

特別研究報告

題目

アトラクタ選択モデルを応用した 誤差に耐性のあるカバレッジ制御手法の提案と評価

指導教員

村田 正幸 教授

報告者

岩井 卓也

平成 22 年 2 月 16 日

大阪大学 基礎工学部 情報科学科

アトラクタ選択モデルを応用した
誤差に耐性のあるカバレッジ制御手法の提案と評価

岩井 卓也

内容梗概

センサデバイスと無線通信機能を備えた小型センサ端末によって、離れた物や場所を観測する無線センサネットワークでは、ある一定数以上のセンサ端末により観測対象を常に観測し続けると同時に、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。既存手法の多くは、幾何学的なアルゴリズムを用いることで、個々のセンサ端末が自身の観測エリア内の観測状態を推定し、観測状態が十分であればスリープして電力消費を抑え、そうでなければアクティブになり観測を実施し、効率的なカバレッジ制御を行う。しかしながら、センサ端末が適切にアクティブ状態またはスリープ状態を選択するためには、周囲のセンサ端末とセンサ端末の位置や観測領域、稼働状態に関する情報などの制御メッセージをやりとりしなければならず、多くの帯域や電力を必要とする。また、センサ端末の位置や観測領域に誤差があると、観測対象が十分に観測されない、あるいは冗長なセンサ端末がアクティブになるなどの問題が生じる。本報告では、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、詳細な位置情報や隣接センサ端末に関する情報を必要とせず、観測領域の観測状態に関する情報のみにもとづいて、それぞれのセンサ端末が適切にアクティブ状態、またはスリープ状態を選択する手法を提案している。シミュレーションによりランダム手法と比較して9%~43%少ないセンサ端末で同等のカバレッジを達成でき、また誤差のある環境下で既存手法と比較してセンサ端末あたりの観測率が向上するとともにオーバーヘッドを約半分に抑えられることを示す。

主な用語

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

目次

1	はじめに	6
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提案	8
2.1	提案手法の概要	8
2.2	カバレッジ制御へのアトラクタ選択モデルの適用	9
2.3	カバレッジの評価方法	12
2.4	瞬時アクティビティの計算方法	13
2.5	アトラクタ選択モデルにもとづく適応的な稼働状態の選択機構	14
3	シミュレーション評価	15
3.1	比較対象	15
3.1.1	ランダム手法	15
3.1.2	CCP (Coverage Configuration Protocol)	15
3.2	誤差モデル	18
3.2.1	センサ端末の位置推定誤差	19
3.2.2	観測エリアの形状誤差	19
3.3	オーバヘッドの算出	20
3.3.1	提案手法のオーバヘッド	21
3.3.2	CCP のオーバヘッド	21
3.4	シミュレーション結果と考察	22
3.4.1	基本評価	23
3.4.2	パラメータ設定による影響	26
3.4.3	センサ端末に関する情報の誤差による影響	36
3.4.4	センサ端末の停止による影響	39
4	小領域毎のアクティビティにもとづくカバレッジ制御手法の検討	41
4.1	小領域毎のアクティビティにもとづくカバレッジ制御手法	41
4.2	シミュレーション結果と考察	42
4.2.1	基本評価	43
4.2.2	パラメータ設定による影響	45
4.2.3	センサ端末に関する情報の誤差による影響	48
4.2.4	センサ端末の停止による影響	49
5	おわりに	51

謝辭	52
參考文獻	53

目次

1	提案手法の動作イメージ	9
2	小領域ごとの観測数の例	12
3	評価値にもとづくセンサ端末の状態遷移	15
4	K_s -Eligibility の適用例 ($K_s = 1$)	16
5	CCP におけるセンサ端末の状態遷移	18
6	RIM による形状誤差	20
7	基本性能の評価	25
8	他手法との比較	26
9	冗長さの重み w による影響	31
10	アクティビティの変化率 δ による影響	32
11	アトラクタへの引き込みの強さ γ による影響 ($\delta=0.001$)	33
12	アトラクタへの引き込みの強さ γ による影響 ($\delta=0.01$)	34
13	係数 p による影響	35
14	誤差による影響	38
15	センサ端末の停止による影響	40
16	小領域毎のアクティビティを用いたカバレッジ制御の振る舞い	42
17	基本性能の評価 (小領域ごとのアクティビティを用いる手法)	44
18	他手法との比較 (小領域ごとのアクティビティを用いる手法)	45
19	係数 p による影響 (小領域ごとのアクティビティを用いる手法)	46
20	冗長さの重み w による影響 (小領域ごとのアクティビティを用いる手法)	47
21	誤差による影響 (小領域ごとのアクティビティを用いる手法)	48
22	センサ端末の平均寄与率 (小領域ごとのアクティビティを用いる手法)	49
23	センサ端末の停止による影響 (小領域ごとのアクティビティを用いる手法)	50

表目次

1	パラメータの組み合わせ	27
2	パラメータによる影響	30
3	パラメータの組み合わせ (小領域ごとのアクティビティを用いる手法)	45

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、離れた場所や物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。ホームセキュリティ、農作物育成環境最適化のような監視、観測型のアプリケーションにおいては、観測対象の場所や物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 [1]。実環境においては、それぞれのセンサ端末が観測可能な観測エリアを正確に把握することは難しく、また、例えば障害物の出現、外因によるセンサ端末の移動などによって、それぞれのセンサ端末の観測エリアが変化するため、必要最小限のセンサ端末を最適配置することは困難である。そのため、設置コストや管理コストの観点から、あらかじめ冗長にセンサ端末を配置し、実際の観測状態にもとづいて不要なセンサ端末を適宜スリープさせる自律的な制御が望まれる。このようなセンサ端末が冗長配置された環境において、観測状態に対するアプリケーションの要求を満足しつつ、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 [2]。

観測対象の領域や物が常に 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 [3-9]。なお、この観測状態に対する条件を k カバレッジと呼ぶ。これらの手法の多くでは、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、観測エリア、稼働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、自身の稼働状態を決定する。例えば、CCP (Coverage Configuration Protocol) [6] では、アクティブ状態にある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、アプリケーションが望むカバレッジが達成されているかどうかを判定する。自身の観測エリア内の全ての交点において十分なカバレッジが得られている場合には、センサ端末はスリープ状態に移行することができる。このように幾何学的なアルゴリズムを用いた決定論的な手法では、アルゴリズムや機構の工夫により最適化が図れ、少数のセンサ端末がアクティブ状態になる効率的なカバレッジ制御が可能である。しかしながら、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、センサ端末の位置や観測エリアの形状に誤差が生じると性能が低下する [7]。また、センサ端末が適切に稼働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 [8] 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、観測エリアが正円であり、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

[9] 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、位置情報などを用いず、確率的に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様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。

本報告では、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、隣接センサ端末の稼働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のカバレッジ情報のみを用いて、自律的な判断により自らの稼働状態（アクティブまたはスリープ）を決定するカバレッジ制御手法を提案する。これにより、所望のカバレッジを達成しつつ、無線センサネットワークの長寿命化を図ることができる。提案手法では、センサ端末による自律的な状態選択を実現するため、最適化問題のヒューリスティックの一つであるアトラクタ選択モデル [10] を応用する。アトラクタ選択モデルは、バクテリアが、環境の栄養状態の変化に応じて生成する栄養を適応的に選択して、成長し続ける仕組みを表した非線形数理モデルである。アトラクタ選択モデルは、ゆらぎ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ることにより、条件変化に対する適応性と、解の安定性を獲得している。センサ端末をアトラクタ選択モデルのバクテリアに、またアクティブ状態、スリープ状態の選択を生成する栄養の選択に、さらにカバレッジをバクテリアの成長率にそれぞれ対応づけることにより、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ことができる。アトラクタ選択モデルを応用した提案手法では、センサ端末は決定論的に振る舞うのではなく、ゆらぎによって確率的に状態間を遷移するため、従来の決定論的なカバレッジ制御における競合回避などのための調停機構が不要になるとともに、センサ端末の位置や観測エリアに誤差のある環境や、センサ端末の追加、移動、故障や電力枯渇による停止などの変化に対しても適応することができる。

本報告の構成は以下の通りである。まず、2章ではアトラクタ選択モデルを応用した誤差に耐性のあるカバレッジ制御手法を提案する。次に、3章において、他手法との比較評価により、提案手法の有効性を示す。さらに、4章において、観測領域を小領域に分割する性能向上手法を提案し、評価結果を示す。最後に5章で本報告のまとめと今後の課題について述べる。

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提案

本章では、提案手法の概要を述べた後、提案手法で用いるアトラクタ選択モデルとカバレッジ制御への適用法、およびアトラクタ選択モデルにもとづく稼働状態の選択機構について述べる。

2.1 提案手法の概要

本報告では、観測領域に冗長に配置されたセンサ端末から、観測領域に関する観測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。以降では、情報収集の周期ごとに繰り返される情報収集の開始時を情報収集タイミング、情報収集と情報収集の間の期間を、観測期間と呼ぶ。なお、観測期間の長さは情報収集の周期と等しい。

情報収集タイミングにおいて、前の観測期間でアクティブ状態にあり観測を行っていたセンサ端末は、センサデバイスから取得した温度、加速度、動体検知などの観測情報と、センサ端末の識別子、およびセンサ端末自身が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物の情報、または観測対象の場所や物の情報など、センサ端末の観測エリアを推定できる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、本報告においては、観測効率を向上するカバレッジ制御技術の提案を目的としているため、センサ端末からの情報収集の方法については検討の対象外とし、例えば文献 [11] などで提案されている手法を用いる。

基地局は、収集された観測情報などから、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。提案手法においては、カバレッジの評価は正確でなくてもよい。例えば、センサ端末の位置が既知である場合には、センサ端末ごとの観測エリアをある半径の正円と仮定し、幾何学的なアルゴリズムを用いて、アクティブなセンサ端末の観測エリアに含まれている領域の面積の割合を求めてもよく、あるいは、観測領域を小さい領域に分割し、例えば建物や物体などそれぞれの領域を識別する物について、その物について得られている観測情報の数に応じてカバレッジを算出してもよい。本報告におけるカバレッジの評価方法は 2.3 節で詳しく述べる。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、現在の観測状態のよさを示す評価値を算出し、メッセージを構成してブロードキャスト、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。

前の観測期間でアクティブ状態にあり観測を行っていたセンサ端末と、過去の情報収集タイミングで設定したスリープタイマが切れることにより情報収集タイミングにスリープ状態

から復帰した直後のセンサ端末は、基地局から広告されたアクティビティを受信する。これらのセンサ端末は、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観測期間の稼働状態を決定する。アトラクタ選択モデルにもとづく状態選択の手法は次節以降で詳しく述べる。アクティブ状態を選択したセンサ端末は、現在の観測期間において、観測エリアを観測し、センサデバイスから観測情報を取得する。取得する観測情報はアプリケーションに依存し、例えば観測期間の間、定期的に観測情報を収集して蓄積する方法や、最大値、平均値などの統計情報を算出する方法、あらかじめ定められた閾値を超えるなどある条件を満たす観測情報のみを保持する方法などがある。一方、スリープ状態を選択したセンサ端末は、スリープ状態の期間を定めるスリープタイマを設定し、直ちにスリープ状態に移行する。スリープタイマは情報収集周期を単位時間とし、1情報収集周期以上後の情報収集タイミングでスリープ状態から復帰する。

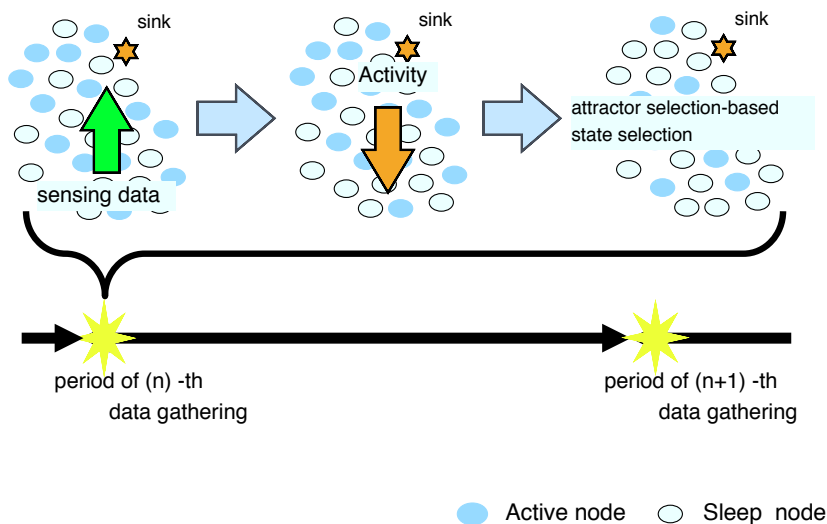


図 1: 提案手法の動作イメージ

2.2 カバレッジ制御へのアトラクタ選択モデルの適用

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。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、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

組みにもとづいて構築されている [10]. 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ている. それぞれの栄養の代謝は、異なる遺伝子の発現量によって制御されており、一方の栄養が生成されている間に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. しかしながら、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ることで、栄養不足によるバクテリアの死滅を防ぐ. 2種類の栄養を栄養1, 栄養2とし、栄養1に対応する遺伝子の発現量を m_1 , 栄養2に対応する遺伝子の発現量を m_2 とすると、遺伝子発現量の変化は、次式で表される.

$$\frac{dm_1}{dt} = \frac{S(A)}{1+m_2^2} - D(A)m_1 + \eta_1 \quad (1)$$

$$\frac{dm_2}{dt} = \frac{S(A)}{1+m_1^2} - D(A)m_2 + \eta_2 \quad (2)$$

A はアクティビティと呼ばれ、細胞の活性度や成長率を表す変数である. $S(A)$ と $D(A)$ はそれぞれ合成と分解を表す関数であり、例えば $S(A) = \frac{6A}{2+A}$, $D(A) = A$ が用いられる. η_1 , η_2 は内因および外因による遺伝子発現量の摂動を表すノイズ項であり、白色ガウス雑音を与える.

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る. 式(3), 式(4)からノイズ項を除くと、この非線形ダイナミクスは、アクティビティが高い時には $m_1 = m_2 = m^*$ というアトラクタを持ち、アクティビティが低い場合には $m_1 = m^*$, $m_2 = \frac{1}{m^*}$ および $m_1 = \frac{1}{m^*}$, $m_2 = m^*$ という二つのアトラクタを持つ. m^* はある定数である. したがって、式(1), 式(2)は、成長率が高い場合には、双方の遺伝子発現量が同程度であり、バクテリアはいずれかの栄養を生成することを表している. 環境の栄養状態が変化し、成長率が低下すると、右辺第1項, 第2項に対してノイズ項の影響が大きくなり、遺伝子発現量はノイズによって制御されるようになる. ノイズの影響により、遺伝子発現は、二つのアトラクタのうちいずれかに向かうが、そのアトラクタに対応した栄養の生成が環境に適切でない場合には、成長率が高くならないため、ノイズの影響を受け続けることになる. 一方、遺伝子発現が適切なアトラクタに向かった場合には、成長率が向上し、アトラクタによる引き込みが強くなり、安定的に適切な栄養を生成するようになる.

提案手法では、アトラクタ選択モデルを応用したアドホックネットワークのための適応的な経路制御手法で拡張された以下のモデルを用いる [12].

$$\frac{dm_1}{dt} = \frac{\text{syn}(\alpha)}{1+m_2^2} - \text{deg}(\alpha)m_1 + \eta_1 \quad (3)$$

$$\frac{dm_2}{dt} = \frac{\text{syn}(\alpha)}{1+m_1^2} - \text{deg}(\alpha)m_2 + \eta_2 \quad (4)$$

m_i ($i = 1, 2$) は文献 [10] における mRNA 濃度に相当し、評価値と呼ばれる。このアトラクタ選択モデルは、2つの評価値の一方が他方に比べて大きくなる2種類のアトラクタを持つ。提案手法では、 $m_1 > m_2$ のアトラクタをアクティブ状態、 $m_1 \leq m_2$ のアトラクタをスリープ状態に対応付けることにより、適応的な稼働状態の選択を実現する。関数 $\text{syn}(\alpha)$ 、 $\text{deg}(\alpha)$ としては、それぞれ次の式 (5)、式 (6) を用いる。

$$\text{syn}(\alpha) = \alpha \times (\beta \times \alpha^\gamma + \varphi^*) \quad (5)$$

$$\text{deg}(\alpha) = \alpha \quad (6)$$

係数 β ($0 < \beta$) はアトラクタの深さ、つまり安定性に影響を及ぼすパラメータである。係数 γ ($0 < \gamma$) はアトラクタの引き込みの強さ、つまり収束性に影響を及ぼすパラメータである。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係数であり $\frac{1}{\sqrt{2}}$ を用いる。提案手法ではアクティビティ α としてカバレッジの満足度を対応づけ、式 (7) で求める。

$$\frac{d\alpha}{dt} = \delta \times (\alpha^* - \alpha) \quad (7)$$

ここで、 α^* ($0 \leq \alpha^* \leq 1$) を瞬時アクティビティと呼び、制御タイミングにおけるカバレッジから算出する。係数 δ ($0 < \delta \leq 1$) はアクティビティの変化率を定めるパラメータである。 δ として 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り、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。

2.3 カバレッジの評価方法

本報告で用いるカバレッジの評価方法を述べる。まず、観測領域を P_{all} 個の同じ大きさの小領域に重複なく分割する。例えば、 $8\text{ m} \times 5\text{ m}$ の観測領域を $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ の40個の小領域に分割する例を図2-(a)に示す。小領域内の数字は、その小領域に便宜上割り当てられた座標を表す。それぞれの小領域について、その中心点を観測エリアに含むアクティブ状態にあるセンサ端末の数を、その小領域の観測数 $CoP(x, y)$ とする。例えば、図2-(a)の観測領域において、半径2mの正円の観測エリアを持つ2台のセンサ端末（黒丸）がアクティブ状態にある場合の、小領域ごとの観測数を図2-(b)に示す。

(0,4)	(1,4)	(2,4)	(3,4)	(4,4)	(5,4)	(6,4)	(7,4)
(0,3)	(1,3)	(2,3)	(3,3)	(4,3)	(5,3)	(6,3)	(7,3)
(0,2)	(1,2)	(2,2)	(3,2)	(4,2)	(5,2)	(6,2)	(7,2)
(0,1)	(1,1)	(2,1)	(3,1)	(4,1)	(5,1)	(6,1)	(7,1)
(0,0)	(1,0)	(2,0)	(3,0)	(4,0)	(5,0)	(6,0)	(7,0)

(a) 観測領域と小領域

0	0	0	0	1	1	0	0
0	1	1	2	1	1	1	0
1	1	1	2	1	1	1	0
1	1	1	1	1	1	1	0
0	1	1	0	0	0	0	0

(b) 2台のアクティブ状態のセンサ端末による観測と小領域ごとの観測数

図 2: 小領域ごとの観測数の例

観測領域に対して、アプリケーションの要求する数以上のアクティブ状態にあるセンサ端末によって観測されている小領域の割合を観測率 S ($0 \leq S \leq 1$) と呼び、式(8)で求める。例えば図2-(b)において $k = 1$ とすると観測率 S は $\frac{24}{40} = 0.6$ 、2-カバレッジの場合には観測

率 S は $\frac{2}{40} = 0.05$ となる。この観測率 S を観測領域全体のカバレッジと呼ぶ。

$$S = \frac{|\{(x, y) \mid CoP(x, y) > k\}|}{P_{all}} \quad (8)$$

2.4 瞬時アクティビティの計算方法

提案手法では、カバレッジ制御の安定性を高めるため、制御タイミングにおけるカバレッジから算出される瞬時アクティビティ α^* を式 (7) で平滑化してアクティビティ α を導出する。瞬時アクティビティ α^* をカバレッジにもとづいて定めることにより、カバレッジが高くなるようにそれぞれのセンサ端末が稼働状態を適切に選択する。しかしながら、式 (8) で定義される観測率 S では、アプリケーションの要求するカバレッジ k に対して小領域あたり k 台以上のアクティブ状態のセンサ端末が観測していれば観測率は変わらない。そのため、観測率 S をそのまま瞬時アクティビティ α^* とすると、冗長なセンサ端末がアクティブ状態になる、非効率的なカバレッジ制御となる。

そこで、提案手法では次式によって定義される冗長度 R を用いて観測状態の冗長性を考慮した瞬時アクティビティを定義する。

$$R = \frac{\sum_{i=x_{min}}^{x_{max}} \sum_{j=y_{min}}^{y_{max}} (CoP(i, j) - k + 1)}{|\{(x, y) \mid CoP(x, y) > k\}|} \quad (9)$$

ここで、 x_{min} , y_{min} はそれぞれ小領域の座標系における x 座標と y 座標の最小値、 x_{max} , y_{max} はそれぞれ最大値である。式 (9) より、 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小領域の k を超える平均観測数が得られ、これを冗長度 R とする。冗長度 R が 1 の時、観測領域は過不足のない数のアクティブ状態のセンサ端末によって必要十分に観測されている。

カバレッジ制御の冗長性を考慮した瞬時アクティビティ α^* を次式で与える。

$$\alpha^* = \left(\frac{S}{\max\{1, w \times R\}} \right)^p \quad (10)$$

ここで、 w ($0 \leq w \leq 1$) は冗長度 R に対する重みである。なお、演算 \max は重み w が小さい場合に、瞬時アクティビティ α^* が 1 を超えることを防ぐためのものである。係数 p (≥ 1)

は、観測率および冗長度に対する瞬時アクティビティの変化率を調整するためのものであり、 p が小さいと、瞬時アクティビティは観測率および冗長度の変動と同程度の大きさで変化する。

2.5 アトラクタ選択モデルにもとづく適応的な稼働状態の選択機構

センサ端末は、基地局から広告されるアクティビティ α を用いて、式(3)、式(4)により評価値 m_1 、 m_2 を更新する。センサ端末は、更新された評価値の大小関係にもとづいて図3に従い状態を遷移する。情報収集タイミングにおいて、前の観測期間でアクティブ状態にあったセンサ端末の動作を次に示す。

Step1 観測情報を基地局に送信する。

Step2 基地局からのアクティビティ α の広告を受信する。

Step3 アトラクタ選択モデル式(3)、式(4)を評価する。

Step4 $m_1 > m_2$ なら続く観測期間でもアクティブ状態を維持し、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、スリープ状態に移行する。 $n (\geq 1)$ は制御パラメータである。

一方、上記Step3におけるタイマ設定によって、情報収集タイミングにあわせてスリープ状態から復帰したセンサ端末の動作を次に示す。

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(3)、式(4)を評価する。

Step3 $m_1 > m_2$ なら続く観測期間でアクティブ状態になり観測エリアの観測を行う。 $m_1 \leq m_2$ ならスリープタイマを情報収集周期の n 倍に設定し、再度スリープ状態に戻る。

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 は一様乱数で与えるものとし、シミュレーション評価では平均を3とした。

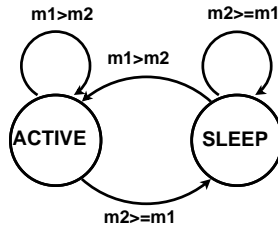


図 3: 評価値にもとづくセンサ端末の状態遷移

3 シミュレーション評価

本章では，シミュレーションにより他手法と性能を比較し，提案手法の有効性を示す．

3.1 比較対象

本節では，2種類の比較対象について説明する．

3.1.1 ランダム手法

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．

3.1.2 CCP (Coverage Configuration Protocol)

CCP [6][13] は，隣接センサ端末と位置，観測エリアおよび稼働状態に関する情報をやりとりすることで，アプリケーションの要求するカバレッジを達成できるよう，それぞれのセンサ端末が自律的に稼働状態を決定するカバレッジ制御機構である．アクティブ状態にあるセンサ端末は定期的に HELLO メッセージをブロードキャスト送信し，位置情報などを近隣のセンサ端末に通知する．それぞれのセンサ端末は，隣接センサ端末の情報にもとづき， K_s -Eligibility と呼ばれるアルゴリズムを用いて稼働状態を決定する．

K_s -Eligibility アルゴリズムでは，まず，アクティブ状態にある隣接センサ端末の観測エリア同士，および観測領域との交点を求める．それぞれのセンサ端末の観測エリアはセンサ端末を中心とする半径 R_s の正円であり，センサ端末間で共通とする．これらの交点のうち，自身の観測エリア内に存在するものについて，自身を除くアクティブ状態にあるセンサ端末の観測エリアに含まれているかどうかを調べる．なお，観測エリアの境界は観測されていないものとする．自身の観測エリア内に存在する全ての交点について，その交点を観測エリアに含むアクティブ状態のセンサ端末数が，アプリケーションの要求するカバレッジであ

る K_s 以上であれば, K_s -Eligibility アルゴリズムは *false* を出力する. 一方, K_s 台より少ないアクティブ状態のセンサ端末に観測されている交点の一つでも存在するか, 観測エリア内に交点がない場合には, K_s -Eligibility アルゴリズムは *true* を出力する.

例えば図 4(a) において, センサ端末 D において K_s -Eligibility アルゴリズムを用いることを考える. 図中, 黒丸はセンサ端末, 実線の円はセンサ端末 D の観測エリア, 点線の円はアクティブ状態にある隣接センサ端末 A, B, C の観測エリアをそれぞれ表す. なお, アプリケーションが要求するカバレッジは 1 とする. センサ端末 D の隣接センサ端末の観測エリアの交点は, 三角で表される 1, 2, 3, 4, 5 である. 交点 1, 3 はセンサ端末 A, 交点 2, 4 はセンサ端末 B, 交点 5 はセンサ端末 C の観測エリアにそれぞれ含まれているため, センサ端末 D では K_s -Eligibility アルゴリズムは *false* と判定され, センサ端末 D はスリープ状態に移行することができる. 一方, 図 4(b) では, センサ端末 G の観測エリアに含まれている交点 6, 7, 8 のうち, 交点 8 を観測エリアに含むアクティブ状態のセンサ端末は存在しないため, センサ端末 G における K_s -Eligibility アルゴリズムは *true* と判定し, センサ端末 G はアクティブ状態にならなければならない.

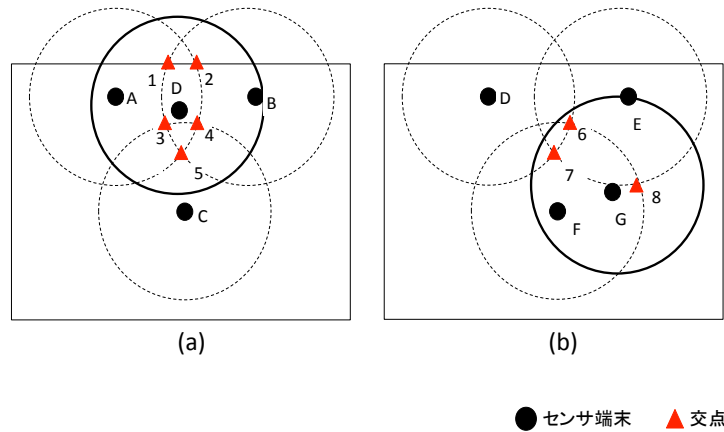


図 4: K_s -Eligibility の適用例 ($K_s = 1$)

このように, K_s -Eligibility アルゴリズムにより, センサ端末は自律的に自身の稼働状態を決定することができるが, 同時に複数のセンサ端末が稼働状態を変化させると, 冗長な観測が行われたり, カバレッジが不足するといった問題が発生する. 状態遷移の競合を回避するため, CCP では, 図 5 に示すように, アクティブ状態とスリープ状態の間の中間状態として WITHDRAW 状態, JOIN 状態をもうけている. CCP における各状態と, 状態遷移について以下に説明する.

- ACTIVE 状態

- センサ端末は観測エリアの観測を行い、定期的に HELLO メッセージをブロードキャストする。また、隣接センサ端末から HELLO メッセージ、WITHDRAW メッセージ、JOIN メッセージを受信すると、 K_s -Eligibility を評価する。 *false* なら WITHDRAW タイマ T_w を設定し、WITHDRAW 状態へ遷移する。

- WITHDRAW 状態

- センサ端末は観測エリアの観測を行う。WITHDRAW タイマが切れるまでに隣接センサ端末から WITHDRAW メッセージまたは HELLO メッセージを受信すると、 K_s -Eligibility を評価する。 *false* なら WITHDRAW 状態に留まる。 *true* なら WITHDRAW タイマをリセットし、ACTIVE 状態へ戻る。WITHDRAW タイマが切れると、SLEEP タイマ T_s を設定し、WITHDRAW メッセージをブロードキャストした後、SLEEP 状態へ遷移する。

- SLEEP 状態

- センサ端末は観測エリアの観測を行わない。SLEEP タイマが切れると、LISTEN タイマ T_l を設定し、LISTEN 状態へ遷移する。

- LISTEN 状態

- センサ端末は観測エリアの観測を行わない。LISTEN タイマが切れるまでに WITHDRAW メッセージ、HELLO メッセージ、JOIN メッセージのいずれかを受信すると、 K_s -Eligibility を評価する。 *false* ならスリープタイマ T_s を設定し、SLEEP 状態へ戻る。 *true* なら JOIN タイマ T_j を設定し、JOIN 状態へ遷移する。

- JOIN 状態

- センサ端末は観測エリアの観測を行わない。JOIN タイマが切れるまでに WITHDRAW メッセージ、HELLO メッセージ、JOIN メッセージのいずれかを受信すると、 K_s -Eligibility を評価する。 *false* なら JOIN タイマをリセットし、SLEEP タイマ T_s を設定して SLEEP 状態へ遷移する。 *true* なら JOIN メッセージをブロードキャストし、ACTIVE 状態へ遷移する。

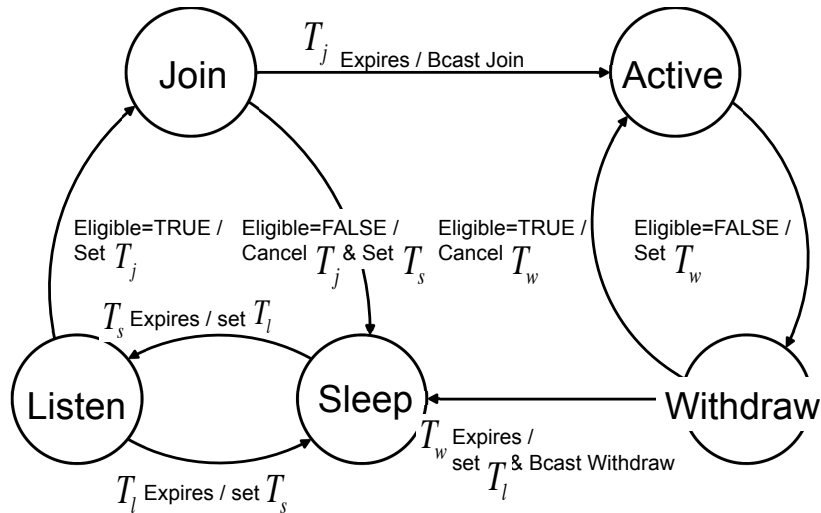


図 5: CCP におけるセンサ端末の状態遷移

3.2 誤差モデル

センサ端末が、 K_s -Eligibility のような幾何学的アルゴリズムを用いて自身の観測エリア内のカバレッジを推定し、適切に稼働状態を決定するためには、センサ端末の正確な位置が把握できること、および観測エリアが半径既知の正円であることが前提とされている。実環境においては、センサ端末は何らかの位置検出技術を用いて自身の位置を推定するが、実際の位置との間には、通常、数%以上の誤差が生じる [14]。例えば、センサ端末自身、あるいは位置推定の基準となるアンカーの位置検出に GPS (Global Positioning System) を用いた場合には、誤差は数 m になる。また、障害物などの設置環境やセンサデバイスの特性の影響を受けるため、観測エリアが正円であるとは考えづらい。このように、位置や観測エリアに誤差がある場合には、カバレッジ制御の性能が低下することが指摘されている [7]。観測エリアの誤差を考慮したカバレッジ制御手法に関する研究も存在するが、距離に応じた検出率などのモデルを与える必要があり、運用環境に関する事前の知識が必要である [15]。

一方、提案手法では、基地局はセンサ端末から収集される観測情報をもとにカバレッジを評価し、これにもとづいてセンサ端末が稼働状態を選択するが、カバレッジの算出に高い正確性を必要とせず、また、センサ端末も領域全体に関する情報を用いているだけであるため、誤差によるカバレッジ制御への影響は小さくなると考える。このことを確認するため、センサ端末の位置と観測エリアの形について以下の 2 つの誤差モデルをシミュレーション評価に導入する。

3.2.1 センサ端末の位置推定誤差

文献 [16] を参考に、シミュレーションでは、実際のセンサ端末の座標に対して、 $-u \sim +u$ の範囲の一様分布にしたがう誤差を与える。なお、 u は誤差の最大値である。例えば、 $u = 5$ の場合、座標 (x, y) にあるセンサ端末が自身で保持する位置情報は $(x-5, y-5) \sim (x+5, y+5)$ の範囲でランダムに与えられる。提案手法では、基地局は、センサ端末から収集したメッセージに含まれる位置情報にもとづいてカバレッジを計算するため、位置推定誤差がある場合には、実際のカバレッジと基地局で計算するカバレッジが異なる。一方、CCP では、隣接センサ端末から受け取ったメッセージに含まれる位置情報にもとづいて K_s -Eligibility アルゴリズムを適用する。そのため、位置推定誤差がある場合には、自身の位置や、交点の位置が実際のものとは異なることになる。なお、CCP では、観測領域外に位置する交点は、無条件に、 k 台以上のアクティブ状態にあるセンサ端末の観測エリアに含まれているものとして扱う。

3.2.2 観測エリアの形状誤差

観測エリアの形状誤差を与えるため、本報告では、パスロスによる無線伝播距離の変動モデルである RIM (Radio Irregularity Model) [17] を用いる。

無線通信では、ある電力で送信された電波は、発信源からの距離によって減衰し、ある地点における受信電力と送信電力の間には差が生じる。この差をパスロスと呼ぶ。パスロスを推定するための様々なモデルが提案されており、例えば次式がよく用いられる。

$$L \text{ [dBm]} = C + 10n \log_{10} d \quad (11)$$

ここで、 C は定数、 n は伝送経路の品質を表す指数、 d は伝送距離 [m] である。したがって、このモデルでは電波の発信源から等距離にある地点における受信電力は等しくなる。しかしながら、実環境においては、送信機と受信機の位置関係などによって、等距離であっても受信電力は異なる。そこで、RIM では、ある距離における受信地点での受信電力を次式で与える。

$$\text{ReceivedSignalStrength} = \text{SendingPower} - \text{DOIAdjustedPathLoss} + \text{Fading} \quad (12)$$

$$\text{DOIAdjustedPathLoss} = \text{PathLoss} \times K_i \quad (13)$$

ここで、 K_i は送信機から i 度の角度におけるパスロスの変動を表す係数であり、次式で求

まる.

$$K_i = \begin{cases} 1, & i = 0 \\ K_{i-1} \pm Rand \times DOI, & 0 < i < 360 \wedge i \in N \end{cases} \quad (14)$$

where $|K_0 - K_{359}| \leq DOI$

RIMでは、係数 DOI (Degree Of Irregularity) を用いて送信機からの角度によってパスロスの大きさを変化させる。なお、 $ReceivedSignalStrength$ は受信電力、 $SendingPower$ は送信電力、 $Fading$ はフェージングによる減衰量、 $PathLoss$ はパスロスモデルにもとづく伝送距離に応じた減衰量、 $Rand$ はワイブル分布に従う乱数とする。 $DOI = 0$ のとき、常に $K_i = 1$ となり、パスロスは $PathLoss$ のみにもとづくため、等距離における受信電力は等しくなる。一方、 DOI を大きくするほど乱数 $Rand$ の影響が大きくなり、等距離における受信電力の差が大きくなる。 DOI を変化させ、ある送信電力で送信された電波を一定の受信電力以上で受信可能な領域の境界を描くと、図6のように歪んだ円が現れる。本報告では、これを誤差のある観測エリアとして用いる。

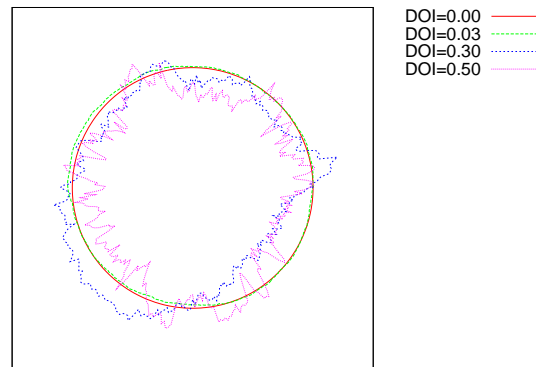


図 6: RIM による形状誤差

3.3 オーバヘッドの算出

本節では、カバレッジ制御に必要となるオーバヘッドを評価するため、提案手法、CCP それぞれで発生するメッセージ数を用いる。なお、観測情報の収集に使用されるメッセージは厳密にはオーバヘッドではないが、冗長なセンサ端末からも観測情報が送信されることから、全てのメッセージをオーバヘッドとして計算対象とする。

3.3.1 提案手法のオーバーヘッド

提案手法においては、観測期間あたりに、制御タイミングにおいてアクティブ状態にあるセンサ端末から基地局へ送信されるメッセージと、アクティブ状態のセンサ端末とスリープ状態から復帰したセンサ端末に基地局からアクティビティを通知するためのフィードバックメッセージが発生する。提案手法におけるオーバーヘッド O_{AS} を次式で求める。

$$O_{AS} = Data + Activity \quad (15)$$

ここで、 $Data$ は制御タイミングにおいて観測情報を収集する際に発生するメッセージ数、 $Activity$ は基地局からアクティビティを通知する際に発生するメッセージ数である。適切な情報収集、拡散機構が用いられたとすると、 $Data$ はアクティブ状態のセンサ端末数、 $Activity$ はアクティブ状態のセンサ端末数とスリープ状態から復帰したセンサ端末数の和でそれぞれ近似できる。なお、本報告では、いずれの制御タイミングにおいても、カバレッジ制御においてアクティブ状態となった任意のセンサ端末から基地局への情報転送が可能であるものとする。したがって、式 (15) は式 (16) で近似できる。

$$O_{AS} \simeq 2N_{AS} + N'_{AS} \quad (16)$$

ここで、 N_{AS} は制御タイミングにおいてアクティブ状態のセンサ端末数、 N'_{AS} は制御タイミングにおいてスリープ状態から復帰したセンサ端末数である。

3.3.2 CCP のオーバーヘッド

CCP においては、情報収集タイミングごとの観測情報の収集のためのメッセージと、カバレッジ制御のために隣接センサ端末間で交換されるメッセージの 2 種類が発生する。CCP におけるオーバーヘッド O_{CCP} を次式で求める。

$$O_{CCP} = Hello + Withdraw + Join + Data \quad (17)$$

ここで、 $Hello$, $Withdraw$, $Join$ はそれぞれ 1 観測期間における HELLO メッセージ、WITHDRAW メッセージ、JOIN メッセージの数であり、 $Data$ は観測情報の収集のためのメッセージ数である。

ここで、所望のカバレッジが得られた後の状態について考える。なお、電力枯渇によるカバレッジの低下は考えない。このとき、センサ端末は ACTIVE 状態または SLEEP 状態のいずれかにある。SLEEP 状態にあるセンサ端末のうち、スリープタイマが切れたものは、LISTEN 状態に移行する。LISTEN 状態が HELLO メッセージの送信間隔より十分長く、隣接する全ての ACTIVE 状態のセンサ端末からの HELLO メッセージを受信することができ

たなら、このセンサ端末における K_s -Eligibility アルゴリズムは *false* と判定し、このセンサ端末はメッセージを送信することなく再度 SLEEP 状態に戻ることになる。また、新たに ACTIVE 状態になるセンサ端末がないため、すでに ACTIVE 状態にあるセンサ端末が SLEEP 状態に移行するために WITHDRAW メッセージを送信することもない。したがって、式 (17) は式 (18) で近似できる。

$$O_{CCP} \simeq (I_{gathering}/I_{hello} + 1)N_{CCP} \quad (18)$$

ここで、 $I_{gathering}$ は情報収集周期、 I_{hello} は HELLO メッセージの送信間隔である。 N_{CCP} は情報収集タイミングにおけるアクティブ状態にあるセンサ端末数である。

3.4 シミュレーション結果と考察

大きさ $50 \text{ m} \times 50 \text{ m}$ の観測領域に 100 台のセンサ端末をランダムに配置し、10 秒おきに観測情報を収集する ($I_{gathering} = 10$ 秒)、定時観測アプリケーションを対象とする。なお、要求カバレッジ k を 1 とする。本報告では適切な情報収集・配信機構によってメッセージ配信が行われているものとし、基地局の位置は特に定めない。それぞれのセンサ端末はなんらかの位置検出手法により自身の位置を検出し、メッセージに含めて送信する。なお、誤差モデルを導入した評価では、この位置情報には誤差が含まれる。また、理想環境における観測エリアはセンサ端末を中心とした半径 10 m の正円とする。したがって、提案手法における基地局は、位置推定誤差や観測エリアの形状誤差の有無によらず、それぞれのセンサ端末の観測エリアをセンサ端末から通知される位置を中心とした半径 10 m の正円としてアクティビティを計算する。一方、CCP では、位置推定誤差や観測エリアの形状誤差の有無によらず、隣接センサ端末から受信したメッセージに含まれる位置を中心とした半径 10 m の正円を、その隣接センサ端末の観測エリアとして、 K_s -Eligibility アルゴリズムを適用する。なお、CCP におけるセンサ端末の通信エリアは半径 20 m の正円とし、誤差はないものとする。

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るものとする。提案手法において、センサ端末で保持する評価値 m_i ($i = 1, 2$) の初期値はいずれも 1、センサ端末および基地局におけるアクティビティの初期値は 0 とする。それぞれのセンサ端末におけるスリープ期間を定めるパラメータ n は平均 3 の一様乱数で与え、シミュレーションを通して変化しないものとする。また、CCP における HELLO メッセージの送信間隔 I_{hello} を 2 秒とし、SLEEP タイマ、WITHDRAW タイマ、JOIN タイマ、LISTEN タイマをそれぞれ 10 秒、5 秒、5 秒、2 秒とする。以降では特に断らない限り、100 通りのセンサ配置についてそれぞれ 1 回のシミュレーションを行った、100 回のシミュレーション結果の平均値を示す。

3.4.1 基本評価

まず、提案手法により、冗長性を押さえつつ、高い観測率が達成できることを示す。なお、本節の評価では、式(5)のパラメータ β には2.5を、パラメータ γ には1.2を用いる。また、式(7)のパラメータ δ には0.01を、式(10)のパラメータ p には1をそれぞれ用いる。式(10)の冗長性の重み w を0として冗長性を考慮しないものを non-weight、重み w を0.4として冗長性を考慮したものを weighted と表記し、シミュレーション結果を図7に示す。図の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7-(a)は100回のシミュレーションにおける各サイクルにおける平均観測率、図7-(b)は平均冗長度、図7-(c)はアクティブ状態のセンサ端末の平均数、図7-(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7-(a)より、冗長度を考慮するかどうかによらず、いったん観測率が低下した後、non-weight ではおよそ300サイクルで、weighted ではおよそ1000サイクルでそれぞれ観測率0.967, 0.974を達成することが分かる。また、図7-(b)より、収束時における冗長度は non-weight および weighted でそれぞれ3.53, 3.49、図7-(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33, 33.3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が下がっているが、その効果は大きくない。しかしながら、図7-(a)、図8-(b)より、冗長度を下げつつ、観測率が向上できているといえる。なお全センサ端末がアクティブ状態の時、平均冗長度は10.3であった。

図7-(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7-(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(3)および式(4)でノイズが加わることにより、約50%のセンサ端末で $m_1 > m_2$ 、残り約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(3)、式(4)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稼働状態を選択する。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(3)、式(4)を評価しないため、稼働状態が変化しない。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にある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、アクティブ状態にあるセンサ端末数が減少し、観測率が低下する。

また, weighted 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した後, 減少, 収束している. これは図 7-(b) に示されるように, この期間の冗長度が高いことにより, アクティビティが小さくなったためである. 前述の通り, アクティビティが小さくなると, アクティブ状態にあるセンサ端末数が減少する. その後, 冗長度が低下し, アクティビティが向上することで, センサ端末の状態が収束する. なお, 図 7-(d) に示されるとおり, 冗長度を考慮しない non-weight では 0.97, 冗長度を考慮する weight では 0.70 に, それぞれアクティビティが収束しているが, このシミュレーションのパラメータ設定では, アクティビティがおおよそ 0.6 を超えると式 (3) および式 (4) 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っている.

次に, 図 8-(a) に, 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, アクティブ状態にあるセンサ端末数と得られる観測率, およびそれらの平均の, ランダム手法, CCP との比較結果を示す. なお, 提案手法では, 4000 サイクルにおいて状態選択が収束したと見なし, また, CCP ではシミュレーション開始より 50 秒経過後において状態選択が収束したと見なす. ランダム手法では, 横軸に応じた 10~50 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, それぞれ 100 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. 図 8-(a) 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いることが分かる. さらに, 同等の観測率を達成するために必要なセンサ端末は, 平均観測率である 0.974 に対して, ランダム手法と比べて, 36 台から 33 台へとおよそ 3 台少なく 9%の削減ができています. しかしながら, CCP では平均 21.46 台のアクティブ状態のセンサ端末で観測率 1 を達成しており, 提案手法とくらべてより少ないセンサ端末でより高い観測率を達成できることが分かる. これは, 提案手法ではセンサ端末が領域全体のカバレッジにもとづいて稼働状態を選択しているため準最適となっているのに対し, CCP では隣接センサ端末間の情報交換にもとづく幾何学的アルゴリズムにより最適な稼働状態を選択できるためである.

最後に, 提案手法および CCP におけるオーバヘッドを比較評価する. 図 8-(b) に, 稼働状態選択が収束したのちのある情報収集タイミングから 40 秒間 (4 サイクル) に発生するオーバヘッドの平均を示す. 提案手法では 10 秒おきにおよそ 80~100 回のメッセージ送信が行われている. これは, およそ 33 台のアクティブ状態にあるセンサ端末による, 観測情報の送信とアクティビティの受信にともなうメッセージ送信数 $33 \times 2 = 66$ と, スリープ期間のパラメータ n が平均 3 の一様乱数であることにより, およそ $(100 - 33)/3 \simeq 22$ 台のセンサ端末がスリープ状態から復帰し, フィードバックメッセージを受信することによる. 一方で, CCP では, アクティブ状態にあるセンサ端末が定期的に HELLO メッセージをブロードキャスト送信するため, オーバヘッドは連続的に増加しており, 提案手法と比較してオーバヘッドが大きくなっている. なお, CCP において HELLO メッセージの送信間隔を

2秒から4秒にすると、単位時間あたりの平均オーバーヘッドが提案手法とおおよそ等しくなる。しかしながら、HELLOメッセージの送信間隔を大きくすると、LISTEN状態、JOIN状態、WITHDRAW状態において状態遷移を決定するのに十分なHELLOメッセージを受信するまでの時間が長くなり、その間、センサ端末の受信機電源が入ったままになるため、待機による電力消費が問題となることが考えられる。

以上の結果より、提案手法は、同数のアクティブ状態にあるセンサ端末で、ランダム手法に比べてより高い観測率をえることができ、また、センサ端末の状態状態変化が収束した後のオーバーヘッドがCCPと比べて大幅に削減できることが示された。

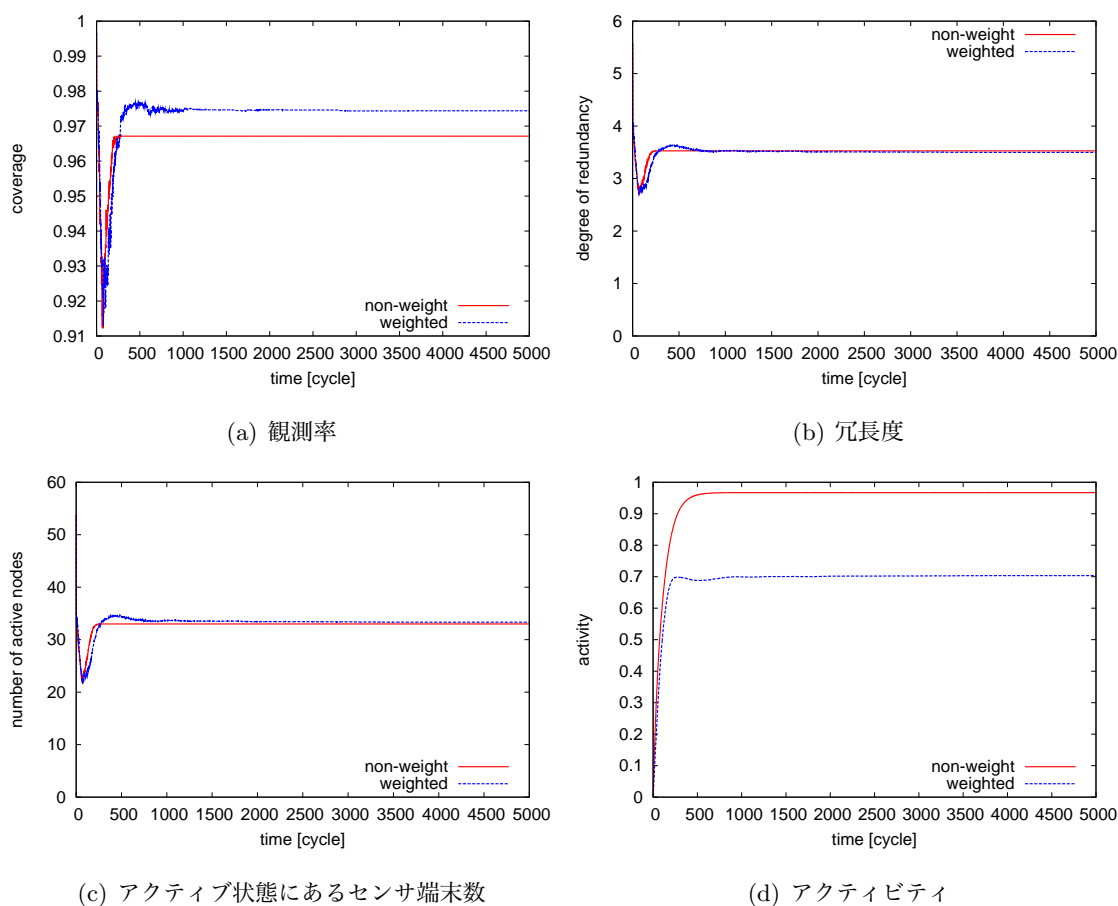


図 7: 基本性能の評価

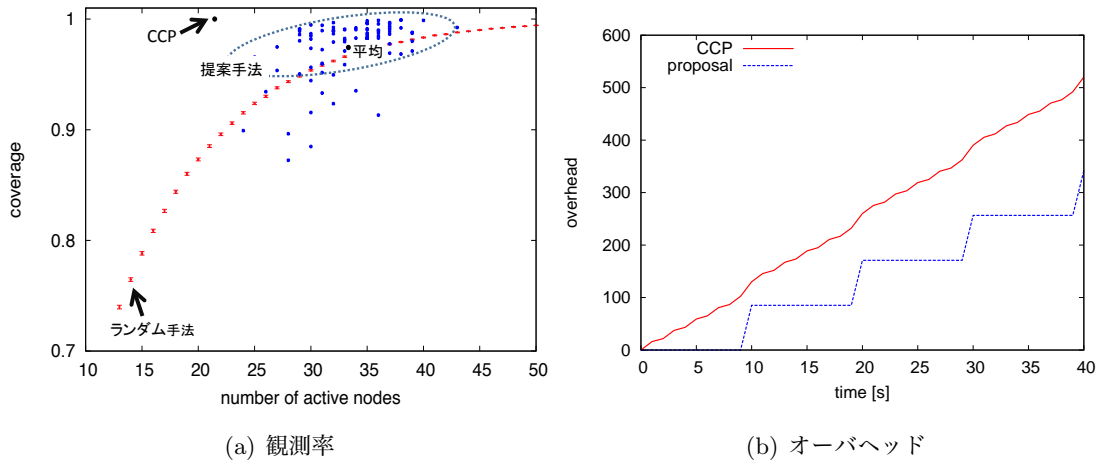


図 8: 他手法との比較

3.4.2 パラメータ設定による影響

本節では、提案手法においてパラメータの組み合わせが性能に与える影響を評価する。本節で用いるパラメータの組み合わせを表 1 にまとめる。

まず、parameter1~parameter4 を用いて、冗長さの重み w による影響を評価する。図 9-(a) より、収束後の観測率は、重み w が 0.4 の場合 (parameter2) が 0.968 と一番高いことが分かる。また、重み w が大きくなるにしたがって、状態収束までの時間や観測率の変動が大きくなることが分かる。一方、図 9-(b) より 5000 サイクルにおける冗長性は、重み w が 0.3, 0.4, 0.5 の時に、それぞれおよそ 3.56, 3.49, 2.90 となり、重み w を大きくするほど冗長性が低下することがわかる。特に、図 9-(c) に示されるように、重み w が 0.3 の時 (parameter1) のアクティブ状態にあるセンサ端末数が 33.82 であるのに対して、重み w が 0.5 の時 (parameter3) のセンサ端末数は 27.4 とおよそ 6 台減少している。このことは、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。なお、重み w が 0.6 の時には、図 9-(d) に示されるようにアクティビティが 0.6 を超えることがないため、ノイズの影響を受け続け、稼働状態が収束しない。3.4.1 と同様のオーバーヘッドの評価結果を図 9-(e) に示す。図 9-(e) より、アクティブ状態のセンサ端末数が減少することにより、重み w が 0.5 (parameter3) のオーバーヘッドが最も小さいことが分かる。したがって、観測率は若干低下するが、センサネットワークの長寿命化の観点からは、重み w として 0.5 を用いるのがよいと考えられる。また、アクティブ状態のセンサ端末あたりの観測率、すなわち、センサ端末の寄与率を考えると、重み w が 0.4 の場合には 0.029、重み w が 0.5 の場合には 0.035 となり、効率のよい観測が行えているといえる。

表 1: パラメータの組み合わせ

組み合わせ名	δ	β	γ	w	p
pameter1	0.01	2.5	1.2	0.3	1.0
pameter2	0.01	2.5	1.2	0.4	1.0
pameter3	0.01	2.5	1.2	0.5	1.0
pameter4	0.01	2.5	1.2	0.7	1.0
pameter5	0.1	2.5	1.2	0.5	1.0
pameter6	0.001	2.5	1.2	0.5	1.0
pameter7	0.001	2.5	0.8	0.5	1.0
pameter8	0.001	2.5	1.0	0.5	1.0
pameter9	0.001	2.5	1.4	0.5	1.0
pameter10	0.01	2.5	0.8	0.5	1.0
pameter11	0.01	2.5	1.0	0.5	1.0
pameter12	0.01	2.5	1.4	0.5	1.0
pameter13	0.01	2.5	1.2	0.5	1.1
pameter14	0.01	2.5	1.2	0.5	1.2
pameter15	0.01	2.5	1.2	0.5	2.0

parameter1~parameter4 の評価において、重み w が大きいほど、観測率の振動が大きくなり、収束までの時間がかかったのは、冗長性が下がるような稼働状態の組み合わせがうまく見つけられず、アクティビティが上昇しないこと、また、その結果、センサ端末が稼働状態を頻繁に変更していることによるものと考えられる。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、よい解に近づくと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、局所最適解からの脱出を容易にし、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。一方、アクティビティの増加を促進すると、よりよい組み合わせとなった時に、その状態により早く収束、安定するようになり、収束速度が速くなることが期待できる。

そこで、重み w を 0.5 に固定し、アクティビティの変化率 δ の違う parameter3 ($\delta = 0.01$)、parameter5 ($\delta = 0.1$)、および parameter6 ($\delta = 0.001$) についてシミュレーションを行った結果を図 10 に示す。図 10-(a) より、アクティビティの変化率 δ が大きいものほど収束までの時間が短いことが分かる。一方、変化率 δ が最も小さい 0.001 の場合が最も観測率が高い。なお、収束時の冗長度 (図 10-(b))、アクティブ状態のセンサ端末数 (図 10-(c)) は、変化率 δ によらずほとんど変わらない。先に述べたとおり、本評価でのパラメータ設定では、アクティビティが 0.6 を超える頃からノイズ項の影響を受けにくくなり、状態選択は収束に向かう。図 10-(d) に示す通り、アクティビティの上昇速度は変化率 δ が大きいものほど早く、これによって図 10-(a) における振動の継続時間の差が現れる。例えば、変化率 δ が 0.001 の場合 (parameter6) には、約 4500 サイクルあたりで一時的に観測率が高くなっているにもかかわらず、約 8500 サイクルまで観測率が変化し続けるが、これは、変化率 δ が小さいため、たまたまよいアトラクタ (稼働状態の組み合わせ) に到達してもアクティビティが即座に大きくならず、そのアトラクタに十分引き込まれないことによる。一方、変化率 δ が 0.1 と大きい場合 (parameter5) には、最適解でなくともたまたま到達したよいアトラクタにすぐに引き込まれ、安定するため、収束までの時間は早いですが、得られる観測率はそれほど高くない。

アトラクタ選択モデルでは、アクティビティによって決定論的制御とランダム探索を組み合わせている。そのため、これらの結果から分かるように、変化率 δ を小さくしてノイズの影響を大きくすることにより、解の探索がより長く継続し、よりよい解を発見することが期待できる (図 10-(a))。さらに、アトラクタの引き込みの強さを弱めることで、さらに高い観測率が得られるものと考えられるため、次に、式 (5) においてアトラクタの引き込みの強さに影響を与えるパラメータ γ を変化させ、その影響を評価する。

アクティビティの変化率 δ を 0.001 に固定し、係数 γ の違う parameter6 ($\gamma = 1.2$)、

parameter7 ($\gamma = 0.8$), parameter8 ($\gamma = 1.0$), parameter9 ($\gamma = 1.4$) についてのシミュレーションを行った結果を図 11 に示す。図 11-(a) より、係数 γ が大きいほどアトラクタの引き込みが弱くなるため、より長く解の探索を行い、稼働状態の収束までの時間が長くなる。また、得られる観測率は係数 γ が大きいほど小さくなるが、これは重み w が 0.5 と比較的大きく、観測率の向上よりも冗長性の抑制を重視した制御になっており、冗長性が下がる稼働状態の組み合わせに収束するためである (図 9)。その結果、図 11-(b) に示されるように、係数 γ が大きくなるほど冗長性は低下するが、図 11-(a) と図 11-(c) から、10000 サイクル時点での寄与率は、係数 γ が 0.8 の場合には 0.030、1.4 の場合には 0.0374 と若干向上している。なお、図 11-(d) に示されるように、係数 γ が大きくなるにしたがい、アクティビティの増加率が下がっていく。

上の評価において、変化率 δ を 0.001 としてアクティビティの変化を抑えつつ、係数 γ を大きくすることによりアトラクタの引き込みの強さを小さくすれば、寄与率が向上することが示されたが、稼働状態の収束に時間がかかるという問題がある。そこで、次に、変化率 δ を 0.01 として、稼働状態の良い組み合わせになったときのアクティビティの増加速度を上げつつ、係数 γ を大きくすることにより引き込みの強さを押さえた場合について、評価する。

アクティビティの変化率 δ を 0.01 に固定し、係数 γ を大きくすることによりアトラクタへの引き込みの強さに影響する係数 γ の違う parameter3 ($\gamma = 1.2$), parameter10 ($\gamma = 0.8$), parameter11 ($\gamma = 1.0$), parameter12 ($\gamma = 1.4$) についてのシミュレーションを再び行った結果を図 12 に示す。図 12-(a) より、係数 γ が大きいほど稼働状態の安定までに時間がかかっているが、変化率 δ が 0.001 の場合 (図 11-(a)) と比較して、大幅に短くなっている。また、係数 γ が 1.2 の場合を除き、変化率 δ が 0.001 の場合と比較して観測率が向上している。ただし、図 12-(b) に示される冗長度、図 12-(c) に示されるアクティブ状態のセンサ端末数は増加しており、変化率 δ が 0.001 よりも冗長度の高い解に収束していることが分かる。これは、図 12-(d) に示されるようにアクティビティの増加速度が速いため、十分な解の探索が行われないことによる。なお、係数 γ が 1.2 と 1.4 では、得られる観測率に差がほとんどないが、アクティブ状態のセンサ端末数はそれぞれ 27.4 と 24.82 であり、係数 γ が大きい方が効率的な観測となっている。

さらに、収束時に得られる観測率に影響を与えるパラメータとして、式 (10) の係数 p を考える。観測率 S が 0.95 以上の値を推移しており、冗長度 R は 2~3 程度であるので、重み w が 0.5 の場合には、 $S/\max\{1, w \times R\} < 1$ と考えることができる。したがって、係数 p を大きくすると、観測率が十分高く、または冗長度が十分低くならないと瞬時アクティビティが大きくなるため、よりよい解を得られるものと考えられる。

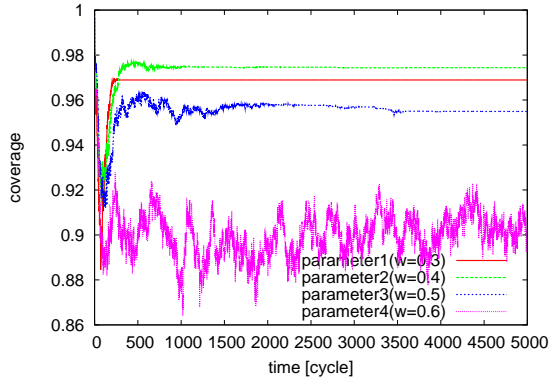
瞬時アクティビティに関する係数 p の違う parameter3 ($p = 1$), parameter13 ($p = 1.1$), parameter14 ($p = 1.2$), parameter15 ($p = 2$) についてのシミュレーション結果を図 13

に示す。図 13-(a) より係数 p が 1, 1.1, 1.2 の場合, 10000 サイクル時点での観測率はそれぞれおよそ 0.96, 0.95, 0.94 となり, 係数 p を大きくするほど観測率が低下することが分かる。これは, 図 13-(b), 図 13-(c) より, 冗長度が小さくなる稼働状態を選択することで, アクティブ状態にあるセンサ端末数が減少するためである。図 13-(b) より, いずれのシミュレーションにおいても冗長度が高いため, 式 (10) の瞬時アクティビティは小さくなる。センサ端末の稼働状態の変更が収束するためには, 冗長度を小さくし, 瞬時アクティビティを増加させる必要がある。同じ冗長度に対して係数 p が大きいほど瞬時アクティビティは小さくなるため, 係数 p が大きいほど冗長度を小さくしないと瞬時アクティビティは増加しにくい。係数 p が 1, 1.1, 1.2 の場合, 10000 サイクル時点でのアクティブ状態にあるセンサ端末数はそれぞれおよそ 27.4, 25.36, 24.05 であり, 寄与率はそれぞれおよそ 0.0350, 0.0374, 0.0390 となる。

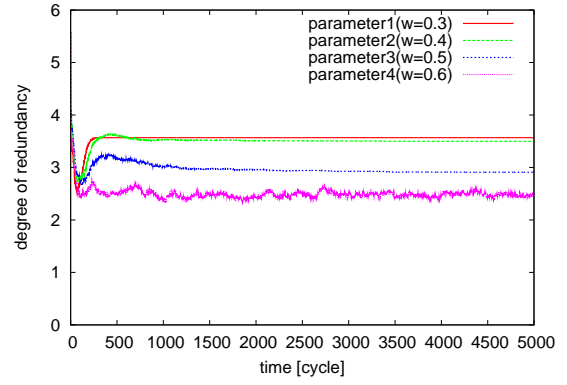
以上の結果をまとめたものが表 2 である。冗長度の重み w を大きくすると, 低い冗長度を達成することができるが, 収束時間が長くなり, また, 得られる観測率も低い。アクティビティの変化率 δ を大きくすると, たまたまよい稼働状態の組み合わせとなったときにアクティビティがすばやく上昇するため, 収束時間は短くなるが, 得られる観測率は低くなる。また, アトラクタの引き込みの強さを定める係数 γ を大きくすると, 引き込みの強さが弱くなるため, 長期間解を探索するようになり, 収束時間が長くなるが, 冗長度が低くなる。ただし, アクティブ状態にあるセンサ端末の数も少なくなるため, 観測率も低い。最後に, 観測率, 冗長度に対する瞬時アクティビティの大きさを調整する係数 p を大きくすると, 観測率や冗長度が改善されてもアクティビティがあまり高くないため, 収束までに時間がかかるようになり, 冗長度, 観測率ともに低い状態に安定する。なお, 重み w が大きすぎる場合 ($w = 0.6$), および係数 p が大きすぎる場合 ($p = 2.0$) には, 10000 サイクルでは収束しなかった。また, 変化率 δ が小さい場合 ($\delta = 0.001$) には, 最初の 2000~3000 サイクルで観測率が激しく変動する現象が見られた。一方, 引き込みの強さの係数 γ の収束性や振動に対する影響はそれほど小さくなく, 値によらず安定したカバレッジ制御が可能である。

表 2: パラメータによる影響

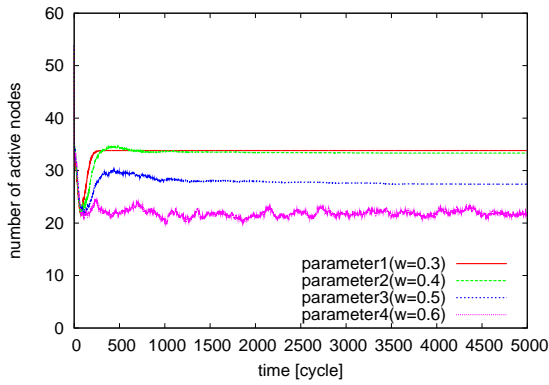
		収束時間	冗長度	観測率	寄与率	
重み w	小	短 ↔ 長	高 ↔ 低	高 ↔ 低	低 ↔ 高	大
変化率 δ		長 ↔ 短	-	高 ↔ 低	高 ↔ 低	
引き込み γ		短 ↔ 長	高 ↔ 低	高 ↔ 低	低 ↔ 高	
べき数 p		短 ↔ 長	高 ↔ 長	高 ↔ 低	低 ↔ 高	



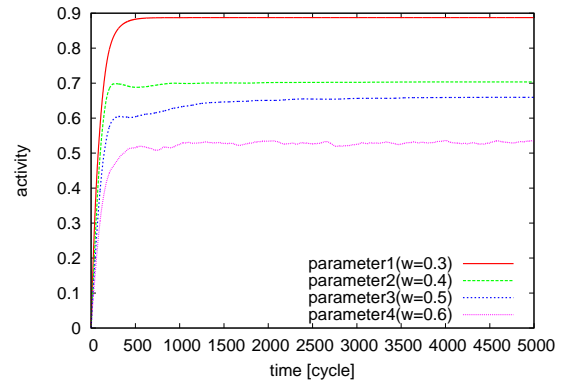
(a) 観測率



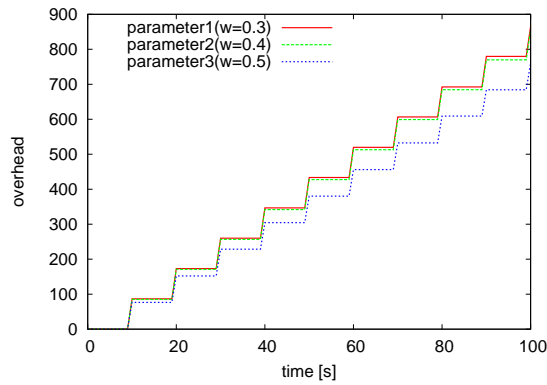
(b) 冗長度



(c) アクティブ状態にあるセンサ端末数

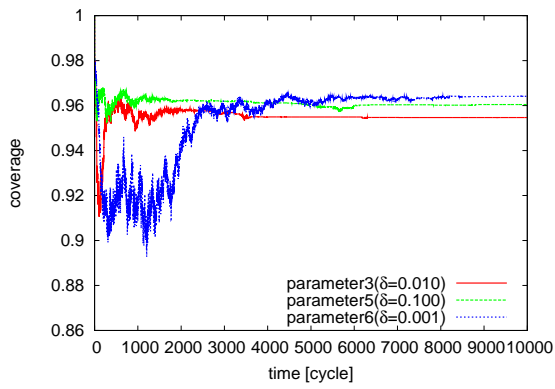


(d) アクティビティ

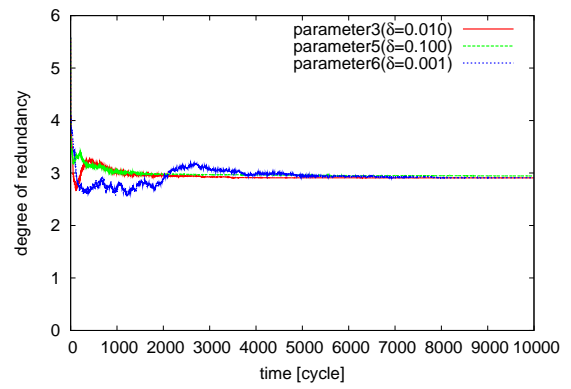


(e) オーバヘッド

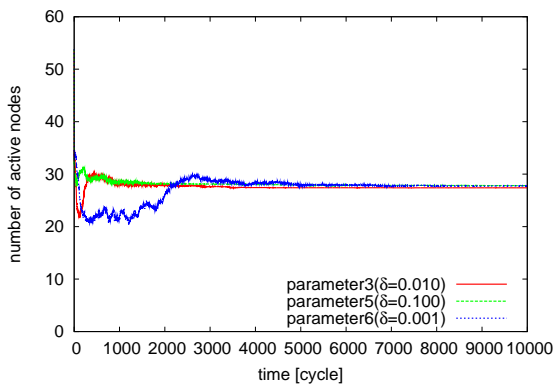
図 9: 冗長度の重み w による影響



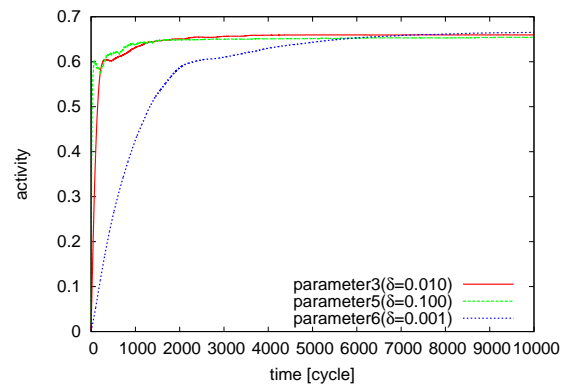
(a) 観測率



(b) 冗長度

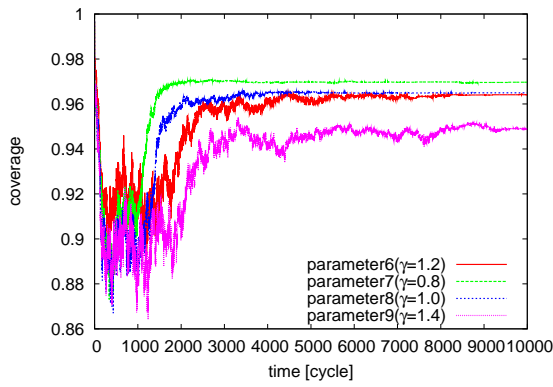


(c) アクティブ状態にあるセンサ端末数

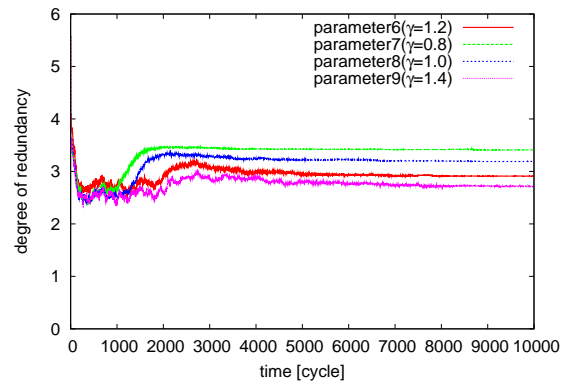


(d) アクティビティ

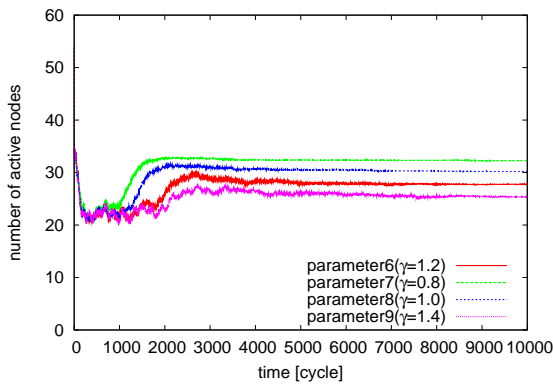
図 10: アクティビティの変化率 δ による影響



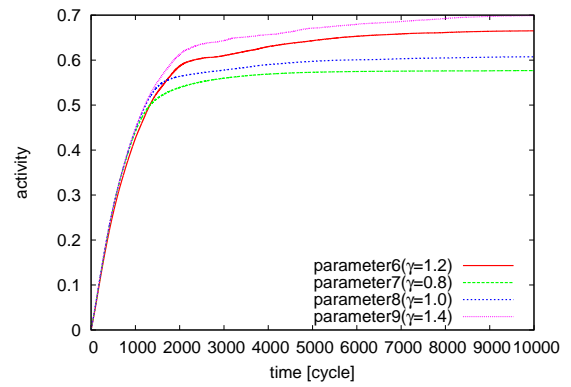
(a) 観測率



(b) 冗長度

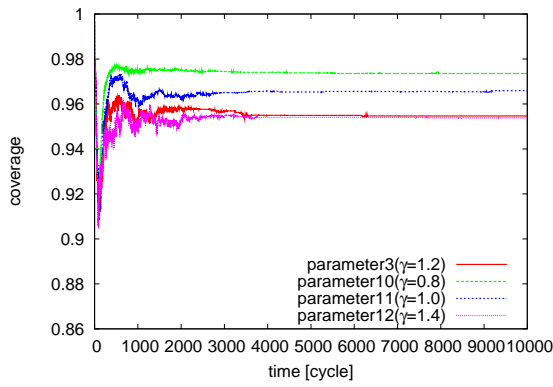


(c) アクティブ状態にあるセンサ端末数

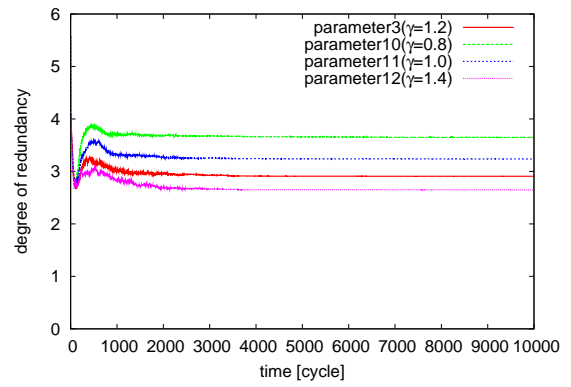


(d) アクティビティ

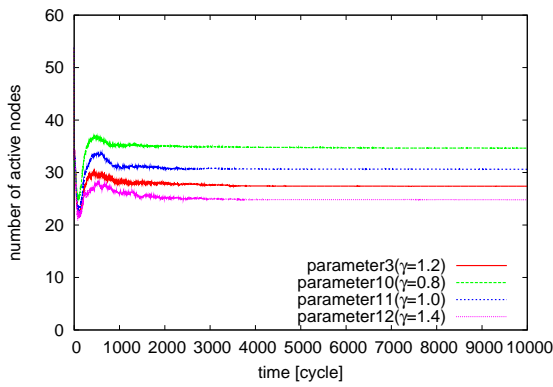
図 11: アトラクタへの引き込みの強さ γ による影響 ($\delta=0.001$)



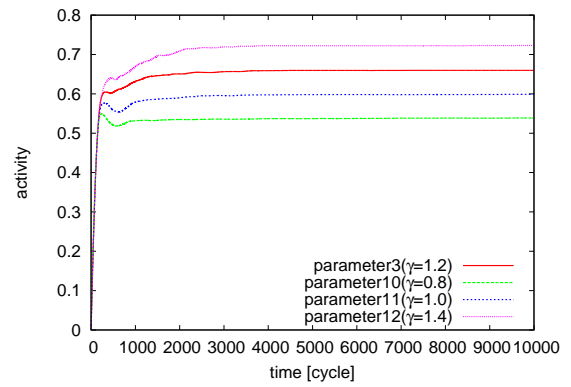
(a) 観測率



(b) 冗長度

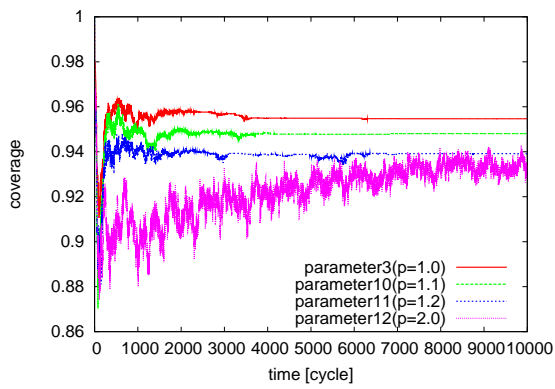


(c) アクティブ状態にあるセンサ端末数

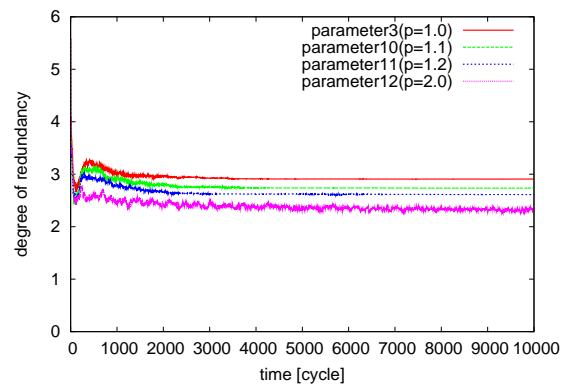


(d) アクティビティ

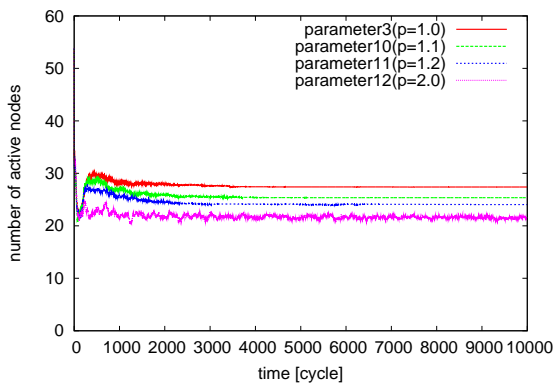
図 12: アトラクタへの引き込みの強さ γ による影響 ($\delta=0.01$)



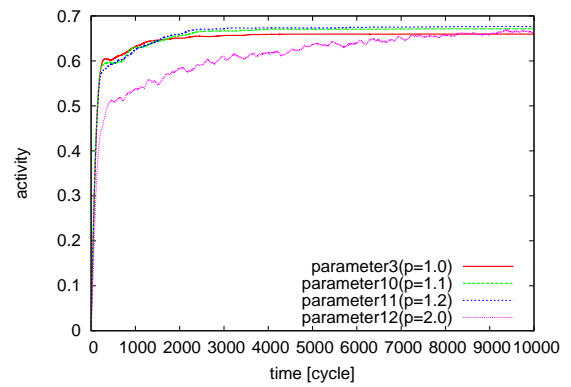
(a) 観測率



(b) 冗長度



(c) アクティブ状態にあるセンサ端末数



(d) アクティビティ

図 13: 係数 p による影響

3.4.3 センサ端末に関する情報の誤差による影響

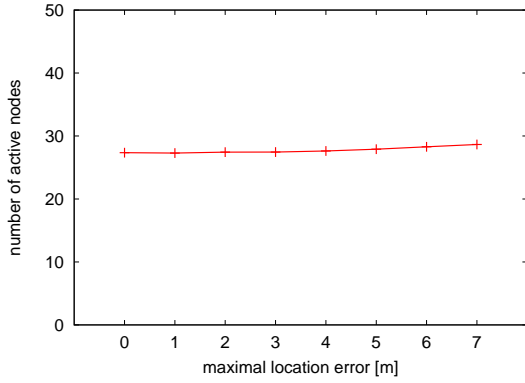
3.4.1 に示したとおり，CCP はオーバヘッドが大きいものの，アクティブ状態のセンサ端末数，観測率ともに提案手法よりも良好な性能を示している．しかしながら，センサ端末が適切に稼働状態を選択するためには，センサ端末の位置や観測エリアの形状が正確である必要がある．そこで，センサ端末の位置推定誤差，および観測エリアの形状誤差が及ぼす影響をシミュレーションにより確認する．ここでは，位置推定誤差の最大値 u として 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 m の 8 種類を用いる．また，観測エリアの不規則さを表す係数 DOI として 0, 0.03, 0.3, 0.5 の 4 種類を用いる．なお，本節のシミュレーションでは，式 (5) のパラメータ β には 2.5 を，パラメータ γ には 1.2 を用いる．式 (7) のパラメータ δ には 0.01 を用いる．式 (10) のパラメータ w には 0.4 を，パラメータ p には 1 を用いる．100 通りのセンサ端末の配置についてそれぞれ 2 回のシミュレーションを行った 200 回のシミュレーション結果の平均を示す．図 14-(a)，図 14-(b) に，横軸に位置推定誤差の最大値 u ，縦軸に 10000 サイクル時点においてアクティブ状態にあるセンサ端末数を，また，図 14-(c)，図 14-(d) に，観測エリアの形状誤差のある場合の観測率を，提案手法，CCP についてそれぞれ示す．なお，アクティブ状態のセンサ端末数は DOI による観測エリアの形状誤差の影響を受けない．また，図 14-(e) に，横軸に位置推定誤差の最大値 u ，縦軸に観測エリアの形状誤差がない場合 ($DOI = 0.00$) の，センサ端末あたりの観測率への寄与率を示す．

図 14-(a) より提案手法では，位置推定誤差の最大値によらずほぼ一定数のセンサ端末がアクティブ状態になっており，また，得られる観測率も図 14-(c) に示されるように位置推定誤差の影響をほとんど受けていない．提案手法では，稼働状態の選択に，領域全体の観測率にもとづいて計算されたアクティビティを用いている．そのため，位置情報の誤差があったとしても，その影響は領域全体で平均化され，また，正しい位置でのセンサ端末の分布と誤った位置でのセンサ端末の分布には大きな違いがないことから，稼働状態や観測率に対する影響は小さい．一方，図 14-(b) より CCP では，位置推定誤差の最大値が増加するにしたがい，アクティブ状態にあるセンサ端末が増加するにも関わらず，図 14-(d) に示されるとおり観測率が低下する．CCP は提案手法と異なり，センサ端末の位置が正確に把握できることを前提に，近隣センサ端末から直接伝えられる位置情報をもとに幾何学的なアルゴリズムを用いることで，少ないセンサ端末で最適な観測率を達成できる稼働状態を選択している．そのため，誤差のある環境下では，誤った稼働状態を選択しやすくなり，誤差の影響が大きくなる．例えば，あるセンサ端末において，実際には観測エリアが自身の観測エリアに重なるようなアクティブ状態にある隣接センサ端末を，位置推定誤差によって遠くに位置すると認識した場合，自身の観測エリア内の交点がこの隣接センサ端末の観測エリアに含まれていないと判断するため，センサ端末がアクティブ状態になり，観測が冗長になってしまうこ

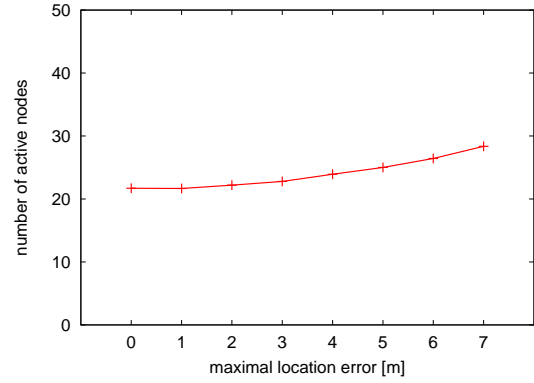
とが考えられる。また、位置推定誤差により隣接センサ端末が近くに位置すると認識した場合、自身の観測エリア内の交点が、実際にはこの隣接センサ端末の観測エリアに含まれていないにもかかわらず、誤って含まれていると判断することで、センサ端末がスリープ状態に移行し、観測率が低下することが考えられる。このように位置推定誤差の影響は、不要なセンサ端末がアクティブ状態になることと、必要なセンサ端末がスリープ状態になることの両方に現れる。位置推定誤差のある場合に、位置推定誤差のない場合と同数のセンサ端末がアクティブ状態になったとすると、実際の観測エリアは大きく重なり合うため、位置推定誤差のない場合と比べて観測率が大きく低下する。さらにアクティブ状態のセンサ端末数が増えたとしても、その配置は最適ではないため、観測エリアの重なりがより大きくなり、観測率は十分に向上しない。したがって、位置推定誤差が大きくなるにしたがい、CCPでは、アクティブ状態のセンサ端末数が多いにもかかわらず観測率が低い、ランダム手法の性能に近づいていく。

また、観測エリアの形状誤差がない場合 ($DOI = 0.00$) と形状誤差が一番大きくなる場合 ($DOI = 0.50$) では、提案手法、CCPともに位置推定誤差の大きさによらず観測率がおよそ0.005低下することが確認できるが、その影響はそれほど大きくない。これは、観測エリアが正円の場合には観測されている地点が、形状誤差によって観測されなくなる場合がある一方で、正円の観測エリア外の地点を形状誤差によって観測できる場合があるためである。

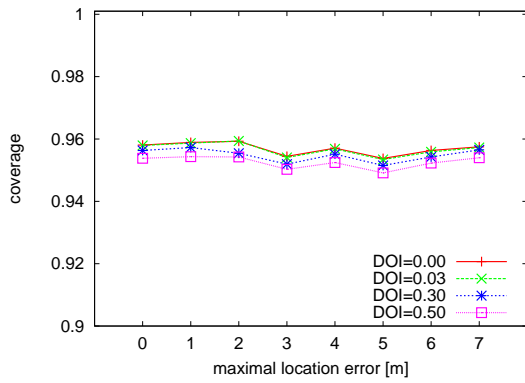
図14-(e)より、CCPは提案手法と比べて位置推定誤差の影響を受ける場合でも寄与率が高い。なお、CCPの寄与率の低下が著しいのは、位置推定誤差が大きくなるにしたがって観測率が低下すると同時にアクティブ状態にあるセンサ端末数が増加するためである。一方で、提案手法では、観測率やアクティブ状態のセンサ端末数が位置推定誤差の影響を受けにくいため、CCPとくらべて寄与率の低下は小さくなる。



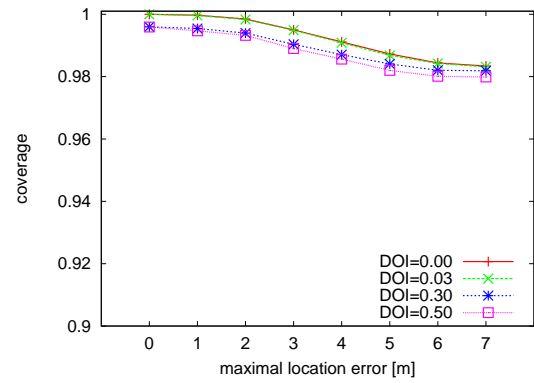
(a) アクティブ状態にあるセンサ端末数 (提案手法)



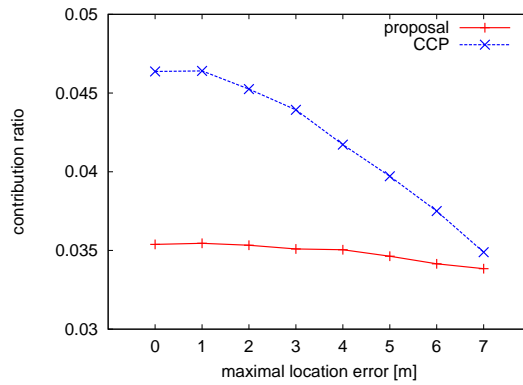
(b) アクティブ状態にあるセンサ端末数 (CCP)



(c) 観測率 (提案手法)



(d) 観測率 (CCP)



(e) 平均寄与率

図 14: 誤差による影響

3.4.4 センサ端末の停止による影響

アトラクタ選択モデルを応用した提案手法では、環境変化に対して適応的に適切な稼働状態を選択することが期待できる。アクティブ状態にあるセンサ端末が何らかの原因で停止すると、観測率が低下し、さらにアクティビティが減少する。これにより、センサ端末における評価値がノイズ項の影響を受けやすくなり、センサ端末の稼働状態の変化が促される。ノイズ項による探索と、アクティビティ上昇によるアトラクタへの引き込みにより、いずれ新たなアトラクタ、すなわち稼働状態の組み合わせに到達し、新たな安定状態が得られる。これにより、アクティブ状態のセンサ端末の停止による観測率の低下を補うことができる。

このような環境変化に対する適応性をシミュレーションにより評価する。なお、本節の評価では、式(5)のパラメータ β には2.5を、パラメータ γ には1.2を用いる。式(7)のパラメータ δ には0.01を用いる。式(10)のパラメータ w には0.5を、パラメータ p には1を用いる。10000サイクルのシミュレーションを行い、5000サイクル時点でアクティブ状態にあるセンサ端末のうち、10%、20%、30%、40%、50%のセンサ端末をランダムに選んで停止させる。センサ端末停止前、センサ端末停止直後、10000サイクル時点での観測率により、適応性を評価する。なお、停止させたセンサ端末は、シミュレーション終了まで動作することはないものとする。シミュレーションの結果を図15に示す。図の横軸はいずれも情報収集周期である。図15-(a)は平均観測率、図15-(b)は平均冗長度、図15-(c)はアクティブ状態のセンサ端末の平均数、図15-(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15-(a)より、5000サイクルでのセンサ端末の停止前の観測率は0.9625であり、10%、20%、30%、40%、50%のセンサ端末を停止させた直後の観測率はそれぞれ0.9486 (-1.44%)、0.9278 (-3.60%)、0.8913 (-7.39%)、0.8442 (-12.29%)、0.7191 (-25.28%)へ低下している。また、アクティブ状態のセンサ端末のうち50%を停止させた場合のみ、停止後からの観測率が上昇しており、他の設定では観測率の回復が見られない。これは、アクティブ状態のセンサ端末数が減少(図15-(c))し、観測率が低下しているにもかかわらず、図15-(d)に示されるように、アクティビティが上昇しているためである。提案手法では、カバレッジ制御における冗長性を抑制するため、式(10)により冗長度を考慮して瞬時アクティビティ α^* を定義しており、アクティビティは瞬時アクティビティにもとづいて変化する。5000サイクルの時点では冗長度が2.9302と高いが、アクティブ状態にあるセンサ端末を停止させると、図15-(b)に示されるように、停止させるセンサ端末の割合が10%、20%、30%、40%、50%の場合にそれぞれ、2.7252、2.4768、2.2597、2.0514、1.6338と冗長度が低下する。その結果、上記のパラメータ設定では、冗長度の低下による瞬時アクティビティの増加が、観測率の低下による瞬時アクティビティの減少を上回るため、瞬時アクティビティとアクティビティが増加し、新たな稼働状態の探索を行えていない。例えば、端末停止直前の観測率0.9625、冗

長さ2.9302, および $w = 0.5$, $p = 1$ より, 瞬時アクティビティ α^* は0.655であるが, 10%のアクティブ状態にあるセンサ端末を停止させると, 観測率0.9486, 冗長度2.7213より, 瞬時アクティビティ α^* は0.697となる. なお, 50%のセンサ端末停止の場合に観測率が上昇しているのは, 一部のシミュレーションにおいてアクティビティが減少したためであるが, ほとんどの場合においてはアクティビティの上昇がみられた.

したがって, 現在のパラメータ設定では, 提案手法がセンサ端末停止に対して適応性があるとはいえ, 適応性向上のためには, 観測率が低下している際の冗長度の低下によるアクティビティの上昇を抑制するか, アクティブ状態にあるセンサ端末が停止しても冗長度が下がらないように定常状態において冗長性を抑えるなどの制御が必要と考えられる.

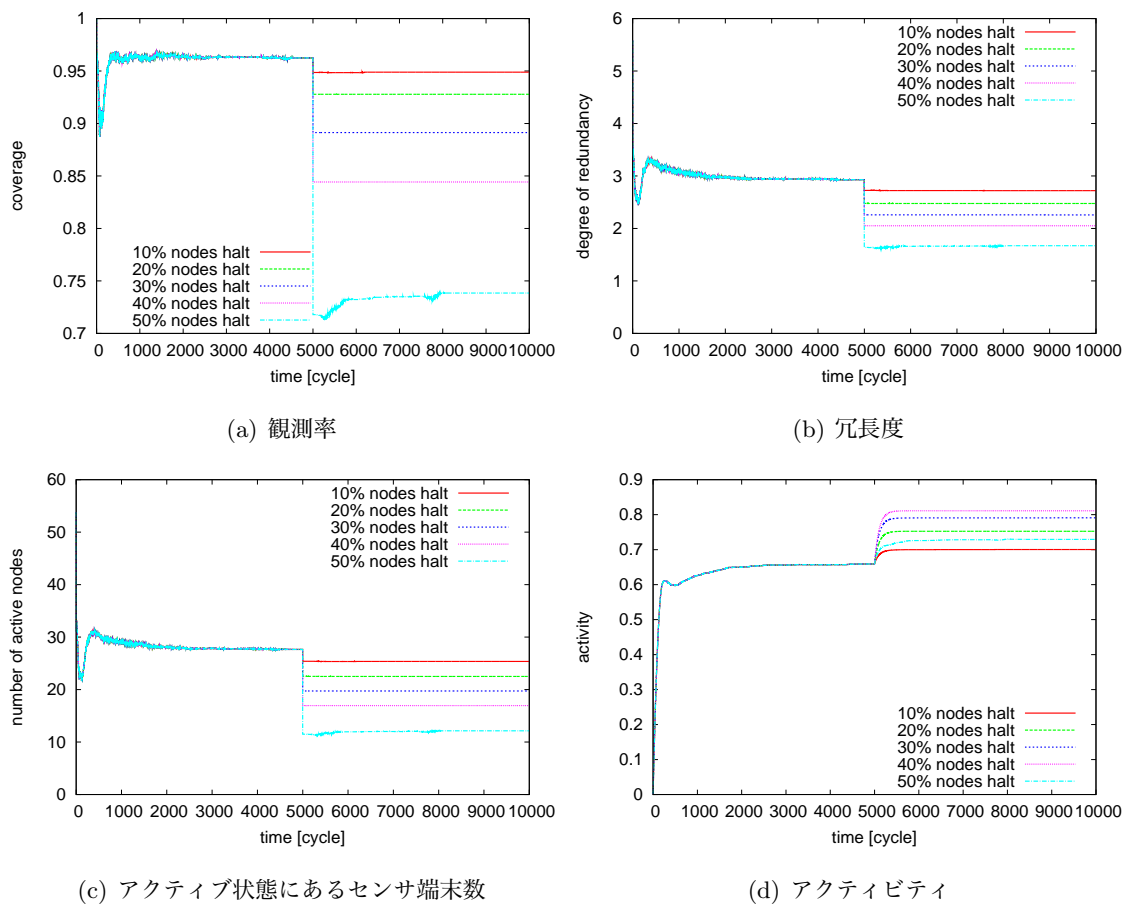


図 15: センサ端末の停止による影響

4 小領域毎のアクティビティにもとづくカバレッジ制御手法の検討

本章では、提案手法の拡張として、観測領域を分割した小領域ごとにアクティビティを算出してアトラクタ選択モデルを適用する手法について検討する。

4.1 小領域毎のアクティビティにもとづくカバレッジ制御手法

観測領域全体のカバレッジにもとづいて計算されるアクティビティを用いてセンサ端末が稼働状態を決定する場合、3.4.2で明らかにしたように、パラメータの調整のみでは観測率の向上と冗長性の抑制の両立は困難である。3.5で述べたように、提案手法では、それぞれのセンサ端末の稼働状態が領域全体のカバレッジにどのように影響を与えているかをセンサ端末が直接的に知ることができず、効果的かつ効果的な稼働状態の選択が行えない。例えば、ある地点の観測に必要な不可欠なセンサ端末がアクティブ状態にあるときに、他のセンサ端末が冗長にアクティブ状態になることによって冗長度が増加し、アクティビティが低下すると、このセンサ端末は誤ってスリープ状態に移行する可能性がある。そこで、観測領域を小領域に分割し、小領域ごとに計算されたアクティビティをその小領域に位置するセンサ端末が稼働状態の選択に用いる手法を提案する。これにより、個々のセンサ端末の稼働状態選択の相互作用が強くなるため、アクティビティがより向上する解をより早く見つけられるものとする。

例えば、図16のように観測領域に15台のセンサ端末が配置されている状態を考える。なお、黒丸はアクティブ状態にあるセンサ端末を、白丸はスリープ状態にあるセンサ端末をそれぞれ表しており、センサ端末を中心とした円がそれぞれの観測エリアを表している。領域全体のアクティビティにもとづいて稼働状態を選択する手法では、上側の図のように観測領域右下の領域が観測されていないことによってアクティビティが低いにもかかわらず、どのセンサ端末がどのようにアクティビティに寄与しているかわからないため、アクティビティ向上に無関係なセンサ端末（図中、赤丸）がアクティブになる場合がある。この時、冗長性が上がるためアクティビティが低下し、他のセンサ端末の稼働状態の変化を誘発する。一方、下側の図のように観測領域を9つの小領域に分割し、小領域ごとのアクティビティにもとづいて稼働状態を選択する手法では、右下の小領域における不十分な観測状態が他の小領域のセンサ端末の振る舞いに影響を与えず、この小領域におけるアクティビティ向上に直接寄与するセンサ端末が稼働状態を変更する。

小領域ごとのアクティビティを用いる手法では、基地局は、観測領域を複数の重複のない同じ大きさの小領域に分割し、小領域ごとにカバレッジ、瞬時アクティビティ、およびアクティビティを計算して、それぞれのセンサ端末にそのセンサ端末の位置する小領域のアク

ティビティを通知する。これにより、自身の位置する小領域と無関係なセンサ端末の稼働状態に影響を受けることなく、より適切な稼働状態選択が行える。なお、カバレッジの計算、およびアクティビティの通知に際しては、センサ端末が推定した位置情報を用いる。したがって、位置推定誤差がある場合、あるセンサ端末の観測情報が実際の位置とは異なる小領域のアクティビティの計算に使用され、また、この誤った小領域のアクティビティが、センサ端末に通知されることがある。

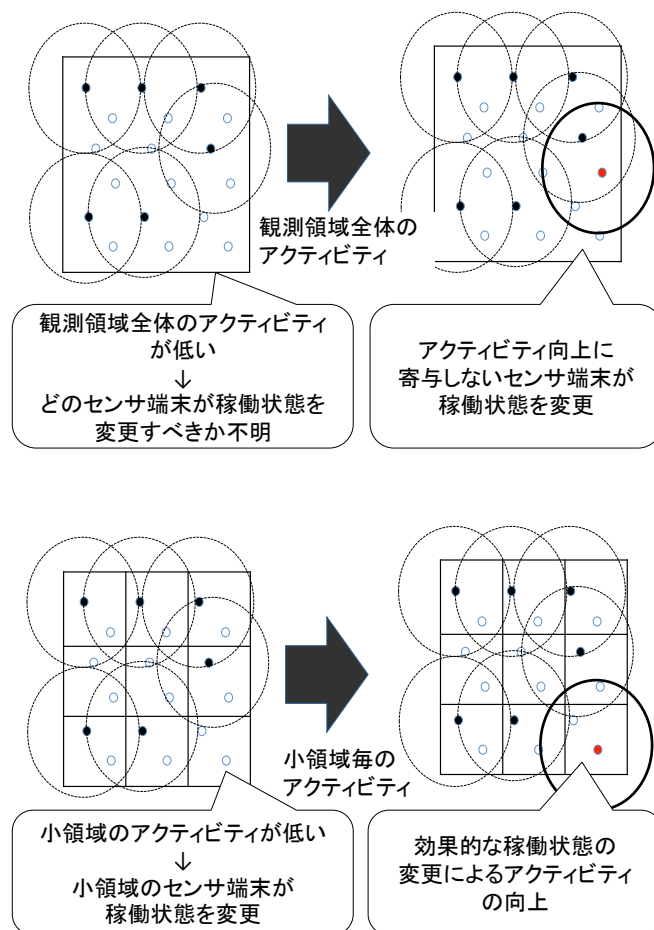


図 16: 小領域毎のアクティビティを用いたカバレッジ制御の振る舞い

4.2 シミュレーション結果と考察

小領域毎のアクティビティを用いた効果をシミュレーションにより確認する。なお、本節のシミュレーションでは特に断らない限り 3.4 節と同じ条件のもと行う。

4.2.1 基本評価

まず、小領域毎のアクティビティを用いることにより、観測率の振動を抑えつつ、高い観測率が達成できることを示す。本節の評価では、小領域の大きさを $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ とする。式 (5) のパラメータ β には 2.5 を、パラメータ γ には 1.2 を用いる。また、式 (7) のパラメータ δ には 0.01 を、式 (10) のパラメータ w には 0.5 を、パラメータ p には 1 を用いる。観測領域全体のアクティビティを用いたものを global-activity、小領域ごとのアクティビティを用いたものを area-activity と表記し、シミュレーション結果を図 17 に示す。図の横軸はいずれも情報収集周期であり、図 17-(a) は 100 回のシミュレーションにおける各サイクルにおける平均観測率、図 17-(b) は平均冗長度、図 17-(c) はアクティブ状態のセンサ端末の平均数、図 17-(d) は平均アクティビティを縦軸にそれぞれ示している。なお、小領域ごとのアクティビティを用いる場合には、各シミュレーションの各サイクルごとの小領域間の平均アクティビティを、100 回のシミュレーション間で平均した値を示している。

図 17-(a) より、観測領域全体のアクティビティにもとづく制御では、400 サイクルから 1700 サイクルにかけての観測率の大きな振動が確認できるが、小領域ごとのアクティビティを用いる場合には、観測率の振動は確認できるものの、観測領域全体のアクティビティを用いる場合とくらべて抑制されている。また、観測領域全体のアクティビティを用いる場合と比較して、観測率が大きく向上するとともに (図 17-(a))、アクティブ状態のセンサ端末数を抑え (図 17-(b))、冗長度も低下 (図 17-(c)) していることがわかる。このときの寄与度は 0.034 から 0.046 に上がっている。また、図 17-(d) に示されるとおり、アクティビティも高くなっており、小領域ごとのアクティビティを用いた方がより安定した制御が行えていることを表している。

次に、図 18 に、200 回のシミュレーションにおける 5000 サイクル時点での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の、ランダム手法、CCP との比較結果を示す。CCP では、それぞれのセンサ端末が隣接センサ端末との情報交換によって稼働状態を選択するため、小領域への分割は行っていない。ランダム手法では、横軸に応じた 10~35 台のセンサ端末を観測領域全体からランダムに選びアクティブ状態とした場合の、それぞれ 100 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。また、パラメータを等しく設定した場合の観測領域全体のアクティビティにもとづく制御による結果もあわせて示す。図より、観測領域全体のアクティビティを用いる手法と比較して、同数のアクティブ状態のセンサ端末でより高い観測率を、また、より少ないアクティブ状態のセンサ端末で同程度の観測率を達成できることが分かる。さらに、同じセンサ端末の配置に対して、アクティブ状態のセンサ端末数のばらつきが小さいことから、より効果的な解を発見できているといえる。また、ランダム手法と比較しても、例えば観測率 0.9778 を達成する

際のアクティブ状態のセンサ端末数が、ランダム手法で37台、小領域ごとのアクティビティを用いた手法で21.1台と、約16台少なく、43%削減できている。

最後に、提案手法およびCCPにおけるオーバーヘッドを比較評価する。図18-(b)に、稼働状態の選択が収束したのちのある情報収集タイミングから40秒間に発生するオーバーヘッドの平均を示す。小領域ごとのアクティビティを用いることにより、アクティブ状態のセンサ端末数が減少するため、観測領域全体のアクティビティを用いる手法と比較してよりオーバーヘッドが軽減されていることがわかる。また、この時の単位時間あたりのオーバーヘッドはCCPの約65%となっている。

以上の結果より、小領域ごとのアクティビティにもとづいてカバレッジ制御を行うことで、観測領域全体のアクティビティにもとづく制御と比べてより少ないセンサ端末でより高い観測率を達成し、オーバーヘッドも削減されることが分かった。

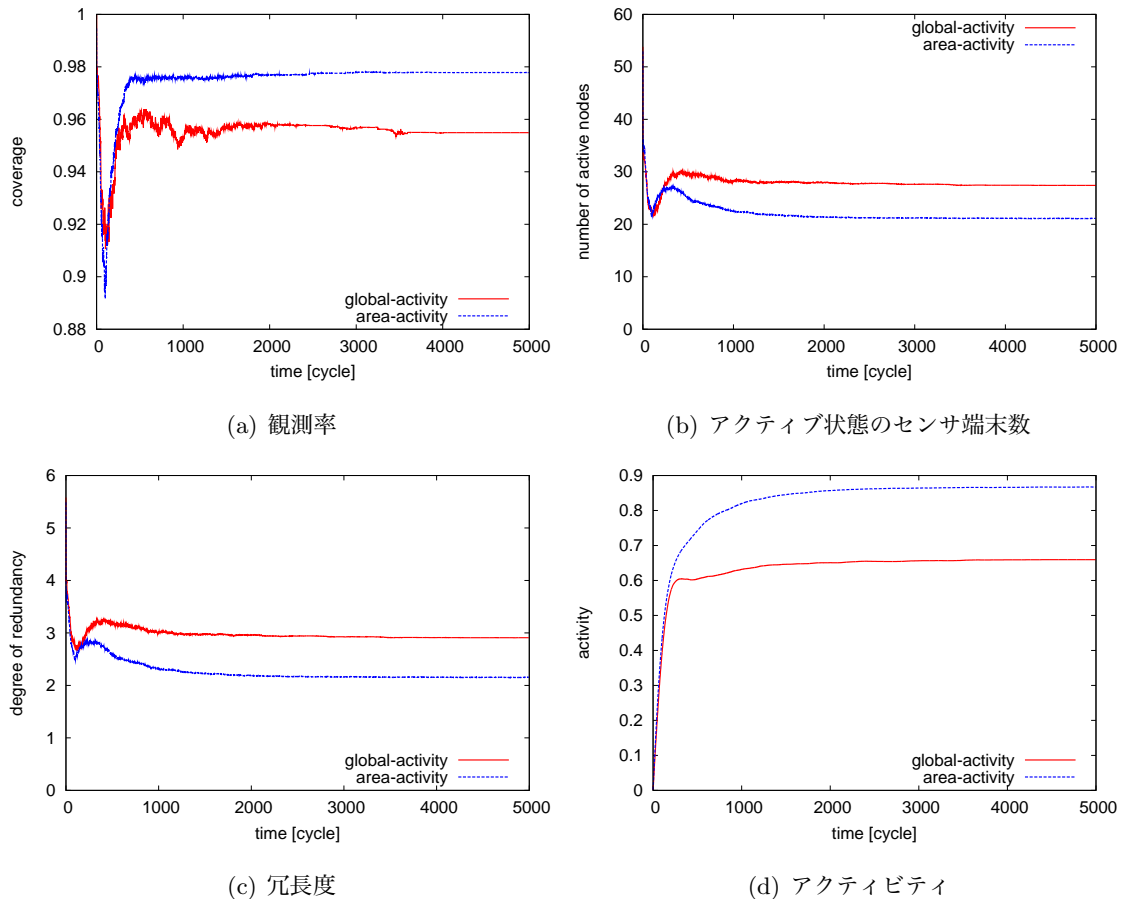


図 17: 基本性能の評価 (小領域ごとのアクティビティを用いる手法)

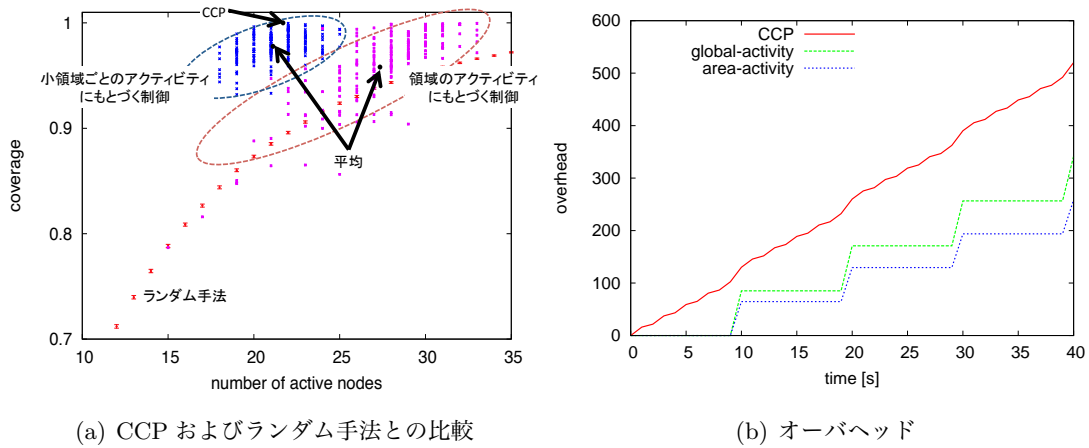


図 18: 他手法との比較 (小領域ごとのアクティビティを用いる手法)

4.2.2 パラメータ設定による影響

本節では、小領域ごとのアクティビティを用いた場合にパラメータの組み合わせが性能に与える影響を評価する。本節で用いるパラメータの組み合わせを表 3 にまとめる。

表 3: パラメータの組み合わせ (小領域ごとのアクティビティを用いる手法)

組み合わせ名	δ	β	γ	w	p
pameter1	0.01	2.5	1.2	0.50	1
pameter2	0.01	2.5	1.2	0.50	2
pameter3	0.01	2.5	1.2	0.50	3
pameter4	0.01	2.5	1.2	0.45	3
pameter5	0.01	2.5	1.2	0.40	3

まず、観測率および冗長度に対する瞬時アクティビティの大きさを調整する係数 p による影響を評価する。図 19-(a) より、係数 p が大きいほど稼働状態の収束までに時間がかかるが、観測率が高くなることから分かる。5000 サイクル時点の観測率は、係数 p が 3 の場合に 0.986 となる。これは、係数 p を大きくするほど、より高い観測率のときでなければアクティビティが増加せず、センサ端末が稼働状態の選択を継続するためである。また、図 19-(b)、図 19-(c) より、係数 p を大きくするほどアクティブ状態のセンサ端末数が減少し、冗長度が低下することが分かる。これも同様に、係数 p を大きくするほど、瞬時アクティビティの計

算式 (10) の分母の影響が大きくなり、瞬時アクティビティが小さくなるためである。以上より、係数 p を大きくすることにより、収束までの時間がかかるものの、観測率が向上し、冗長性を抑えられることが分かった。

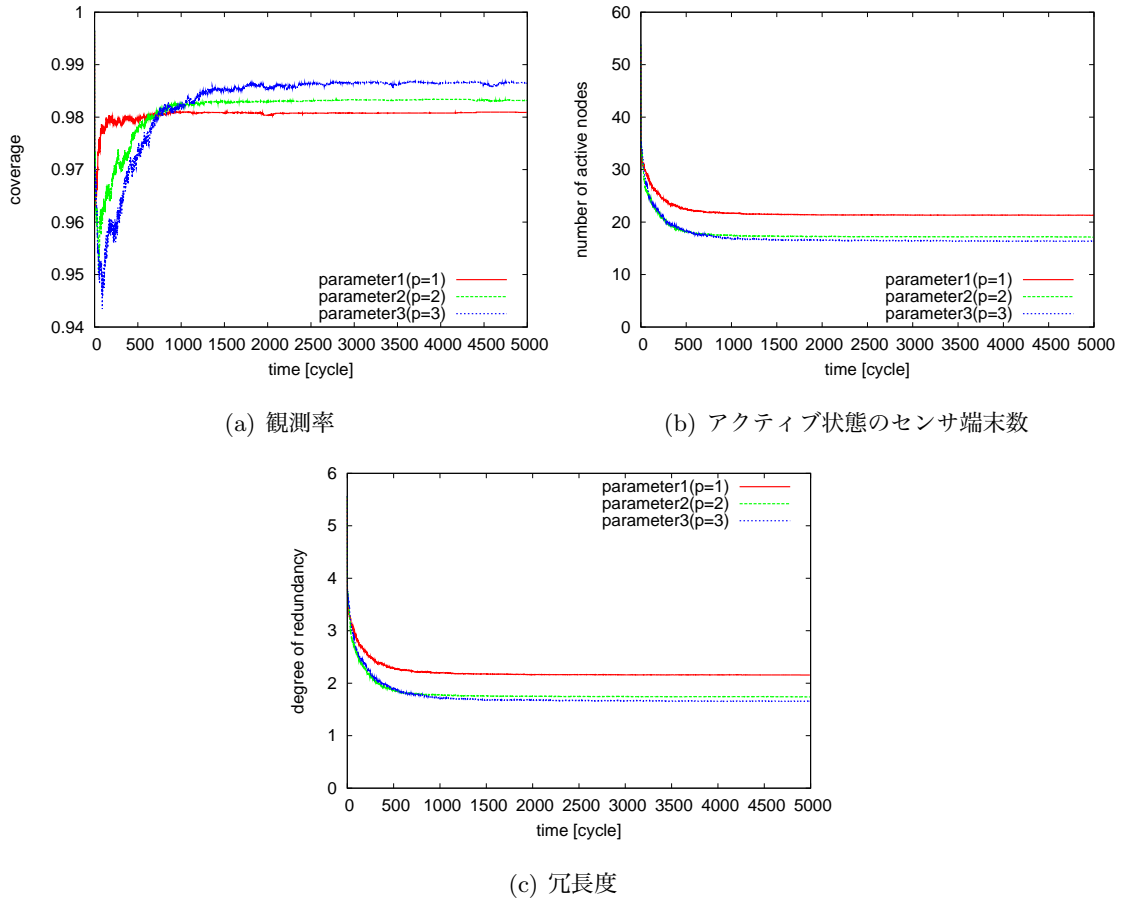
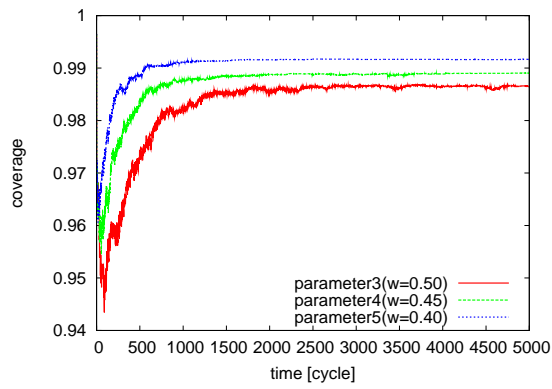


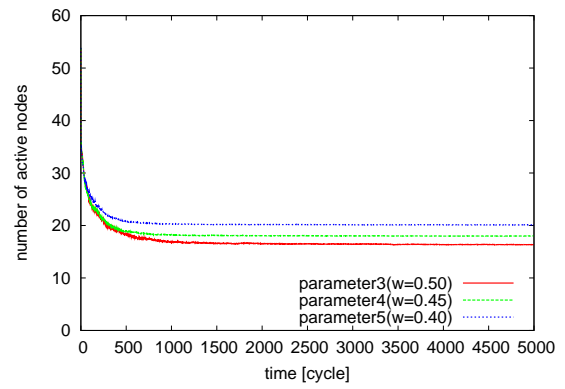
図 19: 係数 p による影響 (小領域ごとのアクティビティを用いる手法)

次に、冗長性を許すことによってさらに観測率を向上することを考え、冗長度の重み w を変化させて評価する。シミュレーション結果を図 20 に示す。小領域ごとのアクティビティを用いた場合に図 20-(a) より、5000 サイクル時点では、重み w が 0.5 のとき (parameter3) の観測率がおおよそ 0.986 であるのに対して、重み w を 0.40 に小さくすることにより (parameter5), 観測率がおおよそ 0.991 になることがわかる。これは、図 20-(b), 図 20-(c) に示されるとおり、より高い冗長度を許すことによりアクティブ状態にあるセンサ端末が増加するためである。

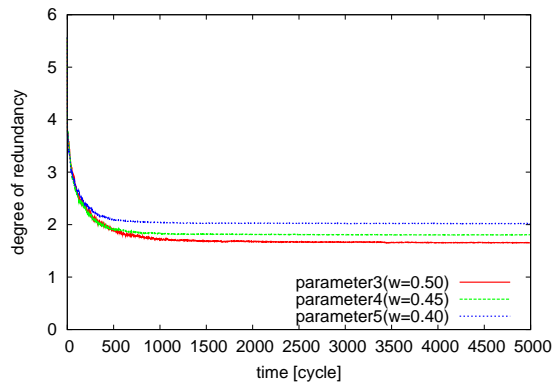
以上より、観測率および冗長度に対する瞬時アクティビティを調整する係数 p を大きくすることで、観測率を高めつつ、冗長なセンサ端末がアクティブ状態になることを抑制することができることが示された。さらに、冗長度の重み w を小さくすることで冗長性を上げ、観



(a) 観測率



(b) アクティブ状態のセンサ端末数



(c) 冗長度

図 20: 冗長度の重み w による影響 (小領域ごとのアクティビティを用いる手法)

測率を高められることが示された。

4.2.3 センサ端末に関する情報の誤差による影響

本節では、小領域ごとのアクティビティを用いる手法での、位置推定誤差による影響を評価する。シミュレーションでは、小領域の大きさとして $5\text{ m} \times 5\text{ m}$ 、 $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ 、 $25\text{ m} \times 25\text{ m}$ の3種類を比較する。それぞれのシミュレーションの結果を area-activity (5, 10, 25 m) として示す。式 (5) のパラメータ β には 2.5 を、パラメータ γ には 1.2 を用いる。図の横軸はいずれも位置推定誤差の最大値であり、図 21-(a) の縦軸は観測率を、図 21-(b) の縦軸はアクティブ状態にあるセンサ端末数を表す。なお、100 通りのセンサ端末の配置を用いて、それぞれ 3 回のシミュレーションを行い、300 回のシミュレーションの結果の平均値を示す。

図 21-(a) より、小領域の大きさを $5\text{ m} \times 5\text{ m}$ の場合には、位置推定誤差の最大値が 0 m のときは観測率が 0.9885 に、最大値が 7 m のときは観測率が 0.9600 となり、位置推定誤差によりおよそ 2.9% 低下する。また、小領域の大きさを $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ とした場合には、観測率は 0.9784 から 0.9557 へとおよそ 2.3% 低下する。さらに、小領域の大きさを $25\text{ m} \times 25\text{ m}$ とした場合には、観測率は 0.964 から 0.957 へとおよそ 1.1% 低下する。一方で、CCP における観測率の低下は、1 から 0.9834 と、約 1.6% である。したがって、小領域ごとのアクティビティを用いる手法では、小領域の大きさを小さくするほど位置推定誤差の影響を受けやすくなることが分かる。

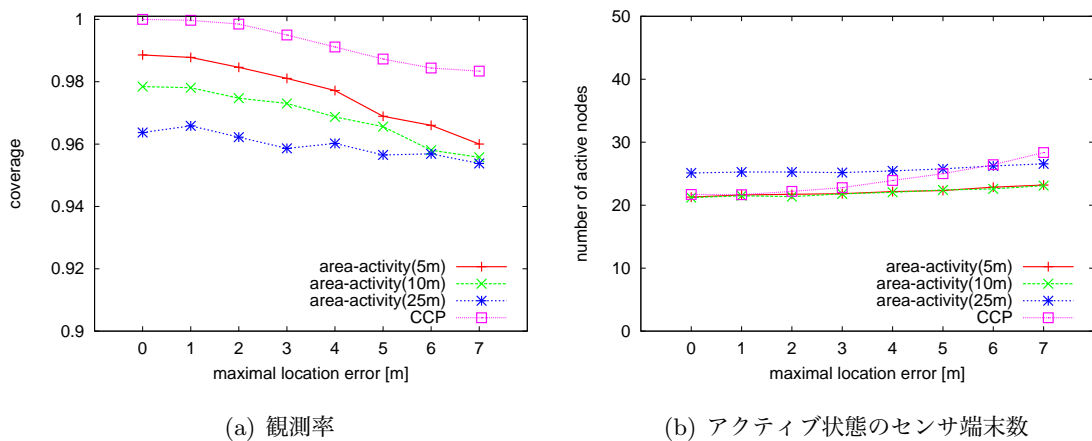


図 21: 誤差による影響 (小領域ごとのアクティビティを用いる手法)

また、CCP では位置推定誤差が大きくなるのにもなってアクティブ状態のセンサ端末数が増加することから、図 22 に示されるように、アクティブ状態のセンサ端末の寄与率は

大きく低下する。特に、小領域の大きさが $25\text{ m} \times 25\text{ m}$ の場合には、アクティブ状態のセンサ端末数が多く、観測率が低いため、位置推定誤差のない状態での寄与率が低いが、位置推定誤差が 7 m の場合には、CCP における寄与率がこれを下回る。

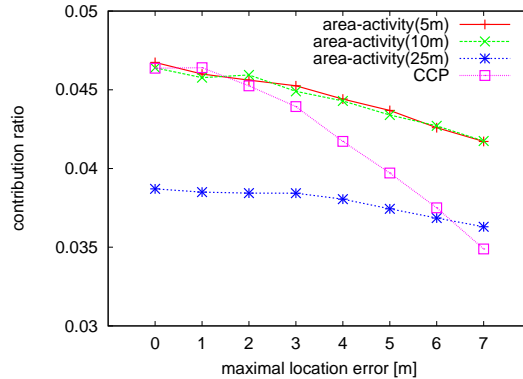


図 22: センサ端末の平均寄与率 (小領域ごとのアクティビティを用いる手法)

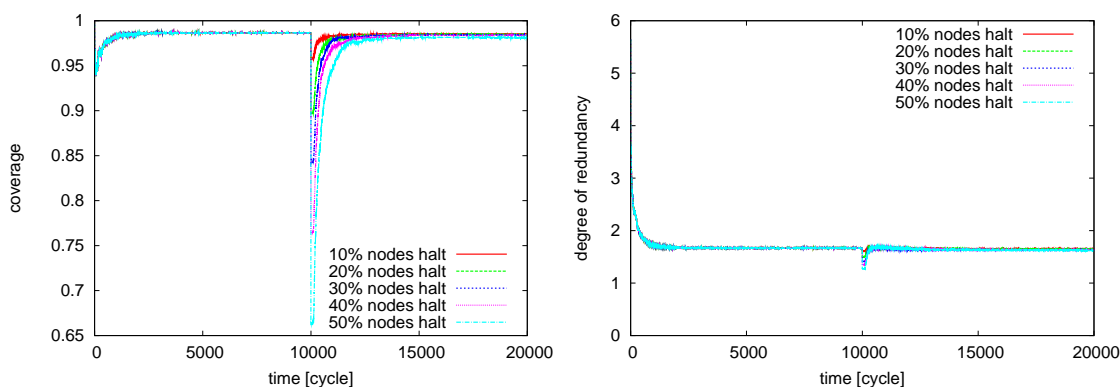
4.2.4 センサ端末の停止による影響

小領域ごとのアクティビティにもとづく制御により、センサ端末の停止に対する適応性が向上することをシミュレーションにより確認する。なお、本節の評価では、式 (5) のパラメータ β には 2.5 を、パラメータ γ には 1.2 を用いる。また、式 (7) のパラメータ δ には 0.1 をそれぞれ用いる。式 (10) の冗長性の重み w を 0.5 を、パラメータ p には 3 を用いる。また、 $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ の小領域毎にアクティビティを計算する。20000 サイクルのシミュレーションを行い、10000 サイクル時点でアクティブ状態にあるセンサ端末のうち、10%、20%、30%、40%、50%のセンサ端末を観測領域全体からランダムに選んで停止させる。3.4.4 と同様に、センサ端末停止前、停止直後、20000 サイクル時点での観測率により、適応性を評価する。なお、停止させたセンサ端末はシミュレーション終了まで動作することはないものとする。シミュレーションの結果を図 23 に示す。いずれの図も横軸は情報収集周期を表す。図 23-(a) は平均観測率、図 23-(b) は平均冗長度、図 23-(c) はアクティブ状態にあるセンサ端末の平均数を縦軸にそれぞれ示している。

図 23-(a) より、10000 サイクルでのセンサ端末の停止前の観測率は 0.986 であり、10%、20%、30%、40%、50%のセンサ端末を停止させた直後の観測率はそれぞれ 0.9580 (-2.9%)、0.8967 (-10.1%)、0.8421 (-14.6%)、0.7645 (-22.5%)、0.6631 (-32.8%) へ低下している。20000 サイクルでの観測率は、10%、20%、30%、40%、50%のセンサ端末を停止させた場

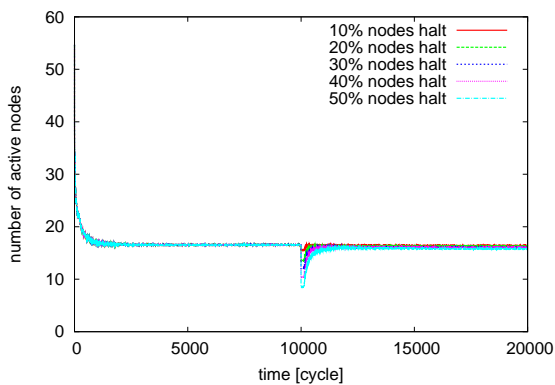
合それぞれ, 0.9856, 0.9851, 0.9842, 0.9839 であり, おおむねセンサ端末停止前の観測率を回復できていることが分かる.

観測領域全体のアクティビティを用いる場合では, 50%のセンサ端末が停止したときのみ, 観測率の回復が認められたが, その効果は非常に小さかった (図 15-(a)). 小領域ごとのアクティビティを用いることにより, センサ端末の停止の度合いによらず, 残ったセンサ端末が適切に稼働状態を再選択することにより観測率が回復しており, カバレッジ制御の適応性が向上したといえる.



(a) 観測率

(b) 冗長度



(c) アクティブ状態のセンサ端末数

図 23: センサ端末の停止による影響 (小領域ごとのアクティビティを用いる手法)

5 おわりに

本報告では、定時観測型アプリケーションを対象とした誤差に耐性のあるカバレッジ制御手法の提案を行い、シミュレーション評価を行った。まず、観測領域全体のカバレッジ情報のみにもとづいて、センサ端末が自律的に稼働状態を決定する手法を提案した。シミュレーションによる評価の結果、誤差に対する耐性があり、ランダム手法よりも高い観測率、CCPよりも低いオーバーヘッドを示したが、観測率を高めるには冗長なカバレッジ制御を行う必要があることが分かった。また、センサ端末の障害に対して、観測率を回復できないことも分かった。そこで、観測領域を分割した小領域ごとにカバレッジ情報を計算し、センサ端末が自身の位置する小領域のカバレッジ情報にもとづいて稼働状態を決定するように手法を拡張し、高い観測率を得つつ、アクティブ状態にあるセンサ端末数の大幅な削減が可能となることを示した。

ただし、提案手法は誤差による観測率の低下や冗長性の増加の影響は小さいものの、得られる観測率はCCPよりも低く、100%の観測を要求するアプリケーションには適用できない。さらに、初期状態からセンサ端末の稼働状態が収束するまでにおよそ1000サイクル、センサ端末の停止に対して観測率を回復するまでにおよそ1000サイクルを必要とする。この間、観測率が低い状態が継続するため、よい解をより早く見つけられるようにする必要がある。しかしながら、本報告を通じて明らかとなったように、提案手法のパラメータ調整のみでは、冗長性を上げることなく観測率を向上し、収束時間を短くするのは困難であると思われる。そのために、アトラクタ選択モデルの式や評価値にもとづく稼働状態の選択手法などの改良について、今後取り組む予定である。

謝辞

本報告を終えるにあたり、ご指導、ご教授を頂きました大阪大学大学院情報科学研究科の村田正幸教授に心より感謝申し上げます。

ならびに、本報告の作成に終始ご指導を頂きました大阪大学大学院情報科学研究科の若宮直紀准教授に深く感謝致します。

また、平素から適切な助言を頂きました大阪大学大学院情報科学研究科の荒川伸一助教に心より感謝致します。

最後に、日頃から様々な相談に応じて頂きました梶岡慎輔氏、井上貴博氏をはじめとする村田研究室の皆様方に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- [1] J. Chen and X. Koutsoukos, “Survey on coverage problems in wireless ad hoc sensor networks,” in *Proceedings of IEEE SouthEastCon*, pp. 22–25, March 2007.
- [2] M. Cardei and J. Wu, “Coverage in wireless sensor networks,” *Handbook of Sensor Networks*, 2004.
- [3] Y. Liu, J. Pu, S. Zhang, Y. Liu, and Z. Xiong, “A localized coverage preserving protocol for wireless sensor networks,” *Sensors*, vol. 9, pp. 281–302, January 2009.
- [4] F. Ye, G. Zhong, J. Cheng, S. Lu, and L. Zhang, “PEAS: A robust energy conserving protocol for long-lived sensor networks,” in *Proceedings of International Conference on DCS*, vol. 23, pp. 28–37, November 2003.
- [5] H. Zhang and J. Hou, “Maintaining sensing coverage and connectivity in large sensor networks,” Tech. Rep. UIUCDCS-R-2003-2351, Department of Computer Science, University of Illinois, June 2003.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] B. Yener, M. Magdon-Ismail, and F. Sivrikaya, “Joint problem of power optimal connectivity and coverage in wireless sensor networks,” *Wireless Networks*, vol. 13, pp. 537–550, November 2007.
- [10] 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, December 2006.

- [11] N. Wakamiya and M. Murata, "Synchronization-based data gathering scheme for sensor networks," *IEICE Transactions on Communications*, vol. 88, pp. 873–881, March 2005.
- [12] K. Leibnitz, N. Wakamiya, and M. Murata, "A bio-inspired robust routing protocol for mobile ad hoc networks," in *Proceedings of ICCCN*, pp. 321–326, August 2007.
- [13] C. Raghavendra, K. M. Sivalingam, and T. Znati, *Wireless sensor networks*. Springer, 2004.
- [14] J. Wang, R. Ghosh, and S. Das, "A survey on sensor localization," *Journal of IET CTA*, vol. 8, pp. 2–11, February 2010.
- [15] N. Ahmed, S. S. Kanhere, and S. Jha, "Probabilistic coverage in wireless sensor networks," in *Proceedings of ICCCN*, pp. 672–681, January 2005.
- [16] J. Lu, L. Bao, and T. Suda, "Probabilistic self-scheduling for coverage configuration in wireless ad-hoc sensor networks," *International Journal of IEEE PerCom*, vol. 4, pp. 26–39, March 2008.
- [17] G. Zhou, T. He, S. Krishnamurthy, and J. Stankovic, "Models and solutions for radio irregularity in wireless sensor networks," *ACM TOSN*, vol. 2, pp. 221–262, May 2006.