

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 10 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760289

研究課題名(和文) 建設的干渉を用いた低消費電力無線センサネットワーク基盤技術に関する研究

研究課題名(英文) Study on a fundamental technology of low-power wireless sensor networks using constructive interference

研究代表者

鈴木 誠 (Suzuki, Makoto)

東京大学・先端科学技術研究センター・助教

研究者番号：20615257

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円、(間接経費) 1,050,000円

研究成果の概要(和文)：建設的干渉現象を援用した同時送信型フラッディング技術を基礎として、様々なトラフィックを効率的に同一技術で収容可能とする無線センサネットワーク技術を開発した。また、開発した通信機構を利用して、橋梁モニタリングおよび農場モニタリングに適用し、消費電力、スループットなどの観点から、十分な性能を実現できることを確認した。要求の異なる2つのアプリケーションを同一技術で高効率に実現できることから、従来の無線センサネットワークで必須であった、アプリケーションごとの作り込み作業が不要となり、開発容易化が可能であることを示した。

研究成果の概要(英文)：We have developed a reliable, efficient collection protocol, and shown that the protocol can reduce power consumption by about 90%. We have applied the protocol to two applications, which are structural health monitoring and agriculture monitoring. Although these two applications have completely different requirements, the protocol can efficiently support these applications. By using the protocol, application developers can focus on application development itself without developing communication protocols.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・通信・ネットワーク工学

キーワード：無線センサネットワーク 建設的干渉 同時送信フラッディング 省電力 時刻同期 橋梁モニタリング 農場モニタリング

1. 研究開始当初の背景

無線センサネットワークの分野では、省電力を主な目的として、MAC プロトコルやルーティングプロトコルなどに関する研究が膨大に進められている。しかしながら、実際のネットワークで必須となる、イベント検知などに必要な遅延性能および無線環境の変動に対する頑健性を確保しつつ省電力化を図ることは、以下の理由から困難である。

これまでのセンサネットワークの無線通信に関する省電力手法は、同期型と非同期型に分類できる。既存のセンサネットワークでは、簡易な方式で実現できる非同期型の省電力手法が主流となっている。非同期型では、送信頻度が極めて低いことに着目し、送信開始時にペイロードと比較して数 10 倍から数 100 倍程度もの長時間のウェイクアップ信号を付与することで、間欠受信を可能とする。しかしながら、長時間送信による消費電力の増大に加えて、トラフィックが存在しない期間のアイドルリスニングや他ノード宛ての通信のオーバーリスニングに要する消費電力が大きく、消費電力の削減効果は限定的である。

これに対して、ネットワークを構成するセンサノードの通信時間区間を同期/スケジュールする同期型プロトコルでは大幅な省電力化が可能となるものの、複雑になるためアプリケーションレベルでの利用事例は限られたものとなっている。同期型において低遅延かつ低消費電力を実現するためには、定期的収集という簡易なトラフィックであっても、ネットワークトポロジを考慮した複雑なスケジューリングが必要となるためである。また、スケジュールされた通信時間区間が固定的であるため、無線環境の変動の際に必要な再ルーティングの収束が遅く、頑健性の確保が困難となる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、無線センサネットワークのための低消費電力ネットワーク基盤技術の実現にある。「低消費電力無線センサネットワークを実現できれば、都市・環境・農業・医療など多分野への展開が現実味を帯び、新たな社会の構築に資する」という認識に基づくテーマ設定である。具体的には、建設的干渉を積極的に利用し、「定期的収集」「イベント通知」「コマンド散布」「トポロジ管理」というセンサネットワークに必要なすべてのネットワーク機能を超低消費電力に実現するネットワーク基盤技術を構築し、これまでのセンサネットワークに存在した消費電力的制約を打破することを目的とする。さらに、テストベッド検証を通して実環境での有効性を明確にし、これらの利用技術を発見・示唆することを

も目的とする。

3. 研究の方法

本研究は、建設的干渉を利用することで、トポロジを考慮したスケジューリングを必要としない同期型無線通信方式を構築し、「省電力」「低遅延」「頑健性」を互いに損なわずに並立させることに特色を有する。具体的には、ユニキャスト転送を基本とする既存技術に対して、建設的干渉に基づくフラッディングを基本として、「定期的収集」「イベント通知」「コマンド散布」「トポロジ管理」という無線センサネットワークに必要なすべてのネットワーク機能を再構築する点に特徴がある。

建設的干渉とは、複数ノードが同一内容の packets をシンボル長の 1/10 程度以下のタイミング誤差で送信することによって生じる現象である。建設的干渉が発生する場合には、複数ノードが同時送信するにも関わらず、パケットロスを発生させることなく正しく受信可能となる。つまり、1 台のノードの送信後、他のノードが「受信直後に同一パケットを転送」を繰り返すことで、パケットロスを発生させることなく、フラッディングを実現できる。

一般に、フラッディングは、送受信が不要なノードまでもが送受信に参加するため消費電力の増大を伴うと考えられている。しかしながら、フラッディングにかかる電力は、衝突回避のためのバックオフやキャリアセンスなどが大部分である。本研究は、建設的干渉を利用する場合には、衝突回避のための仕組みを完全に除去可能であり、不要な送信にかかる電力を考慮しても、消費電力の削減が可能であることを新たに認識したことを最大の特徴としている。

本研究は、以下の 3 つのタスクから構成される。

(1) 低消費電力・低遅延・頑健な建設的干渉利用型ネットワーク基盤技術の開発

既存の通信プロトコルでは、先述の通り、低遅延と頑健性を確保したまま低消費電力化を実現できない。

本研究は、建設的干渉に基づくフラッディングを利用すればユニキャスト転送に基づく通信と比べても低消費電力化が可能であることに着目し、フラッディングを基本とする通信によって、低消費電力に頑健性を確保する点に特色がある。また、高精度時刻同期技術を援用することで複数ノードの同時送信開始時の建設的干渉までもが実現できることに着目し、

イベント通知およびトポロジ管理までもを実現する点にも特色がある。

(2) 高精度時刻同期機構統合型オペレーティングシステムの開発

現存する無線センサノード向けオペレーティングシステムはオーバーヘッドの削減のためにベストエフォートによるタスク管理を行っている。このため、複数タスク存在下では、タスク実行タイミングに不確実性が存在する。建設的干渉を利用するには、すべてのノードで確定的なタイミングで同時送信を開始することが必要となるため、既存のオペレーティングシステムでは対応できない。

本研究は、CPU が具備すべきハードウェア支援までも詳細に検討しつつ、ネットワーク全体で同期されたタイマ/スロット化機構をアプリケーションに提供することで、複数タスクの存在下においても、確定的な同期タスク実行を実現する点に特色を有する。また、本ネットワーク基盤技術では、マルチホップ通信を行う際にもルーティングが不要といった簡略化が可能である。センサノードに必要なメモリ容量の削減など、センサノードのハードウェアの簡略化が可能であることを示す点にも特色がある。

(3) 構造ヘルスマモニタリングを対象とした実証実験

実環境において本研究の有効性を明確にするために、構造ヘルスマモニタリングを対象とした実証実験を行う。構造ヘルスマモニタリングでは、数ヶ月程度に1度の測定が行われる。この際、測定可能期間を確保するために非測定時の待機電力を低減することが課題となっている。これに向け、非測定時のネットワーク維持管理に本研究成果を適用し、待機電力削減および頑健性向上について有

効性を明らかにする。本研究は、基盤技術の開発だけではなく、実証実験を通して、基盤技術の有効性を検証することに特色がある。

4. 研究成果

無線センサネットワークの制約を大幅に緩和する技術が同時送信型フラッディングである。同時送信型フラッディングの転送プロセスを図1に示す。

Initiator と呼ばれる1台のノードがパケットの転送を開始し、Receiver と呼ばれる他のノードは無線通信モジュールをオンとしパケットの受信を待機する。パケットを受信したノードは、リレーカウントと呼ばれるフィールドのインクリメントのみを

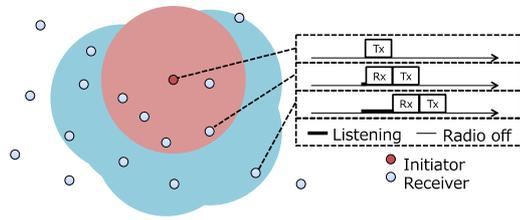


図1 同時送信フラッディング

を行い、パケットを転送し、次のパケットの受信を待機する。転送の際、バックオフ遅延の挿入やパケットヘッダのソースノードアドレスの更新などは行わない。それぞれのノードは、自ノードの転送回数があらかじめ設定した回数となるか、同時送信型フラッディングフェーズがタイムアウトとなるまで、この手順を継続する。

ノードは、同時送信型フラッディングを終了させた際に無線通信モジュールをオフとする。同時送信型フラッディングでは、バックオフやロングプリアンブルが存在しないため、パケットをネットワーク全体に単一パケット送信時間の数倍程度で到達させることができる。

本研究では、このような同時送信型フラッディングを基礎として基盤技術の構築を行う。

(1) 設計

Choco は図2に示されるように、スロット型の通信を行い、同時送信型フラッディング上にスロットスケジューラと省電力制御機構を備える。シンクノードは、全てのセンサノードのトラフィックやパケットロス状況を考慮し、スロット割り当てを行うとともに、各ノードの省電力モードの指定を行う。スロット長は固定であり、スロットの先頭に最大1つのアクティブフェーズを有する。

パケットには、時刻同期パケット、コントロールパケット、データパケット、スリープパケットの4種類存在する。シンクノードは、定期的に時刻同期パケットを送信し、全てのノードを同期させる。時刻同期パケットにはスロット番号が含まれており、スロット番号の同期を行っている。センサノードは、送信モード、待機モード、スリ

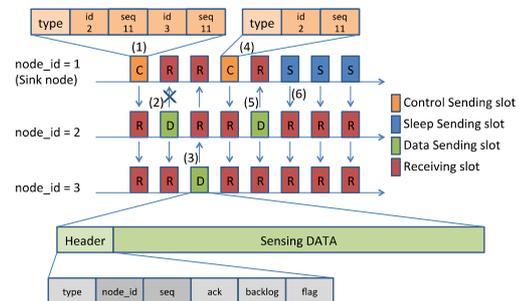


図2 Choco の設計

ープモードの3つのモードが存在し、シンクノードからのコントロール packets およびスリープ packets を受けて、これらのモードを切り替える。

Choco の提供する API には、`choco_send()`、`choco_on_recv()`、`choco_get_slot()`、`choco_process_yield()` が存在する。センサノードは `choco_send()` によって、ローカルのバッファに packets を蓄積し、自身が所有者となるスロットにおいて送信する。packets がシンクノードに到達した時、シンクノードにおいて、`choco_on_recv()` が実行される。`choco_process_yield()` は、指定したスロットの、アクティブフェーズが終了した後にタスク実行が再開される。

(2) 評価

図3に、50台によって構成されるテストベッドにおいて消費電力を評価した結果を示す。

図に示されるように、CTP と Choco のデューティ比の差異は、IPI が短い場合には小さいが、IPI が長くなるにつれて大きくなる。Choco は CTP と比較して、IPI が 10s の場合には、1.7 倍 (CTP: 9.4%, Choco: 5.3%), IPI が 300s の場合には 14.7 倍 (CTP: 2.5%, Choco: 0.17%) 高い消費電力効率となる。

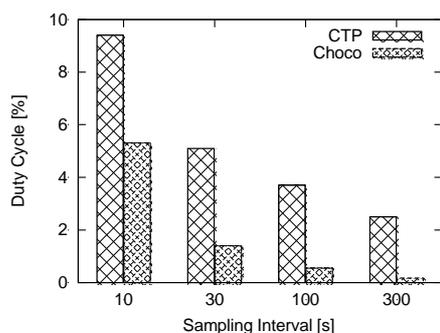


図 3 消費電力評価

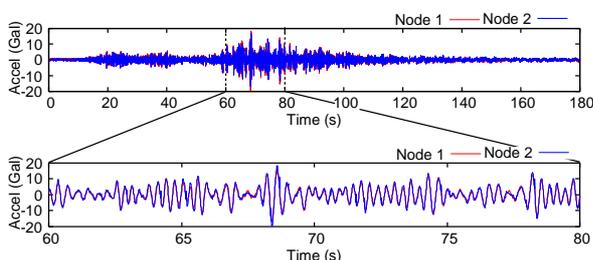


図 4 構造モニタリング実験において取得した加速度波形

(3) 実証実験

本技術を利用して、農場モニタリングおよ

び橋梁モニタリングといったアプリケーションで実証を行った。橋梁モニタリングにおいては、レインボーブリッジにおいて 40 台、都内の人道斜張橋において 24 台を利用して行った。これらのトラフィックについて、十分なスループットで収集可能なことを、実フィールドにおいて確認した。構造モニタリングにおいて取得した加速度波形を図 4 に示す。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

鈴木 誠, 森川 博之, "無線センサネットワークにおける時刻同期誤差分散の推定手法" 電子情報通信学会論文誌, Vol. J95-B, No.11, pp.1471-1479, Nov. 2012.

〔学会発表〕(計 9 件)

1. M. Suzuki, Y. Yamashita, and H. Morikawa, "Low-Power, End-to-End Reliable Collection using Glossy for Wireless Sensor Networks" in Proceedings of IEEE 77th Vehicular Technology Conference (VTC2013-Spring), Dresden, Germany, Jun. 2013.

2. 山下 靖貴, 鈴木 誠, 佐藤 弘之, 鈴木 亮平, 永田 智大, 森川 博之, "同時送信型フラッド型利用型収集プロトコルの実験評価" 電子情報通信学会総合大会, B-19-19, Mar. 2013.

3. 鈴木 誠, 山下 靖貴, 森川 博之, "Choruscast 型転送方式による省電力・高信頼無線マルチホップネットワーク," 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-19-37, Sep. 2012.

4. 山下 靖貴, 鈴木 誠, 森川 博之, "Choruscast 型転送方式を用いたエンド・ツー・エンド信頼型収集プロトコルの初期的評価," 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-19-38, Sep. 2012.

5. T. Shimojo, Y. Tashiro, T. Morito, M. Suzuki, D. Lee, I. Kondo, N. Fukuda, and H. Morikawa, "A Leaf Area Index Visualization Method Using Wireless Sensor Networks," in Proceedings of SICE Annual Conference 2013 (SICE2013), Nagoya, Japan, Sep. 2013.

6. M. Suzuki, "Invited: Lessons Learned from Field Deployments of Wireless Sensor Networks for Agriculture, Data-Center, Structural Monitoring,"

in Proceedings of SICE Annual Conference 2013 (SICE2013), Nagoya, Japan, Sep. 2013.

7. Y. Yamashita, Y. Tashiro, M. Suzuki, Y. Hase, and H. Morikawa, "Understanding the Effects of Carrier Frequency Difference in Concurrent Transmission," in Proceedings of the 11th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys 2013), No. 86, Rome, Italy, Nov. 2013.
8. 鈴木誠, 勝間田優樹, 吉田夏子, 井上雅典, 田代諭拓, 森川博之, "ルーティングレス無線センサネットワークプラットフォームの設計と評価," 電子情報通信学会技術報告書, IN2013-154.
9. 井上雅典, 鈴木誠, 森川博之, "Chocoを用いた大規模無線センサネットワークの運用評価," 電子情報通信学会総合大会, B-18-40, Mar. 2014.

〔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.mlab.t.u-tokyo.ac.jp/~makoto/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鈴木 誠 (SUZUKI MAKOTO)

東京大学・先端科学技術研究センター・助教

研究者番号：20615257

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし