

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 13 日現在

機関番号：11401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24700059

研究課題名(和文)消費電力を抑えた長期運用可能なセンサネットワーク構成法

研究課題名(英文)A Study on Long-term Operational Low Power Wireless Sensor Networks

研究代表者

内海 富博(Utsumi, Tomihiro)

秋田大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：70292365

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,700,000円、(間接経費) 510,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、農業や環境モニタリングなど様々な分野で応用可能な無線センサネットワークの省電力化について検討した。農地の圃場など広大な地域に無線センサネットワークを構築する場合、データを中継する端末の消費電力をいかに抑えるかが課題となる。

中継端末では、通常はいつデータが来るか分からないため常に無線機能をONにして待機している。この待機時間が多くの電力を消費するため、無線機能をON/OFFする間欠動作により消費電力を抑えることができる。特に、周期(ONとOFFの合計時間)が長いほど、電力を抑えつつ、データの到達率を維持する事ができることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In this study, we investigated the low power consumption of wireless sensor networks which can be applied in various fields such as environmental monitoring and agriculture. If the wireless sensor networks developed to a large area such as rice field, it is a issue that how reduce the power consumption of a terminal for relaying data.

The relay terminals, it is always waiting for receive data. Because it does not know when the data will come. This waiting time consume many power. By making intermittent operating a wireless function, it is possible to reduce the power consumption. When the frame time (the total time of ON and OFF) is longer, we found that it is possible to reduce the power consumption and maintain the arrival rate of the data.

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：ネットワークアーキテクチャ センサネットワーク 省電力 間欠動作

### 1. 研究開始当初の背景

無線センサネットワーク(以下, WSN)は, 農業支援や環境モニタリング, 設備管理, セキュリティ用監視システムなど様々な分野で応用されている. WSNを構成する端末(ノード)の多くは電池などのバッテリー駆動であるため, 構築した WSNを「いかに長期運用させるか」が課題となっており, そのための電源問題が技術的課題の1つとして認識されている. 特に農業など広域に WSNを展開する場合, ノード数が多くなり, ネットワークの規模が大きくなるにつれて, バッテリーの交換や充電を行うことが困難となる. WSNの運用可能期間(ライフタイム)を延ばすには大容量のバッテリーを用いることで対応可能であるが, バッテリーサイズが大きくなり, ノードの設置場所も制限される. そこで, 電源問題へのアプローチとしては, 現在2つのアプローチが行われている. 1つは電力の消費を抑制するアプローチ, もう1つは環境から発電してエネルギーを集めるエナジーハーベスティングである.

電力の消費を抑制するアプローチでは, 電力の消費が大きい無線通信機能の ON/OFFを制御し, ノードに間欠動作をさせる方式, 通信出力を抑える方式, できるだけ1ホップで通信できるようにする方式など様々な研究が行われている.

一方エナジーハーベスティングでは太陽光発電や風力発電の他に地上デジタル放送の電波を利用した発電方式も提案されている. しかしながら, エナジーハーベスティングのみでは, システムを運用するために十分な電力を確保することは難しい. そのため, 電力消費を抑制するアプローチと組み合わせる事で電力の需給バランスをとることができれば, 半永久的なシステムを構成することも可能となる.

センサネットワークで代表的な規格として ZigBee がある. ZigBee は, 通信速度は遅いものの低価格, 低消費電力で 100m 程度通信可能な近距離無線通信のデバイスに対応している. ZigBee のセンサデバイスは 10 分間に 1 度程度のセンシングで約 1 年間電池駆動することが製造元により確認されている. しかしながら, 広域のエリアをカバーするためには, 通信距離の制限によりメッシュ型ネットワークを構成し, データを中継する必要がある. そのため, データを中継するデバイス(ルータ)は, いつデータが来るかわからないため常に受信待機状態にあり, 電池駆動では数時間程度しか稼働出来ないことが問題である.

### 2. 研究の目的

本研究では, センサネットワークの省電力化による長期運用を可能にするため, 4 つの視点からアプローチする. それは, ネットワークトポロジ, 間欠動作の方式, ルーチング方式, データの集約である. ネットワークト

ポロジでは, 地理的な制約条件を加えたネットワークトポロジ生成, およびトポロジの違いによるネットワークのライフタイムを評価することで省電力化に適したトポロジについて明らかにする. 間欠動作の方式については, 各ノード間で同期しない非同期方式に適した MAC レイヤにおける制御方式を示し, その有効性を明らかにする. ルーチング方式では, 隣接する全てのノードへデータを送信するフラッディングベースの方式を用い, ルーチングの制御方法について明らかにする. データの集約では, パケット到達率が必ずしも 100%ではない状況下において 1 パケットに複数データを集約し, 冗長化することによりそのデータ到達率を求め, その有効性を明らかにする.

以上の 4 つの方式について, ネットワークシミュレータの QualNet に実装し, その有効性をネットワークシミュレーションにより明らかにする.

### 3. 研究の方法

#### (1) 中継ノードの間欠動作を QualNet へ実装

メッシュネットワーク構成時の ZigBee では, 中継ノードの間欠動作ができない. そのため, ネットワークシミュレータの QualNet において, 中継ノードの MAC レイヤへ間欠動作ができるように実装する. 間欠動作時に, 時間だけで強制的に Sleep してしまうと通信途中で遮断される可能性があるため, 一度通信が始まると, 通信が終了するまでは起動するようにした. 間欠動作の概要を図 1 に示す.

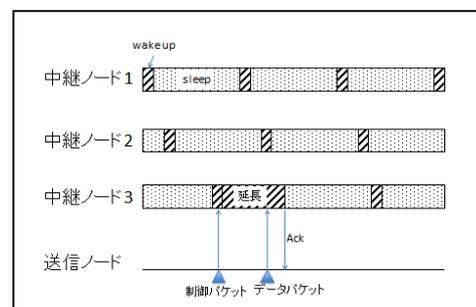


図 1 間欠動作の概要

間欠動作のパラメータとして, フレーム時間 (Wake up 時間 + Sleep 時間), デューティサイクル (Wake up 時間 / フレーム時間) を設定できるようにした.

#### (2) フラッディングベースのルーチング方式の実装

フラッディングベースのルーチング方式を QualNet へ実装する.

- ① 送信ノードは宛先情報を含む送信要求パケットをフラッディングする.
- ② 中継ノードは非同期に間欠動作を行い, 送信要求パケットを受信した場合には Wake up 時間を延長し, 宛先までの距離情報を含む応答パケットを送信ノードへ返信する.

- ③ 送信ノードは応答パケットを受信後、フラッディングまたは宛先までの距離情報を元に、近いところへマルチキャストによりパケットを送信する。

図 2 にルーチング方式を示す。

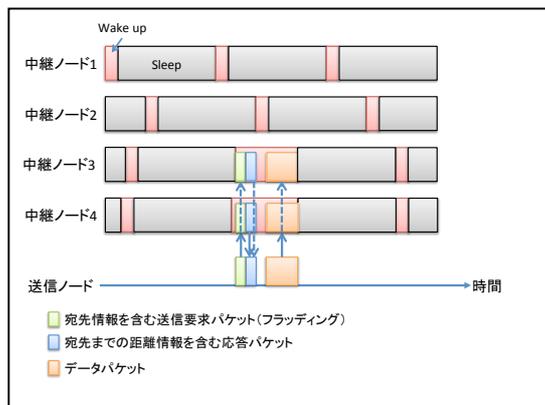


図 2 ルーチング方式

### (3) 評価モデルの検討

本研究では、圃場などの規則的な環境を想定し、中継ノードを格子状に配置したトポロジについて検討する。センサノードはデータを中継しないため、間欠動作が可能であり、周辺の中継ノードと同期を取ることで省電力化が可能である。そのため、中継ノードがデータを受け取ってからが問題となるため、センサノードについては評価から除外している。図 3 に評価モデルを示す。

発生するデータについては、圃場の環境情報など頻繁なセンシングが必要でない場合を想定して、パケット発生間隔は 1 時間に 1 パケット発生させる。

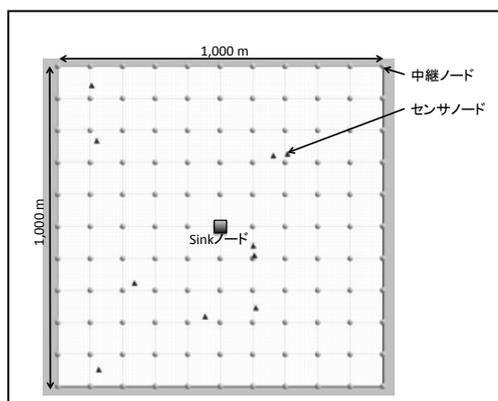


図 3 評価モデル

(2)で実装したルーチング方式を評価した結果、ネットワーク全体を管理する Sink ノードにおいて、デューティサイクルを 90%、つまり 10%だけ Sleep する状態にしないと、中継ノードのアソシエーションが切れて、ネットワークに接続できない中継ノードが多く出ることがわかった。間欠動作をしない場合であれば、中継ノードはアソシエーションリクエストによりネットワークへ参加するが、間欠動作を行うことにより、アソシエーション情報が失われて、Wake up してもネットワ

ークに参加できていない状態のため、再度アソシエーションリクエストによりネットワークに参加する手続きが必要となる。これが周囲のノードも同様な状況であれば、さらにネットワークへの参加が困難となる。また、隠れ端末問題も発生し、パケット到達率の低下を招いた。

フラッディングベースのルーチング方式では、デバッグに時間を要するため、今回は既存のルーチング方式で、デューティサイクルおよびフレーム時間がパケット到達率、消費電力に及ぼす影響を検討した。

### 4. 研究成果

予備実験として、幾つかのルーチングプロトコルの消費電力を QualNet により計算した。比較したルーチングプロトコルは、AODV(Ad Hoc On-Demand Distance Vector), OLSR (Optimized Link State Routing), ZRP (Zone Routing Protocol) である。AODVは ZigBee で標準として採用されているプロトコルで、データが発生したときに送信ルートを決定する Reactive 型のルーチングプロトコルである。OLSR はデータが発生する前にルーチングテーブルを作成する Proactive 型である。ZRP(Zone Routing Protocol) は、ネットワーク内を複数の Zone に分割し、Zone の内外で Proactive 型、Reactive 型を使い分けて経路を構築する Hybrid 型である。

評価モデルにおいて、データの発生間隔を 1 時間 (青)、1 分 (赤) とした場合の各プロトコルの消費電力を図 4 に示す。

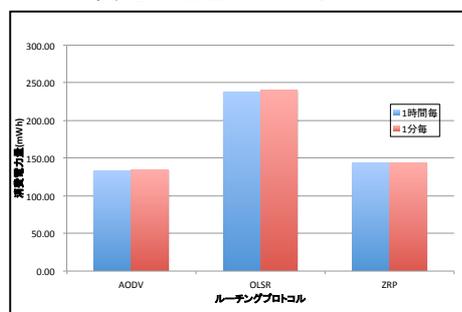


図 4 消費電力

予備実験より、AODV ではデータが発生しない限りルーチング処理を行わないため、最も消費電力が少なく、OLSR では、データの有無に関わらずルーチングテーブルの更新処理が行われるため、その分消費電力が増加している。ZRPは Hybrid 型であることから、AODV と OLSR の間となっている。

予備実験の結果より、AODV がルーチングプロトコルとして低消費電力であること、さらに ZigBee の標準プロトコルであることから AODV のルーチングプロトコルにおいて中継ノードが間欠動作した場合に、間欠動作の間隔としてフレーム時間が消費電力量、およびパケット到達率にどのように影響を与

えるのか検討した。

(1) シミュレーション条件

表 1 にシミュレーションの条件を示す。

表 1 シミュレーション条件

シミュレータ	QualNet 5.2
エリアサイズ	1,000m×1,000m
電波到達範囲	100 m
中継ノード数	120
センサノード数	10
Sink ノード数	1, エリア中央に配置
シミュレーション時間	12 時間
パケット発生間隔	1 時間
パケットサイズ	64 Byte
ルーティングプロトコル	AODV
トポロジ	格子状
フレーム間隔	1 時間, 1 分, 1 秒

表 1 のシミュレーション条件のもとで、デューティサイクルを 10%~100%まで変化させ、そのときのパケット到達率、平均消費電力量を取得する。

(2) 消費電力

図 5 に消費電力量のシミュレーション結果を示す。

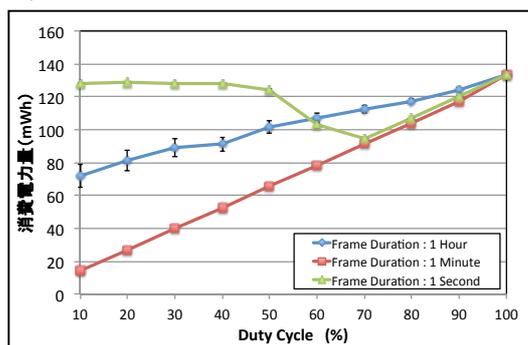


図 5 消費電力量

フレーム時間が 1 分と 1 時間では、デューティサイクルを下げていくと、比例して消費電力量が減っていくのに対して、フレーム時間が 1 秒では増加する傾向が見られた。これは、かなり短い時間に ON/OFF を繰り返すことによって、ネットワークトポロジが頻繁に変化するため、AODV が追従出来ず、ルートの確立ができないため、ルートリクエストの制御パケットの再送が頻繁に行われることにより電力を消費しているものと思われる。一方フレーム時間が長い場合、ルートが確立されてから、一定時間は維持できるため、デューティサイクルに応じて消費電力量が削減できたものと思われる。

(3) パケット到達率

図 6 にパケット到達率のシミュレーション結果を示す。

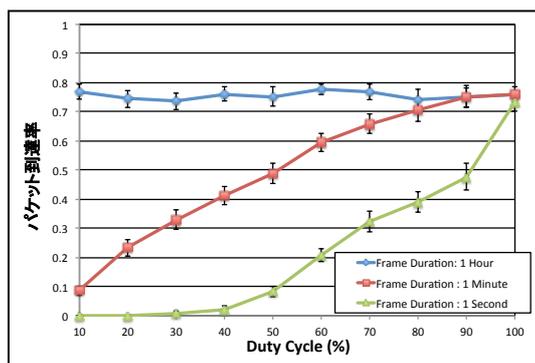


図 6 パケット到達率

図 6 より、フレーム時間が 1 時間であれば、デューティサイクルを 10%まで落としてもパケット到達率を維持する事ができる。フレーム時間が 1 時間で、デューティサイクルが 10%では、Wake up 時間が 6 分あるため、ルートを確立して、パケットを送信するには十分な時間があることから、このような結果になったと思われる。

パケットが廃棄される原因としては、隠れ端末によるパケット衝突、Sink までのルートが存在しないといったことが挙げられる。フレーム時間が 1 時間では、ルート無しで廃棄されたパケット数が 3 に対して、フレーム時間が 1 分では 63 パケット、フレーム時間が 1 秒では 105 パケットに達していた。また、AODV のルート探索のリトライ数も同様に増加傾向にあることから、パケット廃棄の主な原因は、中継ノードの間欠動作により、Sink までのルートが存在しないことが原因であることが分かった。

以上より、中継ノードが間欠動作する無線センサネットワークにおいて、間欠動作自体で消費電力量は削減可能であるものの、中継ノードが Sleep することで、Sink までの経路が失われ、パケット到達率が低下することが分かった。改善するためには、Sink までの経路確立期間を延ばすためにフレーム時間を長くすることが有効であるが、Wake up 時間が長い分、電力消費量の削減率は小さい。

今後の課題として、間欠動作時に Sink までの経路が失われないトポロジについて検討する必要がある。

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)

[学会発表] (計 1 件)

- ① 内海富博, ノードの間欠動作をベースとした低消費電力な無線センサネットワーク構成法に関する検討, 電子情報通信学会, 知的環境とセンサネットワーク研究会, 7 月, 2013.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

内海 富博 (UTSUMI Tomihiro)

秋田大学・大学院工学資源学研究科・助教

研究者番号：70292365