

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 13 日現在

機関番号：32661

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25330115

研究課題名(和文)充電機構を有するセンサーネットワークの時空間特性を考慮した最適制御方式

研究課題名(英文)Optimal control method in consideration of the spatiotemporal characteristics of the sensor network with a charging mechanism

研究代表者

佐藤 文明(SATO, Fumiaki)

東邦大学・理学部・教授

研究者番号：40273164

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)：次世代のセンサーネットワークの一つとして、充電機構を持つセンサーネットワークの研究が行われるようになってきた。しかし、環境発電によるエネルギーハーベストを利用したセンサーネットワークは、電力供給が不安定という課題がある。そのため、センサーノードがデータを送信する際に、中継ノードが常にデータを転送できる状況にないことがあった。この報告では、各センサーの発電パターンに基づいて、2次元のセンサー配置におけるルーティング方式を提案する。さらに、センサーノードの充電効率が均等でない場合における同期プロトコルについても提案する。この提案方式をシミュレーションによって評価し、有効性を確認した。

研究成果の概要(英文)：Rechargeable sensor networks have been studied as a candidate for next generation wireless sensor networks. However, power supplement of energy harvesting is unstable, which is different from battery powered network. Therefore, when a node sends data, the relay nodes are not always available for receiving or transmitting. In this paper, we propose a two-dimensional routing protocol based on the power generation pattern of the sensor node. Furthermore, we also propose a synchronization protocol to support the uneven charge-rate of the sensor node. In our protocol, each sensor node sends its power generation pattern and charge rate to the neighboring node. The information is used to decide the selection the destination node. The preliminary evaluation shows that the proposed protocols are able to achieve higher delivery ratio than the previous work.

研究分野：情報処理

キーワード：センサネットワーク ルーティング エネルギーハーベスト 同期 太陽光発電

1. 研究開始当初の背景

近年、環境モニタリングやスマートグリッド、スマートアグリなどへの応用を中心として無線センサーネットワーク (Wireless Sensor Network: WSN) が注目されている。無線センサーネットワークは、無線通信機能を搭載した小型の無線センサーノードを観測エリアに配置し、無線センサーノードから温度、湿度、照度などの情報を収集するための技術である。

一方近年では、環境発電(エナジーハーベスティング)を用いたワイヤレスセンサーネットワークが注目されている。エナジーハーベスティングとは、太陽光、熱、振動などの周りの環境から微小なエネルギー採取し、電力を得る技術である。自然環境からエネルギーを採取し、利用することができれば、従来のバッテリー駆動とは違い、エナジーハーベストによってセンサーノードに電力を供給することでバッテリーの交換が必要なくなるため、メンテナンスが必要なくなり、長期的な運用が可能になる。またメンテナンスにかかるコスト削減や電池の廃棄問題、環境に優しいクリーンな電力を生み出すことが可能である。しかしながら、自然から発電するため、発電環境に応じて電力供給が変化するので不安定であり、周囲のセンサーノードの稼働状況を把握することは難しいという問題があった。

2. 研究の目的

本研究では、電力供給が不安定であるエナジーハーベスティングを用いた無線センサーネットワークにおいて、各ノードの発電パターンを考慮したルーティングを行う通信方式を提案し、シミュレーションにより提案手法の有効性を明らかにすることである。

3. 研究の方法

本研究では、太陽光発電によるエナジーハーベストを用いたセンサーネットワークを想定している。太陽光発電では、建物や高い木などの影が太陽光パネルにかかることで、発電量が減少し、センサーノードに十分な電力が供給できなくなる場合がある。その発電パターンを送信データに付加することで、周囲のノードに発電状況を通知することができる。その情報を基に、将来の発電状況を予測して、通信が可能であるノードを宛先ノードとして選択することで、到達率を改善することができる。また、送信センサーノードと受信センサーノードとが、同期していないとセンサーデータはうまく転送されない。従って、本研究では送信ノードと受信ノードが同期をとってデータ転送を行うことで、データ到達率を向上させる。

また、センサーノードの配置について、最初は1次元に配置してそのうえでの同期方法を提案し、続いてそれを2次元に配置した際の経路の決定方法に提案し、その効果を評

価した。

4. 研究成果

(1) 発電状況共有方式

先行研究として、センサーノードの送信キューの長さに応じて、送信電力を制御するRT-TPC方式が提案されている。この方式は負荷の高いノードの送信電力を下げて、充電時間を短くして送受信頻度を高める方法により、到達率を向上させようとするものである。

我々は、RT-TPC方式に、発電状況に関する情報を伝搬させることで、宛先ノードの動作状況を推定して、受信しやすいノードに対してデータ送信を行うことで、到達率を向上させる方式を提案した。

そのアルゴリズムを図1に示す。

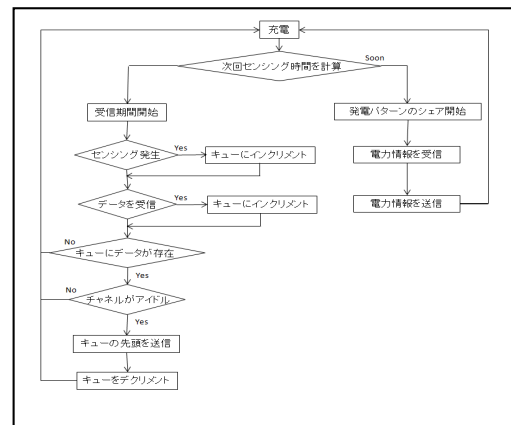


図1 発電状況の共有手順 (左半分は、従来のRT-TPC)

宛先ノードを、送信対象候補のうち、発電パターンの状況が問題ない最も遠いノードを選択して送出することとする。

従来方式とシミュレーションによる比較を行った。その結果、影の幅が大きく、速度が遅いほど提案方式の効果が出ることが分かった。

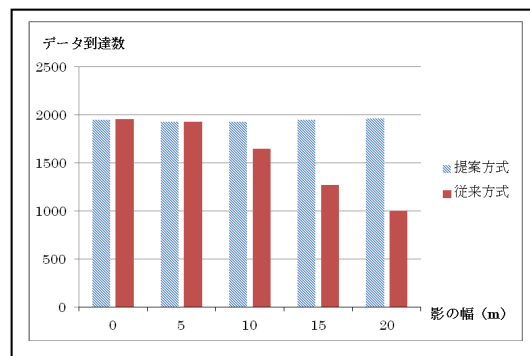


図2 影幅に対するデータ到達数の比較

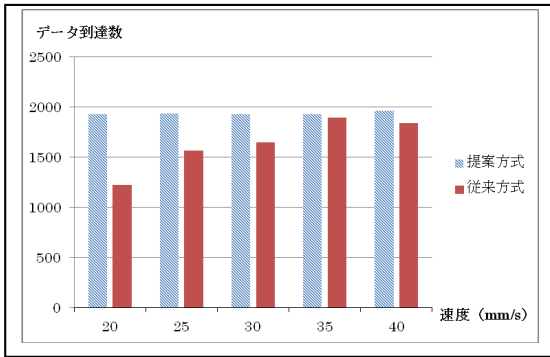


図3 影の移動速度に対するデータ到達数の比較

表1 シミュレーションパラメータ

全体の距離	200 (m)
ノード数、配置	40、一次元
影の速度	30 (mm/s)
影の幅	10 (m)
データ発生率	0.01 (packets/sec)
最大通信距離	70 (m)
最大送信電力	83.7 (mW)
受信電力	72.6 (mW)
受信レート	20 (mW)
送信時間	3.2 (msec)
受信時間	6.4 (msec)
シミュレーション時間	10000 (sec)

(2) 同期方式

エナジーハーベスト型のセンサーネットワークでは、ノードの動作が不安定であるため、受信ノード側が送信データを待っていることが難しい。従って、送信ノードと受信ノード間で、ある同期のメカニズムを導入することで、受信側が効率良くデータを受信できるようにする。

本研究では蛍の集団同期明滅を参考に進行波を発生させることで、センサーノードを同期させることとする。

まず、各センサーノードはシンクノードに対して、充電効率を伝搬させる。シンクノードは収集した充電効率の中でもっと小さい充電効率を各ノードに通知する。これが、充電 - 送信 - 受信のサイクルの時間となる。この時間が決定したのち、各ノードは、スリープ時間を挿入しながら、このサイクルに沿った動作を行っていく。また、センサーノードでは自分の受信したデータが、どのノードから送信されたかを確認して、もし受信タイミングが早すぎるときには、そのタイミングを遅らせる。また、もし遅すぎるときには、そのタイミングを早めることで、適切な送信元のデータを受信できるようにする。

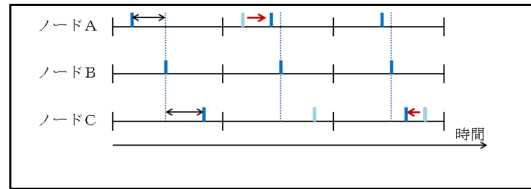


図4 進行波の生成とタイミングの調整

シミュレーションによって、データの到達率を RT-TPC と比較した。図5は、充電レートが 5mW/sec としたときの、従来方式とのデータ到達率の比較である。

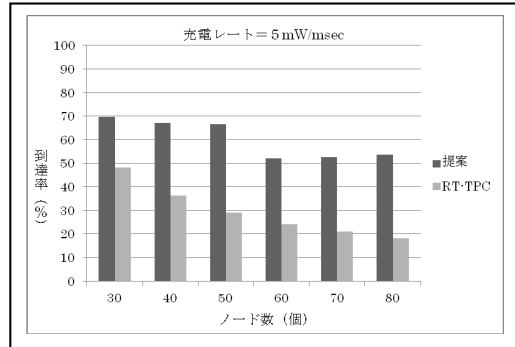


図5 データ到達率比較

表2 シミュレーションパラメータ

全体の距離	200 (m)
ノード数、配置	40~80、一次元
データ発生率	0.01 (packets/sec)
最大通信距離	70 (m)
最大送信電力	83.1 (mW/msec)
受信電力	76.2 (mW/msec)
受信レート	20 (mW/msec)
送信時間	3.2 (msec)
受信時間	6.4 (msec)
シミュレーション時間	10000 (sec)

提案方式によって、データ到達率は格段に向上することが分かった。

(3) 2次元への拡張

上記の方式は、いずれも1次元のノード配置での実験であった。センサーノードの配置では、橋梁の振動データの収集のように、一次元で設置される場合もあるが、多くは農地の管理データの収集のように、2次元で設置される場合も多い。従って、提案方式も2次元で設置される場合についても検討する必要がある。

2次元で設置されたセンサーネットワークについては、シンクノードまでの経路が複数存在し、適切な経路を選択できることがあ

る。センサーノードの発電状況が周囲に伝搬されたときに、その状況から隣接するノードが稼働していないと判断されるときは、そのノードを回避した経路を選択することができる。

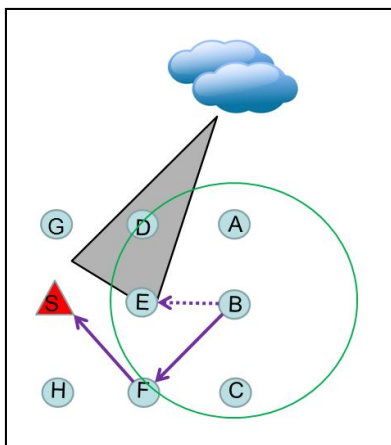


図6 送信先ノードの発電状況による選択

この経路選択方式を組み込んだ2次元センサーネットワークの到達率を評価した結果、非常に発電状況が悪い環境においても、従来方式より高い到達率を得ることができた。

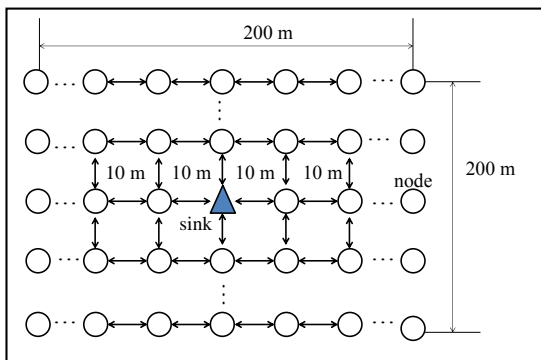


図7 2次元のノード配置

表3 2次元におけるデータ到達率比較

従来方式	21.7%
提案方式	60.4%

#### (4) センサーネットワークの応用

本方式の応用として、太陽光パネルのモニタリングシステムと故障検知システムを構築した。太陽光パネルのモニタリングシステムは、太陽光パネルに設置したセンサーノードによって、発電状況、発熱状況などをモニタリングして、稼働状況をクラウドに蓄積することができる。また、故障検知システムは、クラウド上に蓄積された発電データから、その故障が生じている状況を従来の異常値検知アルゴリズムより高い精度で検知することができる方法を開発し、実装した。

#### (5) センサー間通信のマルチチャネル化の

#### 検討

センサーネットワークのセンサー間通信において、通常の無線LANに用いられるメディアアクセス制御方式(MACプロトコル)としてCSMA/CAが用いられているが、隠れ端末問題によって性能が劣化することが知られている。本研究では、センサー間の通信に2つのチャネルを用いるマルチチャネル型のMACを導入することで、効率が改善できることを示した。従来あるいくつかのマルチチャネルMACに比べて、提案方式はシンプルであり、実現性が高い方式となっている。

#### (6) 研究成果のまとめ

本研究では、充電機構を有するセンサーネットワークにおいて、データの到達率を改善するルーティングプロトコルの開発を行った。センサーノードの発電パターンを伝搬させることで、到達可能性の高いノードを経由するルーティングを行うことができた。また、センサーノード間の同期を取るアルゴリズムを提案し、送信タイミングと受信タイミングを揃えることで、データの到達率を改善することができた。また、2次元のセンサーノードの配置においては、発電パターンを利用した経路の選択を可能として、到達率の改善を行った。これらの成果は、国際会議論文として発表している。

また、これらのプロトコルについて、実機による性能評価を行う予定であったが、安定した実装が間に合わず、性能評価までには至っていないことが、残された課題である。

#### 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14件)

清水健之郎、佐藤文明：“UAV-MANETのための安定ルート選択方式の提案”，情報処理学会論文誌，Vol.57，No.2，pp.449-458，2016。（査読有）

<http://id.nii.ac.jp/1001/00148148/>

Fumiaki Sato，“A Reputation System that Resists a Collusive Attack Focused on a Specific Target”，Journal of Information Processing，Vol.24，No.2，pp.211-216，2016。（査読有）DOI:10.2197/ipsjip.24.211

Kohei Kasori，Fumiaki Sato，“Location Privacy Protection Considering the Location Safety”，The 18th International Conference on Network-Based Information Systems (NBIS 2015)，(2015，9)。（査読有）DOI: 10.1109/NBIS.2015.24

Yohei Akiyama，Yuji Kawanishi，Masaya Iwata，Eichi Takahashi，Fumiaki Sato，Masahiro Murakawa，“Anomaly Detection of Solar Power Generation Systems Based

on the Normalization of the Amount of Generated Electricity," The 29th IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA-2015) (2015, 3). (査読有)

DOI: 10.1109/AINA.2015.198

Yohtaro MIYANISHI, Akira KANAOKA, Fumiaki SATO, Xiaogong HAN, Shinji KITAGAMI, Yoshiyori URANO, Norio SHIRATORI, "New Methods to Ensure Security to Increase User's Sense of Safety in Cloud Services," Proc. of The 14th IEEE International Conference on Scalable Computing and Communications (ScalCom-2014), pp.859-865, (2014.12). (査読有)

DOI: 10.1109/UIC-ATC-ScalCom.2014.37

Fumiaki Sato, "User Location Anonymization Based on Secret Computation," 9th International Conference of Broad and Wireless Computing, Communication and Applications (BWCCA2014), (2014, 11). (査読有)

<http://doi.ieeecomputersociety.org/10.1109/BWCCA.2014.96>

Fumiaki Sato, "Performance Evaluation of a Synchronization Protocol for Rechargeable Sensor Networks," The 17th International Conference on Network-Based Information Systems (NBIS 2014), (2014, 9). (査読有)

DOI: 10.1109/NBIS.2014.85

Keigo Nomura, Fumiaki Sato, "A Performance Study of ZigBee Network under Wi-Fi Interference," The 17th International Conference on Network-Based Information Systems (NBIS 2014), (2014, 9). (査読有)

DOI: 10.1109/NBIS.2014.86

Fumiaki Sato, "A Reputation System Resisting to Undercover Marketing," The 8th International Conference on Complex, Intelligent, and Software Intensive Systems (CISIS-2014), (2014, 7). (査読有)

DOI: 10.1109/CISIS.2014.60

Fumiaki Sato, "A Synchronization and Routing Protocol for Rechargeable Sensor Networks," The 28th IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA-2014) (2014, 5). (査読有)

DOI: 10.1109/AINA.2014.82

Kenta Miura and Fumiaki Sato: "A Hybrid Method for User Location Anonymization Based on Road Mobility Model", Int. J. Adaptive and Innovative Systems, Volume 2, No.1, pp.43-58 (2014). (査読有)

DOI:<http://dx.doi.org/10.1504/IJAIS.201>

4.061046

三浦健太, 佐藤文明: "モバイルサービスにおけるクローキングとダミーに基づく位置情報プライバシー", 情報処理学会論文誌, Vol.55, No.2, (2014, 2). (査読有)

<http://ci.nii.ac.jp/naid/110009664989>

Kenta Miura, Fumiaki Sato, "A Hybrid Method of User Privacy Protection for Location Based Services," 7th Workshop on Engineering Complex Distributed Systems (ECDS 2013), (2013, 7). (査読有)

DOI: 10.1109/CISIS.2013.79

Kazuyasu Kawashima, Fumiaki Sato, "A Routing Protocol Based on Power Generation Pattern of Sensor Node in Energy Harvesting Wireless Sensor Networks", The 16th International Conference on Network-Based Information Systems (NBIS2013), (2013, 9). (査読有)

DOI: 10.1109/NBIS.2013.78

[学会発表](計15件)

菊地亮平, 佐藤文明: "VANETにおけるジオルーティング及びDTNによるハイブリッドルーティング方式の提案", 情報処理学会第78回全国大会, (2016.3.12). 慶応義塾大学(神奈川県横浜市)

大井川由利亜, 佐藤文明: "Bloom Filterを用いたゾーンルーティングプロトコルの提案と評価", 情報処理学会第78回全国大会, (2016.3.12). 慶応義塾大学(神奈川県横浜市)

伊東拓哉, 佐藤文明: "アドホックネットワークにおけるスループットを改善するマルチチャネルMACプロトコルの提案", 情報処理学会第78回全国大会, (2016.3.12). 慶応義塾大学(神奈川県横浜市)

西部剛文, 佐藤文明: "ARに基づく省電力ナビゲーションシステムの提案", 情報処理学会第78回全国大会, (2016.3.12). 慶応義塾大学(神奈川県横浜市)

小島圭貴, 佐藤文明: "ピースの希少性を考慮したP2Pストリーミング方式", 情報処理学会第78回全国大会, (2016.3.11). 慶応義塾大学(神奈川県横浜市)

菊地亮平, 佐藤文明: "車両アドホックネットワークにおける車両密度を考慮したジオルーティング手法の提案", 情報処理学会第164回DPS研究会, (2015.9.10). 倉敷芸文館(岡山県倉敷市)

栗原和也, 佐藤文明: "共有された位置情報に基づく屋内ナビゲーションシステム", 電子情報通信学会2015年総合大会B-18-67, (2015.3.13). 立命館大学びわこ草津キャンパス(滋賀県草津市)

加曾利航平, 佐藤文明: "地域の安全度を考慮した位置情報匿名化方式の提案", 電子情報通信学会2015年総合大会B-18-7, (2015.3.13). 立命館大学びわこ草津キャンパス(滋賀県草津市)



江林怜香、韓 嘯公、宮西洋太郎、浦野義頼、白鳥則郎、金岡 晃、佐藤文明：“秘密計算に基づくクラウドサービスのセキュアな利用インタフェースの提案”，電子情報通信学会 2015 年総合大会 B-7-87, (2015.3.11). 立命館大学びわこ草津キャンパス(滋賀県草津市)

清水健之郎、佐藤文明，“UAV-MANET のための安定化ルーティングの提案”，電子情報通信学会 2015 年総合大会 B-7-24, (2015.3.10). 立命館大学びわこ草津キャンパス(滋賀県草津市)

宮西 洋太郎，韓 嘯公，金岡 晃，佐藤文明，北上 眞二，浦野 義頼，白鳥 則郎，“セキュアマルチパーティー秘密計算法におけるユーザ安心感定量化の試み～情報システムの安心性理論設立を目指して～”，情報処理学会第 162 回マルチメディア通信と分散処理・第 68 回コンピュータセキュリティ合同研究発表会 2015-DPS-162(41), pp.1-6, (2015.3.6). 法政大学小金井キャンパス(東京都小金井市)

金岡 晃，宮西 洋太郎，韓 嘯公，北上 眞二，佐藤 文明，浦野 義頼，白鳥 則郎，“実数演算可能な軽量秘密計算法の一考察”，情報処理学会コンピュータセキュリティシンポジウム 2014 (2014.10.23). 札幌コンベンションセンター(北海道札幌市)

栗原 和也，佐藤 文明：“位置情報を共有するマーカベースの屋内ナビゲーションシステム”，情報処理学会シンポジウム DICOMO2014 ,(2014.7.10). ホテル泉慶(新潟県月岡温泉)

栗原 和也，佐藤 文明：“位置情報サーバを用いた屋内 AR ナビゲーションシステム”，第 76 回情報処理学会全国大会，(2014.3.13). 東京電機大学千住キャンパス(東京都足立区)

秋山 陽平，河西 勇二，岩田 昌也，高橋 栄一，佐藤 文明，村川 正宏：“太陽光電池パネルのクラウドを利用した異常検知システムの開発”，情報処理学会シンポジウム DICOMO2013 ,(2013.7.11). ホテル大平原(北海道河東郡)

〔図書〕(計 2 件)

杉浦茂樹，久保田稔，打矢隆弘，河口信夫，佐藤文明：“C 言語”，共立出版，(2014). 175(118-140).

石田 賢治、小林 真也、齋藤 正史、佐藤 文明、寺島 美昭、南角 茂樹、山口 弘純、水野 忠則：“分散システム”，共立出版，(2015). 237(154-173).

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

佐藤 文明 (SATO, Fumiaki)

東邦大学・理学部・教授

研究者番号：4 0 2 7 3 1 6 4