

## 無線センサネットワーク長寿命化のためのノード集合の分割に基づくスリープスケジューリング手法

勝 間 亮<sup>†1</sup> 村 田 佳 洋<sup>†2</sup> 柴 田 直 樹<sup>†3</sup>  
安 本 慶 一<sup>†1</sup> 伊 藤 実<sup>†1</sup>

本稿では、多数のセンサノードが散布されたデータ収集型無線センサネットワーク (WSN) において、必要最小限のノードを稼働させ、残りをスリープさせることで、WSN の  $k$  重被覆時間を最大化する手法を提案する。本手法を実現するため、 $k$  重被覆時間を最大化する、各時刻のノードの動作モード (センシングやスリープなど) およびマルチホップ通信経路を決定する問題を定式化する。本問題は典型的な組み合わせ最適化問題であり、短時間で最適解を算出するのは困難であるため、ヒューリスティックとして、フィールドを 1 重被覆するノードの集合 (レイヤ) を複数求め、稼働させる  $k$  個のレイヤを選択する方法を提案する。シミュレーションの結果、提案手法は既存手法よりもノードが故障したときの平均被覆度が約 1.03 倍多くなる一方、 $k$  重被覆時間の減少は約 5%にとどまることが確認できた。

### Sleep Scheduling Method Based on Node Set Division for Maximizing Wireless Sensor Network Lifetime

RYO KATSUMA,<sup>†1</sup> YOSHIHIRO MURATA,<sup>†2</sup> NAOKI SHIBATA,<sup>†3</sup>  
KEIICHI YASUMOTO<sup>†1</sup> and MINORU ITO<sup>†1</sup>

In this paper, we propose a method for maximizing the lifetime of a wireless sensor network which  $k$ -cover the target field, by making minimum number of nodes operate and putting other nodes in sleep. In order to attain the objective, we first formulate the problem to decide the operating mode for each sensor node and the communication route at each time period to maximize the  $k$ -coverage time. This problem is a typical combinatorial optimization problem, and thus it is hard to find the optimal solution. So, we propose a heuristic method to find layers that each of them 1-covers the region, and choose  $k$  active layers to make active. This method is considered to be more fault-tolerant. Through simulation-based comparison, we confirmed that the average coverage degree by the proposed method is 3% better than the existing method, while the decrease of  $k$ -coverage time by the proposed method is only 5% worse than the existing method.

### 1. ま え が き

近年、広域に設置された多数の小型センサノード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情報の収集やオブジェクトの追跡などを行う無線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 には、定期的に全エリアのセンシングデータを基地局に送信するデータ収集型 WSN がある。データ収集型 WSN の典型的なアプリケーションとして、農地などに WSN を設置し、各エリアごとの温度や光量などの情報を一点 (基地局) に収集し、収集した情報を用いて作物の育ちやすい環境を作るシステムなどが構築されている<sup>1)</sup>。

これらの WSN アプリケーションの多くは、長期間動作することを要求している。そこで、センサノードのスリープ機能を用いた WSN 稼働時間延長手法が研究されている。Cao らは、通信を行う必要がないときにノードをスリープ状態にして電力を節約するスリープスケジューリング決定手法を提案した<sup>2)</sup>。Ma らは、各ノードのスリープスケジューリング決定のための TDMA (時分割多元接続) に基づく分散アルゴリズムを提案した<sup>3)</sup>。

また、国境警備などのアプリケーションでは、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) をノードで全被覆するだけでなく、十分なセンシング精度の維持や、システムの頑健性が求められる。そのような要求を満たすため、フィールドの  $k$  重被覆とよぶ制約条件を導入している研究がある。 $k$  重被覆とは、フィールド上のどの地点も、少なくとも  $k$  個以上のノードで被覆されていることを言う。Poduri らは、 $k$  が小さいときの、 $k$  重被覆のためのノードの最適な配置について議論した<sup>4)</sup>。しかし、WSN はノードの正確な配置が難しい場合の使用も想定されている (例えば、広大な、危険なフィールドに対しては、空中からノードを散布することが望ましい)。移動可能なノード (可動ノード) を使用して、ノード配置後に  $k$  重被覆の状態にする研究もある。勝間らは可動ノードを用いた WSN で、 $k$  重被覆時間を最大化する手法を提案した<sup>7)</sup>。しかし、フィールドに障害物などがある場合には可動ノードの使用が困難である。そこで、 $k$  重被覆を保つために、十分な数のノードを散布する方法が考えられる。その際、 $k$  重被覆に必要な十分なノードのみを稼働させ、他のノードをスリープさせ必要に応じて稼働させることで、WSN の  $k$  重被覆時間を延長できることが望ましい。しかし、過剰にノードが散布されたデータ収集型 WSN での  $k$  重被覆時間最大化手法は著者らの知る限り存在しない。

本稿では、データ収集型 WSN において、フィールド上に  $k$  重被覆するために十分な数の

<sup>†1</sup> 奈良先端科学技術大学院大学  
Nara Institute of Science and Technology

<sup>†2</sup> 広島市立大学  
Hiroshima City University

<sup>†3</sup> 滋賀大学  
Shiga University

ノードが散布されているときの、 $k$  重被覆時間を最大化する問題を定式化し、それを解くための近似アルゴリズムを提案する。

本稿では、WSN の  $k$  重被覆時間が最大化するように、すべてのノードの動作モード切り換えスケジュール、および、モード切り換えに基づくデータ収集経路を決める問題を定式化する。この問題での主な仮定として、次のことが挙げられる。センサノードにはスリープ、中継、センシングの 3 つの動作モードがあるとする。通信における電力は、距離とデータ量に依存するとする。ノードが故障したとき、何の動作もできなくなるとする。

本問題は典型的な組合せ最適化問題であり、最適解を短時間で算出することは難しい。そこで、本問題を効率的に解くための近似アルゴリズムとしてレイヤ切替法を提案する。レイヤ切替法は、フィールドを 1 重被覆するノードの集合（レイヤ）を複数求め、 $k$  重被覆を達成するために  $k$  個のレイヤを同時に稼働させる点に特色がある。故障ノードによるデータ収集木分断の影響を、そのノードが属するレイヤのみに留めるため、レイヤごとに独立にデータ収集経路を構築する。

提案手法の  $k$  重被覆時間延長の性能を評価するために、提案手法と  $k$  重被覆時間を延長する既存手法の比較実験をシミュレーションにより行った。その結果、提案手法は既存手法よりもノードが故障したときに保つことのできる平均被覆数が約 1.03 倍多くなる一方、 $k$  重被覆時間の減少は約 5%にとどまることが確認できた。

## 2. 問題設定と定式化

本章では、本稿で取り扱う WSN のモデルおよびその仮定を示し、また WSN の  $k$  重被覆時間最大化問題の定式化について述べる。

### 2.1 WSN モデル、仮定、および諸定義

多数のバッテリー駆動のセンサノードがフィールドに配置され、ノードが定期的に環境情報（温度、湿度、日光、移動オブジェクトなど）をセンシングし、マルチホップ通信で基地局に対して送信するデータ収集型 WSN を対象とする。フィールド、基地局、センシング頻度をそれぞれ  $Field$ ,  $B_s$ ,  $I$  で表す。ノードの集合を  $S = \{s_1, \dots, s_l\}$  で表す。

各センサノードはタイマを備えているとする。各ノードにはセンシング、中継、スリープの 3 つの動作モードがあり、それらを切り替えることができるとする。各ノードを動作モードにあわせてセンシングノード、中継ノード、スリープノードと呼ぶ。センシング、中継、スリープノードをそれぞれ  $U = \{u_1, u_2, \dots\}$ ,  $V = \{v_1, v_2, \dots\}$ ,  $W = \{w_1, w_2, \dots\}$  で表す ( $U \cup V \cup W = S$ )。センシングノードは環境情報のセンシングおよびデータの送受信を行うとする。中継ノードはセンシングをせず、データの送受信のみを行うとする。スリープノードはセンシングもデータの送受信も行わないとする。センシングおよび中継ノードは、基地局からデータを受信しての動作モードの変更が可能であるが、スリープノードは設定されたスリープ期間を終えるまで動作モードの変更はできない。

各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  $R$  の円とする。ノ

ド  $s \in U$  のセンシング範囲を  $s.range$  で表す。各ノードは、センシングによりサイズ  $D$  のデータを取得し、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とする。

各ノードは無線通信機能を搭載しており、電波到達範囲はそのノードを中心とした円とする。センシング、中継ノードは無線通信機能を使用可能であるとする。

通信電波を発するノードの電波到達範囲内に他のノードが存在するとき、100%の確率で通信内容を受信でき、この範囲内に無いときは全く受信できないとする。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とするセンシング周期  $I$  は十分長く、ノード間の電波の干渉は無視できるとする。

基地局は各ノードの位置を知ることができるとする。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全ノードにモード切り替えの指示や新たなデータ収集経路の情報を直接届けることができるとする。

センサノードは有限容量のバッテリーを持ち、バッテリーの交換は出来ないものとする。初期バッテリー量を  $e_{init}$ 、時刻  $t$  におけるノード  $s$  のバッテリー残量を  $s.energy[t]$  で表す。ノードのバッテリーはデータの送受信、センシング、待機時、スリープ時に消費されるとする。

$x[\text{bit}]$  を  $d[\text{m}]$  通信するための電力量  $Trans(x, d)$ 、および、 $x[\text{bit}]$  を受信するための電力量  $Recep(x)$  は下式 (1) (2) に従うとする<sup>6)</sup>。

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

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

ここで、 $E_{elec}$  はハードウェアの消費電力係数、 $\epsilon_{amp}$  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。

ノードはセンシングのための電力、待機時の電力、スリープ時の電力を消費する。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量  $Sens()$ 、 $y[\text{s}]$  時間待機するための電力量  $Listen(y)$ 、および、 $y[\text{s}]$  時間スリープするための電力量  $Sleep(y)$  は下式 (3) (4)、(5) に従うとする。

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

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

$$Sleep(y) = E_{sleep} \times y \quad (5)$$

ここで、 $E_{sens}$ 、 $E_{listen}$ 、 $E_{sleep}$  は、それぞれセンシングのための電力消費係数、待機時の単位時間あたりの電力消費係数、スリープ時の単位時間あたりの電力消費係数である。

ノードがバッテリー切れとなったとき、もしくは故障したときには、すべての動作ができなくなるとする。誤ったメッセージを流したり、誤った時刻にメッセージを流すような故障は

起こらないとする．時刻  $t_1$  でノード  $s$  が故障した場合，バッテリー切れの際と同様の扱いをするため，時刻  $t_1$  以降の  $s$  の電力が 0 であるとみなす ( $s.energy[t_2] = 0$ ，ただし  $t_1 \leq t_2$ )．

## 2.2 問題の定式化

時刻  $t_{start}$  での入力として  $Field$ ，基地局  $B_s$  の  $B_s.pos$ ，ノード  $s \in S$  の  $s.pos$ ， $s.range$ ， $s.energy[t_{start}]$ ，定数  $E_{elec}$ ， $\epsilon_{amp}$ ， $E_{sens}$ ， $E_{listen}$ ， $E_{sleep}$ ， $n$ ， $D$ ， $I$  を与える．

本問題の出力は，各ノードの動作モードおよびデータ送信先のスケジュールであり，これについて次で説明する．ここで，データ収集経路を木構造で表す（データ収集木とよぶ）．

$t_{end}$  を，ノードの故障やバッテリー切れにより WSN の  $k$  重被覆が維持できなくなる時刻  $t_{life}$ （後述）よりも十分大きい時刻とする．各ノード  $s \in S$  と，各時刻  $t \in [t_{start}, t_{end}]$  において， $Mode(s, t)$  を時刻  $t$  における  $s$  の動作モードとする．動作モードのスケジュールを時間  $[t_{start}, t_{end}]$  における  $s$  の動作モードの移り変わりとし，下式 (6) で表す．図 1 に動作モードのスケジュールの例を示す．

$$modeschedule(s, [t_{start}, t_{end}]) = \bigcup_{t \in [t_{start}, t_{end}]} \{Mode(s, t)\} \quad (6)$$

また，各ノード  $s \in S$  と，各時刻  $t \in [t_{start}, t_{end}]$  において， $Send(s, t)$  を時刻  $t$  における  $s$  が保持するセンシングデータの送信先とする．データ送信先のスケジュールを時間  $[t_{start}, t_{end}]$  における  $s$  のデータ送信先ノードの移り変わりとし，下式 (7) で表す．

$$sendschedule(s, [t_{start}, t_{end}]) = \bigcup_{t \in [t_{start}, t_{end}]} \{Send(s, t)\} \quad (7)$$

WSN が  $k$  重被覆を維持できなくなる時刻  $t_{life}$  を，下式 (8) を満たさない状態になる時刻とする．

$$\forall t \in [t_{start}, t_{end}], \forall pos \in Field, |Cover(pos, t)| \geq k. \quad (8)$$

ここで，

$$Cover(pos, t) \stackrel{def}{=} \{s | s \in S \wedge pos \in s.range \wedge Mode(s, t) = sensing \wedge s.energy[t] > 0\}. \quad (9)$$

式 (8) は， $S$  のある部分集合によりフィールドが  $k$  重被覆されている状態を表す．

本問題は，WSN が  $k$  重被覆を維持できなくなる時刻  $t_{life}$  を最遅化するような，各ノード  $s \in S$  の動作モードのスケジュール  $modeschedule(s, [t_{start}, t_{end}])$  およびデータ送信先のスケジュール  $sendschedule(s, [t_{start}, t_{end}])$  を決定する問題であり，目的関数は下式 (10) で示される．

$$\text{maximize } (t_{life}) \text{ subject to } (8) \quad (10)$$

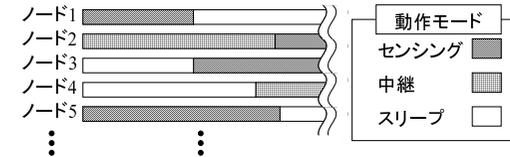


図 1 各ノードの動作モード切替スケジュール  
Fig. 1 Schedule for Switching Operation Mode

## 3. 近似アルゴリズム

2.2 節で示した問題は組合せ最適化問題であり，最適解を短時間で算出することは難しい．よって，本問題において，時間を多期間に区切り，一期間にわたって維持される最適な各ノードの動作モードとデータ収集経路を繰り返し決定する変形問題を解くアプローチをとる．以下では変形問題を効率的に解くための近似アルゴリズムとしてレイヤ切替法を提案する．

### 3.1 レイヤ切替法

WSN は，一部のノードが故障しても動作を続けることがしばしば要求される．そこで，ノードの故障を考慮した WSN の  $k$  重被覆時間最大化手法として，レイヤ切替法を提案する．

レイヤ切替法のアイデアを以下に述べる．フィールドの  $k$  重被覆を保証するため， $S$  から，フィールドを 1 重被覆可能なノード集合（ここではレイヤとよぶ）を複数求め， $k$  個のレイヤを同時に稼働させる．各レイヤに属するノードのバッテリー消費量を均一にするよう，稼働させる  $k$  個のレイヤを適切に選択する．あるノードの故障が起きたときに基地局へのパスが分断されるノードの割合を一定以下に抑えるため，レイヤごとにデータ収集木を独立に作成する．稼働していないレイヤに属するノードは，将来，センシングノードになるため，中継ノードとしてバッテリーを消費するのは得策ではない．そこで，どのレイヤにも属さないノードを中継ノードとして割り当てる．ノードの故障やバッテリー切れによってフィールドの 1 重被覆を満たさなくなったレイヤ（ここでは，レイヤの崩壊と呼ぶ）を再利用するため，どのレイヤにも属さないノードを崩壊したレイヤに加えて  $k$  重被覆性を修復する．

レイヤ切替法の耐故障性能の特徴としては，あるレイヤが崩壊したとき，別のレイヤに切り替えることにより，フィールドの  $k$  重被覆を保つことが可能なことである．ノードの故障が同時に発生したときでも， $k$  個未満であれば，1 重以上のフィールドの被覆が保証できる．

レイヤ切替法において，各ノードの動作モードをいつ，どのように切り換えるかのアルゴリズムを以下で示す．このアルゴリズムは初期配置の直後に実行する．

- (1) 入力としてセンサノードの集合  $S$  を与える．
- (2) 基地局がレイヤ分割アルゴリズム (3.1.1 節で後述) を用いて，なるべく多くのレイヤ（フィールドを 1 重被覆可能なノード集合） $L = \{L_1, L_2, \dots, L_i\}$  を作成する．

- (3) 基地局が各レイヤに対して負荷均等木構築法でデータ収集木  $G = \{G_1, G_2, \dots, G_i\}$  を作成する。
- (4) 基地局がレイヤ選択アルゴリズム (3.1.2 節で後述) を使用して,  $k$  枚のレイヤを選択し, それらのレイヤに属するすべてのノードをセンシングノード集合  $U$  とする。選択可能なレイヤの数が  $k$  未満なら WSN の稼働を終了させる。
- (5) 基地局が中継ノード決定アルゴリズム (3.1.3 節で後述) を用いて, 中継ノードの集合  $V$  を決定し,  $G$  を修正する。
- (6) 基地局がスリープノードの集合  $W$  を  $W = S - U - V$  となるように決定する。
- (7) 基地局が再計算時刻 (後述) を計算する。
- (8) 基地局が計算結果 ( $U, V, W, G$ , 再計算時刻) を各ノードに通知する。
- (9) 各ノードが動作モードやデータ送信先を基地局からの指示通りに変更する。スリープノードは再計算時刻にスリープ状態を解除するようタイマをセットする。
- (10) WSN が稼働し, 再計算時刻まで待つ。
- (11) 再計算時刻になると, スリープノードがスリープ状態を解除し, 基地局からの次の指示を受け取れるように無線通信機能を起動する。
- (12) 各レイヤの 1 重被覆性をチェックし, ノードの故障やバッテリー切れにより, 崩壊したレイヤすべてに対して, 基地局がレイヤ修復アルゴリズム (3.1.4 節で後述) を使用して, 崩壊したレイヤの修復を行う。
- (13) ステップ 12 において, レイヤ修復アルゴリズムが修復完了であれば, 基地局が負荷均等木構築法によりそのレイヤのデータ収集木を新たに作成する。修復不可能であればそのレイヤを  $L$  から削除する。
- (14) バッテリー切れになったノードがあれば  $S$  から除き, ステップ 4 に戻る。

本手法では, 故障ノードに対応するため, 一定の期間  $T$  ごとにノードのスリープ状態を解除するアプローチをとる。ただし, 期間  $T$  以内にいずれかのノードのバッテリー切れが発生することが予測される場合は, その予測時刻  $t_{exh}$  に再計算を行う。 $t_{exh}$  の計算が行われる時刻を  $t_{now}$  としたとき,  $t_{exh}$  を下式 (11) で示す。

$$t_{exh} = t_{now} + \min_{s \in S} \left( \frac{s.energy[t_{now}]}{C(s)} \right) \quad (11)$$

ここで,  $C(s)$  はノード  $s$  の単位時間当りの電力消費量であり, 下式 (12) で与える。センシングノード  $s \in U$  の場合

$$C(s) = I \times (Sens() + Trans(D \times (s.desc + 1), Dist(s, s.send)) + Recep(D \times s.desc)) + Listen(1) \quad (12)$$

中継ノード  $s \in V$  の場合

$$C(s) = I \times (Trans(D \times (s.desc), Dist(s, s.send)) + Recep(D \times s.desc)) + Listen(1) \quad (13)$$

スリープノード  $s \in W$  の場合

$$C(s) = Sleep(1) \quad (14)$$

ここで,  $s.desc$  はデータ収集木の中の  $s$  をルートとしたサブツリーに含まれる  $s$  以外のセンシングノードの数 (子孫ノードの数) である。 $s.send$  は,  $s$  がデータを送る先のノードである。 $Dist(s_1, s_2)$  は  $s_1$  と  $s_2$  の間の距離である。

以上より, 現在の時刻を  $t_{now}$  としたとき, 再計算時刻を下式 (15) で示す。

$$\min(t_{now} + T, t_{exh}) \quad (15)$$

レイヤ切替法には以下の 4 部位がある:(1) レイヤ分割アルゴリズム (2) レイヤ選択アルゴリズム (3) 中継ノード決定アルゴリズム (4) レイヤ修復アルゴリズム。

### 3.1.1 レイヤ分割アルゴリズム

レイヤ分割アルゴリズムのアルゴリズムを以下に示す:

- (1)  $N$  をノードの集合,  $L$  をレイヤの集合とし,  $N = S, L = \emptyset$  とする ( $S$  は全ノードの集合)。 $i = 0$  とする。
- (2)  $N$  の中から 1 重被覆を達成するノード集合 (レイヤ)  $L_i$  を, 1 重被覆により貢献するノードを優先的に選択する操作を繰り返すことで作成し,  $L$  に加える。レイヤを作成できなければ終了する。
- (3)  $N \leftarrow N - L_i$  とする。
- (4)  $i \leftarrow i + 1$  として, ステップ 2 に戻る。

### 3.1.2 レイヤ選択アルゴリズム

レイヤ選択アルゴリズムを以下に示す:

- (1) 初期値として, 本アルゴリズムが呼び出される時刻  $t_{now}$ , レイヤの集合  $L = \{L_1, L_2, \dots, L_i\}$  を与える。
- (2) すべてのレイヤに対して, 所属ノードのうちの, 時刻  $t_{now}$  における最低のバッテリー量を求める (ここではレイヤ稼働時間とよぶ)。
- (3) レイヤ稼働時間が大きいレイヤから順に,  $k$  枚のレイヤを選択して終了する。

### 3.1.3 中継ノード選択アルゴリズム

中継ノード選択アルゴリズムを以下に示す。

- (1) 初期値として, ノードの集合  $P = U$  ( $U$  はセンシングノードの集合), 中継ノードの集合  $V = \emptyset$  を与える。また, どのレイヤにも属さないノードの集合を  $Q$  とする。
- (2)  $P$  の中で, 式 (1) で示される通信電力  $Trans(D \times s_1.desc, s_1.send)$  が最も大きいノード  $s$  を選択する。

表 1 共通パラメータ  
Table 1 Common configuration for experiments

| パラメータ           | 値  |
|-----------------|--|
| 各ノードの初期電力量      | $s.energy = 32400J$ (AA バッテリ 2 個)        |
| データ処理にかかる電力消費係数 | $E_{elec} = 50nJ/bit$ (文献 8))            |
| 信号増幅にかかる電力消費係数  | $\epsilon_{amp} = 100pJ/bit/m^2$ (文献 8)) |
| 電波の減衰係数         | $n = 2$ (文献 8))                          |
| センシング時の消費電力係数   | $E_{sens} = 0.018J$ (文献 9))              |
| 待機時の消費電力係数      | $E_{listen} = 0.043J/s$ (文献 9))          |
| スリープ時の消費電力係数    | $E_{sleep} = 0.000054J/s$ (文献 9))        |
| 各ノードのセンシング範囲の半径 | $R = 20m$ (文献 10))                       |
| フィールドの必要被覆数     | $k = 1, 2, 3$                            |
| センシングのデータサイズ    | $D = 116bit$ (文献 11))                    |
| パケットのサイズ        | 128bit (文献 11))                          |
| センシング頻度         | $I = 0.1Hz$ (文献 11))                     |

- (3)  $s$  と  $s.send$  を結ぶリンクの midpoint に最も近いセンシングしないノード  $s_{relay} \in Q$  を発見する．そのようなノードがなければ終了する．
- (4)  $s$  の単位時間あたりの消費電力  $C(s)$  が小さくなる場合， $s_{relay}$  にそのリンクを中継させ， $s_{relay}$  を  $V$  に入れる．それ以外の場合では何もしない．
- (5)  $P$  から  $s$  を除く．
- (6)  $P = \emptyset$  ならば終了し，そうでなければステップ 2 に戻る．

### 3.1.4 レイヤ修復アルゴリズム

レイヤ修復アルゴリズムを以下に示す：

- (1) 初期値として，どのレイヤにも属していないノード集合  $N$ ，レイヤ集合  $L$ ，崩壊したレイヤ  $L_1$ ， $L_1$  の全ノードの被覆領域  $Area$ ，フィールド  $Field$  を与える．
- (2)  $N$  の中でフィールド内の欠けた領域  $Field - Area$  を最も広く被覆するノード  $s_1$  を  $L_i$  に追加し， $N$  から  $s$  を除く． $N = \emptyset$ ，もしくは欠けた領域を被覆する  $N$  のノードがなければ修復不可能として終了する．
- (3)  $Area$  を再計算し，フィールドを 1 重被覆していれば修復完了として終了する．そうでなければステップ 2 に戻る．

## 4. 実験および考察

提案手法の  $k$  重被覆時間延長に対する効果および耐故障性能を評価するために，提案アルゴリズムおよび既存の  $k$  重被覆時間延長手法の比較実験（実験 1~3）をシミュレーションにより行った．

本実験において用いた共通パラメータを表 1 に示す．本実験を行った計算機は，Intel Core2Duo E6600 (2.4GHz)，1GB メモリ，Windows XP Professional，Sun Java Runtime Environment 1.6.0.02 のデスクトップ PC である．

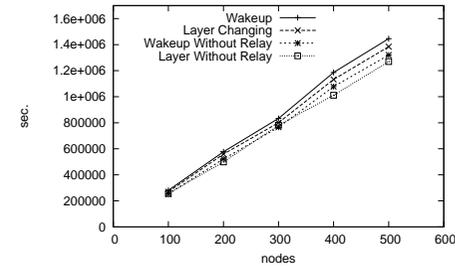


図 2 ノード数を変えたときの WSN の  $k$  重被覆時間  
Fig. 2 WSN Lifetime Depending on the Number of Nodes

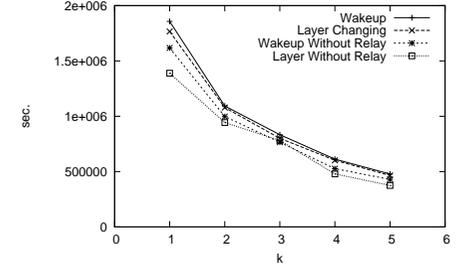


図 3  $k$  を変えたときの WSN の  $k$  重被覆時間  
Fig. 3 WSN Lifetime Depending on  $k$

### 4.1 実験 1

本実験では，ノードの故障を想定しない場合において，ノード数を変更したときの，提案手法の解による WSN の  $k$  重被覆時間を評価する．提案手法の各機能の効果を確かめるため，以下の比較手法を用いた．(i) **Wakeup** は文献 12) で勝間らが提案した， $k$  重被覆時間延長のための動作モードスケジューリング手法（逐次起動法とよぶ）である．(ii) **Layer Changing** は本稿で提案したレイヤ切替法である．(iii) **Wakeup Without Relay** は逐次起動法から中継ノードを決定する部位を除いた手法である．(iv) **Layer Without Relay** はレイヤ切替法から中継ノード選択アルゴリズムを除いた手法である．

本実験で用いたパラメータは，表 1 のものと，フィールドサイズ  $50m \times 50m$ （基地局はフィールドの下端中央），ノード数  $100 \sim 500$ （ $100$  刻みで変更）， $k=3$  とした．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．

本実験の結果を図 2 に示す．この結果は 10 試行の平均値である．

図 2 より，Wakeup は Layer Changing よりも WSN の  $k$  重被覆時間が約 1.05 倍長いことが確認できた．これは，バッテリー切れノードが発生した際に，各ノードの最適な動作モードやデータ収集木が変化するが，レイヤ切替法によって変更しうる各ノードの動作モードやデータ収集木の範囲が逐次起動法よりも限定されてしまうためであると考えられる．また，Layer Changing は Layer Without Relay よりも WSN の  $k$  重被覆時間が約 1.4 倍長いことが確認できた．このことから，レイヤ切替法において，中継ノード選択アルゴリズムにより通信距離を調整することが，WSN の  $k$  重被覆時間延長に対して有効であることが示された．また，すべての手法において  $k$  重被覆時間がノードの数にほぼ比例して増加している．これは，使用中のセンシングノードがバッテリー切れになるまで他の過剰なノードはスリープ状態で待機して，バッテリーを温存できているからだと考えられる．

本実験での再計算時間は， $500$  ノードの WSN の場合，逐次起動法は最大約  $0.4$  秒，レイヤ切替法は最大約  $0.1$  秒であった．これより，実行時間で計算できることが確認できた．

表 2 故障ノードが発生したときの平均被覆数  
Table 2 Average of Coverage

| k  | 逐次起動法  |        |        | レイヤ切替法 |        |        |
|----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|    | 最小     | 平均     | 最大     | 最小     | 平均     | 最大     |
| 1  | 0.3817 | 0.8968 | 0.9398 | 0.3820 | 0.8961 | 0.9402 |
| 2  | 0.7441 | 1.8474 | 1.9674 | 1.3824 | 1.8987 | 1.9697 |
| 3  | 1.0765 | 2.7694 | 2.9768 | 2.3821 | 2.9013 | 2.9798 |
| 4  | 1.4283 | 3.7300 | 3.9832 | 3.3822 | 3.9019 | 3.9878 |
| 5  | 1.7685 | 4.7200 | 4.9862 | 4.3818 | 4.9045 | 4.9878 |
| 6  | 2.1203 | 5.7612 | 5.9849 | 5.3818 | 5.9061 | 5.9899 |
| 7  | 2.4914 | 6.7476 | 6.9880 | 6.3825 | 6.9092 | 6.9913 |
| 8  | 2.8428 | 7.7236 | 7.9904 | 7.3819 | 7.9095 | 7.9924 |
| 9  | 3.1946 | 8.6978 | 8.9926 | 8.3820 | 8.9120 | 8.9932 |
| 10 | 3.5953 | 9.6714 | 9.9898 | 9.3818 | 9.9139 | 9.9939 |

4.2 実験 2

本実験では、ノードの故障を想定せず、必要被覆数  $k$  を変更したときの、提案手法の解による WSN の  $k$  重被覆時間延長の性能を評価する。比較手法は実験 1 と同様である。

本実験でのパラメータは実験 1 とほぼ同様である。実験 1 からの変更点は、ノード数は 300、 $k=1 \sim 5$  (1 刻みで変更) とした点である。

本実験における結果を図 3 に示す。この結果は 10 試行の平均値である。

図 3 より、すべての手法において、 $k$  の増加にともなって  $k$  重被覆時間が大きく減少している。これは、 $k$  の値が増えると  $k$  重被覆に必要なセンシングノードの数も増え、バッテリーを温存できるノードが少なくなるからだと考えられる。また、 $k$  の値にかかわらず、比較手法の優劣関係は変化しないことが確認できた。以上より、 $k$  の値にかかわらず、レイヤ切替法の中継ノード選択アルゴリズムが WSN の  $k$  重被覆時間延長に有効であることが示された。

4.3 実験 3

本実験では、センシング・中継ノードのうちのランダムな 1 ノードが故障した場合におけるフィールドの被覆の減少度合いについて、逐次起動法とレイヤ切替法の差を評価する。

ここでは、あるセンシングノードまたは中継ノードの故障発生後、データ収集木が修復される前の状態におけるフィールドの平均被覆数を評価する。ここで言うフィールドの平均被覆数とは、フィールドを一辺 1 メートルの格子状に区切ったときのすべての格子点における被覆数を計測し、その平均値とする。ただし、格子点における被覆数が  $k$  を超えているときは  $k$  に補正した後に平均をとる。

本実験で用いたパラメータは、表 1 のものと、フィールドサイズ 100m × 100m (基地局はフィールドの下端中央)、ノード数 300、 $k=1 \sim 10$  (1 刻みで変更) とした。

本実験における結果を表 2 に示す。平均被覆数は故障ノードの発生位置によって大きく変化するため、最小 (データ収集木中において故障ノードの発生位置が最悪の場合)、平均、最大について示した。この結果は 300 試行の平均値である。

表 2 より、センシングノードや中継ノードが故障した場合において、 $k$  が 2 以上のとき、レイヤ切替法は逐次起動法よりも平均被覆数が約 1.03 倍多いことが確認できた。また、データ収集木中において故障ノードの発生位置が最悪の場合、逐次起動法では平均被覆数が  $k$  よりも格段に悪くなったが、レイヤ切替法では常に  $k - 1$  以上の被覆を保っている。これは、逐次起動法ではすべてのセンシングノードに対して 1 つのデータ収集木を構築しているが、レイヤ切替法ではレイヤごとに独立なデータ収集木を構築するため、故障が発生した際に基地局へのパスが分断されるノードが少ないからである。以上より、ノードの故障が発生したとき、レイヤ切替法は逐次起動法よりも被覆数減少への影響が少ないことが確認できた。

5. あとがき

本稿では、センシング、中継、スリープの動作モードを備えているセンサノードを用いたデータ収集型 WSN において、WSN の  $k$  重被覆時間を最大化する手法を提案した。提案手法では、耐故障性能を高めるため、フィールドを 1 重被覆するレイヤを複数作成し、レイヤごとにデータ収集木を独立に構築する点に特色がある。そのため、あるレイヤに属するノードが故障しても、データ収集木分断の影響が他レイヤに及ぶことを防ぐことができる。

シミュレーションの結果、故障ノードが発生した場合、レイヤ切替法は逐次起動法よりも、約 1.03 倍の被覆数を保つことを確認した。

参考文献

- 1) Fukatsu, T. and Hirafuji, M.: "Long-Term Monitoring System using Field Monitoring Servers," *Proc. of AFITA/WCCA Joint Congress on It In Agriculture*, pp. 685-691 (2004).
- 2) Cao, Q., Abdelzaheer, T., He, T., Stankovic, J.: "Towards Optimal Sleep Scheduling in Sensor Networks for Rare-Event Detection," *Proc. of Information Processing in Sensor Networks (IPSN2005)*, pp. 20-27, 2005.
- 3) Ma, J., Lou, W., Wu, Y., Li, X.Y., and Chen, G.: "Energy Efficient TDMA Sleep Scheduling in Wireless Sensor Networks," *Proc. of 28th IEEE Int'l Conf. on Computer Communications (Infocom2009)* (2009).
- 4) Poduri, S., Sukhatme, G.S.: "Constrained coverage for mobile sensor networks," *Proc. of Int'l Conf. on Robotics and Automation (ICRA2005)*, pp. 165-171, 2005.
- 5) Yang, S., Cardei, M., Wu, J., and Patterson, F.: "On Connected Multiple Point Coverage in Wireless Sensor Networks," *Proc. of Int'l Journal of Wireless Information Networks*, Vol.13, No.4, pp. 289-301, 2006.
- 6) 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)*, 2000.
- 7) 勝間亮, 村田 佳洋, 柴田 直樹, 安本 慶一, 伊藤 実: "移動センサノードを用いたデータ収集型 WSN での  $k$  重被覆保持時間の最大化手法" 情報処理学会論文誌 数理モデル化と応用 Vol2, No.3, pp. 75-86 (2009).
- 8) Wang, G., Cao, G., La Porta, T., and Zhang, W.: "Sensor Relocation in Mobile Sensor Networks," *Proc. of Infocom 2005*, Vol. 4, pp. 2302-2312, 2005.
- 9) Crossbow Technology, Inc. 2003: "MICA2: Wireless Measurement System," [http://www.xbow.com/Products/Product\\_pdf\\_files/Wireless.pdf/MICA.pdf](http://www.xbow.com/Products/Product_pdf_files/Wireless.pdf/MICA.pdf).
- 10) Ganeriwala, 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)* (2004).
- 11) 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)* (2004).
- 12) Katsuma, R., Murata, Y., Shibata, N., Yasumoto, K., and Minoru, I.: "Extending k-Coverage Lifetime of Wireless Sensor Networks with Surplus Nodes," *Proc. of Int'l. Conf. on Mobile Computing and Ubiquitous Networking (ICMU2010)* (2010).