

ワイヤレスセンサネットワークにおける 稼働時間延長のための複数可動ノード移動先決定手法

村上 大二郎^{†1} 村 田 佳 洋^{†1}

ワイヤレスセンサネットワーク (Wireless Sensor Networks, 以下 WSNs) において稼働時間を最大化することは重要であり、そのひとつに可動ノードを用いた省電力技法がある。

本研究では WSNs の稼働時間を延長するための、可動ノードの移動先決定手法を提案する。提案手法には複数の可動ノードの組合せから総移動距離を減少させる組合せを見つけ、バッテリー消費を抑制する点に特色がある。

提案手法を評価するため、シミュレーション実験を行い、稼働時間を計測した。その実験より、従来手法と比較して約 1.9% 長い稼働時間を示した。

The location determination method of Multi Mobile Nodes for power saving in Wireless Sensor Networks

DAIJIRO MURAKAMI^{†1} and YOSHIHIRO MURATA^{†1}

It is important for the Wireless Sensor Networks (hereafter, WSNs) to maximize lifetime. As one of the researches of WSNs, there is power saving method using mobile nodes.

In this paper, we propose the location determination method to maximize lifetime of WSNs. In this method, the combination of nodes with the minimum moving distance is found, and their locations are determined.

Through simulation experiments, we showed that the our method can achieved 1.9% greater of lifetime than the previous method.

^{†1} 広島市立大学
Hiroshima City University

1. 序 論

近年、環境情報の収集を行うアプリケーションを実現する手段として、ワイヤレスセンサネットワーク (Wireless Sensor Networks, 以下 WSNs) が注目されている。WSNs ではフィールドにセンサノードを配置し、それらが無線通信によりノードのセンシング情報を交換することでフィールド観測を実現する。

典型的なアプリケーションとして、WSNs を利用して農業情報を集約し、農業従事者のための有用な意思決定支援システムがある。しかし、このような WSNs では広域にセンサノードを散布することを考えており、ノードは主にバッテリーで駆動する¹⁾。

移動能力を備えるセンサノードを用いて、センシングエリアやネットワークの修復を試みる研究が行われている^{2),3)}。ここでは移動できるノードを可動ノード、そうでないノードを静止ノードと呼ぶ。一方、WSNs では主に有限のバッテリーを持つノードが用いられるため、稼働時間を最大化するための省電力技法が研究されている⁴⁾。我々の研究グループではこれらを組合せ、可動ノードを用いて稼働時間を延長させる手法を提案している⁵⁾。この手法では、適切な位置に可動ノードを移動させ、通信を中継させることにより省電力化を行っている。しかし、可動ノードの移動先を1ノードずつ欲張り法を用いて決定していたため、可動ノードのバッテリー消費が大きくなる場合があった。

本研究では静止ノードと可動ノードから構成される WSNs の稼働時間を延長するための、可動ノードの移動先を決定し収集木を構築する手法を提案する。提案手法には複数の可動ノードの組合せから総移動距離を減少させる組合せを見つけ、バッテリー消費を抑制する点に特色がある。

提案手法の探索性能を評価をするため、シミュレーション実験により WSNs の稼働時間を計測した。その結果、従来手法と比較して最大稼働時間を約 1.9% 延長することができた。

2. 問題定義

2.1 問題概要

本論文では、フィールドに配置された各センサが周辺の温度や湿度などのデータを定期的に計測し、計測したデータを無線通信により基地局ノードに集めるような WSNs アプリケーションを想定する。本章では、このようなネットワークの稼働時間を最大化するために、可動ノードの適切な移動先の位置を決定すると同時に、適切なデータ収集経路を構築する問題について述べる^{4),6)}。

2.2 仮定するワイヤレスセンサ

WSNsで使用されているセンサはバッテリー駆動であることが多く、WSNsのアプリケーション例では各センサの電力の補強をおこなうことは困難な場合が多いため、バッテリーの電力量は有限であるとする。また、無線範囲の到達範囲および消費電力を調整できるとする。ここでは、センサが単位時間[s]あたり $k[\text{bit}]$ のデータを $d[\text{m}]$ 先のノードに送信するときの消費電力（通信消費電力とする） e_{ex}^{com} は以下の式 (1) に従うと仮定する⁶⁾。

$$e_{ex}^{com} = e_{elec} \times k + \epsilon_{amp} \times k \times d^a \quad (1)$$

ここで、 e_{elec} はハードウェアの消費電力係数で、 ϵ_{amp} は信号増幅器の消費電力係数であり、 $a(a \geq 0)$ はアンテナの種類などの使用環境に関する乗数である。真空中で厳密に一方方向にのみ指向性のあるアンテナを使用して通信する場合、電波の減衰は起きないので、 $a = 0$ で表すことができる。一方、電波が球面状に広がる場合、 $a = 2$ で表すことができる。現実には、この間のいずれかの値をとると考えられる。WSNsにおけるセンサは全てネットワーク上のノードであるとみなす。各ノードによってセンシングされた情報を収集する場所を基地局と呼ぶこととする。ノードは、静止ノードと可動ノードに分けられるとする。静止ノードは最初に配置された場所から移動することができないノードであり、可動ノードはモーターと車輪を装備しており、それらにより位置を変えることができるノードである。提案手法では、静止ノードと、可動ノードの両方を使用する。可動ノードの例として Robomote がある²⁾。可動ノードは通信だけでなく移動にもバッテリーを消費する。ここでは、可動ノードが $d[\text{m}]$ 移動するときの消費電力（移動消費電力とする） e_{ex}^{move} は以下の式 (2) に従うと仮定する⁴⁾。

$$e_{ex}^{move} = e_{move} \times d \quad (2)$$

ここで、 e_{move} は移動におけるハードウェアの消費電力係数である。可動ノードは最大 $V[\text{m/sec}]$ の速さで移動可能であるとする（ V は定数、可動ノードの速さは公式 (2) に影響を与えないとする）。GPS または航空写真等を利用し、ノード間で相互通信することにより、各ノードは全ノードの位置を知ることができるとする。

2.3 問題の入出力

今回想定される WSNs のセンサノードには静止ノードと可動ノードがある。ここで静止ノードを $P = \{p_1, p_2, p_3, \dots\}$ 、可動ノードを $Q = \{q_1, q_2, q_3, \dots\}$ とする。また基地局を B_s とし、センサノード s を $s \in P \cup Q \cup B_s$ とする。このときノード s の初期位置を $s.\text{ip}$ 、初期バッテリー量を $s.\text{ie}$ とする。各ノードの通信待機時の消費電力を e_{idle} とする。また各ノードの単位時間あたりのセンシングデータ量を D とし、これらを入力として与える。

入力を以下に列挙する。

- 各ノード $s \in P \cup Q \cup B_s$
- 初期位置 $s.\text{ip}$ 、初期バッテリー量 $s.\text{ie}$
- 通信消費電力係数 e_{elec} 、信号増幅の消費電力係数 ϵ_{amp} 、消費電力乗数 a 、移動消費電力係数 e_{move} 、待機消費電力係数 e_{idle}
- 単位時間あたりのセンシングデータ量 D

データ収集木 $T(V, E)$ を構築したときの、各ノード $s \in V$ の直接のデータ送信先ノードを $s.\text{sn}$ とする。そのとき、各ノードにおける単位時間あたりのデータ送信量は以下のよう求めることができる。

- (1) すべてのノード $s_i \in V$ に対して、データ送信量 $s_i.\text{dn}$ の初期値を 0 とする。
- (2) すべてのノード $s_i \in V$ に対して以下を繰り返す。
 - (a) 経路上の送信先を s^{des} とし、 $s^{des} \leftarrow s_i.\text{sn}$ 。
 - (b) $s_i.\text{dn} \leftarrow s_i.\text{dn} + D$ 。
 - (c) $s^{des}.\text{dn} \leftarrow s^{des}.\text{dn} + D$ 。
 - (d) $s^{des} \neq \text{基地局 } B_s$ の間以下を繰り返す。
 - (i) $s^{des} \leftarrow s^{des}.\text{sn}$
 - (ii) $s^{des}.\text{dn} \leftarrow s^{des}.\text{dn} + D$

t_{limit} は、データ収集木を経由してデータ収集を行った際に、ノードのバッテリー切れにより、木のノード（あるいはその部分木）が機能しなくなり、ネットワークが維持できなくなるまでの時間である。数式は (4) に従うと仮定する。

各ノード s の稼働時間 $s.\text{limit}$ は以下の式で求められる。

$$s.\text{limit} = (s.\text{ie} - e_{ex}^{move}) / (e_{ex}^{com} + e_{idle}) \quad (3)$$

ネットワークの稼働時間 t_{limit} は以下の式で求められる。

$$t_{limit} = \min_{s \in V} (s.\text{limit}) \quad (4)$$

本問題の目的は、この t_{limit} を最大化するような以下の出力を求めることである。またすべてのノードでデータ収集木を構築することが制約条件である。可動ノード s の移動先の座標を $s.\text{np}(s \in Q)$ 、それらの可動ノードが移動した後のデータ収集木を T とする。出力を以下に列挙する。

- 可動ノードの移動先の位置 $s.\text{np}(s \in Q)$
- 可動ノードが移動した後のデータ収集木 T

3. 提案手法

3.1 提案手法の概要

本章では提案手法である，第2章で述べた WSNs 稼働時間最大化問題のための，可動ノードの移動先位置およびデータ収集経路の決定アルゴリズムについて述べる．

提案手法ではまず**静止ノードのみからなるデータ収集木の構築**を行う．次に**可動ノードの移動およびデータ収集木の更新**を行い，データ収集木を完成させる．このとき，複数の可動ノードを同時に考慮し，可動ノードの移動先を決定することにより，効率の良い移動先の組み合わせを見つける点に提案手法の特色がある．

3.2 静止ノードのみからなるデータ収集木の構築

静止ノードのみからなるデータ収集木を構築する手法について述べる．

データ収集木を構築する手法として，ダイクストラ法を用いることが考えられる．しかしこの手法は，それぞれの経路長を最小化することのみに焦点を当てる．そのため，一部の通信辺に通信負荷が集中して，ノードが早期にバッテリー切れを起こし，その結果 WSNs 全体の稼働時間が短くなる場合があると考えられる．

そこで，稼働時間が最短である通信辺に対し逐次的に中継ノードを追加していくことで，通信負荷の集中を抑えたデータ収集木を構築していく．

- (1) 基地局 B_s と最も近い静止ノードを $s_a \in P$ とする．
- (2) B_s と s_a 間を辺で結び，これを e_0 とする．
- (3) 収集木を構成する通信辺 $E = \{e_0\}$ ，収集木を構成するノード $V = \{B_s, s_a\}$ とする．これを初期のデータ収集木 $T = (V, E)$ とする．
- (4) P から s_a を除いた残りの静止ノードの集合を P' とする．
- (5) P' 内の全てのノード s_i に対して以下の過程を繰り返す．
 - (a) V 内の全てのノード s_j に対して以下の過程を繰り返す．
 - (i) s_i と s_j の間を辺 e_{ij} で結ぶ（つまり， $s_i.sd \leftarrow s_j$ とする）．
 - (ii) s_i から B_s への経路上の全ての辺のデータ転送量にセンシングデータ量 $D(s_i)$ がセンシングするデータを加え，式(1)を用いて各辺の稼働時間を再計算する．
 - (iii) この経路上で最も稼働時間の短い辺を見つけ，その稼働時間を $e_{ij}^{\min}$ とする．
 - (iv) 一旦辺 e_{ij} を取り除き，データ転送量及び稼働時間も元（ステップ(a)

開始時の値)に戻す．

- (b) ノード $s_i \in P'$ に対して $e_{ij}^{\min}$ が最大となるような，つまり WSNs 全体の稼働時間を最も悪化させない接続ノード $s_i \in P'$ を見つける．
- (6) $e_{ij}^{\min}$ が最大となるような，つまり WSNs 全体の稼働時間を最も悪化させない接続元ノード $s_i \in P'$ を見つける．このノード s_i を V に，及び接続辺 e_{ij} を E に追加する．WSNs 全体の稼働時間を再計算する．
- (7) P' が空であれば終了．そうでなければ，ステップ5へ．

3.3 可動ノードの移動およびデータ収集木の更新

α 本の通信辺と可動ノードとの距離をそれぞれ考慮し，通信辺から近い β 個の可動ノードを移動先を選択する．選択された移動先を総当りで計算し，総移動距離の短い組み合わせを見つける．その中から同時決定数 γ 個だけの可動ノードの移動先を決定する．新たに $s.sd$ を送信先のノード， $s.mp$ を中点座標とし，稼働時間によってソートされたノードを s^* とする．

- (1) 移動先が未決定である可動ノードの集合 Q' を $Q' = Q$ とする．
- (2) 集合 $Q' \neq \emptyset$ の間以下を繰り返す．
 - (a) ノード集合 V 内の全てのノードの稼働時間を式(3)により計算する．もっとも稼働時間の短い α 個のノードから成る集合， $\{s_1^*, s_2^*, \dots, s_\alpha^*\}$ ，を選ぶ．
 - (b) $s_1^*, s_2^*, \dots, s_\alpha^*$ ，に対して，それらの送信先ノード $s_1^*.sd, s_2^*.sd, \dots, s_\alpha^*.sd$ との間の中点座標 $s_1^*.mp, s_2^*.mp, \dots, s_\alpha^*.mp$ を計算する．
 - (c) これらの中点座標 $s_1^*.mp, s_2^*.mp, \dots, s_\alpha^*.mp$ と，移動先の決定されていない可動ノード $s^{Q'} \in Q'$ の座標 $s^{Q'}$ との間の距離を総当りですべて計算する．
 - (d) 中点座標と可動ノードの組合せのうちの γ 個を，合計距離が最小になるように全探索により選ぶ．ただしこのとき，中点座標と可動ノードが2つ以上の組合せに重複して含まれていてはならない．またこのとき， $|Q'|$ もしくは $|E|$ が γ より小さいときは， γ のかわりに $\min(|Q'|, |E|)$ の値を用いる．ここで， $|E|$ は集合 E の， $|Q'|$ は集合 Q' の要素数を示す．
 - (e) 選択された γ 個の中点座標 $s_i^*.mp$ と可動ノード r_j^{dec} の組合せの全てに対して，以下を繰り返す．
 - (i) 入力を中点座標 $s^*.mp$ と可動ノード r^{dec} とし，関数「可動ノードの間地点決定法(3.4節で後述)」を適用する．関数の返り値を座標 $r_j.np$

とする.

- (ii) ノード r_j^{dec} の送信先を $r_j^{dec}.sn \leftarrow s_i.sn$ とする.
 - (iii) ノードの送信先を $s_i.sn \leftarrow r_j^{dec}$ とする.
 - (iv) 可動ノード r_j^{dec} をノード集合 Q' から取り除く.
- (3) 可動ノードの移動先の位置 $s.np$, 可動ノードが移動した後のデータ収集木 T を出力して, アルゴリズムを終了する.

3.4 可動ノードの中間地点決定法

ノードを介してデータを中継する際には, 中継のためのノードの最適な位置があると考えられる. 単純に考えた場合, 中継される2ノードを結ぶ直線上に可動ノードを位置させるとき, 効率良くデータを中継できると考えられる. しかし, 可動ノードもバッテリーに限りがある. 移動のためにそれを使い尽くしてしまうと, 中継のためのバッテリーが不足し, 結果としてWSNs全体の稼働時間に悪影響を及ぼす恐れがある. そこで, 最悪の稼働時間を持つ配送木上の辺を見つけ, バッテリー残量を考慮して可動ノードが中継のための移動先を見つけるアルゴリズムを提案する. 2つの静止ノード s_a, s_b と可動ノード s_c を入力とし, 格子幅 st をパラメータとして与える. アルゴリズムは以下のとおりである.

- (1) ノードの座標 $s_a.ip, s_b.ip, s_c.ip$ から, 最小の x 座標 X_{min} , 最大の x 座標 X_{max} , 最小の y 座標 Y_{min} , 最大の y 座標 Y_{max} を得る.
- (2) $(X_{min}, Y_{min}) - (X_{max}, Y_{max})$ の長方形の座標空間を各格子の幅が st である格子状に分割する. このすべての格子点に対して, そこに可動ノード s_c が移動し, ノード s_a, s_b 間の通信を中継した際のWSNsの稼働時間を計算する.
- (3) 最大の稼働時間を見つけ, そのときの移動先座標を $s_c.np$ として返り値とする.

4. 実験概要

4.1 研究概要

提案方式による可動ノードの移動先の決定およびデータ収集木の構築手法の性能を評価するため, シミュレーション実験を行う.

実験1では, 提案手法の解探索性能を評価をするため, 基本的なパラメータを持つインスタンスを用いてシミュレーション実験を行った. 実験2では, 提案手法の解探索性能を評価をするため, ノード密度を変化させたときの稼働時間を計測した. 比較対象として従来手法を用いた. 以下の環境で実験を行った.

- OS : Windows XP Professional x64 edition Version 2003 Service Pack 2
- CPU : Intel(R) Xeon(R) CPU X5355 @ 2.66GHz
- メモリ : 8.00GB RAM
- 開発ツール : gcc (GCC) 3.4.4 (cygming special, gdc 0.12, using dmd 0.125) Copyright (C) 2004 Free Software Foundation, Inc.

シミュレーション実験において, 各ノードの基本パラメータとして以下のものを用いた.

- 各ノードの初期電力量 : $s.ie = 32400[J]$ (参考 : 文献⁶⁾)
- データ処理にかかる電力消費係数 : $e_{elec} = 50[nJ/bit]$ (参考 : 文献⁴⁾)
- 信号増幅にかかる電力消費係数 : $e_{amp} = 100[\frac{pJ}{bit \cdot m^2}]$ (参考 : 文献⁴⁾)
- 移動にかかる電力消費係数 : $e_{move} = 8.267[J/m]$ (参考 : 文献⁷⁾)
- 待機時の消費電力 : $e_{idle} = 0.025[J/s]$ (参考 : 文献⁸⁾)
- 各ノードの単位時間あたりのセンシングデータ量 : $D = 204.8[bit/s]$ (参考 : 文献⁹⁾)
- 複数考慮通信辺数 : $\alpha = 7$
- 複数考慮可動ノード数 : $\beta = 7$
- 同時位置決定数 : $\gamma = 1$

静止ノード, および可動ノードの初期位置は, 一様分布乱数を用いて与えた.

4.2 解探索性能の評価実験 (実験 1)

実験1では, 提案手法の解探索性能を評価をするためシミュレーション実験を行った. フィールドの大きさ $400[m] \times 400[m]$, 静止ノード320個, 可動ノード80個とした. 比較対象として従来手法を用い, 稼働時間と計算時間を計測した. 実験結果を表1に示す. この結果は100試行の平均である.

表1 稼働時間と計算時間の比較結果
Table 1 Comparative result at operating time and computing time

	稼働時間 [hours]	計算時間 [sec]
提案手法	232.60	38.26
従来手法	228.36	37.41

従来手法と比較して, 稼働時間が1.9%向上していた. よって複数の可動ノードを考慮することにより性能が向上しているといえる.

4.3 ノード密度変化に対する性能の評価実験 (実験 2)

実験2では, 提案手法の解探索性能を評価をするため, ノード密度を変化させたときの稼

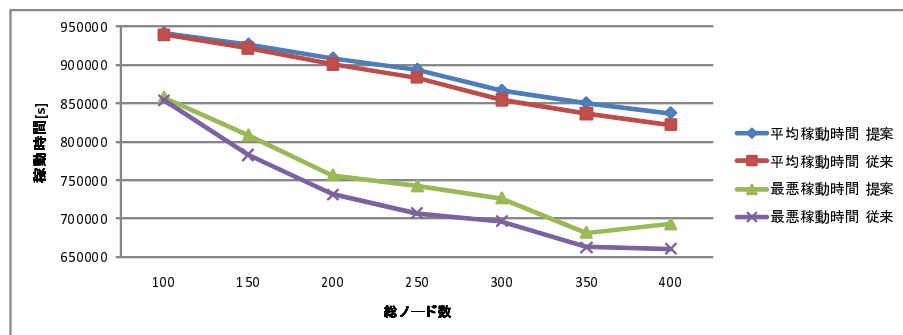


図 1 ノードの密度を変えたときの稼働時間
Fig. 1 Operating time for density

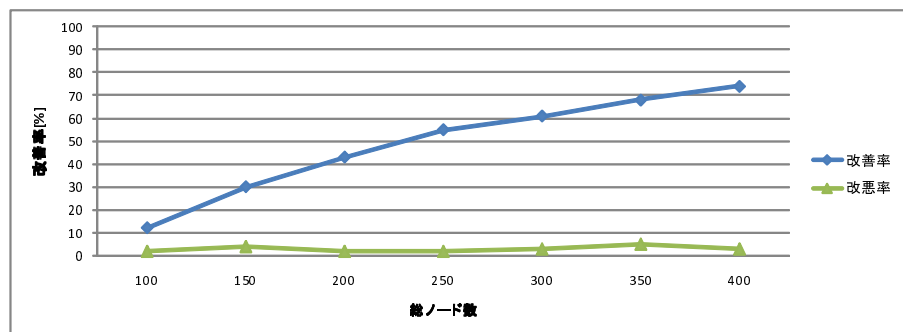


図 2 ノードの密度を変えたときの改善率
Fig. 2 Improvement rate for density

働時間を計測した。静止ノードと可動ノードの比率は 4 : 1 とした。比較対象として従来手法を用いた。今回の実験では、フィールドの大きさ 400[m] × 400[m] のままで、ノードの数を 100~400 と増やしていき、計 7 個のインスタンスを用いてそれぞれ実験を行った。

実験結果を図 1 に示す。この結果は 100 試行の平均である。

また 100 試行中において、提案手法により従来手法よりも稼働時間がより長くなった場合の割合を改善率、より短くなってしまった場合の割合を改悪率とし、これを図 2 に示す。

提案手法は従来手法と比較して、全体的に稼働時間が 1.1% 向上していた。また、提案手

法はノード密度が高くなるにつれて、稼働時間がより向上していた。また図 2 より、ノード数が 400 の場合には提案手法は 7 割近い改善率を示した。よってノード密度が高いほど、提案手法が有効に働くことがわかった。

5. 考 察

WSNs では多数のセンサノードを用いる場合があるため、システムのスケーラビリティが重要である。図 1、図 2 より、従来手法と比較して提案手法はノード密度が高いほど有利であることがわかる。以上のことから、提案手法はスケーラビリティに優れていると考えられる。

本研究で取り扱う問題では、ノードのセンシングデータをすべて基地局に送信する。そのため基地局に近いノードは大量のデータを中継することになり、そのため稼働時間が短くなる傾向がある。ノード総数や密度が高い場合、基地局付近のノード数もまた増加する。そのため、可動ノードはどこでどのように通信すべきかについて選択肢が増えることになる。提案手法は複数の可動ノードを同時に考慮するため、適切な中継方法をうまく算出できたのではないかと考えられる。

6. 結 論

本研究では、静止ノードと可動ノードが混在する WSNs において、稼働時間の短い通信辺群と複数の可動ノードを同時に考慮することにより移動先を決定し、データ収集木を構築することにより、WSNs の稼働時間を延長する手法を提案した。提案アルゴリズムでは、稼働時間の短い通信辺に対する各可動ノードの組み合わせを同時に考慮する点に特色がある。

提案手法の解探索性能の評価実験より、従来手法と比較して約 1.9% 長い稼働時間を実現できることを示した。また、ノード密度が高いほど、改善率が大きくなっていることを確認した。

WSNs では、すべてのノードを稼働させるよりも、センシングを要求されているエリアをどの程度のノード数でセンシングすべきかを考えるほうが重要であることが多い。そこで、今後の課題として、要求されたエリアをセンシングしているノードの稼働時間を最大化する、あるいはそのようなノードをスイッチして全体の稼働時間を最大化するように提案手法を拡張することが挙げられる。

参 考 文 献

- 1) Tang, X. and Xu, J.: Extending Network Lifetime for Precision-Constrained Data Aggregation in Wireless Sensor Networks, *Proc. of 25th IEEE Int'l Conf. on Computer Communications (Infocom2006)* (2006).
- 2) Dantu, K., Rahimi, M., Shah, H., Babel, S., Dhariwal, A. and Sukhatme, G.: Robomote: enabling mobility in sensor networks, *Proc. of Fourth Int'l. Symp. Information Processing in Sensor Networks (IPSN 2005)*, pp.404–409 (2005).
- 3) Mei, Y., Xian, C., Das, S., CharlieHu, Y. and Lu, Y.: Repairing Sensor Network Using Mobile Robots, *Proc. of IEEE Workshop on Wireless Adhoc and Sensor Networks (WWASN 2006)* (2006).
- 4) Wang, G., Cao, G., LaPorta, T. and Zhang, W.: Sensor Relocation in Mobile Sensor Networks, *Proc. of 24th Annual Joint Conf. of the IEEE Computer and Communications Societies (Infocom2005)*, pp.2302–2312 (2005).
- 5) 村上大二郎, 村田佳洋: ワイヤレスセンサネットワークにおける稼働時間延長のための逐次的な可動ノード移動先決定手法, 電気・情報関連学会中国支部第 60 回連合大会, pp.203 – 204 (2009).
- 6) Heinzelman, W., Chandrakasan, A. and Balakrishnan, H.: Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks, *Proc. of the 33rd Hawaii Int'l. Conf. on System Sciences (HICSS 2000)* (2000).
- 7) Sibley, G.T., Rahimi, M.H. and Sukhatme, G.S.: Robomote: A Tiny Mobile Robot Platform for Large-Scale Sensor Networks, *Proc. of IEEE Int'l Conf. on Robotics and Automation (ICRA 2002)* (2002).
- 8) Ganeriwal, S., Kansal, A. and Srivastava, M.: Self aware actuation for fault repair in sensor networks (2004).
- 9) Kamimura, J. and Wakamiya, N. and Murata, M.: Energy-Efficient Clustering Method for Data Gathering in Sensor Networks, *Proc. of First Workshop on Broad-band Advanced Sensor Networks (BaseNets2004)* (2004).