

Sensing through Harvesting: センサとハーベスタの統合可能性に着目した 無線センシング手法

中島直哉^{†1} 西本寛^{†1}
川原圭博^{†1} 浅見徹^{†1}

無線センサネットワークの実現において、管理面と製造面で低コストな無線センサノードが求められている。センサノードの管理面を考えるとエナジーハーベスティングを用いるのが有効であるが、付随する製造コストの増加が問題となる。そこで本稿では、無線センシングの新たなコンセプトとして“Sensing through Harvesting”を提案する。提案手法は、センシングとエナジーハーベスティングを統合することで、エナジーハーベスティングの利点を活かしながら、ノードの製造コストを抑えることが可能である。更に、提案手法をセンサノードプロトタイプとして実装することで低コスト性を証明し、センシングの精度に関して評価を行うことによって、その実用可能性を明らかにした。

Sensing through Harvesting: Wireless Sensing Focused on the possibility of integration of sensor and harvester

NAOYA NAKASHIMA,^{†1} HIROSHI NISHIMOTO,^{†1}
YOSHIHIRO KAWAHARA^{†1} and TOHRU ASAMI^{†1}

For the realization of wireless sensor network, sensor nodes should be fabricated at low cost and managed easily. Energy harvesting is one of the promising method to make management easy. However this method increase the fabrication cost of sensor nodes. In this paper, we propose “Sensing through Harvesting” as a new concept of wireless sensing. The proposed method enable to cut down the fabrication cost without sacrificing the merit of energy harvesting by integrating sensing and harvesting. To show the costless implementation, the prototype of sensor nodes are developed based on the proposed method. In addition, practicality of our method was shown by evaluating the accuracy of sensor value.

1. はじめに

無線センサネットワーク (WSN) はコピキタス・コンピューティング社会や環境モニタリングにおける有望なデータ取得手段の一つである。しかし、WSNの実現には様々な課題も残されている。その課題の一つが、エネルギー源の確保である。既存手法としては一次電池を用いることが主流ではあるが、この方法では電池交換に非常に手間がかかるため現実的ではない。この問題の解決には、環境中に存在するエネルギーを獲得するエナジーハーベスティングを用いることが有効である。これにより、センサノードは自立的にエネルギーを確保可能となり、WSNの運用に伴う電池交換の手間から解放される。しかし、エナジーハーベスティングを用いると環境中のエネルギーを獲得するために用いるエナジーハーベスタやエネルギーを適切に管理するためのモジュールが必要となる。このような部品の増加はセンサノードの高コスト化につながる。

本研究では、低コストな WSN を実現するために、エナジーハーベスティングの考え方に基づき、Sensing through Harvesting (以下、提案手法と呼ぶ) というコンセプトを提案する。センシングとは、しばしばセンサが生じる電気エネルギーを測定する行為を指し、本質的にエナジーハーベスティングを伴うことが多い。そこで、エネルギーという観点からセンサとハーベスタの統合の可能性に着目し、獲得電力によって変化するセンサノードからの無線通信の頻度よりハーベスタで得られているエネルギー量をアクセスポイント (AP) 側で推定し、それに基づいてセンサ値を得る。このようにすることで、センサノードの機能やエネルギー管理を単純化でき、ノードの低コスト化が可能となる。最終的には、大規模無線センシングネットワークの基礎となりうる低コスト無線センシングシステムを提案手法により実現することを目指す。

本稿では、まず第2節で関連研究に言及し、本研究の立ち位置を明確にする。次に、第3節で、提案手法のアイデアを述べ、環境をモデル化と問題の定式化をすることによって提案手法によるセンシングの実現可能性を示す。第4節では、提案手法の実装について述べる。また、作成したデモンストレーションについて言及する。第5節では、第4節で実装したセンサノードを評価し、提案手法の実現可能性を示す。最後に、第6節では、提案手法の汎用性や利害得失に関して考察を行う。

^{†1} 東京大学 大学院情報理工学系研究科

Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo

2. 関連研究

本稿で提案する低コスト無線センシングシステムは、最終的には WSN への応用を考えている。よって、まずは WSN についての関連研究について述べ、WSN の問題をエネルギーの観点から明らかにする。更に、エナジーハーベスティングに関する研究について述べ、本研究がセンサノードの低コスト化を目指す理由を示す。

2.1 無線センサネットワーク (WSN)

WSN は、その名のとおり無線通信を用いてセンサ値をやり取りするセンサノードのネットワークである。広域に有線でセンサを配置していくには大きなコストがかかるだけでなく、配線できない場所には配置できないという制限もあるため現実的でない。したがって、広域の情報を一括して得るためには WSN が非常に有用であり、環境モニタリングや施設のオートメーション化など様々な分野での活躍が期待されている。WSN の実現の上で、特に大きな問題になるのがセンサノードで消費するエネルギーの確保である。エネルギーを効率的に使い、WSN の寿命を延長する上でよく使われる手法にセンサノードをいくつかの集合に分けるクラスタリングというものがある。W. Heinzelman らが提案した LEACH¹⁾ では、配置されたノードが自律的にクラスタを形成する。そして、各クラスタのヘッドノードがデータを集約して送信することで、エネルギー利用効率を向上させた。また、O. Younis らの HEED²⁾ では、クラスタサイズやヘッドなどを各ノードのエネルギー残量に基づいて決定することで、LEACH で問題となっていたエネルギー消費の偏りを解消した。クラスタを用いずに、エネルギー利用効率を改善する研究としては、S. Lindsey らが提案する PEGASIS³⁾ がある。全てのセンサノードに予め共有させておいた位置情報に基づき無線通信することなくチェーンを構成し、そのチェーンを最後まで使い続けることで、センサノードのネットワーク形成にかかるエネルギーを抑えた。また、以上とは別のアプローチとして C. Luo らは、Compressed Sensing⁴⁾ という信号のスパース性に基づき、少数のデータから本来の観測信号を高精度に復元する手法の利用によるマルチホップ WSN の負荷分散を提案している⁵⁾。

ここまででは WSN の寿命をのばすために取り組まれてきたエネルギーの効率的利用に関する研究を紹介した。しかし、いかにエネルギー効率を改善しようと、一次電池を用いている限りいずれはエネルギーが枯渇することには変わりはない。そこで、本稿で提案する手法ではエナジーハーベスティング⁶⁾ を利用する。エナジーハーベスティングでは、一次電池という有限のバッテリーではなく、環境中のエネルギーを利用してエネルギーを確保する。したがって、WSN を半永久的に運用可能であると期待されている。

2.2 エナジーハーベスティング

身近なエナジーハーベスティングの例としては太陽電池による光エネルギーの利用であるが、それ以外にも様々な手法が研究されている。そのひとつに振動からのエナジーハーベスティングが挙げられる。S. Henry らの研究では、圧電体である PZT と Midé 社製の振動発電モジュールである QuickPack (QP)、圧電複合材料の MFC の 3 種の圧電装置を用いた電気エネルギーの獲得を試みている⁷⁾。彼らは、PZT や QP はエナジーハーベスティングに応用可能であり、特に PZT はランダムな振動からのエネルギー獲得に向いていると述べている。また、M. Ujihara ら研究では、温度差を利用した発電に着目している⁸⁾。彼らは熱エネルギーを振動という力学的エネルギーに変換した後、圧電体を用いて電気エネルギーを獲得する手法を提案し、既存手法と比較して 60% の効率上昇を実現した。

WSN へのエナジーハーベスティングの応用において重要となるのが、各ノードにおけるエネルギー管理である。獲得できるエネルギー量が環境に依存するため、状況に応じて適切なエネルギー管理を行わなければならない。

H. Gou らは LEACH に改良を加え、エナジーハーベスティングを用いた WSN に適したアルゴリズムを提案している⁹⁾。彼らの提案する手法では、クラスタヘッドを、エネルギー残量と獲得エネルギー量という二つの基準で選出することで、WSN の寿命を 20 ~ 25% 程度伸ばした。同様に、T. Zhu らの研究もエネルギーの効率的利用を論じている¹⁰⁾。彼らの研究では、バッテリーである大容量キャパシタからの漏れ電流によるエネルギーの損失に注目し、残存エネルギー量に応じて Duty Cycle を変化させることで効率的なエネルギー利用を可能にした。また、L. Cao らは、振動発電による WSN の運用を目指し、エネルギーを Maximum Power Point Tracking によって効率的に利用する方法を提案している¹¹⁾。更に、新たな電力源として注目を浴びているのが電波である。L. Tang らは WSN において、各ノードから送信される無線信号をエネルギー源と捉えることで WSN の寿命を伸ばすことが可能であると述べている¹²⁾。また、H. Nishimoto らは TV 電波を利用したセンサノードの構築を目標に研究を進めている¹³⁾。電波から再生できるエネルギーはごく少量だが、各時点で獲得されている電力を推定し、エネルギーが枯渇してしまわないように Duty Cycle を調節することで、ノードの長期運用を実現している。

このように、広く WSN に応用され始めたエナジーハーベスティングだが、ハーベスタやエネルギー管理モジュール、大容量バッテリーなどの部品の増加に起因するノードの高コスト化が問題となる。本研究では、Sensing through Harvesting というコンセプトを提案し、エナジーハーベスティングを用いながらも、低コストな無線センシングシステムの実現を目指す。

3. Sensing through Harvesting

3.1 アイデア

センサは、その観測対象が生ずる空間・時間的变化を、何らかの方法により電気的信号に置き換える装置である。すなわち、ある種のセンサにおいてはその生み出す電圧を測定するという行為自体が、センシングにほかならない。この生み出された電圧とは、それ自体を電気的エネルギーとみること可能である。また、エナジーハーベスタは、環境中に存在するエネルギーを変換し、電気エネルギーとして取り出す装置を指す。以上より、センサとハーベスタの役割は同一視可能であると考えられる。この考えに基づき、センサとハーベスタの役割を統合した無線センシングシステムを考案した。提案手法の最終目標は、センサが生み出す電気信号をエネルギーと捉え、それをを用いてセンサノードを起動させ、そのノードからの通信頻度の変化を捉えることで実現する無線センシングである。

より詳細に述べると、提案手法では、センサが生み出すエネルギーに応じた通信ビーコンの頻度から、AP側での処理を通して各センサノードで獲得されている電力を推定し、対応するセンサ値を算出する。したがって、APはどのノードからのビーコンが検知されたかという情報を取得するだけでよい。提案手法によるセンシングの対象となりうるのは、短期間のうちにセンシング対象の物理量が何度も大きく変化することのない事象である。これは、ビーコンの到着に伴ってセンサ値の算出を行う提案手法では、ビーコンの到着間隔よりも短い時間で起きる変化に対応できないためである。しかし、省電力の送信機を用いれば、数百 μJ 程度のエネルギーでビーコンの送信が可能であり、これを貯めるのにかかる時間は、 $10\mu\text{W}$ 程度の電力しか得られないハーベスタを用いても数十秒程度で済む。よって、少なくとも数十秒のうちに値が大きく変わることがなければよい。したがって、適用先を著しく狭める要因にはならない。省電力送信機の例としては、TI社製のマイクロコントローラ (MSP430) と Chipcon 製の無線モジュール (CC2500)⁴⁾ が搭載された送信機が挙げられる。この送信機では $200\mu\text{J}$ 程度のエネルギーにより、十数メートル程度の送信を行うことが可能である。

3.2 環境のモデル化と問題の定式化

提案手法によるセンシングを達成するためには、AP側でセンサノードにおける獲得電力を推定できる必要がある。ここでは、その推定可能性をセンシングの対象である環境をモデル化することで示す。まず、センシング対象の物理量が t_0 時間で変化すると仮定する。また、1回ビーコンを送信するのに必要なエネルギーを $E_{require}$ とし、これが t_1 時間で貯まる

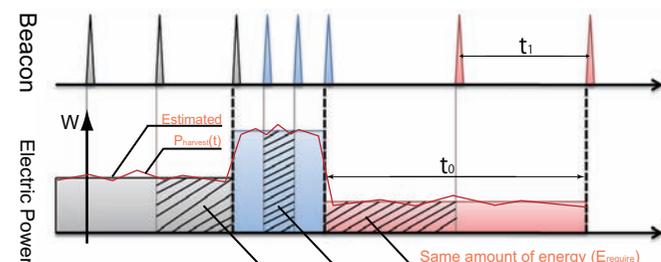


図1 ビーコン間隔による電力の推定可能性

とする。ここで t_0 と t_1 の関係について考えると、提案手法では、短期間のうちにセンシング対象の値が何度も大きく変化することのない事象を対象とするため、 $t_1 \ll t_0$ であるというモデル化を行える。そのもとで、式 (1a) ~ (1c) を考える。 t_0 の間の獲得電力は一定とみなせるので、それより短い期間の獲得電力は式 (1a) のように、その間に獲得された総エネルギーを獲得にかかった時間で割ったものとほぼ等しい。また、 $E_{require}$ については、式 (1b) のように表せる。以上の2式より、 $t_1 \ll t_0$ を満たす t_1 時間でエネルギー $E_{require}$ が貯まれば、式 (1c) に示したように $E_{require}$ を t_1 で割ることで獲得電力を推定できる。図1は、このモデルによる獲得エネルギーの推定可能性を表したものである。また、 t_0 時間で十分なエネルギーが貯まらないような状況下に対しては、その時間での獲得電力を0とすればよく、これは前述したようにセンシングの対象が存在しないという情報の取得と捉えられる。

$$\begin{aligned}
 & P_{harvest}(t) \approx \frac{\int_t^{t+t_1} P_{harvest}(t) dt}{t_1} & (1a) \\
 & \int_t^{t+t_1} P_{harvest}(t) dt = E_{require} \text{ (const.)} & (1b) \\
 & \frac{E_{require}}{t_1} \approx P_{harvest}(t) & (1c)
 \end{aligned}$$

次に、問題の定式化を行う。提案手法において、センサノードはビーコンを送信するのに必要な一定量のエネルギー ($E_{require}$) が貯まり次第、直ちにID情報を含むビーコンをAPに送信する。APはそのビーコンの到着間隔から獲得電力を推定し、その処理を通してセンサ値を導出する。1回のビーコン送信に用いるエネルギー量 $E_{require}$ は、第4節で設計されるエネルギー管理回路の構成によって決定されるため既知である。また、ビーコン間隔 $t_{interval}$ については、APが観測可能である。 $P_{harvest}$ はこれらより式 (1c) によって推定される。更

にここで、物理量と獲得電力の関係を示す関数 $x(P_{harvest})$ を定義する。これは、例えば明るさであれば、獲得電力を与えることでそのときの照度を導出する関数である。この関数は、予めセンサノードに用いるハーベスタを評価し、物理量と獲得電力の対応を記録することで求める。以上を用いることで、センサ値の導出という問題は式(2)のように定式化される。この式により、APはビーコンの受信時にその時点でのエネルギーを推定し、センシング対象の物理量をセンサ値として取得することが可能となる。

$$(SensorValue) = x(P_{harvest}) = x\left(\frac{E_{require}}{t_{interval}}\right) \quad (2)$$

4. 実装

4.1 全体構成

提案手法を利用したセンサノードは大きく分けて3つの部分に分けられる。まず、一つ目がハーベスタ部である。この部分は、太陽電池や圧電素子に相当し、ノードを機能させるためのエネルギー源となる。また、センシングの対象によって適切なハーベスタを選択することでセンサの役割も担う。次に、エネルギー管理回路部であるが、これについては第4.2節で言及する。最後に送信部である。この部分は、基本的にはマイクロコントローラと無線モジュール、そしてアンテナで構成される。機能としては、APに向かってノードのIDを送信できればどのような送信機でも使用可能である。しかし、エナジーハーベスティングで獲得できる電力というのは基本的には微小である。したがって、時間的粒度の細かいセンシングを期待する場合には省エネルギーな送信機が望ましい。例えば、 $100\mu\text{W}$ の電力を供給できるハーベスタを用いて、10秒程度に一度のセンシングする場合、送信機の消費エネルギーは 1mJ 以下にしなければならない。また、ノードの配置によってAPとの距離が変化するため、送信可能な距離も目的に応じて適切に選択することが必要である。

4.2 エネルギー管理回路

4.2.1 設計

エネルギー管理については、ハードウェア的なアプローチで実現する必要がある。これは、ソフトウェア的なアプローチ、すなわちマイコンを用いてエネルギー管理を実現しても、常にマイコンを機能させうるほどのエネルギーを獲得できる保証がないためである。エネルギー管理回路に求められる機能としては、まず、一定のエネルギーを貯めることが挙げられる。更に、様々な送信機を装着可能とするために、貯めておけるエネルギーの量を簡単に変更可能な設計を考えなければならない。また、貯められているエネルギーの量を監視し、毎回一定量のエネルギーを送信機へ供給する機能が求められる。これらの要求を満たすた

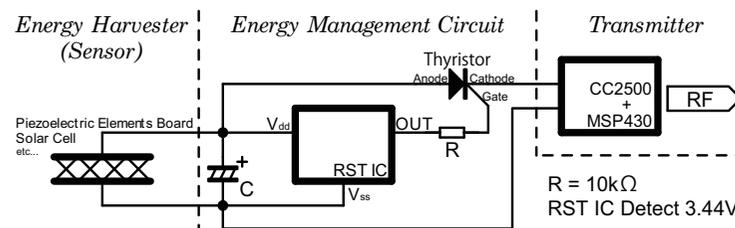


図2 エネルギー管理回路

めに設計した回路を、図2の中心部に示す。この回路は主にエネルギーを貯蔵するためのキャパシタとエネルギー供給の開始と終了を管理するリセットICとサイリスタで構成される。キャパシタには、ハーベスタで獲得されたエネルギーが貯められていく。このキャパシタの容量を変更することで、簡単に貯蔵できるエネルギー量を指定することができる。これにより、エネルギーを貯め、その貯蔵量の変更可能であるという要求を満たせる。また、リセットICはその入力電圧を監視し、一定の電圧以上の入力を検知すると出力信号を発生させる。サイリスタの特徴はアノード・カソード間に電圧をかけただけではOFF状態(遮断)を保持し続け、その状態からゲートに一瞬でも電流が流れることでON状態(導通)に遷移する点である。そして、一度ON状態に移行すると、ゲート電流に関係なくON状態を保持する。再びOFF状態へ遷移させるには、アノード・カソード間に掛かる電圧を0にする、または逆電圧をかけることが必要である。また、サイリスタがON状態を持続できる最小アノード電流を保持電流といい、サイリスタに流れる電流がこれを下回ることでOFF状態に遷移する。エネルギー管理回路の実装という観点でサイリスタを見ると、一瞬の電流入力でON状態へ遷移、すなわち回路を導通可能である点が重要である。

以上で述べたサイリスタとリセットICの特徴を踏まえ、エネルギー量の監視と一定量供給という要求を実現する。まず、リセットICにキャパシタの電圧を監視させる。リセットICはキャパシタの両端の電圧が監視電圧を超えた時点で出力信号を発生させるため、特定の電圧の検出することが可能である。キャパシタに貯まるエネルギーは、キャパシタの容量を C 、電圧を V とすると $\frac{CV^2}{2}$ で求められるため電圧の監視はエネルギーの監視に等しい。更に、エネルギーの一定量供給についてはサイリスタを用いて、供給の開始、終了電圧を一定に保つことで実現する。前述のリセットICからの出力信号をサイリスタのゲートで受け取ることでサイリスタをON状態へ遷移させ供給を開始する。これにより、供給開始電圧を一定にすることが可能である。供給の終了については、サイリスタの電流値制限によるOFF状態遷移を利用する。確かに、リセットICを供給ライン上に配置することにより供給

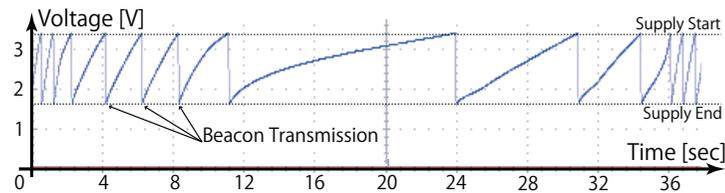


図3 キャパシタ電圧の推移

の終了にも電圧という指標を用いることが可能であり、電圧を一定に保つという意味ではこの構成の方が自然である。しかし、リセット IC はその構成上大量の電力を流せるようになっておらず、データシートから読み取ると、その出力からは最大でも 4mA 程度しか流すことができない。実際に送信機を動作させるためには、最低でも 50mA から 100mA 程度の供給電流が必要である。したがって、供給路からリセット IC を排除し、図 2 のような回路構成を考えた。しかし、電流値制限により一定電圧での供給終了が実現できるかは動作実験によって確かめる必要がある。この点については第 4.2.2 節で言及する。

4.2.2 動作

エネルギー管理回路の動作をまとめると以下のようになる。

- (1) ハーベスタから供給されたエネルギーは、キャパシタ C に貯められる
- (2) C の電圧がリセット IC の検出電圧を超え、検出信号がサイリスタのゲートに流れる
- (3) サイリスタが ON 状態に遷移し、送信機へのエネルギー供給を開始
- (4) エネルギー供給によりキャパシタの電圧が下がり、サイリスタに流れる電流値が減少
- (5) サイリスタが OFF 状態に遷移しエネルギーの供給が終了し、1 に戻る

ここでは、図 2 に示した回路構成により一定電圧での供給の終了が実現されるかを実験で検証する。実験方法は、実際にハーベスタ（太陽電池）と送信機を回路につないで複数回ビーコンを送信し、オシロスコープによりキャパシタの両端電圧の推移を測定する。測定結果を図 3 に示す。図中のエネルギー供給の開始と終了のタイミングを見るとほぼ一定に保たれている。特に供給の終了にはサイリスタの電流制限による OFF 状態への遷移を用いているが、この実験により一定の電圧で供給を止められることがわかった。したがって、この回路により毎回一定量のエネルギーを供給できることが確認された。式 (3) で示される $E_{threshold}$ を供給開始のしきい値とし、式 (4) に示される分だけエネルギーが供給される。供給するエネルギーの量は、キャパシタ C の容量を変化させることで簡単に調節可能である。

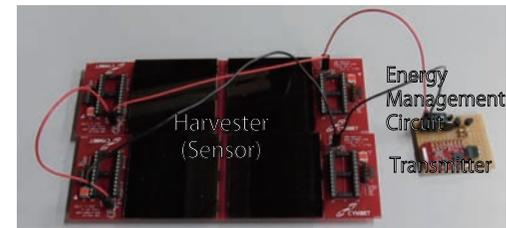


図4 提案手法に基づく光センサノード

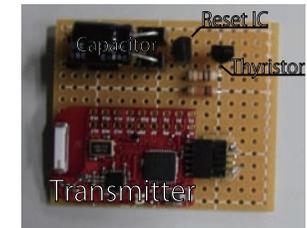


図5 回路部分の拡大

$$E_{threshold} = \frac{CV_2^2}{2} \quad (3)$$

$$E_{require} = \frac{C(V_2^2 - V_1^2)}{2} \quad (4)$$

4.3 デモの製作による稼働実験

以上では、提案手法の実装に必要な構成要素として、ハーベスタ部、エネルギー管理回路部、送信部と分けて示したが、ここではそれらを組み合わせたときの動作について言及する。そのために前節までに作成したエネルギー管理回路を中心に、提案手法を利用した無線センシングシステムとして機能するセンサノードのデモンストレーションを作成した。以下では、作成したセンサノードについて述べ、更にデモンストレーションの動作の様子を記述することで、提案手法に基づくセンシングが実際に機能することを示す。

4.3.1 光センサノード

太陽電池は感光部に照射される光を電気エネルギーに変換できる。よって、ハーベスタ部に太陽電池を用いることで明るさをセンシングするセンサノードが製作可能である。製作した光センサノードを図 4 に示す。送信部には第 3.1 節で述べたマイクロコントローラ (MSP430) と Chipcon 製の無線モジュール (CC2500)¹⁴⁾ が搭載された送信機を用いた。送信プロトコルとしては simpliciTI をベースにしているが、ACK などの機能を排除することで単純なビーコンが送信される。また、エネルギー管理回路は図 5 の上部のように実装された。主な構成要素として、リセット IC には SII 社製の S-8053ALR、サイリスタには SemiWell Semiconductor 社製の MCR22-8 を用いている。キャパシタとしては、ビーコンの送信に十分なエネルギーを蓄えられる 220 μ F の容量のものを採用した。

次に、製作したセンサノードの実用性を示すため、デモ用のシステムを製作した。以下にその動作を示す。

- (1) 受信機はノードからビーコンを受信する度に、ID 情報を PC に送る
- (2) PC は前回の受信との時間差を計算し、これを $t_{interval}$ とする

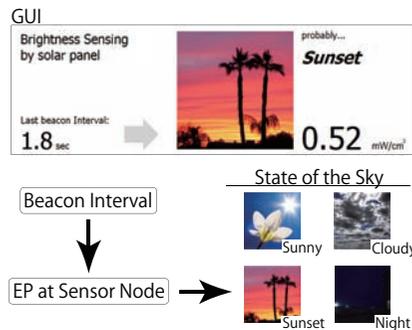


図 6 光センサーノードによるデモ

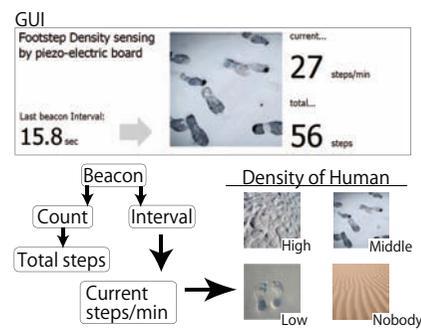


図 7 人感センサーノードによるデモ

- (3) 式(4)より供給されるエネルギー量は分かるため、式(1c)に基づき $t_{interval}$ で割ることでノードでの獲得電力を推定
- (4) さらに太陽電池の面積で割ることで、 1cm^2 当たりの獲得電力を算出
- (5) この値に基づいて、図6に示す GUI を PC の画面上に出力

また、センシングの結果としては、現在の空模様として4つの状態（晴れ、曇り、夕方、夜）を想定し、電力の推定結果により対応する画像を出力する。数枚の薄い紙を用いてセンサの役割を持つ太陽電池部分に当たる光の量を変化させ、センシングシステムの動作を確認したところ、確かに値と画像の変化を確認することができた。したがって、提案手法がセンシングシステムとして動作する可能性を持つことが示された。

4.3.2 人感センサーノード

圧電体は、自身に加わる圧力を電力に変換することのできる物質である。これを用いることで、センサ上を通った人数を検知できるセンサーノードを製作する。今回は、圧電体としてスピーカなどに用いられる圧電振動板を用いることにする。しかし、圧電振動板単体から得られるエネルギーはごく少量で提案手法の実現には足りていない。そのため、まず圧電振動板を用いて十分な電力を得るために複数の圧電振動板を利用した圧電素子板を作成する。具体的には、圧電振動板を直列に2枚つないだものを並列に48個並べ、それをアクリル板で挟みこむかたちで圧電素子板（図8）を設計した。圧電体は、そのかかる物理的負荷が大きいほど得られるエネルギーも大きくなる。よって、人が踏んだときに圧電体へ加わる歪みがより大きくなるよう、直列につないだ圧電振動板間には薄い塩ビ板を挿入する（図9）。更に、圧電振動板の中心部に塩ビ板のかけらを入れることで、上部から押されたときに効率的に圧電振動板に圧力がかかるように設計した。この圧電素子板に対して簡単な評価



図 8 圧電素子板

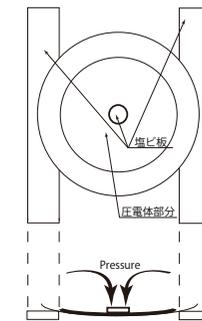


図 9 圧電素子板の内部構造

を行うと、1回踏まれることで $130\mu\text{J}$ 程度のエネルギーを供給可能であることがわかった。

更に、実用性を示すため光センサーノードと同様にデモシステムを製作した。動作としては、ビーコンの数からその場所を通った人の総数を、 $t_{interval}$ から人がその場所を通過した頻度を算出し表示する。更に、光の場合と同様に、現在の通過頻度に基づき4つの状態に分類し、図7に示した4つの絵を用いてグラフィカルに情報の提示を行う。こちらも、実際に運用してみると、圧電素子板を踏む頻度に応じて表示が変わり、センシングシステムとして動いていることを示すことができた。

5. 評価

本節では、製作した各センサーノードに対して定式化を適用し、その性能を評価する。特に光センサーノードに関しては、既存手法との比較評価も行った。今回評価の基準として用いたのは、センサ値のばらつきと正解値に対する誤差である。いずれもセンシングの精度として重要な要素であり、提案手法によるセンシングシステムの評価として適している。

5.1 光センサーノード

5.1.1 定式化の適用と評価

まず、ハーベストの性能評価を行い、第3.2節で行った定式化を光センサーノードに適用する。照度計を用いて正確な照度を測定した後、同様の環境でハーベスタよりキャパシタへエネルギーを貯蓄する。一定のエネルギーを貯めるのにかかった時間を複数回測定し、その平均値を各照度条件下での獲得可能電力とする。測定の結果が図10の実線である。結果を見

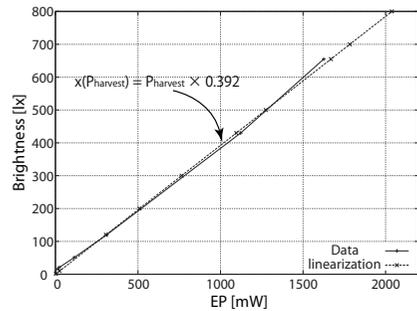


図 10 $x(P_{harvest})$ の決定

ると照度と獲得電力の関係は線形の特徴が伺える．そこで最小二乗法を用いて線形近似を行った．更に，照度が 0 であれば当然獲得電力も 0 なので，近似した結果の切片を 0 にとることにした．これが図 10 中の破線である．両者を重ね合わせてみると大きな誤差もなく，良い近似になっている．したがって，この結果を式 (2) のように表すことで以下を得た．

$$(Illuminance[lx]) = x(P_{harvest}) = 0.392 \times 10^6 \times P_{harvest} \quad (5)$$

次に，提案手法を用いてセンシングを行い，式 (5) に従ってセンサ値の算出を行う．今回は明るさを 6 段階 (15.5lx, 21lx, 51lx, 120lx, 430lx, 655lx) に変え，各明るさにおいて 5 分間ずつセンシングを行った．また，照度計による結果を正解値とする．図 11 に結果と正解値を重ねてグラフにしたものを示す．図を見ると，センサ値が大きくはずれている部分が 2 箇所あるが，これはビーコンの受信失敗を示している．なぜなら，一度ビーコンの受信に失敗すると $t_{interval}$ が 2 回ビーコンを送信するのにかかる時間になり，結果として推定電力が $\frac{1}{2}$ となってしまう． $x(P_{harvest})$ として線形のモデルを立てているので，推定電力が $\frac{1}{2}$ になることはセンサ値が $\frac{1}{2}$ になることと等しい．改めて図を見ると，確かに正解値から見ておよそ半分まで値が下がっており，前述の議論と一致する．これについては，AP 側で各センサ値の前後数個のセンサ値を参照し，あるセンサ値が周辺の値と比較して大きくずれている場合は自動的に修正することで解決可能である．

次に，正解値とセンサ値の誤差とばらつきを評価する．誤差については (平均二乗誤差 / 正解値) $\times 100$ で百分率を算出した．ばらつきに関しては (標準偏差 / 平均値) で算出している．結果を図 12, 13 に示す．まず，図 12 をみると，センサ値の小さい環境で大きな誤差が生まれてしまうことがわかる．この理由は，エネルギーのあまり得られない環境において，ビーコンを送信可能なエネルギー貯めるまでの時間が長くなり，キャパシタからの漏れ電流によって蓄積される誤差が大きくなるためである．これは，提案手法において特有の

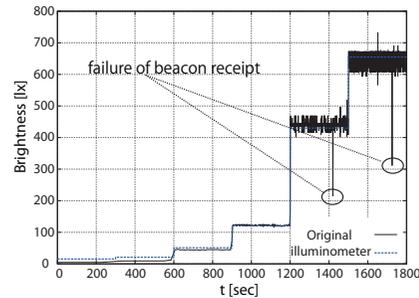


図 11 センシングの結果と照度計による値

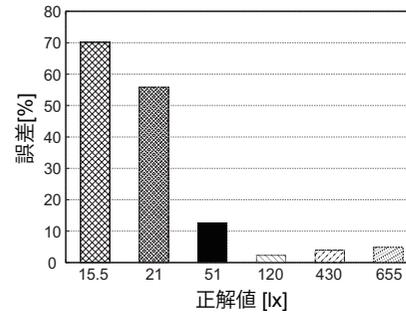


図 12 各照度におけるセンサ値の誤差

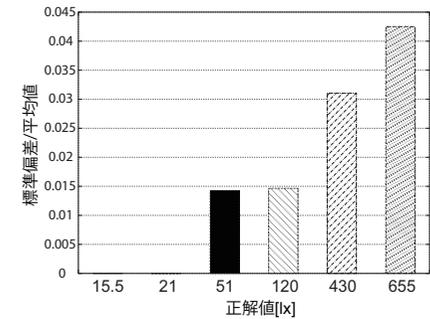


図 13 各照度におけるセンサ値のばらつき

問題であり，このことから提案手法は微量な値の正確なセンシングには向いていないことがわかる．しかし，誤差は大きいながらもビーコンを飛ばすことは可能なので，わずかながらでも光源があるという情報は得られる．したがって，光源の存在を検知するようなセンシングには適用できる．また，図 13 から正解値が大きい環境では値がばらついている様子が見える．これは， $t_{interval}$ が短いとき，すなわちエネルギーが多量に得られる環境では， $t_{interval}$ に生じた誤差の比率が大きくなってしまいうことに起因する．例えば，10 秒の $t_{interval}$ に対して 0.1 秒の誤差が生まれたとしても，全体に含まれる誤差の比率は 1% 程度であるが， $t_{interval}$ が 1 秒だとすると，誤差の比率が 10% と大きくなってしまふ．正解値の大きい環境とは，つまりエネルギーが多量に得られる環境であるので，センサ値が大きいほどばらつきが大きくなっていると考えられる．このばらつきに関しては，センサ値の移動平均を取ることで改善可能である．移動平均を取る方法としては，1 つのセンサ値に対して，その前後 10 秒間のセンサ値の平均をとり，その値を改めてその時点でのセンサ値とすることにした．この改善により，特にばらつきの大きかった 430lx, 655lx のばらつきを $\frac{1}{5}$ 以下に抑えることができた．以下で行う既存手法との比較評価には，改善後のセンサ値を用いる．

5.1.2 既存手法との比較評価

ここでは，既存手法としてフォト IC ダイオードを用いた光センサノードを用いる．既存手法においても，提案手法と同様のセンシング実験を行い，その誤差とばらつきを算出した．提案手法と比較した結果を図 14, 15 に示す．両者を比較すると，既存手法に比べて提案手法は 15.5lx や 21lx といった微小な値のセンシングは苦手としている．だが，それ以上の照度があれば，既存手法に比べても性能が極端に落ちるということはない．よって，不得手とする目的に使用しなければ，提案手法が十分有用であることが実証された．

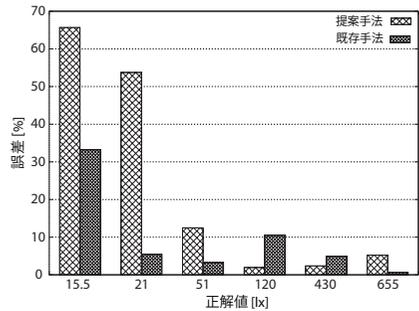


図 14 誤差の比較

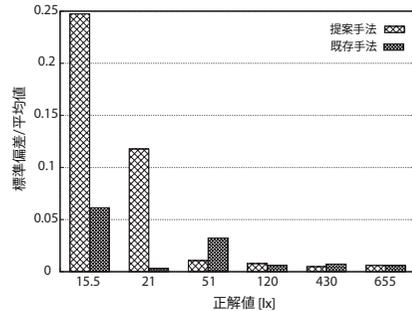


図 15 ばらつきの比較

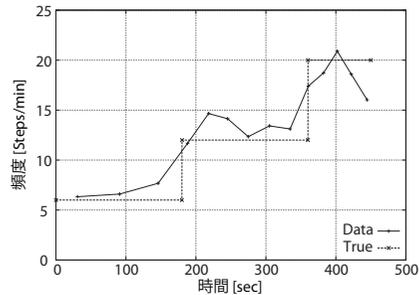


図 16 人感センサノードによるセンシング

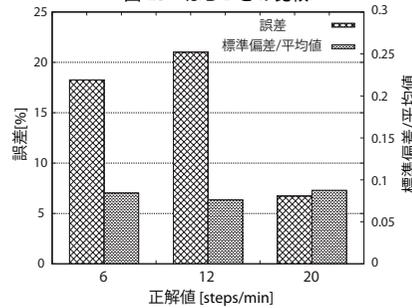


図 17 誤差とばらつきの評価

5.2 人感センサノード

次に、圧電素子による人感センサノードについて評価する。このセンサノードにおいて、ハーベスタは圧電素子板にあたり、センシングの対象はこのセンサノード上を通る人の頻度である。具体的には、1 分間に何人の人が通ったのかをセンシングする。第 4.3.2 節において行なった圧電素子板の評価によると、1 回人に踏まれることで $130\mu\text{J}$ のエネルギーを獲得できる。したがって、第 3.2 節に基づき定式化を行うと、式 (6) のように求まる。

$$(\text{StepFrequency}[\text{steps}/\text{min}]) = x(P_{\text{harvest}}) = \frac{P_{\text{harvest}}}{130 \times 10^{-6}} \quad (6)$$

この定式化に基づき、実際にセンシング実験を行った。方法としては、実際に 3 段階の頻度 (1 分間に 6 回, 12 回, 20 回) で圧電素子板を踏み、その値を正解値としてセンサ値の比較評価を行う。センシングの結果を図 16 に示す。この結果を見ると、確かに正解値の変

表 1 環境中に存在するエネルギー源

エネルギー変換技術	発電量	条件
電磁エネルギー	光	100mW/cm ² 日向
	電波	100μW/cm ² 室内
力学的エネルギー	振動	4μW/cm ³ 人の動き, 振動数 Hz あたり 意識して振れば 2mW/cm ³ (3Hz)
		800μW/cm ³ 機械の動き, 振動数 kHz あたり
	ボタンを押す	50μJ/N MIT 開発デバイス
	手回し	30W/kg 日照エンジニアリングの Tug Power ¹⁶⁾
	歩行	7W 70kg×1cm×1Hz の理論値
空気流	1mW/cm ² 30 リットル/分	
熱エネルギー	熱電	60μW/cm ² 温度差 5 (Thermo Life ¹⁷⁾)

化に合わせてセンサ値のグラフが上昇しているのが確認できる。しかし、かなり大きな誤差やデータのばらつきが生じていることも事実である。光センサノードの実験と同様の方法で、データの誤差、ばらつきを算出した結果を図 17 に示すが、正解値に対して 20% 以上の誤差が平均して見られ、センシングの精度はあまりよくない。このように誤差が大きく出てしまったことに関しては、ハーベスタの性能が原因として考えられる。今回、圧電素子板を 7 回踏むことによってピーコン 1 回分のエネルギーが貯められるとしているが、実際には踏む位置などの条件によって、獲得できるエネルギーに多少の増減がある。これに起因して、6 回、または 8 回でピーコン 1 回分のエネルギーが貯まる場合もある。この違いは、センシングの精度に対してかなり重大な問題となる。精度を上げるための方法としては、より少ない回数でピーコンが送信されるように設計することである。なぜなら、1 回のピーコンを飛ばすために踏む回数が多いほど、その間に生じる獲得エネルギーの誤差が蓄積されることになるためである。より少ない回数でピーコンを飛ばすためには、圧電素子板を改善し、より多くのエネルギーを得られるようにしなければならない。

6. 考 察

6.1 汎 用 性

ここでは提案手法が適用可能なセンシングの対象について言及する。表 1 は機械振興協会経済研究所がまとめた、環境から獲得可能なエネルギー源の一覧である¹⁵⁾。この中でセンシングの対象となりうるのは、光、電波、振動、空気流 (風力)、熱の 5 つである。それぞれについて、提案手法の適用の可能性を考える。光、空気流に関しては、ハーベスタから獲得できる電力が多いため、提案手法の適用が可能であると考えられる。また、振動につい

では、素子単体での獲得エネルギーは微小であるが、素子を直列、または並列につなぎ獲得可能なエネルギーを増やすことで、提案手法によるセンシングが可能になると考えられる。熱に関しては、基本的に温度差による発電になるので、純粋に温度を測るようなセンシングはできない。しかし、センサノードを観測対象に貼り付けるように配置するなどして、気温と対象の温度差を利用できれば、提案手法を適用できる可能性がある。また、例えば異常時に急激に熱くなるような配管などに貼りつけ、異常が起きたときにビーコンが飛ぶようなイベント検知型のセンシングであれば、提案手法が適用できる。電波については、現状では獲得できる電力が足りていないといわざるをえない。確かに、アンテナを大きくすれば得られる電力は増加するが、センサノードが肥大化してしまい、その配置は現実的ではない。これについてはハーベスタの効率向上が待たれるところである。ただし、電波強度の高い場所、つまり電波塔の近くに場所を限定すれば十分な電力を獲得できるため、提案手法の適用の可能性が出てくる。

6.2 利害得失

6.2.1 長 所

提案手法の長所としては、省エネルギー性、自立性、低コスト性の3点が挙げられる。まず、省エネルギー性についてだが、既存手法では、センサノードはセンサ値自体をAPへ送信する必要があったが、提案手法では、AP側で送信ノードのIDのみが分かればよい。よって、センサ値をノードで取得する必要はなく、センシングに際し、マイコンなどを用いてセンサ値を直接読み取る必要はない。したがって、センシングにともなう微弱信号の増幅やアナログ/デジタル変換、また、観測データの演算が不要であるため、これらの処理に必要であったエネルギーを節約することが可能である。データの演算にかかるエネルギーは、使用するマイコンの性能によるが、アナログ/デジタル変換では東京工業大学の資料¹⁸⁾によると、6bit変換器では数十mWの電力を消費する。処理時間を考えると、実際に消費されるのはわずかなエネルギーではあるが、もともと微量のエネルギーしか得られないエナジーハーベスティング手法では有効である。

次に、自立性についてである。自立性とは、提案手法が適用可能なセンシング対象に対して、その対象を読み取れる位置にセンサノードがあれば、エネルギー源を気にすることなく配置できるということである。既存のエナジーハーベスティング手法では、その配置にあたって必ずエネルギー源に対する留意が必要となる。なぜなら、センサノードの起動がデータ取得の前提条件となるためである。しかし、提案手法はセンシング対象からエネルギーを得るため、対象のみを考えた配置が可能である。

最後に、提案手法の低コスト性について言及する。提案手法においては、獲得したエネルギーをビーコン送信に必要なエネルギー分だけ貯め、それを送信機に供給できさえすればよい。したがって、エネルギーの貯蔵量を監視し、供給を制御する能動的機能を持つ複雑な回路は不必要となる。第4.2節において設計した回路は、低コストな受動的素子のみを用いて作成可能である。更に、エネルギーが得られない状態では送信を行わないことが、センシングの対象が存在しない、またはエネルギーを獲得できないほど少ないという情報になる。よって、エネルギーが獲得できない状況に備えて大容量バッテリーにエネルギーを貯めておく必要がない。つまり、一般に高価である高エネルギー密度の大容量バッテリーが数百 μF のキャパシタで済むことになり、これは大きなコストダウンに繋がる。更に、提案手法ではID情報を含むビーコンさえ送ることができればよいので、無線モジュールの単純化も可能である。この点も、センサノードの低コスト化に寄与する。我々の算出では既存のエナジーハーベスティング手法を用いたセンサノードと比較して、約90%のコスト削減が可能であると考えている。

6.2.2 短 所

提案手法において、低コストを実現するために犠牲にしている部分が存在する。ここではそれについて言及する。提案手法では、ビーコンの頻度から一定期間での獲得エネルギー量を推定し、それに基づいてセンサ値を算出する。したがって、その期間におけるセンサ値は導けるが、即時値を得ることはできない。これは、提案手法がリアルタイム性を求めるセンシングには向いていないことを意味する。また、センシング対象が存在していても、十分なエネルギーを貯められるほどのエネルギーが得られない場合、提案手法ではセンサ値が0であると切り捨てることになる。仮に、長い時間をかけてエネルギーが貯まったとしても、キャパシタからの漏れ電流などに起因する誤差が大きくなってしまう。すなわち、提案手法は微小な値のセンシングに提案手法は向いていないといえる。

更に、ビーコンの送信に着目すると、そのロバスト性を考察する必要がある。提案手法では、ノードの単純化を行い、IDを含むビーコンの送信のみがAPとの通信手段である。つまり、通信のロバスト性を高めるプロトコルを犠牲にしている点も短所といえる。しかし、この点に関しては、何らかの対策を行わないとビーコンの喪失によるセンシングの精度の減少を引き起こす危険性が高い。対策としては、次のようなものが考えられる。まず、ビーコンの喪失が起こった場合の補完方法として、まわりのデータを参照して大きく値の異なる部分を補正するというソフトウェア的なアプローチが挙げられる。これはビーコンの喪失が低頻度で起こる場合に有効である。しかし、ビーコンの喪失が多発する環境では、効果的では

ない。もともと通信を阻害する要因が多い場所に配置する場合は、送信機の実効放射電力を増大することもロバスト性を高めるひとつの手段である。だが、送信するために必要なエネルギーが増加するので、送信に必要なエネルギーを貯める時間も長くなり、センシングの時間的粒度は犠牲となることに留意しなければならない。

7. おわりに

本稿では、Sensing through Harvesting という無線センシングシステムの新たなコンセプトを提案した。本来エネルギーを獲得する目的で用いるハーベスタをセンサとしても捉えることで、エネルギー管理などが簡略化され、低コストな無線センシングシステムを設計できる。そして、環境のモデル化とコンセプトの定式化を行い提案手法の実現可能性を示した。また、提案手法の実現に不可欠な要素であるエネルギー管理回路を設計し、それを用いて光や人を検知できるセンサノードを実装した。そして、実装したセンサノードプロトタイプを用いたデモンストレーションを通して、実際にセンシングが可能であることを確かめた。更に、プロトタイプの精度評価を行うことで、提案手法によるセンシングの実用性を示した。最後に、提案手法の汎用性、利害得失に関して議論した。今後の課題としては、WSN への適用が挙げられる。多くのノードが存在する環境ではビーコンの衝突などの問題が表面化するため、その解決が大きな課題である。

謝 辞

本研究は、NEDO 平成 22 年度産業技術研究助成事業の一環として実施された。

参 考 文 献

- 1) W.B. Heinzelman, A.P. Chandrakasan, and H.Balakrishnan, "An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks," *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, vol.1, no.4, pp.660–670, Oct. 2002.
- 2) O. Younis, and S.Fahmy, "Distributed clustering in ad-hoc sensor networks: a hybrid, energy-efficient approach," *INFOCOM 2004. Twenty-third Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*, vol.1, pp.4 vol. (xxxv+2866), March 2004.
- 3) S.Lindsey, C.Raghavendra, and K.M. Sivalingam, "Data gathering algorithms in sensor networks using energy metrics," *Parallel and Distributed Systems, IEEE Transactions on*, vol.13, no.9, pp.924–935, Sept. 2002.
- 4) D.L. Donoho, "Compressed sensing," *Information Theory, IEEE Transactions on*, vol.52, no.4, pp.1289–1306, Apr. 2006.
- 5) C.Luo, F.Wu, J.Sun, and C.W. Chen, "Compressive data gathering for large-scale wireless sensor networks," *Proceedings of the 15th annual international conference on Mobile computing and networking*, pp.145–156, New York, NY, USA, 2009, ACM.
- 6) A.Kansal, J.Hsu, S.Zahedi, and M.B. Srivastava, "Power management in energy harvesting sensor networks," *ACM Trans. Embed. Comput. Syst.*, vol.6, Sept. 2007.
- 7) H.A. Sodano, D.J. Inman, and G.Park, "Comparison of piezoelectric energy harvesting devices for recharging batteries," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol.16, no.10, pp.799–807, Oct. 2005.
- 8) M.Ujihara, G.P. Carman, and D.G. Lee, "Thermal energy harvesting device using ferromagnetic materials," *Applied Physics Letters*, vol.91, no.9, pp.093508–093508-3, Aug. 2007.
- 9) H.Gou, G.Li, and Y.Yoo, "A partition-based centralized leach algorithm for wireless sensor networks using solar energy," *Proceedings of the 2009 International Conference on Hybrid Information Technology*, pp.60–66, New York, NY, USA, 2009, ACM.
- 10) T.Zhu, Z.Zhong, Y.Gu, T.He, and Z.L. Zhang, "Leakage-aware energy synchronization for wireless sensor networks," *Proceedings of the 7th international conference on Mobile systems, applications, and services*, pp.319–332, New York, NY, USA, 2009, ACM.
- 11) L.Chao, C.Y. Tsui, and W.H. Ki, "Vibration energy scavenging and management for ultra low power applications," *Low Power Electronics and Design (ISLPED), 2007 ACM/IEEE International Symposium on*, pp.316–321, Aug. 2007.
- 12) L. Tang, and C. Guy, "Radio frequency energy harvesting in wireless sensor networks," *Proceedings of the 2009 International Conference on Wireless Communications and Mobile Computing: Connecting the World Wirelessly*, pp.644–648, New York, NY, USA, 2009, ACM.
- 13) H.Nishimoto, Y.Kawahara, and T.Asami, "Prototype implementation of ambient rf energy harvesting wireless sensor networks," *Sensors*, 2010 IEEE, pp.1282–1287, Nov. 2010.
- 14) TEXAS INSTRUMENTS, "MSP430 Wireless Development Tool - EZ430-RF2500 - TI Tool Folder," <http://focus.ti.com/docs/toolsw/folders/print/ez430-rf2500.html>.
- 15) 機械振興協会経済研究所, "コピキタスネット向エネルギー変換デバイスにおけるわが国技術の有望性 ;".
- 16) 日照エンジニアリング, "TUG POWER 製品仕様書 ;" <http://www.nseg.co.jp/products/charger/tug/detail.htm>.
- 17) Thermo Life® Energy Corp., "Thermo Life® Characteristics," <http://www.poweredbythermolife.com/thermolife.htm>.
- 18) 国立大学法人 東京工業大学, "世界最小レベルの電力で動く超高速 A/D 変換器を開発 ;" <http://www.titech.ac.jp/file/091116.2-matsuzawa.pdf>.