

WSN の k 重被覆維持時間最大化のための 分散計算によるスリープスケジューリング手法

勝 間 亮^{†1} 村 田 佳 洋^{†2} 柴 田 直 樹^{†3}
安 本 慶 一^{†1} 伊 藤 実^{†1}

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，監査対象領域の k 重被覆維持時間を最大化する，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し，この問題を分散計算により解く手法を提案する．提案手法ではフィールドを格子状の小領域に分割し，各格子を k 重被覆することによりフィールド全体を k 重被覆する．WSN の稼働時間を延ばすためには，より少ないノードで k 重被覆を達成することでバッテリーを温存できるノードを増やすことが望ましい．しかし，各格子で独立に k 重被覆するようセンシングノードを選択すると，格子の境界付近で被覆度が過剰になりやすいという問題がある．この問題に対し，提案手法では隣接する格子が同色にならないように各格子を黒と白の 2 色に塗り分け，先に各白領域を k 重被覆するノード集合を決定し，黒領域では，白領域の被覆情報を用いて効率的に k 重被覆を完成させる．

A Distributed Sleep Scheduling Method to Maximize k -Coverage Lifetime for WSN

RYO KATSUMA,^{†1} YOSHIHIRO MURATA,^{†2} NAOKI SHIBATA,^{†3}
KEIICHI YASUMOTO^{†1} and MINORU ITO^{†1}

In this paper, we propose a distributed method for maximizing the lifetime of a wireless sensor network constructed by massive number of sensor nodes, by making minimum number of nodes operate and putting other nodes in sleep. We first formulate the problem to decide the operating mode for each sensor node and the multi-hop communication path at each time to maximize the k -coverage time. We propose a distributed method to solve this problem by dividing the field into multiple grids and k -covering each grid. It is desired to reduce the battery consumptions of as many nodes as possible by minimizing the number of active nodes which k -cover the field. However, coverage degree is likely to go to excess beyond k near the border line between grids. To solve this problem, our method divides the

set of grids into black and white so that the same color grids do not adjoin each other. First, in each white grid, our method decides the set of active nodes k -covering the white grid. Next, it decides the minimal set of active nodes in each black grid by taking into account the coverage of the active nodes used in adjoined white grids.

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収集するデータ収集型 WSN がある．

データ収集型の WSN アプリケーションには農地の温度管理などがあり，そ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²⁾³⁾⁴⁾．

一方，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）のすべての地点が各ノードによりセンシング可能である（フィールドが被覆されている）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．それらの要求を満たすため，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．

広大，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方法があり，フィールドを k 重被覆するためには過剰多数のノードを散布しなければいけない．これまで，著者は， k 重被覆に必要な十分なノードのみを稼働させ，残り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 重被覆時間を延長する手法を提案してきた¹⁰⁾¹¹⁾．しかし，この手法は基地局で集中計算を行っているため，ノード数が多くなると，計算ためのオーバーヘッド（各ノードのバッテリー情報の取得等）が大きくなり，計算時間が長くなってしまいう問題がある．

^{†1} 奈良先端科学技術大学院大学
Nara Institute of Science and Technology

^{†2} 広島市立大学
Hiroshima City University

^{†3} 滋賀大学
Shiga University

そこで、本稿では、データ収集型 WSN において k 重被覆するために十分な数のノードがフィールド上に散布されているとき、 k 重被覆維持時間を最大化するための、分散計算によるノードのスリープスケジューリング手法を提案する。

本研究で取り扱う問題の仮定として、 k 重被覆に十分な数のセンサノードが配置されるとする。センサノードはスリープ、中継、センシングの 3 つの動作モードを自由に切り替えることができるとする。センシングモードでは、フィールド上で、そのノードを中心とした一定半径の円内を被覆できる。中継・センシングモードでは、データを送受信できる。スリープモードは他モードへの移行しかできないが、待機電力が他モードよりも小さい。

対象問題は、フィールドの k 重被覆維持時間が最大となる、各ノードの動作モードの切り替えスケジュールを決定する問題である。すべてのノードに対してすべての期間の動作モードを決定することは解空間が大きく、NP 困難な問題であると予想される。そこで提案手法では、フィールドを格子状の小領域に分割し、各領域に存在するノードの中で最もバッテリーが多いノードがリーダーとなり、自身が属する領域を被覆範囲に含むすべてのノードの動作モードを決定する。これを定期的に繰り返すことにより、各ノードの動作モードのスケジュールを求める。ここで、各領域において独立に k 重被覆を完成させると、格子の境界線周辺では被覆度が過剰になる可能性がある。この問題に対処するため、各格子状領域を、隣り合う領域が同色にならないように白領域と黒領域に塗り分け、まずは白領域のみを k 重被覆する。黒領域では、白領域でセンシングモードと決定されたノードの被覆範囲を考慮し、効率的に k 重被覆を完成させる。

以下、2 章では、関連研究について述べ、提案手法の位置づけを明確化する。3 章では、提案方式で扱う問題を定式化する。4 章では、対象領域を k 重被覆し、かつ、WSN の k 重被覆時間を最大化する各ノードのモードとデータ収集経路を決定するアルゴリズムを述べる。最後に、5 章で、まとめを述べる。

2. 関連研究

WSN のアプリケーションの種類としては、イベントが発生し、それを検知したノードのみがデータを基地局に送信するイベント検知型³⁾、特定のノードにクエリを送信し、それを受け取ったノードのみがデータを基地局に送信するクエリ型⁴⁾、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などがある。本稿はデータ収集型 WSN を対象とする。例として、フィールドサーバと呼ばれるものがある¹⁾。これは農業用地に温度や光量を検知するセンサノードを多数配置し、それらがセンシングした情報を収集するアプリ

ケーションである。フィールドサーバは 2 年以上のメンテナンスフリーでの使用が想定されている。このように、WSN は長期間の動作を求められることが多い。しかし、設置コスト等の理由により、センサノードはバッテリー駆動であるため、WSN の稼働時間にも限界がある。そのため、省電力化によってバッテリー切れノードの発生を抑え、WSN の長期間動作を実現するための研究が行われている。

Heinzelman らは、ノード間通信において情報を集約してから基地局に送信することで、通信する情報量を削減して省電力化する手法を提案した⁷⁾。しかし、センシングデータが映像などを含むアプリケーション（例えば、カメラを使用した映像モニタリング）では、情報集約が困難な場合がある。

一方、ノードのスリープ機能を活用して省電力化する研究が行われている。Cao らは、イベント検知型 WSN で、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ル決定手法を提案した²⁾。スリープ状態では、ノードは消費電力を抑えられるが通信を行うことができず、時限式でアクティブになると仮定している。この手法は、なるべく多くのノードをスリープ状態にしつつ、イベントが起きた際に、それを感じたノードからシンクノードまでのデータ転送を短時間で行えるスリープスケジュールを決定する。Keshavarzian らは、イベント検知型 WSN で、検知されたイベント情報を基地局が受け取るまでの時間に制限を設け、その制約条件内でアクティブなノードの数を最小に抑える手法を提案した³⁾。Ma らは、クエリ型 WSN の省電力稼働を目的とし、各ノードのスリープスケジュール決定のための 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⁴⁾。このアルゴリズムは、ノードの状態遷移（スリープ状態からセンシング可能な状態になるなど）のための消費電力を考慮し、頻繁に状態遷移が起きないようにしている点に特色がある。しかし、これらの研究は、イベント検知型、クエリ型 WSN を対象としており、 k 重被覆性が求められるデータ収集型 WSN は取り扱っていない。国境警備などのアプリケーションでは、フィールドの全被覆に加えて、システムの頑健性やセンシングしたデータの正確性が求められる。それらのアプリケーションでは、フィールドの k 重被覆がしばしば必要とされる。

Bai 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⁵⁾。しかし、危険地域やノード数が膨大である等、求めた位置にノードを正確に配置するのが困難な場合もある。そこで、 k 重被覆のために移動可能なノード（可動ノード）を用いる手法がある。Wang らは、可動ノードと静止ノードが混在する環境において、短時間でフィールドを k 重被覆する手法を提案した⁸⁾。この手法は、初期配置の直後に一度だけ可動ノードが

移動するとして、フィールドの k 重被覆を保証する可動ノードの移動先を求めている。勝間らは、可動ノードと静止ノードが混在する環境において、WSN の k 重被覆時間を最大化する手法を提案した⁹⁾。この手法は、可動ノードを k 重被覆を完成させるように移動させ、なるべくデータ通信における消費電力を均一化するデータ収集経路の構築を行っている。しかし、可動ノードは静止ノードよりも高価であり、また、フィールドに障害物や凹凸のある場所などが含まれているとき、スムーズに動く事ができないため、全ての WSN アプリケーションには可動ノードは適用できないという問題がある。

以上の問題を解決する手法として、著者らは静止ノードからなるデータ収集型 WSN の k 重被覆時間を最大化するスリープスケジューリング手法を提案した¹¹⁾。この手法は、なるべく少数のノードでフィールドを k 重被覆して他の多数のノードをスリープさせ、バッテリー切れノードが発生すると、その代役としてスリープノードをアクティブにする。しかし、この手法は基地局による集中計算を行って計算結果を全ノードに通知する方式であり、ノード数の増加に伴い計算時間や計算結果を通知するためのオーバーヘッドが大幅に増える。

そこで本稿では、データ収集型 WSN において k 重被覆するのに十分な数のノードが配置されているときの、 k 重被覆維持時間の最大化問題を定式化し、その問題を解く分散計算型のスリープスケジューリングアルゴリズムを提案する。

3. 問題設定と定式化

3.1 概要

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。本問題の定式化は、文献 11) と同じである。以降で使用する記号を表 1 にまとめる。

3.2 WSN モデル, 仮定, および諸定義

(1) 対象 WSN の仮定

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 $Field$, Bs , 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おり、また、センシング, 中継, スリープの 3 つの動作モードを持ち、それらを切り替えることができる。動作モードに応じ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, スリープノードの集合をそれぞれ

$U = \{u_1, u_2, \dots\}$, $V = \{v_1, v_2, \dots\}$, $W = \{w_1, w_2, \dots\}$ 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。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。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。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即時に動作モードを変更できるが、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。また、各センサノードには重複しない固有の ID が付与されている。

表 1 記号表
Table 1 Notations

Notation	Meaning
$Field$	センシング対象のフィールド
$Bs, Bs.pos$	基地局およびその位置
I	WSN のセンシング頻度 [Hz]
D	各ノードがセンシングで取得するデータのサイズ
r_s	各ノードのセンシング範囲の半径
r_c	各ノードの最大電波到達範囲の半径
n	通信距離に対する電波の減衰係数
$Trans(x, d)$	$x[\text{bit}]$ のデータを $d[\text{m}]$ 送信するときの消費電力
$Recep(x)$	$x[\text{bit}]$ のデータを受信するときの消費電力
$Sens()$	センシングのための消費電力
$Listen(y)$	起動状態で y 秒間経過した時の消費電力
$Sleep(y)$	スリープ状態で y 秒間経過したときの消費電力
S	ノードの集合
U	センシングノードの集合
V	中継ノードの集合
W	スリープノードの集合
$s.pos, s.energy[t], s.range$	ノード s の位置, 時間 t におけるバッテリー量, センシング範囲
k	必要とされるフィールドの被覆数

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_s の円である。ノード $s \in U$ 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。

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である。センシング, 中継ノードのみが無線通信機能を使用可能である。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不可能である．ノードは電波の出力を変更することで，最大電波到達範囲の半径 r_c 以下の範囲で，自由に電波到達範囲を変更可能である^{*1}．ただし， r_c は r_s よりも十分大きいとする．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．

(2) 電力消費についての仮定

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できない．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．

$x[bit]$ を $d[m]$ 通信するための電力量 $Trans(x, d)$ ，および， $x[bit]$ を受信するための電力量 $Recep(x)$ は下式 (1), (2) に従う⁷．

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

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

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．

ノードはセンシング時，待機時，スリープ時に，それぞれ異なる電力を消費する．センシングによって $D[bit]$ のデータを取得するための電力量 $Sens()$ ， $y[s]$ 時間待機するための電力量 $Listen(y)$ ，および， $y[s]$ 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．

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

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

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

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当りの電力消費係数である．

3.3 問題の定式化

時刻 t_{start} における本問題の入力として $Field$ ，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} ， ϵ_{amp} ， E_{sens} ， E_{listen} ， E_{sleep} ， n ， D ， I を与える．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．

t_{end} を，ノードの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．

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

各ノード $s \in S$ と各時刻 $t \in [t_{start}, t_{end}]$ に対して，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を $Send(s, t)$ と表す．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．

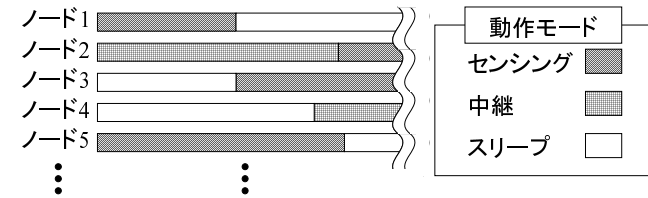


図 1 各ノードの動作モード切替スケジュール

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，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 $sendschedule(s, [t_{start}, t_{end}])$ を決定することであり，目的関数は下式 (10) で示される．

*1 その例として IRIS mote¹²⁾ があり，電波出力を -17.2[dBm] から 3[dBm] まで自由に変更可能である．

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

4. 近似アルゴリズム

4.1 概要

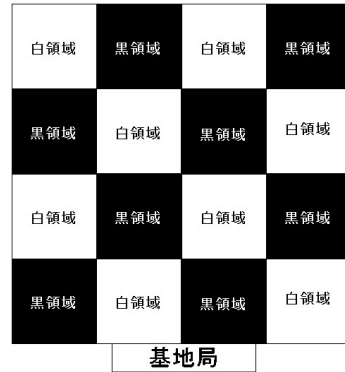


図2 白領域と黒領域への分割

3.3節で述べた問題は組合せ最適化問題であり、すべてのノードに対してすべての期間の動作モードを決定することは解空間が大きく、NP 困難であると予想され、難しい。そこで、本章では本問題を効率的に解くための近似アルゴリズムを述べる。スケーラビリティを考慮し、提案手法は分散計算により対象問題を解く。提案手法では、フィールドを複数の小領域に分割する。各領域を k 重被覆することにより、フィールド全体の k 重被覆を行うが、隣接する領域で同時にセンシングノードの決定が行われると、領域の境界線付近で被覆度が過剰になる可能性がある。例えば、図4で正方形の各領域を1重被覆するとき、ノードEとノードHはどちらかがセンシングしていれば、他方はスリープしていても良い（ノードGとノードJも同様である）。しかし、両領域間で同期をとらずに独立に被覆の計算が行われた場合、センシングノードにするノードを一意に決定することは難しく、ノードEとノードHが共にセンシングノードとなる可能性がある。そのため、提案手法では隣接する領域で異なるタイミングで計算することにより、この過剰被覆度問題に対処する。この際、計算のタイミングを2ステップで終了させるため、格子状に領域を分割する。各格子領域について、隣り合う領域が同色にならないように、白領域と黒領域に塗り分ける（図2）。後に述



図3 隣接領域および通信保証領域

べる提案アルゴリズムでは、白領域で k 重被覆を完成したのち、黒領域において、白領域の計算結果をもとに効率的に k 重被覆する。 k 重被覆の計算は一定時間ごとに行い、計算開始時に、領域内の最もバッテリーが多いノードがリーダーとなり、自身が属する領域を被覆範囲に含むすべてのノードの動作モードを決定する。

以降、ノード配置時の初期設定と、その後に適用される提案アルゴリズムについて述べる。ノード配置時の初期設定では、領域の分割や、各領域の計算を行う順番の決定を行う。提案アルゴリズムでは、各ノードの動作モードとデータ収集経路のスケジュールを決定する。

4.2 ノード配置時の初期設定

本節では、提案アルゴリズム実行前の初期設定について述べる。

まず、フィールドを格子状の小領域に分割する。分割された各領域を $c_1, c_2, \dots, c_i$ で表したとき、 $Field = c_1 \cup c_2 \cup \dots \cup c_i$ である。ある領域 c_j の内部に存在するノードの集合を c_j の所属ノード集合と呼ぶ。ある領域 c_j において k 重被覆の計算の対象となるノードの集合は、領域 c_j の一部をセンシング範囲に含むすべてのノードからなり、 c_j の計算対象ノード集合と呼ぶ。ある領域に属するノードと、その周囲の8領域のどのノードとも通信を1ホップで可能にするため、各領域の大きさは、1辺が $\frac{r_c}{2\sqrt{2}}$ より小さい正方形とする^{*1}。図3に示すとおり、ある領域 c_j の周囲に存在する8領域を c_j の通信保証領域と呼ぶ。

各格子状領域について、隣り合う領域が同色にならないように、白領域と黒領域に塗り分ける（図2）。後に述べるアルゴリズムにおいて、ステップ1では、各白領域で同時に計算を行う。ステップ2では、各黒領域が隣接するすべての白領域の計算終了を確認後、各白領域の計算結果による被覆情報をもとに、計算を行う。

提案アルゴリズムの実行前に、同一の計算対象ノード集合に属するすべてのノードは相互通信を行い、互いのバッテリー量、位置、固有のノードIDを把握する。基地局は、各ノードに対して、どの領域内に属するかの情報と、どの領域の計算対象に入っているかの情報をフラッシングにより送信する。

4.3 提案アルゴリズム

本節では、全体のアルゴリズムの流れを述べたのち、各領域を k 重被覆するために各領域で実行されるアルゴリズムについて述べる。

本手法は、フィールドの k 重被覆を実現するため、一定時間 T ごとに各領域のリーダーとなるノードを再決定し、そのリーダーが各ノードの動作モードを計算することで、各ノー

*1 ここでは最大通信距離 r_c はセンシング範囲半径 r_s よりも十分大きいと仮定している

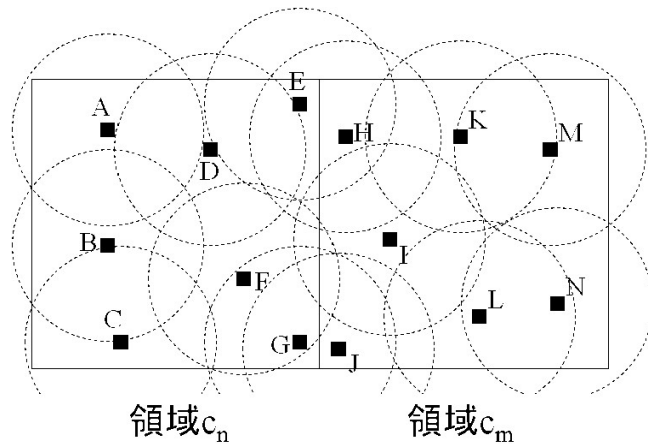


図 4 被覆超過の例

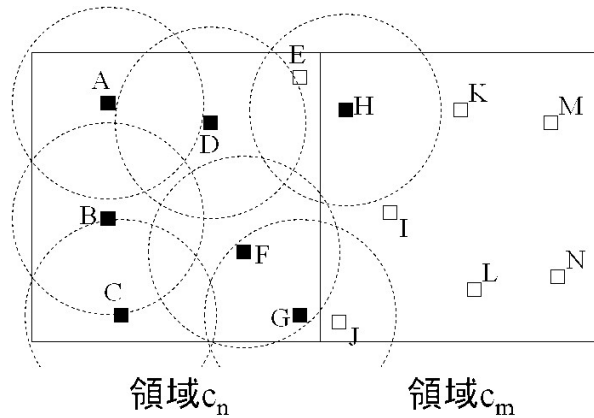


図 5 提案手法による被覆超過防止の例 1

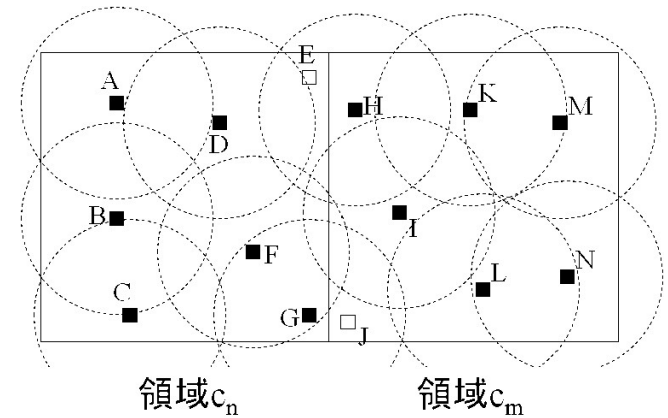


図 6 提案手法による被覆超過防止の例 2

ドの動作モードのスケジュールを決定する手法である。提案アルゴリズムはノード配置時の初期設定の後に実行される。

スリープモードを設定するノードに対して、スリープ状態にする前に、次に起きる時間を設定しなければならない。再計算をするたびに、リーダーから計算結果を受け取れるように、再計算が行われるタイミング（一定時間 T ごと）にスリープ状態を解除させる。

各領域で実行されるアルゴリズムを以下に記述する。

- (1) 各ノードは相互通信により同一の計算対象ノード集合に属するノードのバッテリー情報を収集
- (2) 各領域で、所属ノード集合の中からリーダーノードを選出（後述）
- (3) 各リーダーノードは、隣接領域の所属ノード集合のすべてのノードに通知
- (4) 各白領域では、リーダーノードが領域を k 重被覆するセンシングノードの集合を決定（後述）
- (5) k 重被覆できない領域が存在するとき、WSN の運用を終了
- (6) 各白領域では、すべてのセンシングノードからリーダーノードにデータを収集するための経路を構築
- (7) 各白領域のリーダーノードは、隣接する黒領域のリーダーノードに被覆の情報を通知
- (8) 各黒領域では、隣接するすべての白領域から被覆の情報を受信後、リーダーが領域を

k 重被覆するセンシングノードの集合を決定

- (9) k 重被覆できない領域が存在するとき、WSN の運用を終了
- (10) 各黒領域では、すべてのセンシングノードからリーダーノードにデータを収集するための経路を構築
- (11) 各黒領域のリーダーノードは、隣接する白領域のリーダーノードに被覆の情報を通知
- (12) 各領域のリーダーノードは計算対象ノード集合に属するすべてのノードに動作モード変更通知を送信し、それを受信したノードは動作モードを変更
- (13) WSN を運用し、一定時間 T が経過後、ステップ 1 に戻る

以下、アルゴリズムの各部位の詳細および WSN 運用時のデータ収集手法について述べる。
リーダーノード選出方法

各領域の所属ノード集合に属するすべてのノードが互いに通信を行い、各々のバッテリー量を把握し、その領域での計算対象となるノードの中から、最もバッテリーが多いノードがリーダーノードに選択される。最大バッテリー量をもつノードが複数ある場合、ノード ID の最も若いノードがリーダーノードとなる。ここでは、すべてのノードのバッテリー量と固有 ID を取得した時点で一意にリーダーノードが決定するため、リーダーノードから決定の通知をする必要はない。

センシングノード決定方法

k 重被覆時間を延長するため、できるだけ少数のノードで領域を k 重被覆し、それ以外のノードが通信の中継やスリープを行い、バッテリーを節約する。各領域のリーダーノードは、著者らが文献 11) で提案した逐次起動法により、領域を効率よく k 重被覆するセンシングノードの集合を決定する。逐次起動法は、より k 重被覆に貢献するノードを優先的にセンシングノードにする操作をフィールドが k 重被覆されるまで繰り返す手法である。

提案手法により、フィールドを 1 重被覆する際の被覆の超過が解消する例を、図を用いて説明する。図 4 において、領域 c_n が白領域、領域 c_m が黒領域とする。提案手法では、まず白領域 c_n を 1 重被覆するセンシングノード集合を逐次軌道法により決定する。ここではノード A, B, C, D, F, G, H がセンシングノードとなるとする (図 5)。白領域 c_n のリーダーノードは、黒領域 c_m に影響する被覆情報 (ノード H, F, および G がセンシングノードとして決定されていること) を、黒領域のリーダーノードに送信する。次に、黒領域 c_m を 1 重被覆するセンシングノード集合を決定するが、ここでは黒領域 c_m からノード H, F, および G が被覆する範囲を除いたエリアを 1 重被覆するセンシングノード集合を決定する。逐次起動法により、最も黒領域 c_m の 1 重被覆に貢献するノード L から、M, K, N, I の順にセンシングノード集合に追加され、黒領域 c_m が 1 重被覆される (図 6)。以上より、前述したノード E と H、ノード G と J が共にセンシングノードとなる問題は解決された。

各領域内でのデータ収集経路構築手法

ここでは、リーダーノードに領域内のすべてのセンシングデータを収集するためのデータ収集経路の構築手法について述べる。各センシングノードはリーダーノードをシンクとみなし、この経路に沿ったマルチホップ通信によりデータを送信する。リーダーノードから基地局にデータ収集するための方法は後で述べる。

領域内でのデータ収集のための経路は、各ノードの消費バッテリー量を均一にすることができる既存手法を用いて構築する。ここでは、各ノードは構築された木のリンク長に応じて電波出力を調整し、省電力通信を行う。式 (1) より、通信負荷は通信データ量と通信距離に依存する。データ収集型 WSN では、シンク周辺のノードは自身のデータに加えてシンクから遠い位置にあるノードのデータも中継するため、通信データ量が増え、消費バッテリー量が多くなる傾向がある。そこで、各ノードの通信データ量をなるべく平均化するデータ収集木を構築するために負荷均等木構築法⁹⁾を使用する。負荷均等木構築法で構築したデータ収集木は、シンクから遠い位置にあるノードの通信距離が長くなる傾向がある。そこで、データ収集木の各リンクの通信距離を短くするため、中継ノード選択法¹¹⁾により中継ノードの決

定とデータ収集木の修正を行う。中継ノード選択法は、式 (1) で計算される通信負荷が最大のリンクを発見し、その通信の中継可能な位置にあるスリープノードを中継ノードとして使用することで、データ収集木を修正する手法である。

基地局へのデータ収集手法

各リーダーノードから基地局へのデータ収集法について述べる。前述の負荷均等木構築法は、木に属するすべてのノードの位置やバッテリー量が既知でないと使用できない。そのため、ここでは局所的な情報のみで可能なデータ収集手法を用いる。

本手法では、WSN 運用時において、各リーダーノードが基地局へ送信すべきデータを保持しているときに、自身より基地局に近い通信保証領域のリーダーノードと通信を行い、それらのノードのバッテリー量の情報を得る。これらのノードの中でバッテリー量が最大のノードに所持データを送信することで、各ノードのバッテリー消費量を均一にしつつ基地局にデータを収集する。

各領域のリーダーノードが実行するデータ送信アルゴリズムを以下に述べる。

- (1) 通信保証領域の各リーダーノードの位置を取得
- (2) 自身よりも基地局に近い、すべての通信保証領域のリーダーノードを送信先候補ノードとする
- (3) 自領域のすべてのセンシングノードからセンシングデータを受信、もしくは他領域のリーダーノードからセンシングデータを受信するまで待機
- (4) すべての送信先候補ノードと通信を行い、バッテリー情報を取得
- (5) 最もバッテリー量が高い送信先候補ノードに、保持しているセンシングデータを送信 (ただし、基地局はバッテリー量は無限大とする)
- (6) ステップ 3 に戻る

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問題を定式化し、その問題を解くための分散計算アルゴリズムを提案した。提案手法は、フィールドを格子状の小領域に分割し、計算のタイミングを 2 ステップにすることで、領域間の境界線付近を効率的に k 重被覆している点に特色がある。

今後の課題としては、提案手法の k 重被覆維持時間の延長度合いを評価することが挙げられる。分散計算を行うことによるオーバーヘッドを評価するため、文献 9) のアルゴリズム

との比較実験を行う。また、耐故障性能を備えた分散計算アルゴリズムの開発や、より実際の WSN 運用に近い環境での評価のための実機センサノードを用いたテストベッドの構築が挙げられる。

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., Abdelzaher, 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) Keshavarzian, A., Lee, H., and Venkatraman, L.: “Wakeup scheduling in wireless sensor networks,” *Proc. of 7th ACM Int’l Symp. on Mobile ad hoc networking and computing (MobiHoc2006)* (2006).
- 4) 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).
- 5) Bai, X., Yun, Z., Xuan, D., and Zhao, W.: “Optimal Multiple-Coverage of Sensor Networks,” *Proc. of Int’l Conf. on Computer Communications (INFOCOM2011)*, 2011.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) Wang, W., Srinivasan, V., and Chua, K. C.: “Trade-offs Between Mobility and Density for Coverage in Wireless Sensor Networks,” *Proc. of 13th Int’l. Conf. on Mobile Computing and Networking (MobiCom 2007)*, pp. 39–50, 2007.
- 9) 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, Vol. 2, No.3, pp. 75–86 (2009).
- 10) 勝間 亮, 村田 佳洋, 柴田 直樹, 安本 慶一, 伊藤 実: “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” 情報処理学会論文誌 数理モデル化と応用, Vol. 3, No.3, pp. 140–153 (2010).
- 11) 勝間 亮, 村田 佳洋, 柴田 直樹, 安本 慶一, 伊藤 実: “過剰にノードを用いることによるセンサネットワークの稼働時間延長方式” マルチメディア, 分散, 協調とモバイルシンポジウム (DICOMO2009), pp. 322–332 (2009).
- 12) Crossbow Technology, Inc. 2008: “IRIS mote,” <http://www.xbow.jp/mprmib.pdf>.
- 13) 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.
- 14) Crossbow Technology, Inc. 2003: “MICA2: Wireless Measurement System,” http://www.xbow.com/Products/Product.pdf_files/Wireless.pdf/MICA.pdf.
- 15) Ganeriwal, 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).
- 16) 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).
- 17) Dijkstra, E.W.: “A Note on two Problems in Connection with Graphs,” *Numerische Mathematik*, 1959.
- 18) Sun Microsystems, Inc.: “SunSPOT (Sun Small Programmable Object Technology),” <http://www.sunspotworld.com/>