



無線センサネットワークの省電力化技術

久保 祐樹 柳原 健太郎
野崎 正典

無線通信機能を持ったセンサで構成する無線ネットワークは無線センサネットワークと呼ばれており、環境モニタリング、自動検針、構造物モニタリング、ホームセキュリティなどへの適用が期待され、さまざまな研究開発が行われている。無線センサネットワークでは、センサに無線通信機能を付与し、無線マルチホップネットワークを構築することで、より広い範囲の観測や、センサの設置容易性の向上が実現できる。こうした無線センサネットワークのセンシング期間の要望は電池駆動で数年間などと、長期間にわたる場合が多い。ところが現状の無線センサネットワーク技術では中継を行うセンサノードは省電力動作ができないという制限があるため、全てのセンサノードを電池駆動で数年間動作させることは困難である。こうした制限は無線センサネットワークのアプリケーションの適用範囲を狭めることになるため、ネットワークの全てのセンサノードをより省電力で動作させるための技術が求められる。

一方、近年ますます地球環境に関する問題意識が高まっている。こうした中で、まず現状の地球環境の状態を知ることが重要であると言われることがあり、現状を知るための方法として無線センサネットワークを用いるこ

とが考えられる。無線センサネットワークによる環境モニタリングシステムや省エネルギー化システムを構築する場合に、システムを導入することによる省電力効果が非常に高いものであっても、システム自身の省電力化が十分ではなかったり、省電力化システムの設置のためにセンサノードの電源の配線工事が必要であったりすると、省エネルギー化システムの価値を下げてしまうと考えられる。本研究によるセンサノードの省電力化技術は、ノードを省電力化することによるシステム自身の省エネルギー効果と、ノードを省電力化したことで、電源の配線が不要になり設置容易性が向上し、無線センサネットワークを用いた省エネルギー化システムの普及を推進する効果が期待できる。

センサノードの省電力化

センサノードにおける電力消費は、大部分が無線デバイスを駆動させるために使われている。特に送信出力の小さい近距離無線デバイスは、送信よりも受信に電力を多く消費する傾向があり、パケットの送信時、受信時だけでなく、受信待機時においても受信中とほぼ同じ電力

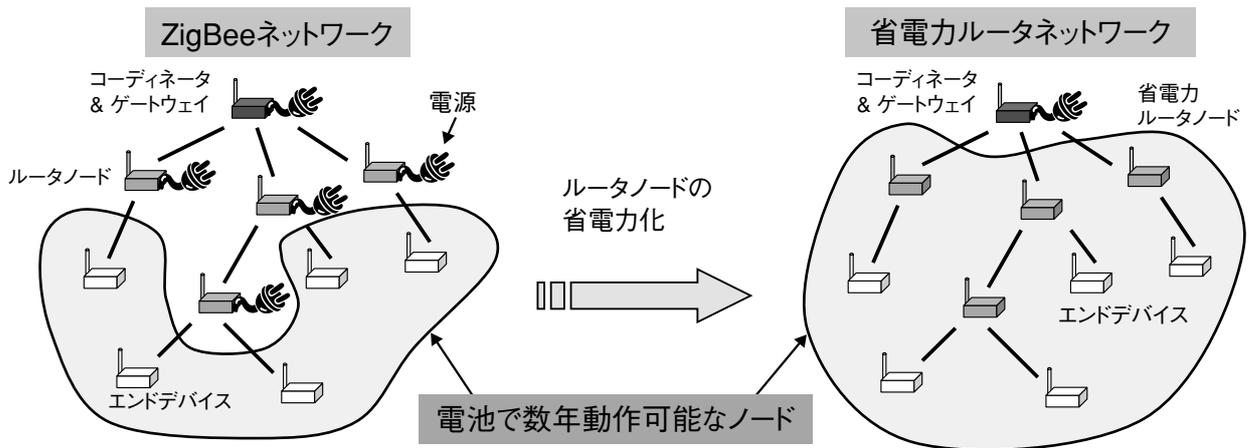


図1 無線センサネットワークの構成と電池駆動で数年動作可能なノードの範囲の比較

を消費する。したがって、受信待機中には無線デバイスをスリープ状態にすることで電力の消費を抑えることが可能となる。実際にセンサノードに流れる電流を測定したところ、受信待機時には約26mAの電流が流れていたが、スリープ状態では約23 μ Aになり、スリープすることで消費電力を1000分の1以下に抑えることが可能であった。無線センサネットワークのプロトコルとして知られているZigBee*¹⁾を使用した場合には、中継を行わないセンサノード（エンドデバイス）に関しては、スリープを行いながら送受信を行う仕組みが考えられており、電池駆動で数年間の動作が可能である。しかし、ルータノードはその他のルータノードやエンドデバイスと非同期に通信を行うため、いつ自身にパケットが送信されるかを事前に知ることが難しく、現状ではスリープ制御による省電力化の仕組みがないことが課題である。そのため、長期間の動作のためにはルータノードには電源が必要になる。したがってZigBeeを用いてネットワークを構築した場合、図1左側のように電池駆動で長期間動作可能なセンサノードはエンドデバイスのみに限定され、ルータノードの通信路は無線化できるが、電源のための配線が必要になる。しかしここで、ルータノードの省電力化が実現できれば、図1右側のようにゲートウェイノード（以下GW）以外の全てのセンサノードの電源の配線が不要になり、完全にセンサノードを無線化できる（図1はZigBeeコーディネータとGWが同一ノードであった場合の構成例である）。完全な無線化が達成できると、センサノードの設置容易性が飛躍的に向上し、無線センサネットワークの適用範囲が広がるという効果が期待できる。図1右側ではGWの電池駆動を考えていないが、一般にGWは高機能なコンピュータに接続されている場合が多く、電源が取得可能であると考えられ、電池駆動が不要である場合が多い。また、GWにはセンサデータの収集などで、トラフィックが集中することが予想される。ノードをスリープさせることによる省電力化は、通信のスループットを犠牲にしているため、GWなどトラフィックが集中するノードがスリープ制御を行うと、トラフィックの観点からネットワークに収容できるノード数を少なくしてしまう場合がある。こうした理由からGWはスリープ制御を行わない方がよい場合が多いと考えている。以上のことから、大規模な観測対象を電池駆動の無線センサネットワークで観測するためにはルータノードのスリープ制御技術が重要であると考えている。

センサノードをさらに省電力動作させれば、太陽光、ドアの開閉、振動などのエネルギーを二次電池などに蓄積しておき、蓄積したエネルギーでセンサノードを駆動さ

*1) ZigBeeは、Koninklijke Philips Electronics N.V.の登録商標です。

せることも可能になる。こうした試みはエナジーハーベスティングセンサネットワークと呼ばれている。エナジーハーベスティングセンサネットワークは、観測期間が有限な電池駆動の無線センサネットワークと違い、ノードが故障するまで動作可能であるため、ノードのメンテナンスコストの大幅な削減が可能になる。ただし電力が常に確保できるわけではないため、常時センシングを行うことは困難である。しかし、センサノードの省電力化技術を適用すれば、ノードの動作時間が増え、センシング可能な時間帯を広げることが可能になるなどの効果が期待できる。このようにエナジーハーベスティングセンサネットワークにもルータノードの省電力化技術を利用することが効果的と考えられる。

省電力通信プロトコルの従来研究

本節では、ルータノードを省電力動作させるための従来研究を紹介する。ルータノードの省電力化技術に関するMedia Access Control (MAC) 層の従来技術は大きく分けて同期型と非同期型の2つに分けられる。同期型ではSensor-MAC (S-MAC)¹⁾と呼ばれる方式が広く知られている。図2にS-MACの動作を図示する。S-MACは無線回路を駆動している時間（アクティブ期間）と無線回路をスリープさせている時間（スリープ期間）を周期的に繰り返す動作を基本としている。アクティブ期間はさらに同期期間とデータ期間に分かれており、同期期間において同期パケットをブロードキャストすることで、近傍ノードに自身のスリープスケジュールを通知し、それを受け取ったノードは自身のアクティブ期間を同期パケットの送信元に合わせることで、送受信ノード間でアクティブ期間を同期する。このようにS-MACでは、ノードのアクティブ期間を同期させることで、スリープしていることによってパケットの受信に失敗することをなくしている。データパケットの送信はアクティブ期間中のデータ期間で行い、期間内ではCarrier Sense Multiple Accessによるコンテンション回避を行い送信する。S-MACでは、大規模時の同期に課題があるが、動

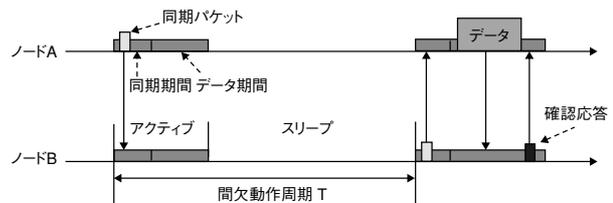


図2 S-MACによる省電力化の仕組み

作パラメータとしてアクティブ期間の長さとし、スリープ期間の長さを決めると、期間長の比でノードのデューティ比が一律に決定するため、通信負荷がノードごとに異なっても電池寿命の差が現れにくいという特徴がある。

非同期型の方式はLow Power Listening (LPL) と呼ばれる方式がよく知られており、Berkeley-MAC (B-MAC)²⁾、X-MAC³⁾、などの関連する方式が提案されている。その他にはReceiver Initiated Cyclical Receiver (RICER)⁴⁾ などビーコン送信を行う非同期の省電力方式が提案されている。B-MACでは、センサノードは一定の動作周期Tごとに数ミリ秒間無線デバイスをアクティブ状態にし、それ以外ではスリープ状態をとる動作を基本としている。アクティブ時にはキャリアセンスを行い、チャンネルが使用中かを判定する。チャンネルが使用中であれば、アクティブ状態のままパケットの受信を待ち、チャンネルが使用されていない場合は再びスリープ状態に戻る。パケットの受信を待つ場合は、パケットを正しく受信するか、タイムアウトするまで待った後にスリープ状態に戻る。これに対して送信側ノードは動作周期T以上の長さのプリアンブルをつけてパケットを送信する。受信ノードはTごとに必ずチャンネルをチェックしているため、送信元がプリアンブル送信をしている間にパケット受信待機状態に移行することができ、プリアンブルの後のデータを受信することが可能になる。長いプリアンブルを送信する代わりに、送信先に起動を要求する非常に短い制御パケットを連続で送信することによって、同等の機能を実現することも可能である。この方式は、アクティブ時の動作をシンプルにすることで、アクティブ時間を他の方式よりも短くすることが可能であるが、送信時に必ずT秒間余計に信号を送信するコストが発生する問題や、1ホップ内に存在する送信先以外のノードもアクティブ状態にさせてしまう問題がある。

X-MACはB-MACの方式を拡張したものである。その動作を図3に示す。送信側のノードAはウェイクアップ要求パケットとして、送信先ノードのアドレスを含む制御パケットを連続送信する。受信側のノードBはウェイクアップ要求を受信すると、ウェイクアップ応答パケット

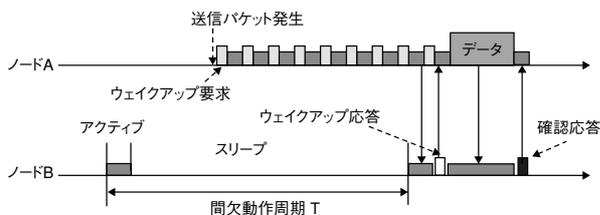


図3 X-MACによる省電力の仕組み

を返信し、ノードAは応答の受信後にデータパケットを送信するという動作を行う。この方法では、送信先からの応答があるまでウェイクアップ要求を送信すればよい。B-MACでは、送信時に必ずT秒間のプリアンブルの送信が必要な問題を改善すると同時に、アドレス情報から受信に関係ないノードはデータパケットの受信を待たずにスリープ状態に戻ることが可能となり、1ホップ内に存在する送信先以外のノードをアクティブ状態にさせてしまう問題を解決している。

RICERと呼ばれる方式はビーコンを送信するが、LPLと仕組みは非常によく似ている。図4にRICERの動作を図示する。RICERでは間欠的にビーコンを送信するように動作する。ノードBは周期的にビーコンを送信し、その後一定時間だけパケットの受信待機をするという動作を行っている。ノードAで送信パケットが発生した時にはノードAは受信待機状態になり、送信先であるノードBのビーコンの受信を待つ。ノードAがノードBのビーコンを受信するとすぐにデータを送信すれば、ノードBのビーコンの直後の受信待機中にパケットを送信することができる。このようにしてセンサノードはスリープを行いながら非同期な通信を可能にしている。

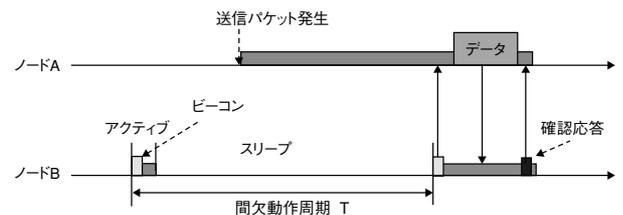


図4 RICERによる省電力の仕組み

ここで紹介した非同期型の方式は同期が不要であるためスケラビリティに優れているが、受信側ノードの負荷に対して、送信側ノードの負荷が高くなるため、トラフィックパターンによってノード間で消費電力に差が出てしまうという問題がある。

本節で紹介したように、ルータの省電力化技術は研究レベルでは数多く提案されているが、標準化にはいたっていないため、ルータノードの省電力化が必要な場合には独自の省電力プロトコルを実装して要求を満たそうとしているのが現状である。

開発方式：自律分散通信タイミング制御

我々が開発した省電力方式として、自律分散通信タイミング制御方式⁵⁾がある。この方式では各ノードはある

固定周期で制御パケットを送信し、データを送信する時には制御パケットの直後に送信するという動作を行う。つまり、制御パケットは自己のデータ送信のタイミングを近傍に伝えるものである。制御パケットを受信した時には、自己と近傍ノードとの制御パケットの送信時間差を計算し、送信タイミングの時間差に応じて、送信タイミングが重複しないように自身の制御パケットの送信タイミングを自律的に決定する。この時にローカルな情報のみで自律的に調整を行う方法に本方式の特徴がある。

この方式はパケットの衝突回避を目的に開発しているが、通信タイミング制御が収束すると、お互いの通信タイミングが定常化するため、各ノードの送信のタイミングを予測することが可能になる。つまり、自己宛のパケットが送信されるタイミングがわかるため、通信に関係のない期間では無線デバイスの電源を切っておいてもパケットの受信に失敗することがない。この動作を図5に示す。ノードAはノードB、C、Dの送信タイミングを制御パケットの交換により把握しているため、そのタイミングに合わせて無線デバイスをアクティブ状態にすることができる。ノードAはノードBの送信する制御パケットに合わせてアクティブ状態になる。ノードBの送信した制御パケットには、タイミング制御の情報以外にも、その後に送信するパケット数が記されている。そのため、ノードAはノードBのデータパケットを受信した後にスリープ状態に移行できる。ノードCからの受信も同様であるが、送信するパケットがない場合は制御パケットのみを受信してスリープ状態に移行する。またノードDなど2ホップ先のノードに関しては、隠れ端末による衝突を回避するために、制御パケットの送信タイミング制御は必要であるが、直接の通信を行うことはないため、ノードDの送信タイミングにはスリープを行うように動作する。

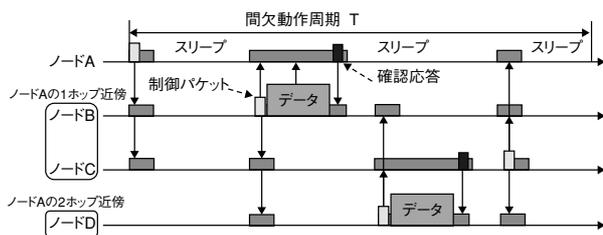


図5 自律分散通信タイミング制御による省電力化

自律分散通信タイミング制御は、他の省電力方式と違いパケットの衝突の問題も同時に解決している点に特徴がある。他の省電力方式ではスリープ制御を行うことでアクティブ時間にトラフィックが集中するため、軽微なトラフィックの増加でもパケットが衝突しやすくなって

しまうが、本手法を用いるとスリープ制御を行いながらも高いトラフィックに対応できる。

まとめ

本稿では無線センサネットワークのルータノードを省電力化するための課題と省電力化のための従来技術を紹介し、我々の開発した自律分散通信タイミング制御によるルータノードの省電力化を説明した。センサノードの省電力化技術は無線センサネットワークのアプリケーションの適用範囲の拡大やエナジーハーベスティングセンサネットワークにつながる重要な技術である。

今後は更なる省電力化方式の開発やセンサノードをスリープさせることによって発生する遅延の改善の検討と試作機による評価を行う予定である。◆◆

参考文献

- 1) W. Ye, J. Heidemann and D. Estrin: "An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks", Proc. IEEE INFOCOM, vol.3, pp.1567-1576, 2002.
- 2) J. Polastre, J. Hill and D. Culler: "Versatile low power media access for wireless sensor networks", Proc. ACM SenSys, pp.95-107, 2004.
- 3) M. Buettner, G.V. Yee, E. Anderson and R. Han: "X-MAC: a short preamble MAC protocol for duty-cycled wireless sensor networks", ACM SenSys, pp.307-320, 2006.
- 4) E.A. Lin and J.M. Rabaey: "Power-efficient rendezvous schemes for dense wireless sensor networks", Proc. IEEE ICC, pp.3769-3776, 2004.
- 5) Yuki Kubo and Kosuke Sekiyama: "Communication Timing Control with Interference Detection for Wireless Sensor Networks", EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2007.

筆者紹介

久保祐樹: Yuki Kubo. 研究開発センタ ユビキタスシステムラボラトリ
 柳原健太郎: Kentaro Yanagihara. 研究開発センタ ユビキタスシステムラボラトリ
 野崎正典: Masanori Nozaki. 研究開発センタ ユビキタスシステムラボラトリ