

最大センシング間隔に着目した エネルギーハーベスティングセンサノードの電力制御

下田 和佳^{1,a)} 中田 尚¹ 近藤 正章¹ 中村 宏¹

概要: ワイヤレスセンサネットワークにおける大きな問題のひとつである、動作可能時間を大きく改善する技術としてエネルギーハーベスティングセンサネットワークが実現されつつある。本研究では、任意の時刻の情報を精度良く取得するために、与えられたエネルギー制約を満たしつつ、エネルギーハーベスティングセンサノードの最大センシング間隔を最小化するアルゴリズムを提案する。また、数値シミュレーションによりその有用性を確認した。

1. 序論

ワイヤレスセンサネットワーク (WSNs) は多数の無線センサを用いたセンサネットワークであり、将来重要となってくる、IoT の基幹技術のひとつである。WSNs のセンサノードは一般的にバッテリー駆動であるため、動作時間を伸ばすことが重要である。動作時間を伸ばし、永久に動作可能なセンサノードを実現し得る技術として、エネルギーハーベスティングセンサネットワークが注目されている。エネルギーハーベスティングセンサネットワークとは太陽光発電など、環境から電力を収集し、動作するセンサネットワークのことである。エネルギーハーベスティングセンサネットワークにおいては、エネルギーが供給されるため、消費電力を抑えることに主眼を置いた既存のセンサネットワークに対する電力制御だけでなく、供給されるエネルギーを含めたエネルギーを無駄なくかつ効率よく使うための、エネルギーハーベスティングセンサネットワークに適した電力制御が必要となる。

エネルギーハーベスティングセンサネットワークを対象とした先行研究として Aman Kansal らの論文 [1] があげられる。この論文では、バッテリーに充電する際のエネルギーロスに着目し、予測発電量が消費電力より多いときには動作時間を最大にし、予測発電量が消費電力より少ないときには動作時間を最短にすることでエネルギーロスを抑える。その後、制御区間の最初と最後のエネルギー残量が一定となるように、予測発電量が多いときから順に動作時間を伸ばす、もしくは、予測発電量が少ないときから順に動作時

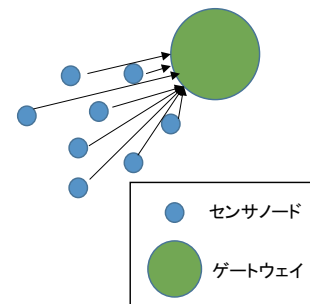


図 1 センサネットワーク概略図

間を短くする。このアルゴリズムにより、永続動作を実現しつつ、動作している時間が最大化された。

この他にも、発電量に応じて通信量を制御することで通信量の和を最大化させるもの [2] や、通信量・センシング量及びバッファ容量を考慮して、通信量・センシング量を制御することで、通信量の和を最大化させる [3] といった研究が行われてきた。

このように、先行研究ではセンシング量・通信量の和の最大化を目的としており、動作頻度の高い時間と低い時間を作ることでエネルギーロスを抑えるという手法を提案していた。そのため、動作頻度が低いタイムスロットにおいては、最低性能で動作させることとなっていた。このような制御は日照量計測のように発電量が多いときのデータが重要であるときのような限定された条件では有効である。しかし、温度センサなど多くのセンサにおいて、任意の時刻の温度を予測する場合などでは、センシングデータの合计数よりもセンシングデータの最大の取得間隔を短くすることが重要である。

そこで、本研究ではエネルギーハーベスティングセンサノードにおいて、収集電力量が予測できる場合及びできな

¹ 東京大学
The University of Tokyo, Bunkyo, Tokyo 113-8656, Japan
^{a)} shimoda@hal.ipc.u-tokyo.ac.jp

い場合における，最大センシング周期を最小化する電力制御を提案することを目的とする。

本論文では，2.にて本研究で対象とするセンサノードについて述べる．3.では収集電力についての予測データがある場合でのアルゴリズムについて，4.では収集電力についての予測データがない場合でのアルゴリズムについて述べる。

2. 問題設定

ひとつのセンサノードのセンシングの動作時間を制御する．動作時間の制御はタイムスロット i ごとに変化させることができるとする．動作時間はタイムスロットごとのデューティ比 $D(i)$ で表す．デューティ比には，センサノードが機能するために満たすべき下限及び上限値が設定されている．その範囲において，デューティ比を大きくすることでセンシング周期を短くすることができるとする．各タイムスロット内において，収集電力 $P_h(i)$ は一定であるとする．センサノードは，収集電力は直接使うか，バッテリーに充電することができ，バッテリーに充電する場合はエネルギーロス η が発生するとする．バッテリーに充電されたエネルギー残量 $B(i)$ は $0 \leq B(i) \leq B_{max}$ を常に満たす． B_{max} はバッテリーの最大容量である．センサノードにはスリープ状態と動作状態の二つの状態が存在するとする．スリープ状態の消費電力は収集電力・動作時の消費電力より十分小さく，動作時の消費電力は常に一定 P_s とする。

3. 予測収集電力を用いた電力制御

3.1 定式化

予測収集電力が得られる場合は，予測が得られる周期 (24 時間など) を制御周期とする．制御周期の終了時点のエネルギー残量を開始時点でのエネルギー残量に等しくなるように制御することで，永続動作が可能になる．以上をもとにして，以下のように定式化を行った。

$$\begin{aligned} \max \min D(i) & \quad (1) \\ B(i) - B(i+1) &= \Delta T D(i) [P_s - P_h(i)]^+ \\ & - \eta \Delta T D(i) [P_h(i) - P_s]^+ - \eta \Delta T P_h(i) \{1 - D(i)\} \\ B(1) &= B_0 \\ B(Nw+1) &= B_0 \\ 0 \leq B(i) &\leq B_{max} \\ D_{min} \leq D(i) &\leq D_{max} \end{aligned}$$

$D(i) \cdot B(i)$ は各タイムスロット i でのデューティ比・バッテリー残量を表す． $[\]^+$ は $[\]$ 内が正ならばその値を，負ならば 0 を返すものとする。

第 1 式は最小のデューティ比を最大化するということを

表している．第 2 式はバッテリー残量の変動を表し，右辺第一項は消費電力 P_s が収集電力 $P_h(i)$ より大きいときの動作時の消費エネルギー，第二項は消費電力 P_s が収集電力 $P_h(i)$ より小さいときの動作時の充電量，第三項はスリープ時の充電量を表している． η は充電によるエネルギーの減少比率である．第 3 式はバッテリー残量の初期値，第 4 式は制御周期が終わったときのバッテリー残量に対する制約条件，第 5 式はバッテリー残量に対する制約条件である．第 6 式・第 7 式はデューティ比の下限及び上限を表している。

電力収集量 P_h 及び，センサノードのパラメータ P_s や η 既知のもとで，デューティ比 D を変動させることで，最小のデューティ比を最大化し，最大のセンシング間隔を短くする。

3.2 提案手法

定式化 (1) を実現するためには，バッテリー残量に関する制約式を満たしつつ，できる限り平均的に電力を消費する必要がある。

そこで，はじめに，デューティ比を定数 D として， $2 \leq j \leq N_w$ に対して

$$\begin{aligned} B(j) &= B_0 + \sum_{i=1}^j (\Delta T D [P_s - P_h(i)]^+ \quad (2) \\ & - \eta \Delta T D [P_h(i) - P_s]^+ - \eta \Delta T P_h(i) \{1 - D\}) = 0 \end{aligned}$$

を満たす D 及び

$$\begin{aligned} B(Nw+1) &= B_0 + \sum_{i=1}^{N_w} (\Delta T D [P_s - P_h(i)]^+ \quad (3) \\ & - \eta \Delta T D [P_h(i) - P_s]^+ - \eta \Delta T P_h(i) \{1 - D\}) = B_0 \end{aligned}$$

を満たす D を求める．式 (2) は各 j において $B(j) \geq 0$ を，式 (3) は $B(Nw+1) = B_0$ を満たすための条件である．式 (2) 及び式 (3) で求まる D の中で，最小の D を D_t ，そのときの j を j_t とする。

次に， $2 \leq j \leq j_t$ において，

$$\begin{aligned} B(j) &= B_0 + \sum_{i=1}^j (\Delta T D [P_s - P_h(i)]^+ \quad (4) \\ & - \eta \Delta T D [P_h(i) - P_s]^+ - \eta \Delta T P_h(i) \{1 - D\}) \\ &\leq B_{max} \end{aligned}$$

を満たすかのチェックを行う． $B(j) \leq B_{max}$ を満たす場合は， $D(i) = D_t (1 \leq i \leq j_t)$ とする．そして， $B(j_t) = 0$ として， $j_t + 1 \leq j \leq N_w$ に対して，式 (2) 及び，式 (3) の計算へ戻る。

$B(j) \leq B_{max}$ を満たさない場合は，満たさない最小の j を j_t とし，

$$B(j_t) = B_0 + \sum_1^{j_t} (\Delta TD[P_s - P_h(i)]^+ - \eta \Delta TD[P_h(i) - P_s]^+ - \eta \Delta TP_h(i)\{1 - D\}) = B_{max} \quad (5)$$

を満たす D を D_t とする。そして、 $B(j_t) = B_{max}$ として、 $j_t + 1 \leq j \leq N_w$ に対して、式 (2) 及び、式 (3) の計算へ戻る。これを $j_t = N_w$ となるまで繰り返すことで、予測収集電力を用いた、永続動作時の最大間隔を最小にする電力制御を得ることができる。

このアルゴリズムによって求まる D が定式化 (1) の最適値であることを示す。このアルゴリズムによって、求まる D の最小値 $\min D(i)$ は、後半の $B(j) \leq B_{max} (a \leq j \leq b)$ を満たすループで求められた D となる。

$B(j) \leq B_{max}$ を満たさないループにおいて、最終的に求められるデューティ比 D_t 、区間の最後のタイムスロットを j_t とし、更新される前のデューティ比 D'_t 、区間の最後のタイムスロットを j'_t とする。デューティ比 D_t のときは $B(j_t) = B_{max}$ であり、デューティ比 D'_t のときは $B(j_t) \geq B_{max}$ である。これより、 $D_t \geq D'_t$ が得られる。

j_t から j'_t の区間でのデューティ比を考える。 j_t のとき $B = B_{max}$ 、 j'_t のとき $B = 0$ となる均一のデューティ比をとる場合がこの区間での最小のデューティ比が最大となる場合である。一方、 D'_t は j_t のとき $B \geq B_{max}$ 、 j'_t のとき $B = 0$ となるデューティ比である。よって、 j_t から j'_t の区間での最小のデューティ比 D は $D \leq D'_t \leq D_t$ となる。

よって、後半の $B(j) \leq B_{max} (a \leq j \leq b)$ を満たすループで求められた D の中の最小値が全体の D の最小値となる。最小値が得られる区間には、区間の最初のエネルギー残量は B_{max} もしくは $B_0 (j = 1$ のときのみ) であり、区間の最後のエネルギー残量は 0 もしくは $B_0 (j = N_w$ のときのみ) であるため、境界条件が良くなることはない。よって、この区間において均一のデューティ比をとることが、デューティ比の最小値を最大化することとなる。

3.3 シミュレーションによる評価

収集電力は晴天時の太陽光発電を想定し、制御周期の長さを 24 時間とし、図 2 のように最大で 72[mW]、最小で 0[mW] とし、その間を徐々に変動すると仮定した。

1 タイムスロットの長さは 10[min] とした。動作時の消費電力は GPS モジュールを想定し、70[mW] とし、デューティ比の下限は 0.1、上限は 0.5 とした。バッテリーの容量は 800[J]、初期エネルギーは 200[J] とした。充電によるエネルギー減衰率 η を 0.8 とした。また、比較対象として、Aman Kansal らの論文 [1] で提案された手法についてのシミュレーションも行った。

シミュレーションによる評価を行った結果、デューティ比及び、エネルギー残量は図のようになった。

先行研究では、デューティ比は D_{max} から D_{min} の値を

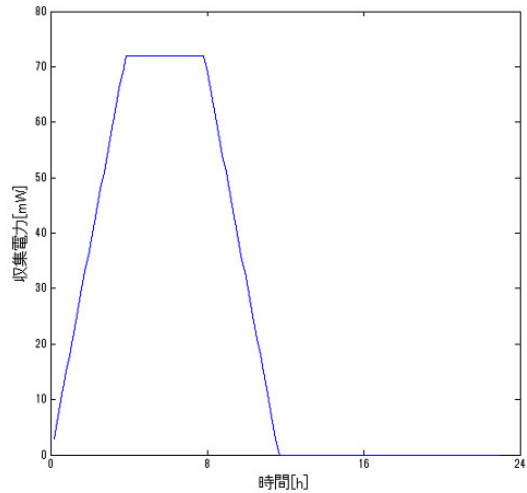


図 2 収集電力

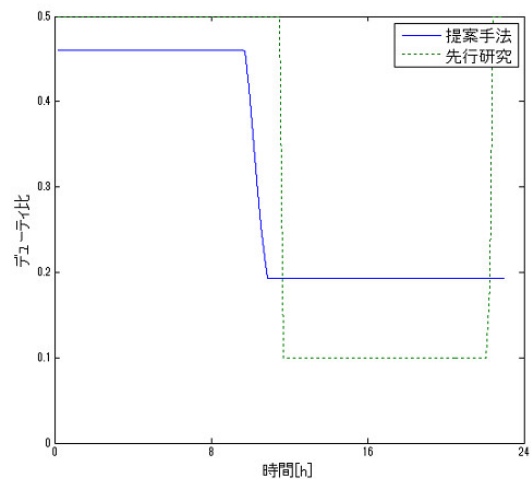


図 3 予測ありの場合のデューティ比

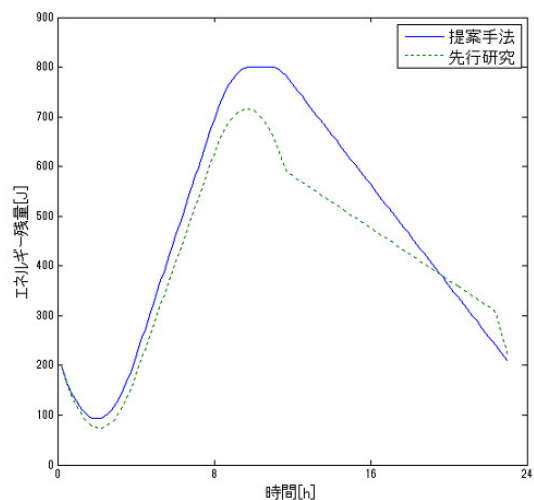


図 4 予測ありの場合のエネルギー残量

とっており、デューティ比の最小値は D_{min} となっている。一方で、提案手法では最低デューティ比は D_{min} より大きくなっていることがわかる。このことから、提案手法は先行研究と比較して、最小のデューティ比を大きく、つまり、最大センシング周期を短くすることができるということが確認された。また、全体のデューティ比の和は提案手法が先行研究の 96.1% となった。また、エネルギー残量もエネルギーの最大容量を超えることは無く、エネルギー効率も大幅に悪化することは無いということも、確認された。

4. 予測収集電力を用いない電力制御

4.1 提案手法

振動による収集電力など予測が困難なものや、予測自体は可能でも、センサノードが予測値を得ることができない場合も存在する。そのような場合においては、予測値によらず、エネルギー残量によって電力制御を行う必要がある。

エネルギー効率を高めるためには、バッテリー容量を超えて充電することを避ける必要がある。そのため、バッテリー残量が増えるにつれて消費エネルギーを大きく、センシング間隔を短くすることが望まれる。一方、最大のセンシング間隔を最小にするためにはセンシング間隔をなるべく平均化する必要がある。しかし、センシング間隔を一定にすると、バッテリー残量がなくなったり、バッテリー容量を超えてしまい、エネルギーを無駄にする可能性がある。

そこで、各タイムスロットでのデューティ比を以下のよう設定する。

$$D(i) = D_{min} \left(\frac{B(i)}{kD_{min}\Delta TP_s} \right)^{1/n} \quad (6)$$

k 及び n はセンサノードの及びその周辺環境によって調整するパラメータであり、 $k > 1$, $n > 1$ とする。 $D_{min}\Delta TP_s$ はデューティ比を D_{min} にしたときの消費エネルギーであり、この消費エネルギーの k 倍のエネルギーまでエネルギー残量が下がったとき、デューティ比を D_{min} にする。 n を大きくすると、センシング間隔はより平均化され、 $n = 1$ のときエネルギー残量に比例したセンシング間隔を、 $n \rightarrow \inf$ のときエネルギー残量によらず一定のセンシング間隔をとる。

4.2 シミュレーション

4章のシミュレーションと同じく、太陽光発電を想定し、収集電力量は図2のように設定し、動作時の消費電力は $70[mW]$ 、デューティ比の下限は 0.1、上限は 0.7 とした。

パラメータを、 $k = 9$, $n = 4$ にした場合と、 $k = 2$, $n = 6$ にした場合についての比較を行った。図5を見ると $n = 4$ のときのほうが、最小のデューティ比が小さく、最大のデューティ比が大きくなっていることがわかる。最大のセンシング間隔を短くすることが重要なので、この点においては $n = 6$ のほうが勝っているといえる。図6を

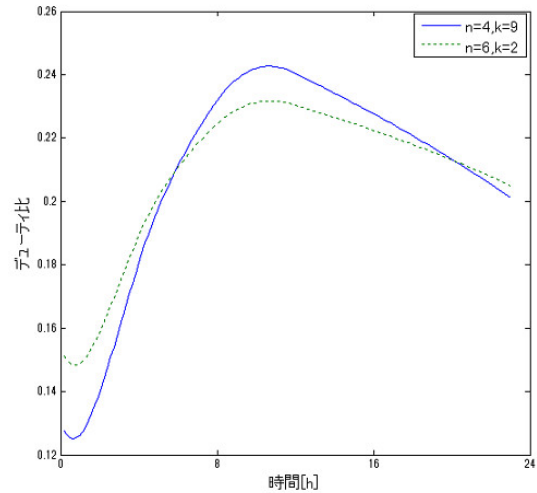


図5 予測なしの場合のデューティ比

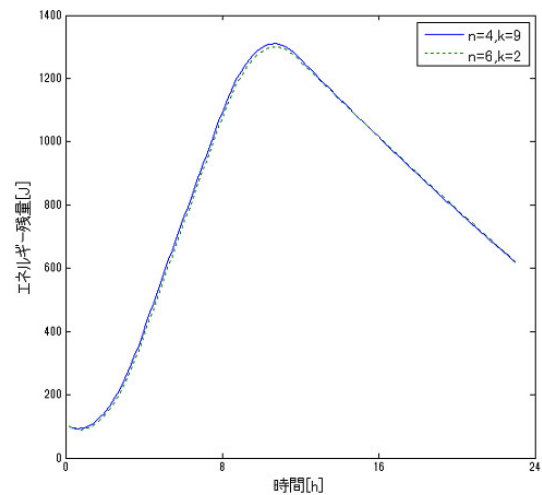


図6 予測なしの場合のエネルギー残量

見ると、わずかではあるが、 $n = 4$ のときのほうが最大のエネルギー残量が多いことがわかる。今回の収集電力は、収集電力が少ない時間が長く設定されているため、最大のエネルギー残量の差は小さくなっているが、より長い時間収集電力を多く得られる場合には、この差はより大きくなる。そのようなセンサノードにおいて、 n を大きくしすぎるとバッテリー容量を超えて充電されることとなり、使用できるエネルギーが減ってしまう。センサノードや周辺環境から、適した n 及び k を選択する必要がある。

5. まとめ

本稿では、センシングのみを行うエネルギーハーベスティングセンサノードにおける、最大センシング周期の最小化を実現するためのアルゴリズムを提案した。予測収集電力を用いた手法では、数値シミュレーションにより、提案手法は既存手法と比較し、最大センシング周期を短くするこ

とを確認した。予測収集電力を用いない手法においては、エネルギー効率と最大周期を短くするという2つの目的に対して、パラメータを調整することで、使用状況に応じた電力制御を実現する手法を提案した。

今後の課題としては、定式化の際に置いた仮定の検証、及びより現実のセンサネットワークに即した問題設定を考えるということや、センシングに加えて、通信・バッファについても考慮した問題などが挙げられる。

謝辞

本研究の一部は、NEDO「位置情報収集システムにおけるノーマリーオフコンピューティング技術の研究開発」事業による。

参考文献

- [1] Aman Kansal, Jason Hsu, Mani B. Srivastava, Power Management in Energy Harvesting Sensor Networks, ACM Transactions on Embedded Computing Systems, VOL. 6, NO. 4, Article 32, (2007)
- [2] Nicolo Michelusi, Kostas Stamatiou, Michele Zorzi, On Optimal Transmission Policies for Energy Harvesting Devices, Information Theory and Applications Workshop, pp. 249-254 (2012)
- [3] Shaobo Mao, Man Hon Cheung, Vincent W. S. Wong, Joint Energy Allocation for Sensing and Transmission in Rechargeable Wireless Sensor Networks, IEEE Transactions on Vehicular Technology VOL. 63, NO. 6, pp. 2862-2875 (2014)