立大学（熊本県）
 - 28) 渡辺尚, [招待講演]スマートアンテナを有効利用する無線ネットワークの現状と将来、電子情報通信学会（AP研究会）、（口頭発表）、2009.10.08、静岡大学（静岡県）
 - 29) Keita Takahashi, Masaki Bandai, Takashi Watanabe, A Routing Protocol towards Sustainable Sensor Networks for Nature Monitoring, R'09 Twin World

- Congress, 2009.09.14、Nagoya University (Aichi Prefecture)
- 30) Daisuke Okamura, Wuyungerile Li, Masaki Bandai, Takashi Watanabe, FUNDAMENTAL ANALYSIS TOWARDS PARTIAL DATA AGGREGATION IN WIRELESS SENSOR NETWORKS, The 12th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC'09), 2009.09.07, Hotel Metropolitan (Sendai, Japan)
 - 31) 渡辺尚、[招待講演]無線マルチホップネットワークの新たな潮流、電子情報通信学会(NS.RCS)、2009.07.16、北海道大学(北海道)
 - 32) 高田悠、萬代雅希、木谷友哉、渡辺尚、移動シンクを利用した協調型データ蓄積方式について、情報処理学会マルチメディア、分散、協調とモバイル(DICOM02009)シンポジウム、2009.07.08、別府温泉杉乃井ホテル(大分県別府市)
 - 33) Daisuke Okamura, Masaki Bandai, Takashi Watanabe, Discussions on Data Aggregation in Wireless Sensor Networks、情報処理学会(MBL研究会)、2009.05.07、宮古島マリンターミナル(沖縄県宮古島市)

[その他]

ホームページ等

<http://aurum.cs.inf.shizuoka.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

渡辺 尚 (WATANABE TAKASHI)

静岡大学・創造科学技術大学院・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

木谷 友哉 (KITANI TOMOYA)

静岡大学・若手グローバル研究リーダー育成拠点・特任助教

研究者番号：40418786