

論文

リモートセンシング状況に基づいた低消費電力プロトコルの開発

仲村 将司*¹⁾ 武田 有志*²⁾

Development of low power protocol based on remote sensing conditions

Masashi Nakamura *¹⁾, Yuji Takeda *²⁾

Intermittent operation is the general power saving method in a wireless sensing network, and we propose a Group Control Method (GCM) to reduce the power-intensive data transmission time. Noting that the sensor value does not change significantly in the sensing of environment measurements, then by grouping together terminals showing the same trends, power consumption can be controlled by setting a normal sleep cycle to groups with a lot of battery life remaining and a long sleep cycle to groups with little battery life remaining. This research experimentally evaluated algorithms implemented in a real device, as well as in a simulation, and verified its effectiveness. The results of each evaluation verified the power-saving effect of this technique.

キーワード：無線センサネットワーク，間欠動作，環境計測

Keywords : Wireless sensor networks, Intermittent operation, Environmental measurements

1. はじめに

近年，M2Mの関心の高まりや無線デバイスの低価格化により，M2Mのコア技術である無線センサネットワークが注目されている。また，それに伴い無線センサネットワークに適した無線通信規格であるZigBeeも注目されている。ZigBeeは，アドホック通信やマルチホップ通信・メッシュネットワークといった特徴があり，これを生かせる場面として環境計測分野での利用が進んでいる。

環境計測は屋外で行われる事が多く，計測エリアが広範囲に渡る事がある。そうした場合，全てのノード端末に有線電源を確保する事は配線のコストや敷設労力の面でもデメリットが大きいため，電池で駆動させての運用が一般的である。しかし，無線センサネットワークは多くのノード端末により構成されるため，電池コストや電池交換作業の負担は運用上の問題となっている。また，これらの問題を解決する手段としてエネルギーハーベスティング技術の利用があるが，電力供給が不安定である事やセンサ端末サイズの増大といった問題があり実用実績が少ない状況である。そのため，環境計測における駆動時間の延命は無線センサネットワークを長期稼働させる上で重要な要件となっている。

本研究では，無線センサネットワークの省電力化手段である間欠動作をセンシングデータの傾向を基にコントロールする事で，エネルギー消費効率を向上させるアルゴリズムを考案した。

2. 提案手法

本研究では，環境計測分野に最適な無線センサネットワークの省電力化手法として群制御手法を考案した。本手法は収集したセンシングデータの変化を読み取り，同じ傾向を示すものをグルーピングする。そして，グループの中で電池残量の多い端末を通常のSleep，それ以外のものをLong Sleepで駆動させる事で省電力化を図る(図1)。

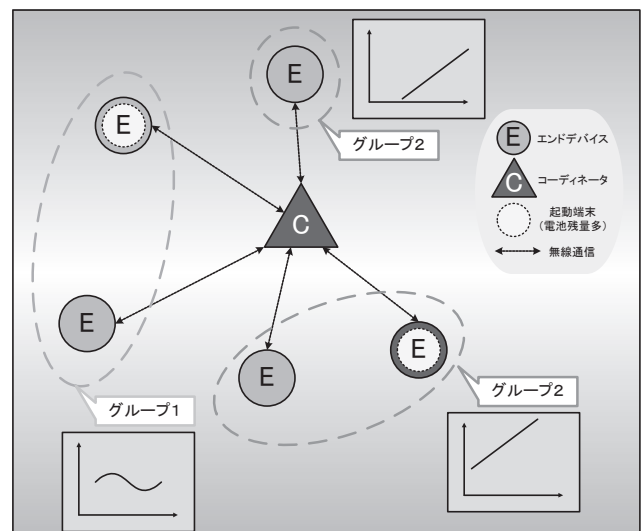


図1. 群制御手法イメージ

事業名 平成24年度 基盤研究

*¹⁾ 電子・機械グループ

*²⁾ 生活技術開発セクター

2.1 想定するネットワークとその動作 ネットワーク形態は、図2の様なクラスタツリーを想定している。各エンドデバイスとルータは間欠動作をしており、エンドデバイスのみが一定間隔でセンシングを行う。センシングにより得られたデータはルータを介しコーディネータに収集される。収集したデータはPCのデータベースへ蓄積される。また、コーディネータは、収集データを基にグルーピングを行いSleep時間の変更命令をルータとエンドデバイスに送信する。グルーピングは全てのエンドデバイスがActiveになった時に行われる。また、本機能はZigBeeプロトコルのApplication Objectsで実現される(図3)。

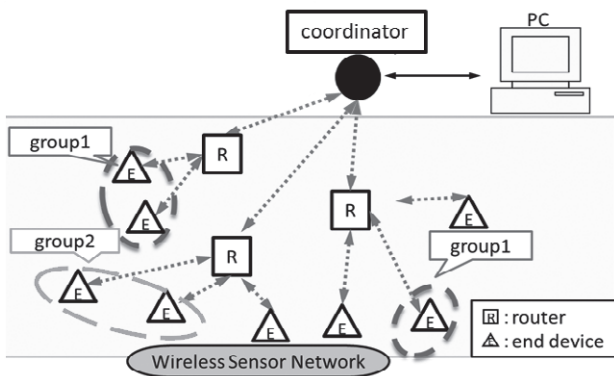


図2. ネットワークトポロジ

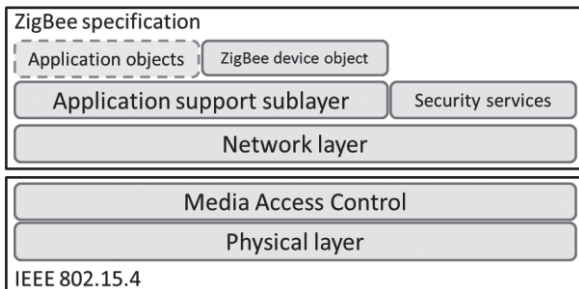


図3. ZigBee プロトコルスタック

2.2 グルーピング手法と予測値の算出 センシングデータの傾向を判定する方法として導関数を用いた。最初にラグランジュ補間に基づいた数値微分のn+1点公式⁽¹⁾を使用する。このうち、 L_k はラグランジュ補間多項式である。本論では、この公式を用いる事により求められる3点近似公式により、ある時区間のノード毎のセンシングデータの傾向を求める⁽²⁾。なお、丸め誤差は無視できるものとした。この導関数値の差が閾値 θ 以内である時、同じ傾向であると判断する⁽³⁾。また、Longer Sleep時はセンシングを行わないためセンサ値を知る事ができない。その対策方法として同じグループ内の起きているノードのセンサ値を用いて⁽⁴⁾の計算式により予測値を求める。

$$f'(x_j) = \sum_{k=0}^n f(x_k) L'_k(x_j) + \frac{f^{(n+1)}(\xi(x_j))}{(n+1)!} \prod_{k=0, k \neq j}^n (x_j - x_k) \dots \dots \dots (1)$$

(L_k はラグランジュ補間多項式)

$$f'(x_0) = \frac{1}{2h} (f(x_0 - 2h) - 4f(x_0 - h) + 3f(x_0)) \dots \dots \dots (2)$$

$$|f'(x) - g'(x)| \leq \theta \quad (\theta: \text{閾値}) \dots \dots \dots (3)$$

$$\text{Pre } g(x_0) = f(x_0) + (g(x_0 - h) - f(x_0 - h)) \dots \dots \dots (4)$$

(Pre $g(x_0)$): 時刻 x_0 での推定値)

2.3 同期手法 本手法では、ルータ及びエンドデバイスが間欠動作を行う。そのためSleep時間を不適切に決めてしまうとルータと同期がとれなくなり、センシングデータを上手くコーディネータに送る事ができなくなる。そこで、Longer Sleep時間を式⁽⁵⁾の様定義した。Sleep状態に移したノードは、設定したタイマがTs (Usual Sleep time) またはTls (Longer Sleep time) 経過した後にActive状態に移す。ノードのタイマの同期は全てのノードがActive状態の時に行う(図4)。

$$Tls = kTs + (k - 1) Ta \dots \dots \dots (5)$$

($k \in \mathbb{N}$)

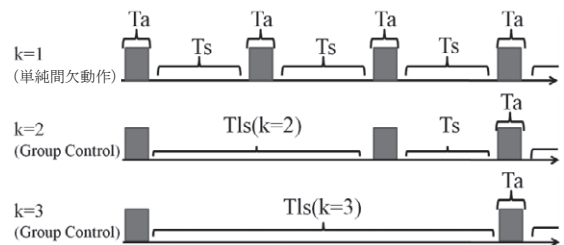


図4. kの違いによる Longer Sleep 時間の変化

3. シミュレーションによる省電力評価

提案手法と単純間欠動作を行った場合で、消費電力とLonger Sleep時の予測値と実測値の誤差をシミュレーションにより評価を行った。ルーティングの影響による電力の消費を省くため、コーディネータを中心としたスター・トポロジ(コーディネータ1台、エンドデバイス5台)を用いた。評価データは4種類の気象庁提供の気温データを用いた(表1)。また、評価には表2の様なパラメータを設定した。閾値(θ)は、関数間の導関数の値の近さを表している。Active PowerとSleep Powerの値は実機評価で使用する無線モジュール(Digi International社製のXbee)がActive時とSleep時で約1000倍の差がある事より決定した。

表1. 使用データ

pattern	area	period
1	Saitama	1/1/2011~1/20/2011
2	Saitama	7/1/2011~7/20/2011
3	Kyoto	1/1/2011~1/20/2011
4	Kyoto	7/1/2011~7/20/2011

表2. 設定パラメータ

indefinite number	
Threshold	θ
Active Time	1 sec
Sleep Time	10 min
Longer Sleep Time (k=2)	20 min1sec
Active Power	10 mW
Sleep Power	0.00 1mW

3. 1 シミュレーションの評価結果 シミュレーションの評価結果を図5，図6，図7，図8に示す。消費電力と閾値との関係では横軸 θ の値が0.0001よりも大きくなるにつれて消費電力が減っている（図5）。また，予測値と実測値の誤差と閾値に関しては，横軸 θ の値が0.0001よりも大きくなるにつれて誤差が大きくなる（図6）。この結果により，閾値を大きくすれば消費電力は下がるが，誤差が大きくなる事がわかる。

次に，表1 pattern2における閾値0.001の時の消費電力を図7に，予測誤差を図8に示す。この時，単純間欠動作時の消費電力は30.5 W，群制御手法の平均消費電力は20.4 Wとなり，33.2%削減される事がわかった。また，図7のノード毎の消費電力を見てみると，消費電力が極端に高いノードが無く，どのノードも約20 W程度となっているためネットワーク全体の寿命が延びた事がわかる。予測値との誤差は平均0.253℃となった（図8）。

以上の結果により，群制御手法の方が定間隔スリープの様な単純間欠動作を行うよりも電力の消費が少ないという結果が得られた。また，地域や日にちによって，消費電力と予測誤差が異なるのは，センシングデータの類似性によ

るところが大きい。類似性が大きければ，グルーピング回数が増えるため，消費電力が下がる事になる。

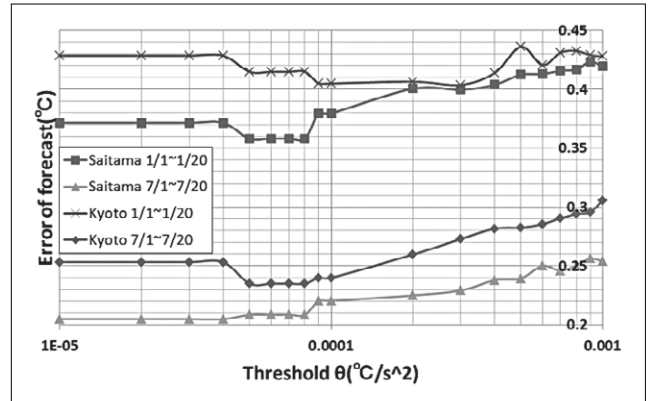


図6. 閾値と予測誤差との関係

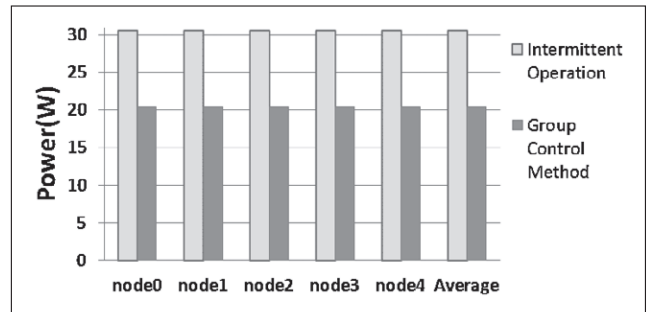


図7. ノード毎の消費電力

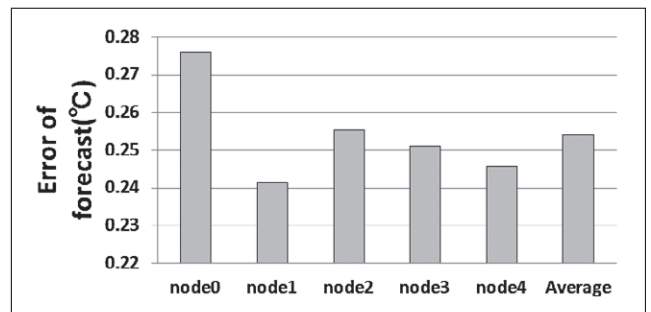


図8. ノード毎の予測値との誤差

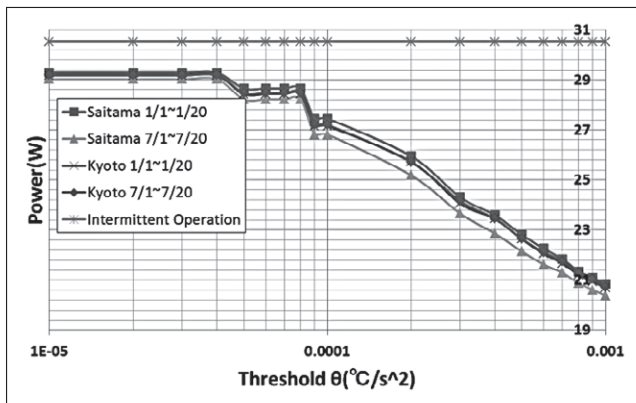


図5. 閾値と消費電力との関係

4. 実機による省電力評価

4. 1 評価環境 今回の評価にはZigBee Coordinator (ZC)を1台，ZigBee End Device (ZE)を6台使用し，スター・トポロジを構築した。ZEの内，5台は群制御アルゴリズムを実装し，1台は単純間欠動作をするプログラムを実装した（図9）。実環境での使用を想定した評価を行うために，恒温恒湿槽を3台使用し，恒温槽2台にはセンサ端末を2台ずつ，残りの恒温槽1台にはセンサ端末を1台設置した（図10）。それぞれの恒温槽は，実環境での温度計測を基に，温度を設定した（図11）。

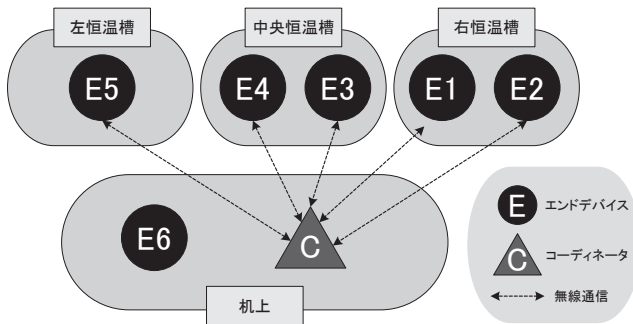


図9. 構築ネットワークと端末の配置図



図10. 実験の様子

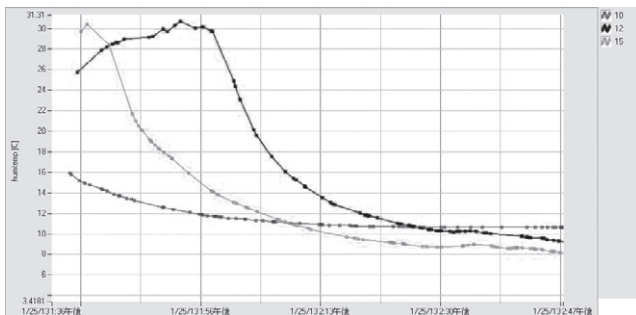


図11. 実環境における温度変化

4. 2 実機による評価方法 無線の Active と Sleep を確認するために、ZE 端末から Sleep 中は出力を OFF (0 V)、Active 中は出力を ON (5 V) する様に設定し、メモリハイログで 1 時間モニタリングした。このログを基に、群制御手法と単純間欠動作時における消費電力を Active と Sleep 時間の積算合計から求めた。今回は Active 時間を 5 秒、通常 Sleep 時間を 20 秒、Longer Sleep 時間を 50 秒に設定した。なお、各状態での消費電流はマルチメータを使用して計測し、Sleep 時は $0.639 \mu\text{A}$ 、Active 時は 16.57 mA である事をあらかじめ確認した。これらの結果を基に以下の算出式により消費電力を計算し、消費電力の削減率を割り出した。

$$\text{Total 消費電力} = \text{電圧 } V \times \text{電流 } mA \times \text{稼働時間 } h$$

4. 3 実機による評価結果 今回の評価で群制御手法の場合の Active の Total 時間は 8112 秒、Sleep の Total 時間は 21888 秒。単純間欠動作の場合の Active の Total 時間は 1935 秒、

Sleep の Total 時間は 4065 秒である事がわかった。これを基に求めた消費電力を以下に示す。

$$\text{Total 消費電力 (群制御手法)} : (3.3 \text{ V}) \times ((8112/3600) \text{ 時} \times 16.57 \text{ mA}) + (3.3 \text{ V}) \times ((21888/3600) \text{ 時} \times 0.000639 \text{ mA}) \approx \underline{0.123 \text{ Wh}}$$

$$\text{Total 消費電力 (単純間欠動作)} : (3.3 \text{ V}) \times ((1935/3600) \text{ 時} \times 16.57 \text{ mA} \times 5) + (3.3 \text{ V}) \times ((4065/3600) \text{ 時} \times 0.000639 \text{ mA} \times 5) \approx \underline{0.147 \text{ Wh}}$$

$$\text{削減率} : (0.147 \text{ Wh} - 0.123 \text{ Wh}) / 0.147 \times 100 \approx \underline{16.3 \%}$$

5. まとめ

無線センサネットワークの駆動時間を延命させるため、センシングデータから導く省電力化手法として群制御手法を考案した。本研究では、本手法の評価をシミュレーション及び実機で行ったが、シミュレーションでは消費電力が 33% 削減できる事、実機においては 16% 削減できる事がわかった。それぞれの結果より、本手法が無線センサネットワークの消費電力を削減する手段として有効である事がわかった。特に、本手法はグループ内の端末 1 台を起動させ他を休ませるといった方法をとっているため、必要となる端末の数が多きアプリケーションには有効である。今回は温度データのみを用いたが、今後は他のセンシングデータ (湿度・照度など) を含めた省電力化手法の検討を行ってみたいと考えている。

(平成 25 年 7 月 22 日受付, 平成 25 年 8 月 9 日再受付)

文 献

- (1) ZigBee Specification, ZigBee Alliance (2007)
- (2) Deborah Estrin, Akbar Sayeed, and Mani Srivastava, Wireless Sensor Networks, Mobicom 2002 Tutorial (2002)
- (3) Merlin, C. J and Heinzelman, W. B, Schedule Adaptation of Low-Power-Listening Protocols for Wireless Sensor Networks, IEEE Trans. Mobile Computing, Vol.9, No.5, pp.672-685 (2010)
- (4) W. Ye, J. Heidemann and D. Estrin, An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks, IEEE INFOCOM, Vol.3, pp.1567-1576 (2002)
- (5) Shinya Kondo, Akimitsu Kanzaki, Takahiro Hara, Shojiro Nishio, Energy-Efficient Data Gathering using Sleep Scheduling and Spatial Correlation based on Data Distribution in Wireless Sensor Networks, NBIS2011, pp.194-201 (2011)
- (6) Akihiro Arai, Yuji Takeda, Masashi Nakamura, Takashi Yamaguchi, Masahiro Inoue, Network Power Saving with Sensing Data Characteristic, ISCE2011, pp.166-170, Singapore (2011)
- (7) William H. Press, et al., Numerical recipes in C the art of scientific computing, Cambridge University Press (1998)