

# 極少資源無線センサノードにおける無線通信の回復方法

## A method for recovering wireless connection in limited resource sensor node

三宅 大樹†  
Daiki Miyake

岡留 剛†  
Takeshi Okadome

角所 考†  
Koh Kakusyo

### 1. はじめに

無線センサネットワークは実空間の情報をコンピュータネットワークに取り込むための基盤技術であり、その導入が容易であるという特徴から、構造モニタリング、環境モニタリング、ビルオートメーションといったように様々な応用が考えられている[1]。無線センサノードの普及により多くの物事に役立っているが、一方で課題点もある。無線センサノードは通常小型のバッテリーを搭載させるため、大容量のバッテリーは使用できない。それに伴いバッテリーをマメに交換または充電の必要がある。そこで現在その手間を軽減するために、自然エネルギーを利用したバッテリーレスのセンサノードの開発およびセンサノードの省電力化の研究が盛んに行なわれている[2]、[3]、[4]。特に省電力化のために、スリープ制御によりセンサノードの通信方式を間欠にすることで省電力化を図っている。しかし、ノード間の通信間隔を間欠にすることで、時刻同期の必要性がある。同事象を複数ノードを用いてセンシングする場合、時刻の一致しないセンサデータは意味を成さないからである。そこで、通常、キャリブレーションを行なうことや外部モジュールを使用して時刻同期を取っている。しかし、極少資源下でセンサノードを動作させる場合には、十分な電力が得られないため時刻同期が取れない。結果として、同期時間の修正ができず、やがて通信が途切れてしまう。また、既存研究には、非同期通信による通信同期法がいくつも研究されている[5]。しかしそれらの提案手法のどれもが、複雑な処理を必要とし、その分だけセンサノードの消費電力を要するため、義損研究での通信同期法も利用できない。

そこで本研究では、極少資源のため時刻同期を取ることができない「完全同期」通信方式の無線センサノードにおいて、通信同期が取れなくなった場合に、確実に通信を回復させるための手法を提案する。

### 2. 関連研究

#### 2.1 農場ネットワーク構築のための無線アドホックノードの開発

参考文献[6]では、圃場モニタリングのためのセンサノードを開発し、その動作について述べた。これはセンサ端末を作物や圃場に設置し、そのセンサデータによって作物の状態を管理するものである。それによって、農作業の管理が容易になり、作業の負担を軽減することができる。研究成果として、経路制御方式の一部と、雨量、風力を計測するためのインタフェースを開発し、実験室レベルで利用可能であることを示した。圃場では、ネットワーク構築のために必要な電力などのインフラが存在しないといった環境下であることから、センサノードを自律動作させるために太陽電池とバッテリーを電源として動作させている。また、無線通信における間欠動作による省電力機構の実装

を行なっている。この研究では、RTC (Real Time Clock) を搭載することでマルチホップ通信による間欠動作を実現しているが、もちろんRTC は別途で電力を消費する。しかし、本研究で使用するデバイスの設置場所は野外のため、太陽電池による電力の発電量はそれなりに多いところが実用におけるポイントである。

#### 2.2 Solar Biscuit

参考文献[7]では、太陽電池などの環境発電デバイスと電気二重層キャパシタにより駆動されるバッテリーレス無線センサネットワークノードを用いて、バッテリー交換を行わずとも半永久的に動作する無線センサネットワークの実現を目指している。本研究では、電池によりセンサノードを駆動させている場合、電池交換の際に大変時間がかかってしまい実用的でない点と、電線を引いて電気を送る場合の工事費用と電気代のためのコストがかかりすぎてしまう点に着目した。研究成果として、ソーラーパネル搭載の手のひらサイズの小型無線モジュールを開発し、それにより、電池交換などの労力の削減に成功した。しかし、問題点として、本研究のセンサノードは屋外で使用することを前提としているが、太陽光発電のため、夜間や雨の日には使用できない。その上、得られる電力は電池などと比べて少ない点が挙げられている。

### 3. 極少資源下における通信方式

時刻同期の手法は、十分な電力源をもつ無線センサノードの場合には、外部のセンサモジュールや、無線センサノード自身のクロックを利用できるだけの電力があるため、時刻同期を取ることが可能である。また、ある程度資源の限られた環境下においても、既存研究の多くは、これら方法で時刻同期を取るために、そのとき必要とする電力を補うための手法を提案している。しかし、極少資源下で無線センサノードを使用する場合には、無線センサノード自身を駆動させることで手一杯なため、以上のような時刻同期の方法を使用することはできない。

また、通常の無線センサネットワークの構築において、スリープモードを導入した無線センサノードの通信方式は、送信側センサノードにのみ導入しており、センサデータを受信する側のセンサノードは常に起動し受信状態を保つような方式となっている。しかし、極少資源下で無線センサノードを使用する場合の通信方式においては、無線センサノードの起動時間を削減し極力通信処理にかかるコストを少なくすることによって、無線センサノードの消費電力を必要最小限に抑える必要がある。この通信方式の消費電力の観点から、極少資源下で無線センサノードを使用する場合には、常時データ計測を行なうために無線センサノードを起動させ続けることはできない。そこで、常時データ計測を行なう必要の無いセンサノードにターゲットを絞ることにより、センシングに用いる送信側センサノードだけでなく、転送データを受け取る受信側センサノードにおいても省電力化を行なうための通信方式を取る。

†関西学院大学, Kwansai Gakuin University

具体的には、単一方向のマルチホップセンサネットワークの動作サイクルにおいて、図2のようにセンサノード起動中における通信時以外の消費電力を抑えるために、通信に必要な処理時間以外はセンサノードの動作を制限し、センサノードのスリープ時間とする。

この通信方式は、図1で記した通り、センサノードを同時にスリープさせ、その後同時に起床させて通信するといったような通信方式を取ることで、以上の条件を満たす非常にシンプルな通信方式である。図中のWで記したウェイク時間中に、送信側センサノードがセンサデータを転送(send)し、受信側センサノードは受信データを確認するとすぐに、認識信号(ack)を返すといった一連の動作を行ない、送信側ノードが認識信号を受信すると通信完了となる。受信と送信は起床毎に交互に入れ替わり、バケツリレーの容量でデータを上位ノードへ伝える。

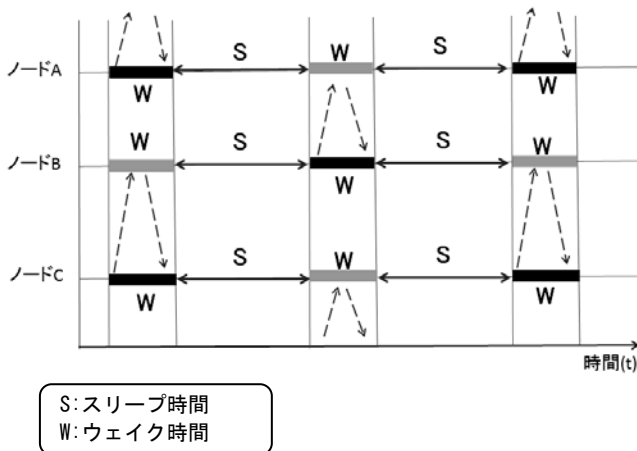


図1 スリープモードを利用した通信方式

しかし、この通信方式は、センサノード間の通信処理のためのウェイク時間を同時にしないといけない。スリープ中のセンサノードとは通信できないため、センサノード間のウェイク時間がズレてしまうと通信ができないからである。ただし、厳密には、データ転送時における転送遅延時間や通信処理時間を考慮して、受信側センサノードの受信状態は、送信側センサノードの通信処理時間よりも、わずかなだけ長く取る必要がある。したがって、図1のような通信方式を取る場合には、通信同期を取る必要がある。しかしながら、本節冒頭で述べたように、極少資源下では時刻同期を取ることができない。時刻同期が取れない場合、通信ノイズなどの要因により無線センサノード間の同期時間にズレが生じてしまう。具体的には、図2の右端のように、同期時間にズレが生じてしまったために、無線センサノードABC間のウェイク時間が合致せず、通信が途切れてしまう。

また先行研究には、非同期通信を実現した無線センサノードを開発した研究もあるが、これらの研究における提案手法は、どれも非常に計算処理が高度かつ複雑であり、処理のために膨大な電力を必要とするため、超低消費電力で無線センサノードを動作させる場合には、既存研究の手法を用いた通信復帰手法は利用できない。

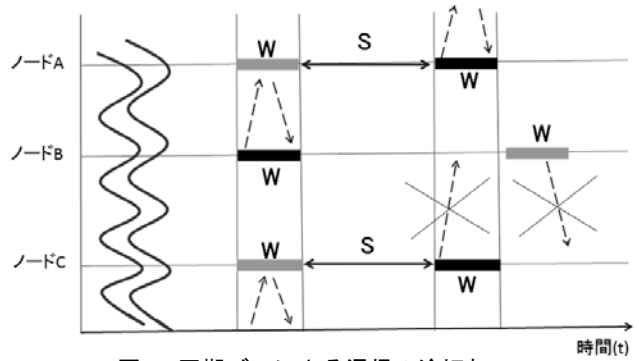


図2 同期ズレによる通信の途切れ

そこで本研究では、極少資源のため時刻同期を取ることができない「完全同期」通信方式の無線センサノードにおいて、通信同期が取れなくなった場合に、確実に通信を回復させるための手法を提案する。

#### 4. 同期復帰法

前述の通り、同期時間にズレが生じてしまうと通信ができなくなってしまう。また、その通信不可の状態のまま放置していても通信が再開する可能性は極めて低い。そこで本節では、通信同期が取れなくなった場合に、確実に通信を回復させるための手法を提案する。

同期時間のズレが生じたノードの上位ノードをA、下位ノードをBとする。ノードAが下位ノードからデータを受信できなかったと認識した時、ノードAはリカバリモードと呼ばれるモードに移行する。リカバリモードは、図3に示すように、ノードAを受信専用に変更し、通信時間を調整することで通信の復帰を試みるというモードである。なお、Aがリカバリモードに変更された時点でAの上位ノードもAと通信が取れなくなるため、リカバリモードへ切り替わる。すなわち、Aの上位ノード全てがリカバリモードへ切り替わる。リカバリモードでの同期回復を下位ノードから上位ノードへ順に行なうことで、どのような場合であっても同期回復が可能となる。

図3に示した記号の定義はそれぞれ、リカバリモード前の通常時における、センサノードのスリープ時間を $S$ 、ウェイク時間を $W$ とおき、同期時間のズレを $d$ とする。また、リカバリモード中における、受信側センサノードAのスリープ時間を $S_a$ 、ウェイク時間を $W_a$ とする。以上を定義した上で、リカバリモード中の通信方略を述べる。

まず下位ノードBは、図3の通り、通常時と同じ動作を繰り返し、ノードAへとデータの送信を試みる。一方受信側センサノードAの通信復帰方略だが、こちらは送信側センサノードBよりもある値だけ長く $S_a$ 時間電荷を貯めることで、センサノードBよりも長く受信状態( $W_a$ )を保つことができるような動作を同サイクルで繰り返す方略をとる。

リカバリモード中に以上の動作をすることで、どんなズレ $d$ が生じてても、有限回繰り返すことで通信を再開させるといった方略をとる。そのためには $W_a$ 、 $W$ それぞれの区間において、受信側センサノードAのウェイク時間 $W_a$ が、送信側センサノードBのウェイク時間 $W$ を完全に覆うような通信方略をとることで、通信を再開させる必要がある。

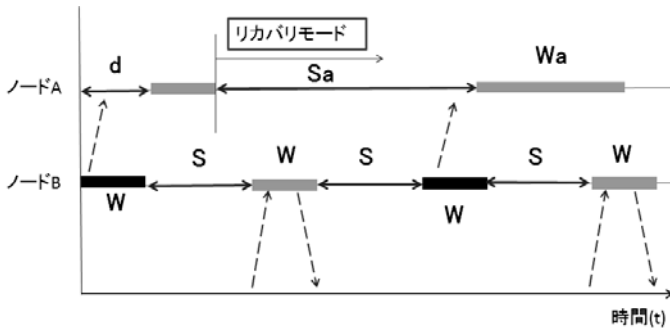


図3 ノードAB間における通信の回復方法1

ここで、それぞれのセンサノードの1サイクルの合計時間を $T$ で表す。すなわち、Aに対してはスリープ時間とウェイク時間の合計、Bに対しては2回分のスリープ時間とウェイク時間の合計となる。ノードAは、ノードBよりそれぞれ $\alpha$ 倍長く取るとする( $\alpha \geq 1$ )。例えばセンサノードAのウェイク時間は $W_a = \alpha \times W$ となる。そして、リカバリモードに入ってから充放電した回数を $T$ 回、受信側 $m$ 回、送信側 $n$ 回としたとき、通信が再開するタイミングはそれぞれ $m$ 回目、 $n$ 回目となる。さらに、通信回復時の $W_a$ の開始時間、終了時間をそれぞれ $a_1, a_2$ とおく。同様に、通信回復時の $W$ の開始時間、終了時間をそれぞれ $b_1, b_2$ とおく。そのとき、通信復帰のための条件として、 $W$ の区間 $[b_1, b_2]$ が $W_a$ の区間 $[a_1, a_2]$ の区間内に収まることが必要である。

以上の定義から、通信回復まで動作を繰り返した場合、すなわち、ノードA,Bがそれぞれ $m, n$ 回ウェイクとスリープを繰り返した場合、 $a_1 = m \times T_a - W_a + d$ ,  $a_2 = m \times T_a + d$ となる。同様に、そのとき $b_1 = n \times T + W$ ,  $b_2 = n \times T$ となる。

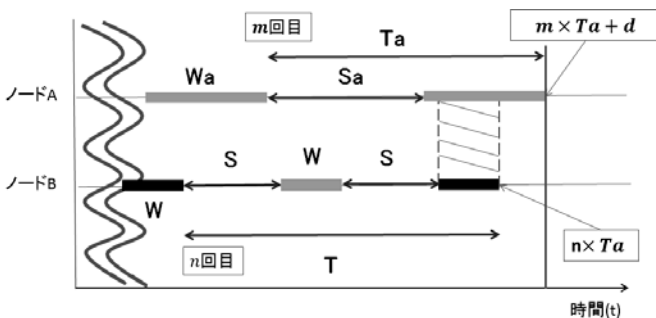


図4 ノードAB間における通信の回復方法2

(1)を満たす、正の整数 $m$ と $n$ が存在することとなる。 $m \times T_a - W_a + W + d \leq n \times T \leq m \times T_a + d$ . (1)

### 5. 通信回復のための定理

不等式(1)に、 $T_a = \alpha \times T$ ,  $W_a = \alpha \times W$ を代入し、

$$\alpha \times m \times T + (1 - \alpha)W + d \leq n \times T \leq \alpha \times m \times T + d$$

これより、

$$\alpha \times m + \frac{(1 - \alpha)W}{T} + \frac{d}{T} \leq n \leq m \times \alpha + \frac{d}{T} \quad (2)$$

ここで、通信処理時間( $W$ )を5ミリ秒、そのときに必要なスリープ時間( $S$ )を4995ミリ秒と仮定する。この $W$ と $S$ の値は、本研究で使用する無線センサノードで実現可能で

ありかつ、将来使用されるであろうさらにハイスpek的な無線センサノードでも十分実現可能な値である。

### 定理

通信回復のための不等式(2)を満たす、 $\alpha \geq 1$ かつ、正の整数 $m$ と $n$ が存在する。

### 証明

$T = 2 \times (W + S)$ より、 $T$ は10秒となる。また、このとき $d$ は、 $-5 \sim +5$ 秒の範囲で任意の時間を取る。

不等式(2)に上記の $T$ と $W$ の値を代入し、

$$\alpha \times m + \frac{(1 - \alpha)}{2000} + \frac{d}{10} \leq n \leq m \times \alpha + \frac{d}{10} \quad (3)$$

不等式(3)に $\alpha = 2001$ を代入すると、最左辺と最右辺の差が1となる。さらに、 $m = 1$ を代入すると、

$$2000 + \frac{d}{10} \leq n \leq 2001 + \frac{d}{10} \quad (4)$$

場合分けして

- (i)  $-5 \leq d < 0$  のとき、 $n = 2000$
- (ii)  $0 \leq d \leq 5$  のとき、 $n = 2001$

いずれの場合も不等式(2)を満たす整数 $n$ が存在する。

### 6. まとめと今後の課題

本研究では、極少資源下で無線センサノードを使用時に、同期時間のズレが生じてしまいセンサノード間で通信ができなくなった際に、いかなる同期時間のズレであっても確実に通信を回復させる同期復帰法を提案した。

今後の課題としては、実機による実験を行ない本手法の有用性を示すことである。

また、本研究の提案手法は、センサノードの消費電力抑制のために、通信回復に必要な計算処理を単調にすることで実現している。しかし、いかなる同期時間のズレに対しても一定のリカバリ時間で通信回復するため、非常に小さなズレであっても非常に大きなズレと同じだけ通信復帰に時間を要してしまう。今後は、より短時間での通信回復可能な方法を検討することが大きな課題となる。

### 参考文献

- [1] 鈴木誠・猿渡俊介・南正輝・森川博之(2008). 無線センサネットワークにおける時刻同期技術の研究動向, 技術研究報告書.
- [2] 森川博之・南正輝(2005). 実空間指向ユビキタスネットワーク, 電子情報通信学会論文誌, **J88-B**, 11, 2137-2146.
- [3] 飛内秀典・田中將義(2008). ユビキタスワイヤレス通信端末用バッテリーレス圧電・太陽電池電源の検討, 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, 2008年通信(2), 347, 551.
- [4] 高橋孝輔他(2010). 過酷な環境で動作するセンサノード用電源の開発, 電子情報通信学会技術研究報告IEICE technical report, **109**, 450, 43-48.
- [5] 久保祐樹・柳原健太郎・野崎正典(2009). 無線センサネットワークの省電力化技術, **214**, 76, 1.
- [6] 内尾文隆・平藤雅之(2005). 農場ネットワーク構築のための無線アドホックノードの開発, 電気通信普及財団研究調査報告書, **20**, 399-405.
- [7] Minami, M. T. Morito, H. Morikawa and T. Aoyama (2006). *Solar Biscuit: A Battery-less Wireless Sensor Network System for Environmental Monitoring Applications*, Morikawa Laboratory.