

センサネットワークにおける アトラクタ選択モデルを用いたカバレッジ制御手法の提案と評価

岩井 卓也[†] 若宮 直紀^{††} 村田 正幸^{††}

[†] 大阪大学基礎工学部情報科学科 〒565-8531 大阪府豊中市待兼山町 1-3

^{††} 大阪大学情報科学研究科 〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 1-5

E-mail: [†]t-iwai@ics.es.osaka-u.ac.jp, ^{††}{wakamiya,murata}@ist.osaka-u.ac.jp

あらまし 無線センサネットワークでは、観測対象がある一定数以上のセンサ端末により常に観測されることを保証しつつ、冗長なセンサ端末を適宜スリープさせることで、ネットワークの長寿命化をはかるためのカバレッジ制御が必要である。多くの従来手法では、センサ端末が自身の観測エリアの観測状態を推定し、アクティブ、スリープ状態を選択するために、周囲のセンサ端末と位置や観測領域、観測状態に関する情報など制御メッセージをやりとりしなければならない。本稿では、生物システムの環境適応メカニズムの非線形数理モデルであるアトラクタ選択モデルを用いることにより、観測領域全体のカバレッジに関する情報のみにもとづき、それぞれのセンサ端末が適切に状態を決定することのできる手法を提案する。シミュレーションをとおして、提案手法により、ランダムな手法と比較して20%少ないセンサ端末で同程度のカバレッジを達成できることを示した。

キーワード 無線センサネットワーク、カバレッジ問題、アトラクタ選択モデル

Proposal and Evaluation of Attractor Selection-based Coverage Control in Wireless Sensor Networks

Takuya IWAI[†], Naoki WAKAMIYA^{††}, and Masayuki MURATA^{††}

[†] Department of Information and Computer Sciences, School of Engineering Science, Osaka University
1-3 Machikaneyama, Toyonaka 565-8531, Japan, 565-8531 Japan

^{††} Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University
1-5 Yamadaoka, Suita 565-09871, Japan 565-0871 Japan

E-mail: [†]t-iwai@ics.es.osaka-u.ac.jp, ^{††}{wakamiya,murata}@ist.osaka-u.ac.jp

Abstract The coverage problem is one of major issues to prolong the lifetime of a wireless sensor network while guaranteeing that the target region and objects are monitored by the sufficient number of active sensor nodes. There have been many proposals on the coverage problem. However, most of them require sensor nodes to exchange information about the location, sensing area, and sensing state with neighbor nodes in order to determine whether to monitor around or sleep. In this paper, we propose a novel coverage control mechanism where each sensor node relies only on the abstract information about the degree of coverage of the whole target region. To enable autonomous decision of sensor nodes, we adopt a nonlinear mathematical model called the attractor selection model for flexible and adaptive behavior of biological systems to dynamically changing environment. Through simulation experiments, it is shown that the proposal can accomplish the same level of coverage as the random method with fewer active nodes by 20 %.

Key words Wireless sensor network, Coverage problem, Attractor selection model

1. はじめに

無線通信能力を持つセンサ端末を多数配置することにより、

離れた場所やモノの状態を観測することのできる無線センサネットワークは、環境モニタリング、防犯・防災などの幅広い応用が期待されている。このような監視、観測型のアプリケー

ションにおいては、観測対象の場所やモノが常に必要十分な数のセンサ端末によって観測されていることが求められる。一方、無線センサネットワークは数十～数百台のセンサ端末から構成されることが多く、設置コストや管理コストの観点から、冗長配置されたセンサ端末を適宜スリープさせることにより、センサ端末あたりの電力消費を抑え、センサネットワークの長寿命化を図る必要がある。このような観測状態に対するアプリケーション要求を満足しつつスリープ制御によってセンサネットワークを長期間運用する問題をカバレッジ問題と呼ぶ [1].

観測対象の領域やモノが常に k 台以上のアクティブ状態のセンサ端末によって観測されているという条件の下、アクティブ状態のセンサ端末数を最小化し、無線センサネットワークの寿命を最大化するためのさまざまな手法が提案されている。多くの手法においては、センサ端末は、自身の位置と自身のセンサによって観測可能な観測エリア、および隣接するセンサ端末とのメッセージ交換によって得られる隣接センサ端末の位置と観測エリア、および観測状態に関する情報にもとづき、幾何学的なアルゴリズムを適用することによって、状態を決定する。例えば、CCP [2] では、自身の観測エリアと隣接センサ端末の観測エリアの交点が、十分な数のアクティブ状態のセンサ端末の観測エリアに含まれているかどうかによって、所望のカバレッジが達成されているかどうかを判定する。このような手法においては、センサ端末の位置が既知であること、観測エリアが既知で正円であることなどの仮定を置いており、これらの仮定に誤差が生じると性能が低下する [3]。また、センサ端末が状態を決定するためには、隣接センサ端末間で情報交換を行う必要があり、帯域や電力が消費される。文献 [4] では、グラフ理論における支配集合の考え方を応用することにより、センサ端末の位置情報を必要としないカバレッジ制御手法を提案しているが、観測エリアは正円であり、送信電力が制御可能であることを前提としている。また、CARES は、センサ端末の状態遷移をマルコフモデルで規定し、適切に状態遷移確率を与えることによって定常状態でカバレッジを達成するが、センサ端末が観測領域全体に一樣分布で配置されていること、観測エリアがセンサ端末間で共通の大きさの正円であることを前提としている [5].

本稿では、個々のセンサ端末が、自身や隣接センサ端末の位置や観測エリア、状態に関する情報を用いることなく、センサ端末から収集される観測情報にもとづいて算出される観測領域全体のカバレッジのみを用いて、アクティブ状態、スリープ状態を選択することのできるカバレッジ制御手法を提案する。提案手法では、センサ端末の自律的な状態選択のため、生物システムの環境適応メカニズムの非線形数理モデルであるアトラクタ選択モデル [6] を応用する。アトラクタ選択モデルは、最適化問題のヒューリスティックの 1 つであり、ノイズによる解空間の探索と、非線形ダイナミクスによる解の引き込みを組み合わせている。

本稿の構成は以下の通りである。まず 2 章において、提案するカバレッジ制御手法の基本動作について説明し、3 章において、アトラクタ選択モデルについて説明する。4 章において、

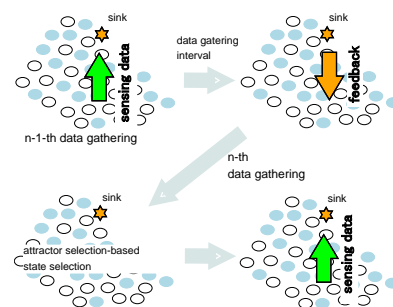


図 1 アトラクタ選択モデルを利用したカバレッジ制御

アトラクタ選択モデルを用いた状態選択の方法を説明し、5 章において、提案手法の有効性をシミュレーションにより評価する。最後に 6 章で本稿のまとめと今後の課題を述べる。

2. アトラクタ選択モデルを応用したカバレッジ制御手法の基本動作

本稿では、観測領域に配置されたセンサ端末から、観測領域に関するセンサ情報を定期的に基地局で収集する、定時観測アプリケーションを対象とする。

基地局は、収集されたセンサ情報などから、観測領域または観測対象がどれくらい観測されているかを表す度合い、すなわちカバレッジを算出する。なお、本稿での提案方式においては、カバレッジは正確でなくともよく、例えば、センサ端末の位置が既知である場合には、観測領域を小さい領域に細分化し、観測領域のうち k 個以上のセンサ情報が収集されている小領域の割合としてもよい。基地局は、カバレッジをもとにアクティビティと呼ばれる評価量を算出し、情報収集周期ごとにブロードキャスト、フラッディング、または適切な情報拡散手法を用いてセンサ端末に通知する。

センサ端末は、受信したアクティビティにもとづいてアトラクタ選択モデルにより状態を選択する。アクティブ状態を選択したセンサ端末は、センサデバイスから温度、加速度、動体検知などのセンサ情報を取得する。なお、アプリケーションに応じて、情報収集周期の間、継続的にセンサ情報を取得し、蓄積してもよい。センサ端末は、センサ情報とセンサ端末の識別子、および位置推定を行う場合には位置情報、あるいは、例えば機器や施設の名称などセンサ端末が設置されている場所やモノの情報、またはセンシング対象の場所やモノの情報からなるメッセージを構成し、マルチホップ通信またはシングルホップ通信によって基地局へ送信する。なお、本稿ではセンサ端末からの情報収集方法については検討の対象外とし、例えば文献 [7] などを用いる。スリープ状態を選択した場合には、スリープ時間を定めるタイマを設定し、スリープする。なお、このタイマは情報収集周期を単位時間とし、基地局からのアクティビティの広告を受け取れるタイミングでスリープ状態から復帰する。

3. アトラクタ選択モデル

アトラクタとは、非線形ダイナミクスにおいてシステムが過渡状態を経た後に到達する安定状態のことであり、アトラクタ

選択モデルは、生物システムが環境変化に適応的に適切な安定状態を選択する仕組みを表した非線形数理モデルである。文献 [6] では、バクテリア *E. coli* が培地内の栄養状態の動的な変化に適応する仕組みを示している。バクテリアは成長に必須の 2 種の栄養を生成する代謝ネットワークを有し、それぞれの代謝は異なる遺伝子の発現量によって制御されている。また、一方の栄養が生成されている間は他方の栄養を生成しないように遺伝子操作されている。培地内に 2 種類の栄養が十分にあるときには、バクテリアはいずれの栄養を生成していても十分に成長できるため、それぞれの栄養を生成するバクテリア量は培地内でおおよそ等しくなる。環境変化などにより培地からいずれかの栄養が欠乏すると、不足している栄養を生成するバクテリアが次第に多くなり、栄養不足によるバクテリアの死滅を防ぐ。

このような適応的な遺伝子発現は次式でモデル化される。

$$\frac{dm_1}{dt} = \frac{\text{syn}(\alpha)}{1+m_2^2} - \text{deg}(\alpha)m_1 + \eta_1 \quad (1)$$

$$\frac{dm_2}{dt} = \frac{\text{syn}(\alpha)}{1+m_1^2} - \text{deg}(\alpha)m_2 + \eta_2 \quad (2)$$

ここで、 m_i ($i = 1, 2$) は mRNA 濃度を表す。 $\text{syn}(\alpha)$, $\text{deg}(\alpha)$ はそれぞれ mRNA の生成、消費を表す関数であり、例えば $\text{syn}(\alpha) = \frac{6\alpha}{2+\alpha}$, $\text{deg}(\alpha) = \alpha$ で与えられる。 η_i ($i = 1, 2$) は細胞内外のノイズの影響による mRNA 濃度の変化を表す。 $\alpha \in [0, 1]$ はアクティビティと呼ばれ、例えばバクテリアの活性度など、遺伝子発現状態の良さを表す。

現在の遺伝子発現状態が適切なとき、アクティビティ α の値は大きくなり、遺伝子発現へのノイズ項 η_i の影響が小さくなるため、遺伝子発現量は式 (1), 式 (2) の右辺第 1 項, 第 2 項のダイナミクスにより制御される。環境の栄養状態に対して遺伝子発現が不適切なとき、アクティビティ α の値は小さくなるため、遺伝子発現へのノイズ項 η_i の影響が大きくなり、生成する栄養が変化する。その結果、環境状態に対して適切な栄養生成が行えるようになると、アクティビティが高くなり、式 (1), 式 (2) による非線形ダイナミクスの引き込みによってアトラクタに収束する。

4. アトラクタ選択モデルによる状態の選択

提案手法では、センサ端末をアトラクタ選択モデルのバクテリア、アクティブ状態、スリープ状態の選択を生成する栄養の選択にそれぞれ対応付け、カバレッジによりアクティビティを定義することにより、センサ端末が適応的かつ自律的に状態選択を行うカバレッジ制御を実現する。

4.1 基本動作

情報収集周期ごとに、基地局は、前回の情報収集タイミングにおけるカバレッジから次式によりアクティビティ α を計算し、無線センサネットワーク全体に広告する。

$$\frac{d\alpha}{dt} = \delta \times (\alpha^* - \alpha) \quad (3)$$

ここで、 $\alpha^* \in [0, 1]$ を瞬時アクティビティと呼び、カバレッジから算出する。瞬時アクティビティの算出については 4.2 で述

べる。 δ はアクティビティの変化率を定める係数である。0.01 など小さい値を用いることで一時的な瞬時アクティビティ α^* の変化にアクティビティ α が影響されにくくなるため、安定したカバレッジ制御が期待できる。一方、アクティビティ α の変化が遅くなるため、収束に時間がかかるという問題がある。なお、アクティビティの初期値は 0 とする。

センサ端末はアトラクタ選択モデルによって更新される評価値 m_1 , m_2 にもとづいて状態を遷移する。なお、 m_1 , m_2 の初期値はいずれも 1 とする。情報収集のタイミングにアクティブ状態にあるセンサ端末の動作を以下に示す。

Step1 基地局からのアクティビティ α の広告を受信する

Step2 アトラクタ選択モデル (式 (1), 式 (2)) を評価する

Step3 $m_1 > m_2$ ならセンサ情報を取得、送信後、観測を継続する。 $m_1 \leq m_2$ ならセンサ情報を取得、送信後、スリープタイマを情報収集周期の n 倍に設定し、スリープする

一方、スリープ状態にあるセンサ端末は、上記 Step3 におけるタイマ設定によって、基地局からのアクティビティ広告にあわせてスリープから復帰する。スリープから復帰したセンサ端末の動作を以下に示す。

Step1 基地局からのアクティビティ α の広告を受信する

Step2 アトラクタ選択モデル (式 (1), 式 (2)) を評価する

Step3 $m_1 > m_2$ ならセンサ情報を取得、送信後、アクティブ状態になり、観測を継続する。 $m_1 \leq m_2$ ならスリープタイマを情報収集周期の n 倍に設定し、再度スリープする

なお、スリープ期間 n としてセンサ端末で共通の定数を用いると、多くのセンサ端末が同時に状態遷移し、カバレッジが振動するため、状態が収束せず、不安定になる。そのため、 n は乱数で与えるものとし、シミュレーション評価では、平均 5 の一様分布とした。

式 (1) および式 (2) における $\text{syn}(\alpha)$, $\text{deg}(\alpha)$ としては以下を用いる [8]。

$$\text{syn}(\alpha) = \alpha \times (\beta \times \alpha^\gamma + \varphi^*) \quad (4)$$

$$\text{deg}(\alpha) = \alpha \quad (5)$$

係数 β はアトラクタの深さ、すなわち安定性に影響し、係数 γ はアトラクタに引き込む強さ、すなわち収束性に影響する。定数 φ^* は、この非線形ダイナミクスが安定点を持つためのものであり、 $1/\sqrt{2}$ を用いる [8]。

4.2 瞬時アクティビティの算出

基地局は、情報収集タイミングごとに、得られたセンサ情報からカバレッジを計算し、瞬時アクティビティ α^* を求め、アクティビティ α を更新する。先に述べたとおり、観測対象のうちセンサ情報が得られているものの割合や、イベントの検出率など、カバレッジの評価尺度はアプリケーションの要求やシステム構成によって様々なものが考えられる。基本特性を評価するため、本稿では、観測領域を格子状に分割した小領域のうち、中心がアクティブ状態のセンサ端末に観測されているものの割合を観測率と呼び、観測率をカバレッジとする。小領域の中心 (x, y) を観測するアクティブ状態のセンサ端末数を $CoP(x, y)$

とすると、観測率 $SR \in [0, 1]$ は次式で求められる。

$$SR = \frac{|\{(x, y) \mid CoP(x, y) > 0\}|}{P_{all}} \quad (6)$$

ここで、 P_{all} は観測領域内の小領域の数である。

SR を瞬時アクティビティ α^* とすると、複数のアクティブ状態のセンサ端末が同じ小領域を観測しても瞬時アクティビティは変わらず、冗長な観測が行われてしまう。そのため、式 (7) により、観測されている小領域あたりのアクティブ状態のセンサ端末の平均数として冗長度を定義し、冗長度 RR を用いて瞬時アクティビティ α^* を式 (8) で算出する。

$$RR = \frac{\sum_{i=x_{min}}^{x_{max}} \sum_{j=y_{min}}^{y_{max}} CoP(i, j)}{|\{(x, y) \mid CoP(x, y) > 0\}|} \quad (7)$$

$$\alpha^* = \frac{SR}{\max\{1, w \times RR\}} \quad (8)$$

ここで、 \max は、冗長度 RR に対する重み w が小さい場合に、瞬時アクティビティ α^* が 1 を超えるのを防ぐためのものである。

5. シミュレーションによる評価

本章では、提案手法の有効性、およびパラメータ設定の影響をシミュレーションにより評価する。

5.1 シミュレーションの条件

大きさ 50×50 の観測領域に 100 台のセンサ端末をランダムに配置する。センサ端末は自身を中心とする半径 10 の正円を観測できるものとする。また、観測領域を 1×1 の大きさの小領域に分割して観測率を求める。なお、全てのセンサ端末がアクティブ状態の時、全ての小領域が 3 台以上のセンサ端末に観測されるような配置とした。センサ端末の通信距離は十分大きく、全てのセンサ端末から基地局に直接通信可能とし、また、メッセージの棄却は発生しないものとした。

シミュレーション開始時には、全てのセンサ端末がアクティブ状態にあり、状態選択のための評価値 m_1, m_2 はいずれも 1 とする。また、時刻 0 に基地局はアクティビティの初期値 0 を広告する。以降では、特に断らない限り、100 通りのセンサ端末の配置についてそれぞれ 1 回のシミュレーションを行い、100 回のシミュレーション結果の平均値を示す。評価に用いたアクティビティ α の変化率 δ 、係数 β, γ 、および冗長性の重み w の組み合わせを表 1 に示す。なお、ノイズ項の分散 σ は 0.4 とした。

5.2 基本評価

提案手法により、基地局から定期的に得る観測領域全体のカバレッジの良さのみにもとづいて、センサ端末が自律的に状態を決定することにより、冗長なセンサ端末がアクティブ状態になることを防ぎつつ、高い観測率を達成できることを示す。パラメータの組み合わせとして表 1 の parameter1 を用いた場合の結果と、冗長度を考慮しない瞬時アクティビティを計算する parameter0 を用いた場合の結果をあわせて図 2 に示す。図の

組み合わせ名	δ	β	γ	w
parameter0	0.01	2.5	1.2	0.0
parameter1	0.01	2.5	1.2	0.4
parameter2	0.01	2.5	1.2	0.2
parameter3	0.01	2.5	1.2	0.6
parameter4	0.10	2.5	1.2	0.6
parameter5	0.50	2.5	1.2	0.6
parameter6	0.01	2.5	1.0	0.6
parameter7	0.01	2.5	1.4	0.6

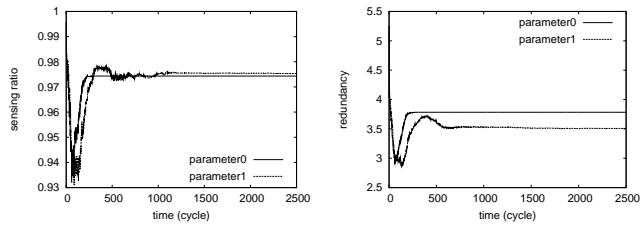
表 1 シミュレーションでのパラメータ設定

横軸はいずれも情報収集周期であり、以降ではこの時間単位をサイクルと呼ぶ。また、図 2(a) は平均観測率、図 2(b) は平均冗長度、図 2(c) はアクティブ状態のセンサ端末の平均数、図 2(d) は平均アクティビティを縦軸にそれぞれ示している。

図 2(a) より、パラメータ設定によらずいったん観測率が低下した後、parameter0 ではおよそ 200~300 サイクルで、parameter1 ではおよそ 1250~1500 サイクルで観測率がおよそ 0.975 に収束していることがわかる。また、図 2(b) より、収束時における冗長度は parameter0 および parameter1 でそれぞれ 3.78, 3.50、図 2(c) より、収束時にアクティブ状態にあるセンサ端末数はそれぞれ 35.9, 33.5 となっており、冗長度を考慮したアクティビティにより若干冗長性を下げることができている。

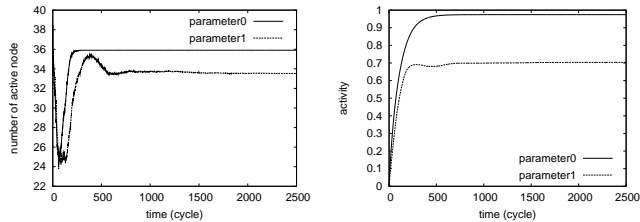
図 2(a) の 100 サイクル前後における一時的な観測率の低下は、図 2(c) に示されるとおり、アクティブ状態にあるセンサ端末数が一時的に大きく減少することによる。初期状態では評価値 m_1, m_2 は等しく 1 と設定されており、シミュレーション開始直後にはこれに式 (1) および式 (2) でノイズが加わることにより、50 % のセンサ端末では $m_1 > m_2$ 、残り 50 % のセンサ端末では $m_1 < m_2$ となる。そのため、およそ半分のセンサ端末がアクティブ状態になり、残りの半分のセンサ端末がスリープ状態になる。このとき、観測率は十分に高い状態にあるが、アクティビティ α の初期値が 0 であるため、シミュレーション開始後しばらくはアクティビティが低い状態が継続する。アクティブ状態にあるセンサ端末は、情報収集周期ごとに式 (1)、式 (2) により評価値を算出し、状態を決定するが、アクティビティが低いためノイズに影響されておよそ等確率で状態を選択する。一方、スリープタイムによってスリープ状態を継続しているセンサ端末は式 (1)、式 (2) を評価しないため、状態が変化しない。したがって、アクティビティが低い期間には、情報収集タイミングごとにアクティブ状態のセンサ端末のおよそ半分が順次スリープ状態に移行する一方で、スリープ状態のセンサ端末があまりアクティブ状態に移行しないため、アクティブ状態のセンサ端末数が減少し、観測率が低下する。

また、parameter1 では、アクティブ状態にあるセンサ端末数が 400 サイクルあたりでいったん増加、減少した後、収束している。これは図 2(b) に示されるように、この期間の冗長度が高いため、アクティビティ α が小さくなったためである。前述の通り、アクティビティ α が小さくなると、アクティブ状態のセンサ端末数が減少する。その後、冗長度が低下し、アクティ



(a) 観測率の変化

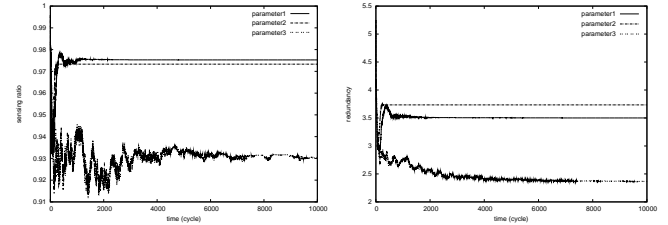
(b) 冗長さの変化



(c) アクティブ状態のセンサ端末数の変化

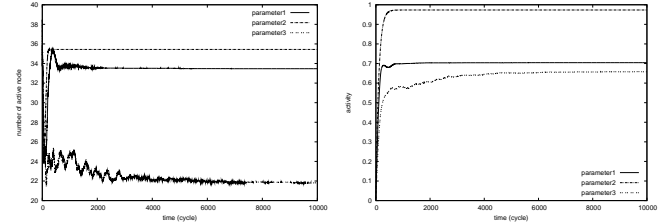
(d) アクティビティの変化

図2 提案手法の基本評価結果



(a) 観測率の変化

(b) 冗長さの変化



(c) アクティブ状態のセンサ端末数の変化

(d) アクティビティの変化

図3 係数 w による影響

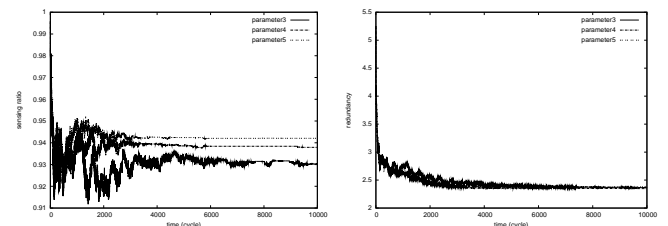
ティ α が向上することで、センサ端末の状態が収束している。

なお、図2(a)に示されるとおり、冗長度を考慮しないparameter0では0.97、冗長度を考慮するparameter1では0.70に、それぞれアクティビティが収束しているが、このパラメータ設定では、アクティビティ α がおおよそ0.65を超えると式(1)および式(2)におけるノイズ項の影響がほとんどなくなり、状態変化が生じにくくなる。

5.3 パラメータの影響の評価

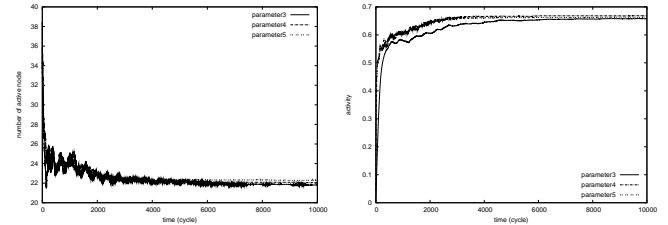
まず、冗長度の重み w の影響を評価するため、表1のparameter1, parameter2, parameter3を比較する。図3(b)より、重み w を大きくするほど冗長度が低下することがわかる。特に図3(c)に示されるように、重み $w = 0.6$ の場合にはアクティブ状態にあるセンサ端末数が大きく減少しており、センサネットワークの長寿命化に有効であると考えられる。しかしながら、図3(a)より、収束時の観測率が他のパラメータ設定ではおおよそ0.975であるのに対して、重み w が大きいparameter3では0.930に低下しており、収束までの時間も長くなっていることがわかる。これは、無線センサネットワーク全体として高い観測率を維持しつつ冗長性を下げられるような状態の組み合わせをうまく見つけられていないことによると考えられる。

アトラクタ選択モデルは、最適化問題のヒューリスティックの一種であり、アクティビティが低い場合にはノイズ項により解空間を探索し、よい解に近づくにつれてアクティビティが増加することによって解に引き込まれ、収束する。したがって、アクティビティの増加を抑えランダムな探索を許すことにより、局所最適解から脱出し、大域最適なアトラクタ、すなわち最適なセンサ端末の状態の組み合わせに到達することが期待できる。そこで、重み $w = 0.6$ とし、アクティビティ α の変化率 δ を変えてシミュレーションを行った結果を図4に示す。変化率 δ を小さくすることによって(parameter3)、アクティビティ α の増加速度が低下しているが(図5(d))、観測率は変化率 δ が大きい方が高い(図5(a))。これは、たまたまよいアトラクタに到達してもアクティビティ α がすぐに高くないため、アトラク



(a) 観測率の変化

(b) 冗長さの変化



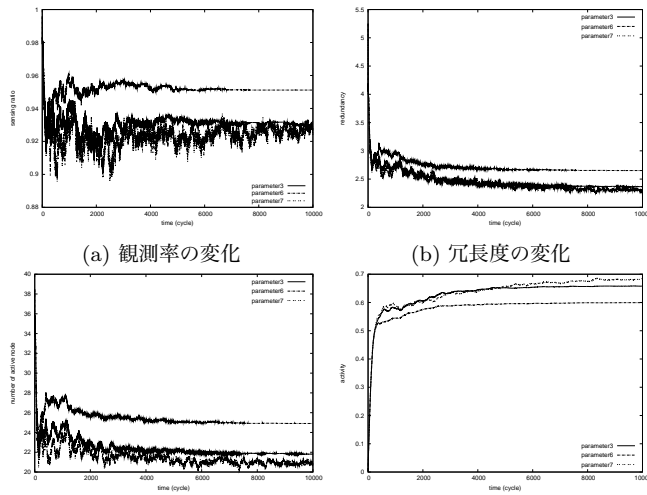
(c) アクティブ状態のセンサ端末数の変化

(d) アクティビティの変化

図4 係数 δ による影響

タにとどまることができず、再度ランダムな探索を行うためと考えられる。

そこで、次にアトラクタへの引き込みの強さに影響する係数 γ を変化させる。 γ が小さいほど、たまたま見つかったよいアトラクタへの引き込みが強くなり、早く収束する。図5に結果を示す。図5(a)より、 γ が小さいほど、収束までの時間が短くなり、高い観測率が得られ、 γ が大きいほど、収束までの時間が長くなり、観測率も下がることがわかる。 γ が1.4の時には10000サイクル経過後も収束しなかった。以上より、提案手法により、観測領域全体のキャパシティにもとづくセンサ端末の自律的な制御によって観測率0.930~0.974を達成できることが確認できた。また、冗長度の重み w を大きくするほど収束時の冗長度は小さくなるが、収束までの時間が長くなるとともに、収束時の観測度が低下すること、および、定数 γ を小さくすることによってアトラクタへの引き込みの強さを大きくし、収束時間を短く、かつ観測率を高くできることが明らかとなった。



(a) 観測率の変化 (b) 冗長さの変化
(c) アクティブ状態のセンサ端末数の変化 (d) アクティビティの変化

図5 係数 γ による影響

5.4 比較評価

本節では、提案手法によって冗長度を抑えつつ高い観測率が得られていることを検証する。パラメータの組み合わせとしては parameter3 を用いた。比較対象として、任意の数のセンサ端末をランダムに選択し、アクティブ状態とした場合の結果を用いる。この手法をランダム手法と呼ぶ。図6に、12~50台のランダムに選んだセンサ端末をアクティブ状態とした場合の、10000回のシミュレーションから得られる平均観測率と99%信頼区間を示す。実線は平均観測率を表している。また、parameter3における100回のシミュレーションのそれぞれの収束状態における、アクティブ状態のセンサ端末数と得られる観測率、およびそれらの平均を示す。また、冗長度を考慮しない parameter0 の結果も併せて示す。図より、アクティブ状態のセンサ端末数が同じ場合、ランダム手法よりも提案手法のほうがおおむね高い観測率を達成しており、アクティブ状態のセンサ端末の平均数22における観測率の差はおよそ0.05であることがわかる。また、同じ観測率を達成するために必要なアクティブ状態のセンサ端末数もおおよそ5台少なく、20%削減されている。

6. おわりに

本稿では、定時的にセンサ端末から収集される観測情報をもとにして得られる観測領域全体のカバレッジに関する情報のみを用いて、センサ端末が自律的に適切な状態を選択するカバレッジ制御手法を提案し、シミュレーション評価により有効性を示した。

提案手法では、正確な位置や観測エリア、近隣センサ端末に関する情報を必要としないため、多くの従来手法に比べて、誤差の影響を受けにくく、また、メッセージ交換による電力や帯域の消費を抑えることができると考えられる。今後、これらの点に関する他手法との比較評価、および小領域ごとのアクティビティを用いるなどした提案手法の性能向上に取り組む。

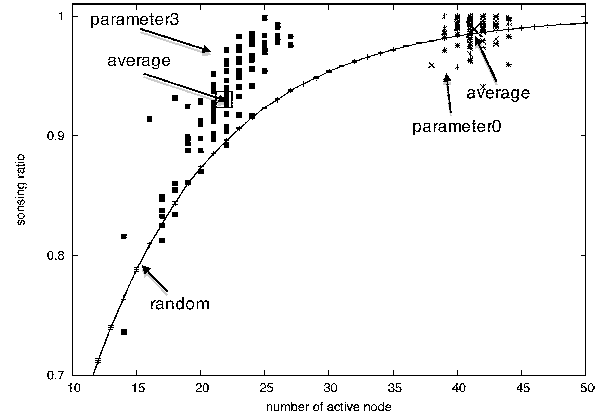


図6 ランダム手法との比較

謝 辞

本研究の一部は、文部科学省グローバル COE プログラム(研究拠点形成費)の補助によるものである。ここに記して謝意を表す。

文 献

- [1] M. Cardei and J. Wu, "Coverage in wireless sensor networks," *Handbook of Sensor Networks*, 2004.
- [2] X. Wang, G. Xing, Y. Zhang, C. Lu, R. Pless, and C. Gill, "Integrated coverage and connectivity configuration in wireless sensor networks," in *Proceedings of ACM SenSys*, pp. 33-72, August 2003.
- [3] M. Zhang, M. Chan, and A. Ananda, "Coverage protocol for wireless sensor networks using distance estimates," in *Proceedings of IEEE SECON*, pp. 183-192, June 2007.
- [4] R. Zheng, G. He, and X. Liu, "Location-free coverage maintenance in wireless sensor networks," Tech. Rep. UH-CS-05-15, Department of Computer Science, University of Houston, July 2005.
- [5] B. Yener, M. Magdon-Ismail, and F. Sivrikaya, "Joint problem of power optimal connectivity and coverage in wireless sensor networks," *Wireless Networks*, vol. 13, no. 4, pp. 537-550, 2007.
- [6] A. Kashiwagi, I. Urabe, K. Kaneko, and T. Yomo, "Adaptive response of a gene network to environmental changes by fitness-induced attractor selection," *Plos One*, vol. 1, no. 1, 2006.
- [7] N. Wakamiya and M. Murata, "Synchronization-based data gathering scheme for sensor networks," *IEICE Transactions on Communications*, vol. 88, pp. 873-881, March 2005.
- [8] K. Leibnitz, N. Wakamiya, and M. Murata, "A Bio-Inspired Robust Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks," in *Proceedings of 16th International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN 2007)*, pp. 321-326, August 2007.