

移動センサノードを用いたデータ収集型 WSN での k 重被覆時間の最大化手法

勝 間 亮[†] 村 田 佳 洋^{††} 柴 田 直 樹^{†††}
安 本 慶 一[†] 伊 藤 実[†]

本論文では、環境情報の収集を目的とする、静止ノードと可動ノードから構成される WSN において、広範囲のセンシング領域を k 重被覆し、かつ、稼働時間を最大化するような可動ノードの適切な移動先、および、データ収集のためのマルチホップ通信経路を構築する手法を提案する。対象問題は Minimum Geometric Disk Cover 問題を含んでいるため、NP 困難な問題である。そこで、準最適解を実用時間で求めるため、遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm, 以下 GA) に基づいた近似アルゴリズムを提案する。WSN における基地局ノード (データを収集するノード) に近いノードは、早くバッテリーが枯渇するという問題に対処するため、各ノードの通信における電力消費量のバランスがとれたデータ収集木を構築するような解を生成し、GA の初期解に含ませる工夫を行った。さらに、フィールドの k 重被覆に関する十分条件を判定する効率的な手法を考案した。シミュレーションにより、100 から 300 ノードの WSN に対し、提案手法が十分に優れた性能を示すことを確認した。

Maximizing k -Coverage Lifetime of Wireless Sensor Networks Using Mobile Sensor Nodes

RYO KATSUMA,[†] YOSHIHIRO MURATA,^{††} NAOKI SHIBATA,^{†††}
KEIICHI YASUMOTO[†] and MINORU ITO[†]

For a wireless sensor network (WSN) consisting of both static and mobile sensor nodes to collect environmental information, we propose a method to k -cover the target sensing field and maximize the WSN lifetime by moving the mobile sensor nodes to appropriate positions. Our target problem contains a Minimum Geometric Disk Cover Problem known to be an NP-hard problem, as a special case. We develop a genetic algorithm (GA) based scheme to find a near optimal solution in practical time. Considering that a node near the sink node tends to consume more battery power by forwarding the data transmitted from nodes farther from the sink node, we add a tree where power consumption for communication is balanced among all nodes to our GA-based algorithm as an initial candidate solution. Through computer simulations, we confirmed that our method achieves much longer k -coverage lifetime than conventional methods for 100 to 300-node WSNs.

1. ま え が き

近年、広域に設置された多数の小型センサがセンシングした情報を無線マルチホップ通信により交換することで環境モニタリングやオブジェクトの追跡などを行う、ワイヤレスセンサネットワーク (以下、WSN) およびそのアプリケーションが注目されている。WSN アプリケーションの多くは、センシングの対象となるフィールド (以下、単にフィールドと呼ぶ) 内の全ての場所をセンシングできることや、長期間動作することを要求している。

WSN を長期間稼働させるため、センシングやデータ転送の省電力化を行う研究が行われている。例えば、センサノード間の通信頻度を調整して省電力化を実現する手法¹⁾や、センシングした情報をノード間で統合して通信データ量を削減する手法²⁾などが提案されている。これら既存研究の多くは、一度配置されると位置が固定するノード (静止ノードと呼ぶ) のみの使用を想定している。

静止ノードのみの WSN では、ノードのバッテリーの枯渇および故障や、想定通りの位置にノードを設置できなかったこ

とにより出現したセンシング不可能な領域を自動的に修復することはできない。そこで、近年、車輪とモータ等を備え、対象領域を自由に移動できるノード (可動ノードと呼ぶ) の利用を考慮した研究が行われ始めている。例えば、可動ノードが移動することで、バッテリーが尽きたノードや故障したノードのセンシング領域を埋め合わせる手法³⁾が研究されている。また、国境警備のようなアプリケーションの場合、十分なセンシング精度の維持や、頑健なシステムが求められる。そこで、フィールドを k 重被覆することにより、WSN のセンシング精度や頑健性を保つ研究が行われている。例えば、可動ノードと静止ノードが混在する環境において、可動ノードが適切に移動することによってフィールドの k 重被覆を保証する手法がある⁴⁾。しかし、これら可動ノードを用いる既存手法は、フィールド全体の被覆に注力しており、可動ノードによる WSN 稼働時間の延長法は提案されていない。

本論文では、基地局へのデータ収集を目的とする、静止ノードと可動ノードからなる WSN において、フィールドを k 重被覆し、かつ、稼働時間をできるだけ長くする可動ノードの適切な移動先、および、データ収集のためのマルチホップ通信経路 (基地局を根とした全ノードを含む木: データ収集木) を発見する問題を定式化する。本問題は NP 困難であり、実用時間内に最適解を求めることは難しい。そこで、本問題に対する準最適解を実用時間で求めるため、遺伝的アル

[†] 奈良先端科学技術大学院大学
Nara Institute of Science and Technology

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

^{†††} 滋賀大学
Shiga University

* ある地点が k 個以上のノードのセンシング可能な範囲内にあること

ゴリズム (GA) を基にしたアルゴリズムを提案する。品質の良い GA の初期解を素早く生成するための負荷均等木構築法を考案した。負荷均等木構築法は、基地局周辺のノードの電力消費の偏りを軽減する。

シミュレーションの結果、提案方式は、数百ノードからなる WSN に対し、対象領域を k 重被覆する WSN の稼働時間を延長できることを確認した。

2. WSN 稼働時間最大化問題

2.1 対象となる WSN のモデル、仮定、および定義

2.1.1 対象 WSN における仮定

WSN では、基地局ノードと、複数の静止ノード、可動ノードとがあり、ノードを配置するフィールド (障害物は無いものとする) が与えられる。基地局を B_s 、静止ノードの集合を $P = \{p_1, \dots, p_l\}$ 、可動ノードの集合を $Q = \{q_1, \dots, q_m\}$ と表す。フィールドを $Field$ で表す。本論文では、フィールドに配置された各ノードが周辺の温度や湿度などのデータを周期的に計測し、データ収集木に沿ったマルチホップ無線通信により、計測したデータを基地局 B_s に集める WSN アプリケーションを対象とする。センシングの頻度を I とする。各ノードが 1 回のセンシングで得るデータサイズを D とする。

ノードは、バッテリー駆動を想定し、バッテリーの交換は出来ない。WSN は静止ノードと可動ノードからなる。静止ノードは最初に配置された場所から移動できず、可動ノードはモータと車輪を装備し、移動できる。フィールド上に障害は全くなく、可動ノードは $Field$ 内の指定された任意の位置に真っ直ぐ動くことができる。各ノード $s \in P \cup Q \cup \{B_s\}$ は固有のノード ID を持ち、その位置は $s.pos$ で表される。

各静止、可動ノードのセンシング可能な範囲は、そのノードを中心とした半径 R の円である。ノード $s \in P \cup Q$ のセンシング範囲は $s.range$ で表される。各ノードは、センシングにより固定のデータサイズ D を取得し、データの圧縮や統合をせずマルチホップ通信によって基地局に送る。

あるノードの発する電波到達範囲はそのノードを中心とした円である。他のノードがこの円内にあるとき、100% の確率で通信内容を受信でき、この円内に無いときは全く受信できない。ノードは電波の出力を変更することで、自由に電波到達範囲を変更できる。センシング周期 I が十分長く、ノード間の電波の干渉は無視できる。

提案アルゴリズムの計算は全て基地局における集中制御で行い、強力な電波を使用して可動ノードに移動先の指示を直接届けることができる。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、基地局は各ノードの位置を知ることができる。

2.2 電力消費についての仮定

ノードが $x[\text{bit}]$ のデータを $d[\text{m}]$ 通信するときの消費電力 $Trans(x, d)$ 、および、 $x[\text{bit}]$ のデータ受信時の消費電力 $Recep(x)$ は下式 (1), (2) に従う²⁾。

$$Trans(x, d) = E_{elec} \times x + \epsilon_{amp} \times x \times d^n \quad (1)$$

$$Recep(x) = E_{elec} \times x \quad (2)$$

ここで、 E_{elec} はハードウェアの消費電力係数、 ϵ_{amp} は信号増幅器の消費電力係数、 $n (\geq 0)$ は電波の減衰係数である。厳密に一方方向のみ指向性のあるアンテナを使用し、電波の減衰が起きなければ $n = 0$ であり、電波が球面状に広がるとき $n = 2$ である。現実には、この間のいずれかの値をとる。

ノードはセンシングのための電力、待機電力を消費する。センシングによって $D[\text{bit}]$ のデータを取得するための電力 $Sens()$ 、および、 $y[\text{sec}]$ 時間待機するための電力 $Listen(y)$

は下式 (3), (4) に従う。

$$Sens() = E_{elec} \times D + E_{sens} \quad (3)$$

$$Listen(y) = E_{listen} \times y \quad (4)$$

可動ノードは通信やセンシングだけでなく、移動にもバッテリーを消費する。 $d[\text{m}]$ 移動するのに必要な電力 $Move(d)$ は、下式 (5) に従う。

$$Move(d) = E_{move} \times d \quad (5)$$

ここで E_{move} は定数である。可動ノードは一定速度 $V[\text{m/sec}]$ で移動可能である。

2.3 問題の定式化

2.3.1 問題設定

WSN を長期間使用すると、ノードのバッテリーは消耗し、バッテリー切れになるノードも出現する。そのとき、データ収集木が分断され、 k 重被覆が崩壊するなどして、WSN が満足に機能しなくなる可能性がある。そのため、バッテリー残量と電力消費モデルから k 重被覆の崩壊時刻を予測し、その都度修復するため、可動ノードを適切な位置に移動させることが必要である。そこで、各可動ノードの移動スケジュールを求め問題の定式化する。

t_0 を WSN の初期配置の時刻、 t_{end} をノードの電池切れにより WSN が稼働できなくなる時刻 t_{life} よりも十分大きい時刻とする。各ノード $s \in P \cup Q$ と、各時刻 $t \in [t_0, t_{end}]$ において $Run(s, t)$ を時刻 t における s の移動速度と移動方向とする。スケジュールを時間 $[t_0, t_{end}]$ における s の移動速度と移動方向の移り変わりとし、下式 (6) で表す。

$$schedule(s, [t_0, t_{end}]) = \bigcup_{t \in [t_0, t_{end}]} \{Run(s, t)\} \quad (6)$$

入力として $Field$ 、基地局 B_s の $B_s.pos$ 、ノード $s \in P \cup Q$ の $s.pos$ 、 $s.energy$ 、 $s.range$ 、定数 E_{elec} 、 ϵ_{amp} 、 n 、 E_{listen} 、 E_{move} 、 V 、 D 、 I を与える。WSN の稼働終了時刻 t_{life} を、可動ノードをどこへ移動させても k 重被覆にならない状態になる時刻とする。

本研究において対象とする WSN の稼働終了時刻 t_{life} を最大化する問題は、各ノードの位置が決定すれば k 重被覆時間を最大化するようなデータ収集木が定められるとしたとき、各ノード $s \in Q$ のスケジュール $schedule(s, [t_0, t_{end}])$ を決定する問題であり、目的関数は下式 (7) で示される。

$$\text{maximize } (t_{life}) \quad (7)$$

ただし、下式 (8) の、フィールドの k 重被覆を満たすことが制約条件である。

$$\forall pos \in Field, |Cover(pos)| \geq k. \quad (8)$$

where

$$Cover(pos) = \{s | pos \in s.range \wedge s \in P \cup Q \wedge s.energy > 0\}. \quad (9)$$

2.3.2 問題へのアプローチ

2.3.1 節で定式化した問題は、全期間 $[t_0, t_{end}]$ に関する可動ノードの移動方向と移動距離、および、データ収集木の最適スケジュールを求め問題であるため、解の探索領域が広く、難しい。よって、本問題を、多期間に区切り、各期間につき最適な可動ノードの移動先の座標、およびデータ収集木を求め問題に近似し、以下のアプローチをとる。

- (1) WSN 予測稼働終了時刻 (以下で説明) を最大化し、かつ、式 (8) を満たすような可動ノードの移動先とデータ収集木を決定する問題を解く。
- (2) 新たにバッテリー切れのノードが発生するたびに、手順 (1) を繰り返す。

ここで、手順 (1) の問題に対する入力は 2.3.1 節で示し

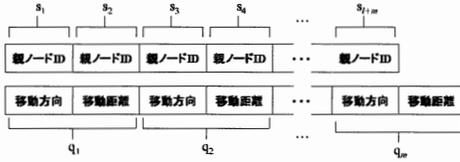


図 1 Encoding of Solution Candidate

たものと同様で、出力は各可動ノード $p \in Q$ の移動先の座標 $p.newpos$ と、データ収集木 (各ノード $s \in P \cup Q$ の親ノード $s.send$) である。ただし、各可動ノード $q \in Q$ の移動先は、下式 (10) を満たさなければならない。

$$|q.pos - q.newpos| < \frac{V}{I} \quad (10)$$

すなわち、可動ノードの移動先はセンシング間隔 $\frac{1}{I}$ 秒の間に移動可能な距離内である。

WSN 稼働終了時刻 t_{life} は、将来の可動ノードの移動も見越した稼働終了時刻であり、厳密に求めることは難しい。そこで、 t_{life} の代わりに、次にバッテリー切れのノードが発生する時刻 (WSN 予測稼働終了時刻) を目的関数とする。WSN 予測稼働終了時刻を下式 (11) で示す。

$$\begin{aligned} & \text{maximize} \left(t_{now} + \min_{s \in P \cup Q} \left(\frac{s.energy}{C(s)} \right. \right. \\ & \left. \left. - \frac{Move(|s.pos - s.newpos|)}{C(s)} \right) \right) \quad (11) \end{aligned}$$

ここで、 t_{now} は現在の時刻、 $C(s)$ は各ノード $s \in P \cup Q$ の単位時間あたりの電力消費量とする。 $s \in P$ のとき、 $|s.pos - s.newpos| = 0$ であることに注意。従って、 $\frac{s.energy}{C(s)} - \frac{Move(|s.pos - s.newpos|)}{C(s)}$ はノード $s \in P \cup Q$ がバッテリー切れになるまでの時間を表す。

各ノード $s \in P \cup Q$ の単位時間あたりの電力消費量 $C(s)$ は下式 (12) で与えられる。

$$\begin{aligned} C(s) = & (Sens() + Recep(D \times s.desc) \\ & + Trans((D + H) \times (s.desc + 1), \\ & |s - s.send|)) \times I + Idle(1) \quad (12) \end{aligned}$$

ここで、 $s.desc$ は、データ収集木における s を根とする部分木に含まれる s 以外のノードの数 (子孫ノードの数)、 H はバケットのヘッド長である。

本問題は Minimum Geometric Disk Cover Problem (GDC)⁵⁾ を含むため、NP 困難である。

3. アルゴリズム

本章では、2.3.2 節で定義した問題に対して解を導く GA を用いた近似アルゴリズムを述べる。

本アルゴリズムはノードの初期配置の時点から適用され、2.3.2 節で示した手順で、 k 重被覆を保つ解が算出できなくなるまで何度も適用する。

3.1 遺伝的アルゴリズム (GA)

GA は、データ (解の候補) を遺伝子で表現した配列 (個体と呼ぶ) を複数用意し、適応度の高い個体を優先的に選択して、交叉や突然変異などの操作を繰り返しながら解を探索する⁶⁾。以下、本問題を GA で解くための詳細を述べる。

符号化: 各個体はそれぞれ $|Q| + |P \cup Q|$ 個の遺伝子座を持ち、各可動ノードの移動先とデータ収集木における親ノードを格納する。符号化の概念図を図 1 に示す。

初期個体群生成: 各ノードの移動先は、一様分布乱数により

フィールド上のランダムな座標を与える。GA では、初期個体群に品質の良い解を混ぜることによって探索効率を向上させることができる。そのため、初期個体群のデータ収集木を生成する際、以下の 3 手法をランダムに適用する。(1) 負荷均等木構築手法: 3.3 節で示すデータ収集木の構築手法である。(2) ダイクストラ法: 通信における消費電力を辺のコストとした最小全域木 (Minimum Spanning Tree) を作成する。(3) 1-hop 接続手法: 全てのノードの親ノードを基地局に設定する。

適応度計算: 個体の評価値を計算する方法を以下に述べる。まず、染色体から各ノードの位置とデータ収集木を決定する。それらと 2.3.2 節で示した入力から、目的関数式 (11) の値を計算し、それを適応度とする。もし復号した解が式 (8) で示される k 重被覆の制約条件を満たしていない場合、適応度を 0 とする。

遺伝演算子: 効率よく解を探索するため、エリート保存戦略、ルーレット選択、一様交叉手法を用いる。これらの手法については文献 6) で述べられている。

終了条件: ある一定の世代数 (ステップ 3) からステップ (6) を経過した回数) が経過したとき終了する。

3.2 局所探索法

各可動ノード $q \in Q$ の移動先 $q.newpos$ に対して、 $q.pos$ を中心とした半径 w の円内からランダムな座標を与え、その移動先を極座標表現にして移動方向と移動距離を設定する。その移動先で目的関数の値を計算し、変更前より良い値なら移動先を更新し、同様の操作を繰り返す。そうでなければ移動先を変更前に戻し、アルゴリズムは終了する。

3.3 負荷均等木構築手法

まず、基地局に直接接続するノード (第 1 レベルノード) を決定し、その後、残りのノードを第 1 レベルノードに接続していくアプローチをとる。

第 1 レベルノード群およびその数の選定方針は以下のとおりである。(1) 第 1 レベルノードの数については、1 から $|P \cup Q|$ 個まで、すべてのパターンについて以下の (2) を試し、各第 1 レベルノードの消費電力が最小となる数を選ぶ。第 1 レベルノードの選択の際、送信のための消費電力が少なくなるように、基地局に近いノードから順に選択していく。(2) 各第 1 レベルノードがデータ中継を担当する (残りのノード群中の) ノード数を決める。その際、第 1 レベルノードのデータ転送量と基地局までの距離を考慮し、全第 1 レベルノード間で消費電力が均等化されるよう、分担ノード数を決める。

以上で、第 1 レベルノードが決まる。次に、各第 1 レベルノード s について、分担ノード数が決まっているので、残りのノード群を、 s に近い順に分担ノードとして割り当てる。 s とその分担ノード集合について、上記 (1)、(2) を再帰的に適用する。

4. 実験および考察

提案手法によるフィールドの k 重被覆時間を評価するため、数百ノードの WSN で、提案手法の一部の機能を無効化したアルゴリズムとの比較実験を行った。

以上のシミュレーション実験における、各ノードの共通パラメータを、表 1 に示す。GA のパラメータは、予備実験で良い解を導出できた、個体数 20、世代数 20、交叉率 1、突然変異率 0.01 と定めた。

4.1 k 重被覆時間

提案手法と比較手法を以下で述べる。(i) Proposed Method (Balance) は提案手法であり、3 章で述べた手法を全て使用

表 1 実験のパラメータ設定

Table 1 Common configuration for experiments

パラメータ	値
各ノードの初期電力量	$s.energy = 32400J$ (文献 2))
データ処理にかかる電力消費係数	$E_{elec} = 50nJ/bit$ (文献 7))
信号増幅にかかる電力消費係数	$\epsilon_{amp} = 100pJ/bit/m^2$ (文献 7))
電力消費乗数	$n = 2$ (文献 7))
センシングにかかる電力消費係数	$E_{sens} = 0.018J/bit$ (文献 7))
移動にかかる電力消費係数	$E_{move} = 8.267J/m$ (文献 8))
可動ノードの最大移動速度	$V = 0.5m/s$ (文献 8))
待機時の消費電力係数	$E_{listen} = 0.025J/s$ (文献 9))
各ノードのセンシング範囲の半径	$R = 20m$ (文献 9))
センシングのデータサイズ	$D = 116bit$ (文献 10))
パケットのサイズ	128bit (文献 10))
センシング頻度	$I = 0.1Hz$ (文献 10))

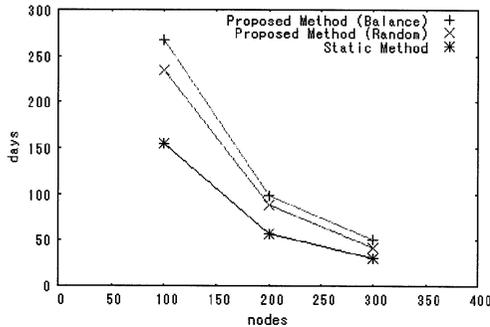


図 2 3 重被覆保持時間
Fig.2 3-coverage duration

している。(ii) **Proposed Method (Random)** は、GA の初期個体群生成の際に、ランダムに生成したデータ収集木 (3.1 節における初期個体群生成の (3) の手法) のみを使用した提案手法である。(iii) **Static Method** は、ノードが移動しない場合で、データ収集木構築のみを行う提案手法である。

本実験におけるフィールドやノードの設定は以下のようにした。

- フィールドの大きさ: 50m × 50m, 100m × 50m, 100m × 100m
- 基地局の位置: フィールドの南端中央
- ノードの数: 100, 200, 300
- 可動ノードと静止ノードの割合: 1:3
- 被覆数: $k = 3$

フィールドの大きさは、 k 重被覆の際に過剰なノードが出る程度にノード数によって調整した。静止ノード、および可動ノードの初期位置は、フィールド内に一様分布乱数を用いて与えた。

実験結果を図 2 に示す。この結果は 30 試行の平均である。図 2 より、Proposed Method (Balance) および Proposed Method (Random) は Static Method よりも k 重被覆時間が約 1.8 倍長い。これより、可動ノードは k 重被覆時間を長く保

つために有効であることが分かる。さらに、Proposed Method (Balance) は Proposed Method (Random) よりも k 重被覆時間が約 1.2 倍長い。これより、負荷均等木構築法の有効性も示されている。また、提案手法の計算時間は 300 ノードの $k = 3$ の場合で 120 秒程度であり、現実的な時間内で計算可能である。

5. あとがき

本論文では、静止ノードと可動ノードを共に用いたデータ収集型 WSN において、 k 重被覆状態を長期間維持することを目的として問題設定を定式化し、GA に基づいたアルゴリズムを提案した。本手法は、GA の初期解を作成する際に、データ収集木を負荷均等木構築法を使用して構築することによって、各ノードのデータ送信によるバッテリー消費量になるべく均一になるようなデータ収集木を構築した点に特色がある。評価実験の結果、提案方式は、100 から 300 ノードの WSN に対して、フィールドの k 重被覆時間を、他の手法より延長できることを確認した。

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)*, pp. 1-12 (2006).
- 2) Heinzelman, W.R., 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)*, Vol. 2, pp. 3005-3014 (2000).
- 3) Mei, Y., Xian, C., Das, S., Charlie Hu, Y., and Lu, Y.: "Repairing Sensor Network Using Mobile Robots," *Proc. of IEEE Workshop on Wireless Ad hoc and Sensor Networks (WWSAN 2006)*(2006).
- 4) Wang, W., Srinivasan, V., and Chua, K. C.: "Trade-offs Between Mobility and Density for Coverage in Wireless Sensor Networks," *Proc. of The Thirteenth Annual Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking (MobiCom 2007)*, pp. 39-50 (2007).
- 5) Srinivas A., Zussman G. and Modiano E.: "Mobile Backbone Networks - Construction and Maintenance," *Proc. of The ACM Int'l Symp. on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc2006)*, pp.166-177 (2006).
- 6) Goldberg, D. E.: "Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning," *Addison-Wesley Publishing Company, Inc.* (1989).
- 7) Wang, G., Cao, G., La Porta, T., and Zhang, W.: "Sensor Relocation in Mobile Sensor Networks," *Proc. of 24th Annual Joint Conf. of the IEEE Computer and Communications Societies (Infocom2005)*, Vol. 4, pp. 2302-2312 (2005).
- 8) 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)*, Vol. 2, pp. 1143-1148 (2002).
- 9) Ganerwal, S., Kansal, A., and Srivastava, M. B.: "Self aware actuation for fault repair in sensor networks," *Proc. of Int'l Conf. on Robotics and Automation (ICRA2004)*, Vol. 5, pp. 5244-5249 (2004).
- 10) Kamimura, J., Wakamiya, N., and Murata, M.: "Energy-Efficient Clustering Method for Data Gathering in Sensor Networks," *Proc. of First Workshop on Broadband Advanced Sensor Networks (BaseNets2004)*, Vol. 103, pp. 31-36 (2004).