

ソーラパネル付モバイルセンサノードで構成されたWSNのための最適移動スケジューリング手法とその評価

江藤 大¹ 勝間 亮² 玉井 森彦¹ 安本 慶一¹

概要: 農業用地などにおいて定期的に環境情報を収集する無線センサネットワーク (WSN) では、最少数のノードによって対象領域全体を常に被覆することと、必要期間以上ネットワークが動作することが求められる。近年、モバイルノードあるいはエネルギーハーベスティングを適用し、WSN の稼働期間を延長する研究が行われているが、その両方を同時に考慮した研究は行われていない。本稿では、農地における作物の生育によって日陰領域が刻々と変化する環境でノードが十分な発電量を獲得し、かつ、対象領域の全被覆を一定期間以上維持するために必要なノード数を最小化するための、モバイルノードの移動スケジュールを決定する方法を提案する。提案手法では、各ノードの現在の位置と日時からセンシングを行う各地点の発電量を予測することによって、電池残量の少ないノードの発電量が大きくなるように各ノードの移動経路を決定する。また、提案手法の有用性を評価するために、移動での電力消費量や太陽光発電量の実測値をもとにしたシミュレーションを行った。その結果、提案手法では比較手法に比べ指定した期間において WSN を稼働させるためのノード数を 4%削減し、ネットワーク寿命を 10%延長することができた。

Movement Scheduling Method for Wireless Sensor Networks with Mobile Sensor Nodes using Solar Panel and Its Evaluation

ETO, MASARU¹ KATSUMA, RYO² TAMAI, MORIHIKO¹ YASUMOTO, KEIICHI¹

Abstract: Wireless sensor network (WSN) requires coverage of a given target field any time and operation lifetime longer than an expected duration by the minimum number of sensor nodes. Some studies add a mobility or energy harvesting function to sensor nodes to extend lifetime of WSN. However, there is no study which utilizes both functions in a harmonious way for WSN lifetime extension. In this paper, we propose a method for determining a schedule of node movement to cover the target agricultural field. It is necessary to operate WSN for an expected duration by the minimal number of nodes. The proposed method computes a moving schedule of each mobile sensor node which covers the target field without depleting battery of some nodes by predicting solar power generation at each point of the target field where shadow areas change depending on time, orbit of the sun, and height of crops. We conducted computer simulations and compared the performance of the proposed method with a conventional method. As a result, the proposed method reduced the number of nodes by 4% compared to the conventional method. Moreover, the proposed method extended lifetime of WSN by 10% compared to the conventional method.

1. はじめに

近年、多数のセンサノードによって構築される無線センサネットワーク (以下、WSN: Wireless Sensor Network)

が注目されている。データ収集型 WSN では、各ノードがデューティサイクルと呼ばれる一定周期で環境情報をセンシングし、センシングデータを無線マルチホップ通信によって基地局に送信する。データ収集型 WSN の例として、農業用地において温度や湿度などの環境情報を定期的に収集するアプリケーションがある [1], [2]。農業用地の環境情報を取得することによって、作物が生育しやすい環境なのか病虫害が発生しやすい環境なのかを知ることができ

¹ 奈良先端科学技術大学院大学
Nara Institute of Science and Technology
² 大阪府立大学
Osaka Prefecture University

る。このようなアプリケーションでは、センシング対象とする領域全体を常に被覆することと、必要な期間以上ネットワークが動作することが求められる。ここで、対象領域の被覆とは領域内のすべての地点がセンサノードによってセンシングされていることを示す。

センシング対象領域を効率良く被覆するための研究が多数行われており、中でも、駆動機能を備え自由に移動できるモバイルノードを用いて効率的に領域を被覆する手法が提案されている [3], [4]。モバイルノードは周りの環境や観測するイベントの変化に応じて移動し、センシングを行う。モバイルノードを対象領域内に散布するだけで自動的に WSN を構築できるため敷設が容易である上に、一部のノードが故障した場合でも、他のモバイルノードが故障したノードのセンシング位置まで移動することで、対象領域の被覆を保つことができる。しかし、モバイルノードが移動するために必要な電力消費は比較的大きいため、ネットワーク寿命（対象領域全体が稼働中のセンサのセンシング範囲で被覆され続けている時間）を著しく短縮させないよう、移動距離は最小にしなければならない。

ネットワーク寿命延長のための技術として、エナジーハーベスティング [5] が注目されている。エナジーハーベスティングとは、太陽光や熱などの環境エネルギーから電力供給を行う技術であり、環境エネルギーから電力を供給することによってバッテリーを回復させることができるため、ネットワークの寿命延長もしくは半永久化が期待される。しかし、太陽光を利用した発電では、日射量によってソーラパネルの発電量が変化する。また、日射量は天候、季節による太陽の軌道や遮蔽物による日陰の影響を受けるため、位置や日時によって変化する。特に、農業用地での WSN では作物による日陰領域が発生し、作物が生育することによって日陰領域が変化する。

本稿では、農業用地において定期的に環境情報を取得する WSN を想定し、太陽光発電による充電が可能なモバイルノードが対象領域内を効率よく被覆する WSN を動的に構築する手法を提案する。ネットワークは作物の植え付けから収穫までの期間に亘って稼働しなければならず、それを達成するためのノード設置のコストを最小限に抑えるため、提案手法では、対象領域の全被覆と一定期間 T 以上のネットワーク寿命を満たすために必要なモバイルノード数を最少化することを目的とする。

本目的を実現する上での課題は、(1) 対象領域内の各地点での発電量をどのように予測するか、(2) フィールドを被覆し、かつ、WSN 稼働時間を最大化するノードの移動方法をどのように決定するか、(3) スケーラビリティを保つためにいかにしてスケジュールの計算を行うか、の3点である。

(1) の課題を解決するために、作物の成長モデルを導入し、季節毎の太陽の軌道を考慮して、対象領域内の日陰領

域を予測することで、より正確な発電量を予測する。(2) の課題を解決するために、フィールドを一つのセンサノードで被覆可能なグリッドに分割し、一定時間内において各グリッドにセンサノードが一つ以上存在する瞬間があるように移動スケジュールを決定する。また、その際に一定時間後の電池残量が少なくなるノードを予測し、日向領域に移動するように移動スケジュールを計算する。(3) の課題を解決するために、複数の隣接グリッドからなる小領域を定義し、小領域ごとに選出されたリーダノードがその小領域内の被覆を完成させる移動スケジュールを計算する。

ソーラパネルを用いた充電機構および移動機構を装備したノードを制作し、発電量と移動による電力消費を計測する予備実験を行った。予備実験の結果を用いて、提案手法の評価のため、提案手法の農地での運用を模したシミュレーションを行った。その結果、提案手法は発電量予測を行わない手法に比べ必要ノード数を4%削減し、ネットワーク寿命を10%延長することができた。

2. 関連研究

WSN の代表的なアプリケーションとして、農業用地において温度や湿度などの環境情報を収集するものがある。Mancuso らは、トマトを栽培しているグリーンハウス内にノードを設置し、気温、相対湿度、土壌温度のセンシングを行っている [1]。これらの環境情報は作物の生育に影響を与え、得られた環境情報を基にグリーンハウス内の温度、湿度や与える肥料の量を調整することで作物の品質を向上することができる。Langendoen らは、ジャガイモを栽培している農場に大規模な WSN を構築し、温度、湿度のセンシングを行っている [2]。農場の気候から、作物の生育状況や疫病菌のリスクが高いフィールドをユーザに伝えることができる。

複数のモバイルノードを用いて効率よく対象領域の被覆を保つための研究が行われている。Chi らは、固定のセンサノードが多数設置された対象領域において、被覆状態が保たれているかどうかを判定する手法を提案した [6]。Wang らは、モバイルノードと固定ノードが混在する環境において、対象領域を k 重被覆するようなモバイルノードの移動先を求める手法を提案した [3]。しかし、固定ノードのみを用いた WSN では、センシング環境が動的に変化する環境への適用が困難な場合がある。また、Wang らの手法も、ノード配置後に1度だけ動くことを想定しているため、動的に変化する環境に対応できない。Seokhoon らは、センシング対象のイベントの発生箇所に従って、モバイルノードを再配置する手法を提案した [4]。この手法では、イベントが発生している方向にセンサネットワークを成長させるようにノードを移動させ、移動による消費電力を最小限に抑えながら被覆領域を最大化している。しかし、ノードの配置コストを考慮していないため、対象領域が広くな

るにつれてコストが急激に増加する。

ネットワーク寿命を延長させるために、エナジーハーベスティングを用いた研究が行われている [5]。その中でもソーラパネルを搭載したセンサノードを用いて、天候や太陽の軌道を考慮して WSN のネットワーク寿命を延長する研究がある。Gaudett らは、時刻毎に変化する太陽のプロファイルによって発電量を予測し、将来的な電池残量に応じてセンシング範囲を設定することで、最少のノード数で効率よく対象領域を被覆する手法を提案した [7]。太田らは、天候の変化を考慮した発電量の予測を行い、電池残量に余裕があるノードにデータ転送の中継をさせることでネットワークの寿命を延長する手法を提案した [8]。しかし、これらの既存研究では、日陰による発電量の変化を考慮していない。日陰の領域は、日向の領域に比べて発電量が少なく、ノードのバッテリーが枯渇してしまう可能性が高い。

上で述べた既存研究の問題点を解決するため、本研究ではモバイルノードの配置コストを考慮し、対象領域の被覆を保ち、さらに一定期間以上のネットワーク寿命を保証する WSN を構築するために必要なモバイルノード数を最小化するノードの移動手法を提案する。

3. 農業用 WSN における配置ノード数最少化問題

本章では、本研究で取り扱う WSN のモデルおよびその仮定を示し、対象とする問題を定式化する。

3.1 WSN モデル

本研究では、農業用地において温度や湿度などの環境情報を収集するアプリケーションを想定する。そこで、多数のセンサノードが対象領域に配置され、一定周期 I ごとに環境情報をセンシングし、マルチホップ通信で各ノードからセンシングデータを収集する基地局（シンク）へデータを送信し、指定した稼働期間 T 以上対象領域を被覆し続けるデータ収集型 WSN を対象とする。ここで、稼働期間 T は植え付けから収穫までの期間であると想定する。また、対象領域の端に基地局（シンク・電源を完備し固定ネットワークに接続されているとする）を設置する。

センサノードはソーラパネルと二次電池を備えており、太陽光による発電で二次電池に充電することができる。また、センサノードは温度や湿度などの環境情報のセンシング、データの送受信および移動を行うことができる。

3.2 電力モデル

センサノードは二次電池を持ち、ソーラパネルによる充電ができる。日射量 $c[MJ/m^2]$ のときの、ソーラパネルによる発電電力 $Charge(c)$ は下式 (1) に従うものとする。

$$Charge(c) = c \times E_{gen} \quad (1)$$

ここで、 E_{gen} はソーラパネルによる単位日射量 $[MJ/m^2]$ 当たりの発電量である。

また、センサノードはデータの送受信、センシングおよび移動時に電力を消費する。

$x[bit]$ のデータを $d[m]$ 送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 (2), (3) に従うものとする [10]。

$$Trans(x, d) = E_{elec} \times x + \varepsilon_{amp} \times x \times d^2 [J] \quad (2)$$

$$Recep(x) = E_{elec} \times x [J] \quad (3)$$

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である。

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 $Sens(D)$ は下式 (4) に従うものとする。

$$Sens(D) = E_{elec} \times D + E_{sens} \quad (4)$$

ここで、 E_{sens} はセンシングのための電力消費係数である。

センサノードが $d[m]$ 移動するための電力量 $Move(d)$ は下式 (5) に従うものとする [11]。

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

ここで、 E_{move} は $1[m]$ 移動するために消費する電力量である。

3.3 日射量モデル

3.2 節で述べたように、ソーラパネルを用いたエナジーハーベスティングでは、発電量は日射量に大きく依存する。また、日射量は日陰の領域と天候によって変化する。晴天時の日射量は、作物の生育状況と太陽の位置によって決定される日陰領域によって変化する。そこで、日射量モデルとして、夜間の日射量を $c_{night}(t)$ 、曇天時の日射量を $c_{cloudy}(t)$ 、時刻 t における晴天時の日向の領域の日射量を $c_{sunny}(t)$ 、晴天時の日陰の領域の日射量を $c_{shadowy}(t)$ と定義する。ここで、 $c_{night}(t)$ は 0 である。また、曇天時であれば、対象領域の位置と時間によらず $c_{cloudy}(t)$ とする。

農業用地では、日陰の領域は太陽の位置と作物の生育状況によって決定される。まず、作物の成長をモデル化する。図 1 のように、作物は円錐状に成長するとし、成長速度は式 (6) のロジスティック成長曲線 [9] に従うものとする。

$$N_t = \frac{K}{1 + (\frac{K}{N_{t-1}} - 1)e^{-n}} \quad (6)$$

ここで、 N_t は時刻 t における作物の高さ $[m]$ 、 K は作物の高さの上限 $[m]$ 、 n は成長係数である。

太陽の位置は緯度経度と日時によって決定する。

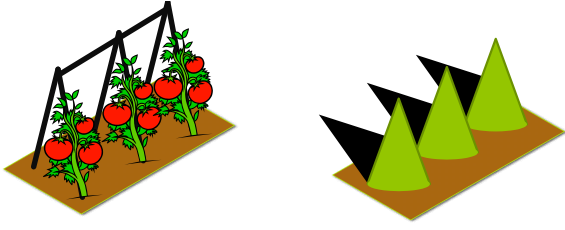


図 1 作物の成長モデル

3.4 問題の定式化

本問題の入力として、対象領域 $Field$, ノードの集合 N , ノード n の位置 $n.pos$, ノード n のセンシング半径 $n.r$, ノード n の電池残量 $n.energy$, 定数 K , $c_{sunny}(t)$, $c_{shadowy}(t)$, $c_{cloudy}(t)$, E_{gen} , E_{elec} , ε_{amp} , E_{sens} , E_{move} , ネットワークの稼働期間 T , センシング間隔 I , センシングで取得するデータサイズ D を与える. 出力は, 各ノードの移動スケジュール, センシングおよび送受信のタイミングである. ここで, ノード n の移動スケジュールとは, 各時刻 t における n の位置 $n.pos(t)$ のことである.

ノードの移動は, 対象領域の被覆が保たれるようにしなければならない. 対象領域の被覆はセンシング間隔 I の間にすべての地点が 1 度でもセンシングされている状態のことであり, 式 (7) で表すことができる.

$$\forall pos \in Field, \exists t \in [t_j, t_j + I), Cover(pos, t) \geq 1 \quad (7)$$

ここで, t_j はネットワークの稼働期間をセンシング間隔 I で区切ったときのあるタイムスロット $[t_j, t_j + I)$ の開始時刻であり, $Cover(pos, t)$ は時刻 t において位置 pos を被覆しているセンサノード数を示し, 式 (8) で定義される.

$$Cover(pos, t) = |\{n \mid |n.pos(t) - pos| \leq n.r \wedge n.energy(t) > 0 \wedge n \in N\}| \quad (8)$$

センシングの開始時刻を t_{start} , 対象領域の全被覆ができなくなる時刻を t_{life} とする. タイムスロット $[t_j, t_j + I)$ において式 (7) が成立する時, 真になる関数を $Covered(Field, t_j, I)$ とする. $[t_{start}, t_{life})$ が m 個のタイムスロット $[t_1, t_1 + I), \dots, [t_m, t_m + I)$ に分割できるとする. このとき, 対象領域の被覆を保つという制約は以下の式 (9) で表すことができる.

$$t_{life} - t_{start} > T \wedge \forall j \in \{1, \dots, m\} Covered(Field, t_j, I) \quad (9)$$

また, センサノード n が自身のセンシング範囲を被覆するためには, タイムスロット $[t_j, t_j + I)$ でセンサノード n により利用できる電力が, タイムスロット $[t_j, t_j + I)$ で行うデータの送受信, および, センシングで消費される電力以上である必要がある. この制約を式 (10) で示す.

$$\forall j \in \{1, \dots, m\}, n.energy(t_j) - Trans(x, d) - Recep(y) - Sens(D) > 0 \quad (10)$$

ここで, $c(n, [t_j, t_j + I))$ はノード n がタイムスロット $[t_j, t_j + I)$ で受ける日射量, x は自身が送信するセンシングデータのサイズ [bit], d は送信する隣接ノードとの距離 [m], y は他のノードから受信するデータのサイズ [bit] である.

また, タイムスロット $[t_j, t_j + I)$ でノード n が移動する場合, タイムスロット $[t_j, t_j + I)$ でセンサノード n が利用できる電力が, タイムスロット $[t_j, t_j + I)$ で移動するための電力以上である必要がある. この制約を式 (11) で示す.

$$\forall j \in \{1, \dots, m\}, n.energy(t_j) - Move(l) > 0 \quad (11)$$

ここで, l はノード n がタイムスロット I_j において移動する距離 [m] である.

本問題の目的は, ノード数 $|N|$ を最少化する, ノードの移動スケジュールを決定することであり, 目的関数は下式で示される.

$$\text{minimize } |N| \text{ subject to (9), (10) and (11)} \quad (12)$$

4. 予測電池残量に基づく移動スケジュールリング法

4.1 概要

本章では, 3 章で定義した配置ノード数最少化問題を解くためのアルゴリズムを示す. 本アルゴリズムは一定時間後のノードの電池残量を予測し, 最小のノードの電池残量が最大になるように移動スケジュールを決定する.

スケラビリティを考慮し分散計算により対象問題を解くため, フィールドを複数の小領域に分割し, 各領域において被覆の制約条件を満たすことにより, フィールド全体の被覆を満たすようにノードを移動させる. しかし, 隣接する領域間で同時にノードの移動スケジュールを決定すると, 領域の境界付近にいるノードが同時に複数の異なる領域への移動を要求される可能性がある. そのため, 提案手法では, 文献 [12] で提案されている隣接する領域間で異なるタイミングで計算する手法を用いることで, この問題に対処する. 例えば, 図 2(a) のように対象領域を格子状の小領域に分割してそれぞれに A と B のラベル付けを行い, 同じラベルを持つ小領域同士が隣接しないようにする. そして, 各小領域 A で移動スケジュールを決定した後に, 残りの小領域 B において移動スケジュールの決定を行う.

また, 一定期間の WSN の稼働を保つため, センシング周期毎に小領域内の最も電池残量が多いノードがリーダノードとなり, 自身の所属する小領域を被覆するためのノードの移動スケジュールの計算を行う. そして, 被覆の制約条件を満たせなくなるまでの時間をネットワーク寿命とする. 提案手法では, ノード数を変化させ, 各ノード数におけるネットワーク寿命を求め, 必要な WSN の稼働期間を満たすことができる最少のノード数を求める.

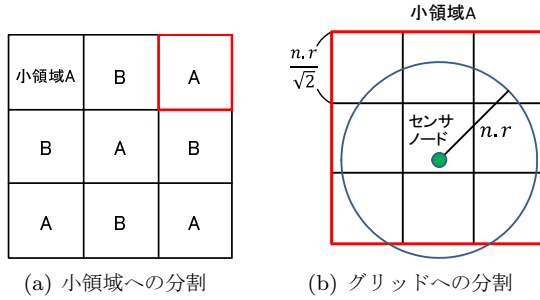


図 2 対象領域の分割

以降、対象領域の被覆、発電・消費電力予測、提案アルゴリズムについて述べる。

4.2 対象領域の被覆

対象とする WSN では、対象領域を常に全被覆しなければならない。3.4 節で述べたように、本研究ではセンシング間隔 I の間に対象領域のすべての地点を 1 度でもセンシングしていれば、対象領域を全被覆しているとする。そこで、図 2(b) に示すように、各小領域をグリッドに分割する。このとき、ノードのセンシング半径 $n.r$ に対して、対象領域を 1 辺 $\frac{n.r}{\sqrt{2}}$ の正方形のグリッドに分割する。このように分割することで、グリッド内のどの位置でセンシングしても、そのグリッド内のすべての地点を確実に被覆できる。各スロットにおいて、グリッド内でノードが 1 つ以上存在している瞬間があれば、そのグリッドは被覆されている。つまり、各スロットにおいて、小領域に含まれる各グリッドについてノードが 1 つ以上存在している瞬間があれば、その小領域を被覆していることになる。提案手法では、この制約条件を満たすように移動スケジュールを決定する。

4.3 電池残量の予測

各ノードは、各スロットの開始時刻 t_j に消費電力量と発電量を予測する。現在の電池残量と予測した消費電力量と発電量から、 $t_j + I$ における予測電池残量を計算する。現在の位置にとどまった場合の予測電池残量と、別のグリッドに移動した場合の予測電池残量を求め、4.4 節で述べる移動ノードを決定するためのパラメータとして使う。

4.3.1 消費電力量の予測

3.2 節の電力モデルを用いて、時刻 t_j から $t_j + I$ までのデータ送受信、センシングおよび待機時間による消費電力量を計算する。また、移動する場合には式 (5) を用いて移動による消費電力量を加える。

4.3.2 発電量の予測

ノードは現在の自身の位置もしくは移動先グリッドの位置と日時から時刻 t_j から $t_j + I$ までの発電量を予測する。過去の日射量のデータ [13] のうち、晴天時の全天日射量を時刻 t_1 における日射量 $c_{sunny}(t_1)$ 、晴天時の散乱日射量を時刻 t_1 における日陰の日射量 $c_{shadowy}(t_1)$ 、曇天時

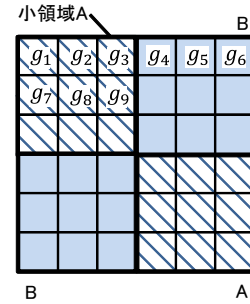


図 3 対象領域の分割の例

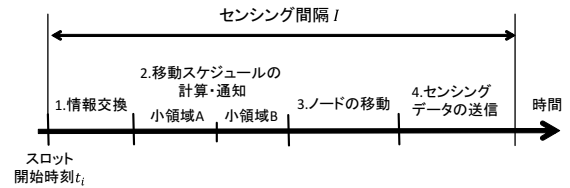


図 4 各スロットにおける流れ

の全天日射量を時刻 t_1 における日射量 $c_{cloudy}(t_1)$ とする。さらに、作物の成長と太陽の軌道から、時刻 t_1 における自身の位置が日向か日陰かを予測し、晴天時の日向ならば $a_{sunny}(t_1) = 1$ 、晴天時の日陰ならば $a_{shadowy}(t_1) = 1$ 、曇天時ならば $a_{cloudy}(t_1) = 1$ 、夜間ならば $a_{night}(t_1) = 1$ とする。求めた日射量とソーラパネルの性能を基に、式 (13) を用いて発電電力値を計算する。

$$\begin{aligned} Charge(c) = & E_{gen} \times \int_{t_j}^{t_j+I} (c_{sunny}(t) \times a_{sunny}(t) \\ & + c_{shadowy}(t) \times a_{shadowy}(t) \\ & + c_{cloudy}(t) \times a_{cloudy}(t) \\ & + c_{night}(t) \times a_{night}(t)) dt \end{aligned} \quad (13)$$

4.4 移動スケジュール計算アルゴリズム

本手法では、各スロットの開始時刻に各小領域のリーダーノードを決定し、そのリーダーノードが自身の属する小領域を全被覆するように計算を行う。

4.2 節で述べたように、図 3 のように対象領域をセンシング半径に応じた大きさのグリッドに分割し、それぞれのグリッドに $g_1, g_2, g_3, g_4, \dots$ と一意にグリッド ID を割り当てる。そして、複数のグリッドを含むように小領域を決定する。それぞれの小領域に対し A と B のラベル付を行い、同じラベルを持つ小領域同士が隣接しないようにする。

図 4 に各スロットにおけるノードの動作の流れを示す。それぞれの詳細について以下に記述する。

情報交換

各ノードは自身の現在の電池残量、 $t_j + I$ における予測電池残量と位置に関する情報をブロードキャストする。このとき、同じグリッドに属するノードと隣接グリッドに属するノードはこの情報を受信する。

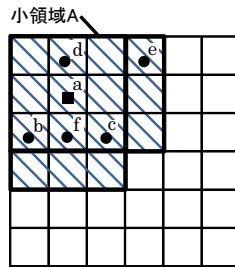


図 5 小領域 A における移動スケジュールを計算する領域

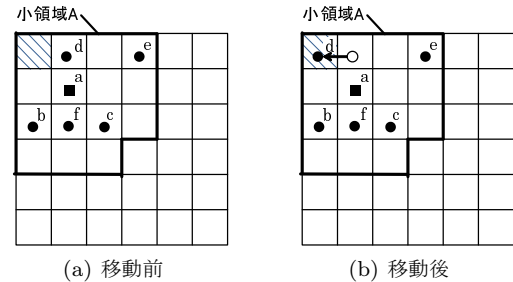


図 6 移動スケジュールの例

移動スケジュールの計算・通知

移動スケジュールの計算アルゴリズムを以下に記述する.

- (1) 小領域内で現在の電池残量が最も多いノードをリーダーノードとして選出
- (2) リーダーノードは各ノードの位置情報から、小領域内でまだセンシングされていないグリッドを確認
- (3) 各ノードに対してセンシングされていないグリッドまで移動した場合の予測電池残量を計算し、 $t_j + I$ において小領域内のノードの最小の電池残量が最大になるように移動するノードを決定
- (4) どのノードにも移動に必要な電力が足りず、被覆の制約を満たせない場合は WSN の運用を終了
- (5) 小領域内にセンシングされていないグリッドがなくなれば、移動先を各ノードに伝達し、アルゴリズムを終了

対象領域の全被覆を満たすため、各タイムスロットの間隔 I 内に対象領域の各地点をセンシングするようにノードを移動させる. 各小領域ごとに被覆を満たすように移動経路を決定することで、対象領域全体の被覆の制約条件を満たすことができる. また、隣接する小領域では移動スケジュールを同時に計算せず、交互に独立に計算する. ここでは、図 4 に示すように、小領域 A が先に移動スケジュールの計算を行い、その後小領域 B の移動スケジュールの計算を行う.

各小領域で選ばれたリーダーノードは、自身が所属する小領域およびその小領域に隣接するグリッドに存在するノードの移動経路を決定する. 図 3 における左上の小領域 A に対して、図 5 の斜線の領域にいるノードを移動させることで、対象領域の被覆を行う. 各小領域 A が斜線の領域のノードを移動させる場合、別々の小領域のリーダーノードが同じノードに対して移動を指示する可能性があるが、その場合はリーダーノードが所属するグリッド ID が小さい方の移動スケジュールを優先し、そうでないリーダーノードに対して再計算するように要求する.

図 6(a) において、小領域 A 内のノード a, b, c, d, f は互いの位置と電池残量を収集する. 収集したデータから最も電池残量の多いノード a がリーダーノードに選ばれる. リーダーノード a は、図 5 の斜線の領域にいるノード e の位置と電池残量を収集する. また、ノードの位置からセンシングさ

表 1 ノードの予測電池残量
(a) 予測電池残量 (図 6(a)) (b) 予測電池残量 (図 6(b))

ノード	予測電池残量	
	移動無	移動有
a	60%	55%
b	55%	50%
c	50%	35%
d	55%	60%
e	50%	45%
f	50%	45%

ノード	予測電池残量
a	60%
b	55%
c	50%
d	60%
e	50%
f	50%

れていないグリッド g_1, g_3, g_7, g_9 を求める. 次に、4.3 節で述べたように、センシングされていないグリッドに各ノードが移動した場合の消費電力量と発電量を予測し、現在のタイムスロットの終了時刻の電池残量を予測する. そして、予測した電池残量の最小値が最大になり、その上で全体での電池残量の合計が最大になるようなノードを選択し目的地点まで移動させる. 例えば、表 1(a) に示すように、各ノードが現在の位置にとどまる場合の予測電池残量と、グリッド g_1 に移動した場合の予測電池残量を求めたとする. ノード d が移動有りの電池残量の方が移動無しよりも大きくなっているのは、現在の地点では日陰によってほとんど発電できず、移動後の位置との発電量の差が大きいためである. この時、ノード a, b, d のいずれかが移動した場合は、いずれも最小の予測電池残量が 50% になる. このうち、ノード d が移動した場合に全体での電池残量の合計が最大になるため、ノード d がグリッド g_1 に移動する. そして表 1(b) に示すように、ノード d が移動したとして予測電池残量を求め、残りのセンシングされていないグリッドに対して同様に計算を行いノードの移動経路を決定する.

ノードの移動

各ノードはリーダーノードから通知された移動スケジュールにしたがって移動する. 移動をしながら、各グリッドを通過する際にセンシングを行う.

センシングデータの送信

各ノードは移動終了後に、そのスロット内で取得したセンシングデータをリーダーノードに対して送信する. リーダーノードは小領域内のすべてのノードからデータを受け取った後、データを集約し、シンクに向けて送信する.

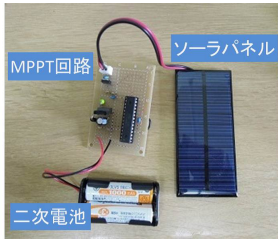


図 7 充電回路

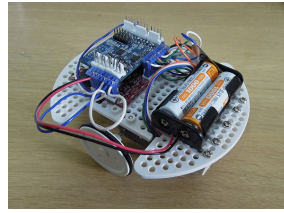


図 8 駆動ロボット

表 2 充電回路による発電量の計測結果 (10 回の平均)

日向における発電量	180[mW]
日陰における発電量	24[mW]

5. 評価

提案する移動スケジューリング法を評価するため、ネットワークシミュレータ Scenargie[15] を使用してシミュレーションを行った。シミュレーションでは、WSN が必要な期間稼働するために必要なノード数について、太陽光発電量を考慮しない手法 (比較手法) と比較を行った。また、シミュレーションで用いるパラメータを決定するために、ソーラパネルによる太陽光発電量と駆動機能による消費電力量を測定する予備実験を行った。

5.1 予備実験

WSN で利用するノードでの充電を想定し、図 7 に示すような単 3 電池 2 本の二次電池に対してソーラパネルで充電を行う最大電力点追従 (MPPT) 回路を製作した。晴天時に日向と日陰で充電した場合の発電量を計測した。日陰における充電では植物の葉によって影が発生する場所で計測を行った。10 回計測を行った時の平均値を表 2 に示す。日陰での平均発電量は、日向での発電量の 13% 程度であった。また、影の向きによって発電量が左右され、完全に影の状態になった場所では充電できなかった。そのため、日陰での発電量を正確に予測することは難しいが、5.3 節における評価では、平均値を用いて予測を行う。

駆動機構による消費電力の測定は、図 8 に示すヴィストン株式会社のビュートローバーを利用した [14]。移動速度を 50[cm/sec] に調整し、駆動した場合の電流を測定し、消費電力量を求めた。電流の測定は、ロボットを直進させ電流が一定になった値を計測した。その結果、50[cm/sec] で動かせた場合の消費電力は 1680[mW] であった。

5.2 シミュレーションにおける想定環境

シミュレーションでは、文献 [1] におけるトマトを栽培する農場における実機実験を参考にして、農場において温湿度を測定することを想定し、指定された期間の WSN の運用のために必要なノード数と移動スケジュールを求める。シミュレーションで利用するパラメータを表 3 に示

表 3 シミュレーションにおけるパラメータ設定

対象領域のサイズ	100 × 100[m]
センシング半径	30[m]
稼働期間 T	90[day]
センシング間隔 I	15[min]
バッテリーの電圧	2.4[V]
バッテリーの電池容量	1000[mAh]

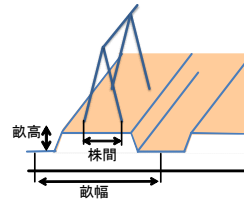


図 9 農地における畝

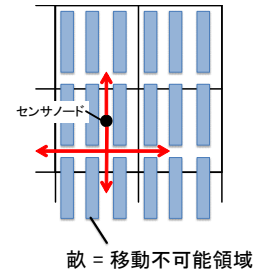


図 10 農地におけるノードの移動

す。稼働期間は、作物の植え付けを 5 月 1 日とし、その日から 90 日間を対象とする。4.2 節に従うとグリッドの 1 辺は $\frac{30}{\sqrt{2}} = 21.2[m]$ となるが、簡単のためにグリッドの 1 辺を 20[m] とする。ノードのバッテリーは 5.1 節と同様に単 3 電池 2 本であるとする。また、ソーラパネルによる太陽光発電量、および、駆動機能による消費電力は 5.1 節の予備実験で得られた結果を用いる。

農業用地においては畝が存在するため、ノードは畝のないところのみを移動できるものとする。シミュレーションでは、トマトを栽培していることを想定し、畝は南北方向に作るものとし、図 9 に示すよう、畝幅 120[cm]、畝高 20[cm]、株間 50[cm] とする。また、畝の長さはグリッドの 1 辺よりも短いものとし、図 10 に示すように、ノードは南北方向に隣接するグリッドに対しては最短距離で、東西方向に隣接するグリッドに対しては畝を回避するために遠回りをするが、直接移動することができる。

5.3 実験結果

本節では、シミュレーション結果について述べる。ノード数を変化させて WSN を運用した場合のネットワーク寿命について評価を行う。ここで、ネットワーク寿命とは WSN の稼働開始から対象領域を被覆できなくなった瞬間までの日数である。

また、シミュレーションでは提案手法と太陽光発電量を考慮しない手法とを比較する。比較手法では、センシングされていないグリッドに対し移動するノードを決定する際に、移動による消費電力量のみを考慮して予測電池残量を求める。そして、ノード間で最小の予測電池残量が最大になるように移動スケジュールを決定する。

提案手法と比較手法をそれぞれ用いてシミュレーションを 10 回ずつ行い、その平均値を図 11 に示す。また、ノード数が 23 の場合に WSN を稼働した後のバッテリー残量の

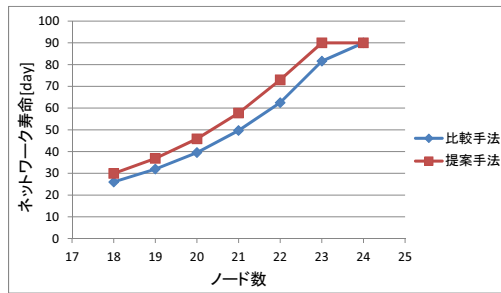


図 11 ネットワーク寿命

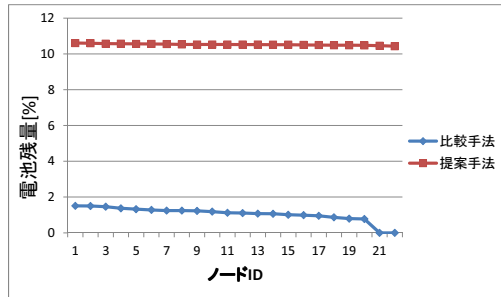


図 12 ノード数 23 の時の電池残量

表 4 ノード数 23 の時の 1 日当たりの平均発電量

提案手法	3271972[mW]
比較手法	3145530[mW]

結果を図 12 に、1 ノードの 1 日の平均発電量を表 4 示す。

提案手法ではノード数が 23 以上のとき、比較手法ではノード数が 24 以上のとき、稼働期間のどのセンシング周期においても被覆を保ったまま WSN を 90 日間稼働することができる。つまり、提案手法は比較手法に比べて 90 日間稼働するのに必要なノード数を 4%抑えることができた。同じノード数でのネットワーク寿命を比較すると、提案手法は比較手法に比べて最大で 16%、平均で 10%長いという結果が得られた。また、提案手法では WSN を稼働した後のバッテリー残量がどのノードもほぼ同じ程度であるのに対し、比較手法では特定の数ノードが他のノードよりも電力を消費している。さらに、提案手法の 1 日当たりの平均発電量は比較手法に比べ約 4%増加している。

6. まとめ

本研究では、農業用地において太陽光発電による充電が可能なモバイルセンサノードが対象領域内を効率よく被覆する WSN を動的に構築する手法を提案した。提案手法の有用性を評価するため、ネットワークシミュレータ Scenargie を使用してシミュレーションを行った。

その結果、提案手法では比較手法に比べ指定した期間において WSN を稼働させるためのノード数を 4%抑えることができ、またネットワーク寿命を 10%延長することができることが分かった。

今後の課題として、提案手法を農地に適用し、モバイル

ノードの移動能力や作物の成長に伴う通信品質の変動などの調査を行うことが挙げられる。

参考文献

- [1] Mancuso, M., Bustaffa, F. "A wireless sensors network for monitoring environmental variables in a tomato greenhouse," *Proc. of 2006 IEEE Int'l. Workshop on Factory Communication Systems (WFCS 2006)*, pp.107-110, 2006.
- [2] Langendoen, K., Baggio, A., Visser, O. "Murphy Loves Potatoes Experiences from a Pilot Sensor Network Deployment in Precision Agriculture," *14th Int'l. Workshop on Parallel and Distributed Real-Time Systems (WPDRTS)*, pp.1-8 2006.
- [3] Wang, W., Srinivasan, V. and Chua, K.C. "Trade-offs Between Mobility and Density for Coverage in Wireless Sensor Networks," *Proc. 13th Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking (MobiCom 2007)*, pp.39-50
- [4] Seokhoon Y., Onur S., Murat D., and Chunming Q. "Coordinated Locomotion of Mobile Sensor Networks," *Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks, 2008. SECON '08. 5th Annual IEEE Communications Society Conference on*
- [5] Chalasani, S., Conrad, J. "A survey of energy harvesting sources for embedded systems," *Proc. of IEEE Southeastcon 2008*, pp.442-447, 2008.
- [6] Chi-fu H. and Yu-chee T. "The Coverage Problem in a Wireless Sensor Network," in *Proc. of WSNA. ACM, 2003*, pp. 115-121.
- [7] Gaudettez, B., Hanumaiahx, V., Vrudhulaz, S., Krunz, M. "Optimal Range Assignment in Solar Powered Active Wireless Sensor Networks," *Proc. of 31th Int'l. Conf. on Computer Communications (INFOCOM2012)*, pp. 2354-2362, 2012.
- [8] 太田健太郎, 小林健太郎, 山里敬也, 片山正昭 "太陽エネルギーを利用した無線センサネットワークのための発電量予測を用いた中継ノード選択手法," *モバイルコンピューティングとユビキタス通信 (MBL), 2012-MBL-61, Vol.31*, pp.1-8, 2012.
- [9] Mohr, H., Schopfer, P. 原著, 網野 真一, 駒嶺 穆 監訳, "植物生理学," シュプリンガーフェアラーク 東京株式会社, pp.1-598.1999.
- [10] Heinzelman, W.R., Chandrakasan, A., Balakrishnan, H. "Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks," *Proc. of the 33rd Hawaii Int'l. Conf. on System Sciences (HICSS 2000)*, pp.1-10, 2000.
- [11] Rahimi, M., Shah, H., Sukhatme, G.S., Heideman, J., Estrin, D. "Studying the Feasibility of Energy Harvesting in a Mobile Sensor Network," *Proc. of the IEEE Int'l. Conf. on Robotics and Automation (ICRA)*, pp.19-24, 2003.
- [12] Katsuma, R., Murata, Y., Shibata, N., Yasumoto, K., Ito, M. "A Decentralized Method for Maximizing k-coverage Lifetime in WSNs," *Proc. of The Sixth International Conference on Mobile Computing and Ubiquitous Networking (ICMU2012)*, pp.16-23, 2012.
- [13] NEDO, "日射量データベース", <<http://www.nedo.go.jp/library/nissharyou.html>> (参照 2012-08-21)
- [14] ヴイストーン株式会社, "Beauto Rover H8/ARM", <http://www.vstone.co.jp/products/beauto_rover/> (参照 2013-05-15).
- [15] 株式会社スペースタイムエンジニアリング, "Scenargie", <<http://www.spacetime-eng.com/jp/index.html>> (参照 2013-12-26).