

作物の生育に伴う太陽光発電量変化を予測した モバイルセンサノードによるフィールド被覆法

江藤 大¹ 勝間 亮² 玉井 森彦¹ 安本 慶一¹

概要: 近年、多数のセンサノードによって構成される無線センサネットワーク (以下、WSN) が注目されている。WSN には定期的に環境情報を収集するデータ収集型 WSN があり、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。近年、WSN にモバイルノードを利用した研究が盛んに行われている。しかし、モバイルノードは移動するために必要な電力消費が大きいので、稼働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。センサノードの稼働時間延長のための技術として、環境エネルギーから電力供給可能なエナジーハーベスティング技術、特に太陽光発電が注目されている。しかし、太陽光発電は日照量によって発電量が変化し、特に日陰の領域では日照量が少なく、十分な発電量が期待できない。そこで本研究では、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。そして、領域の全被覆を一定期間以上保つことができる最少のノード数を求める。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い、その結果に基づき提案手法を用いて WSN を運用した場合のシミュレーションを行った。結果、静止ノードのみを用いた場合と比較してノード数を 33%抑えることができた。

Field Coverage Method with Mobile Sensor Nodes Considering Solar Energy Generation Variation by Crop Growth

MASARU ETO¹ RYO KATSUMA² MORIHIKO TAMAI¹ KEIICHI YASUMOTO¹

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) が注目されている。WSN には定期的に環境情報を収集するデータ収集型 WSN がある。データ収集型 WSN では、各ノードが一定時間ごとに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、その作物が生育しやすい環

境なのか疫病が発生しやすい環境なのかを知ることができる。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。

センシング対象領域を被覆するための様々な研究が行われており、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

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

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、エネルギーハーベスティング [5] が注目されている。エネルギ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る。ソーラパネルや温度差による発電素子などを利用することによって、ノードに電力を供給することができる。そのため、従来のノードではバッテリーが枯渇するとそのノードは利用できなくなっていたが、環境エネルギーから電力の供給をすることによってバッテリーを回復させることができ、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、エネルギーハーベスティングによる電力の供給は、環境に依存するため発電量が不安定であるという問題点がある。特に、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障害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。

本研究では、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。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。

本研究では、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渡って稼働しなければならない。対象領域内にモバイルノードを設置するとモバイルノードは自動的に移動し WSN を構築する。また、センシング間隔 I のうちに、モバイルノードが複数の地点を移動しながら対象領域のすべての地点をセンシングすることで、対象領域が全被覆されるものとする。ノードはソーラパネルを利用した充電、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と仮定する。

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。そして、対象領域の全被覆を一定期間 T 以上保持することができる最少のノード数を求める。

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、発電量と電力消費量を計測する予備実験を行った。また、予備実験の結果を用いて、簡単な設定のもとで WSN を運用した場合のシミュレーションを行い、提案手法を用いることで静止ノードのみと比べてノード数

を 33%減らすことができた。

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 [1], [2]。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。そのため、複数の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 [4]。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 [3]。この手法では、センシング対象の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、電力消費を最小限に抑えながら被覆領域を最大化している。さらに、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。

また、ネットワーク寿命を延長させるために、エネルギーハーベスティングを用いた研究が行われている。その中でも太陽光発電機構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、時刻毎にで変化する太陽のプロファイルによって各ノードの発電量を予測し、将来的にバッテリーに余裕のあるノードはセンシング範囲を広く、そうでないノードはセンシング範囲を狭くすることで、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]。また、太田らは、天候の変化を考慮した発電量の予測を行い、バッテリー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少化するノードの移動手法を提案する。本手法では、エナ

ジーハーベスティングを用いてノードに電力を供給する際に、日陰領域の発電量を考慮することでノードの発電量が最大になるようにノードを移動させることで、少ないノード数でのネットワーク寿命の延長を図る。

3. 配置ノード数最少化問題

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す。

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基地局にデータを送信し、ネットワークの稼働期間 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 は作物の作付から収穫までの期間であると想定する。多数のセンサノードがセンシングおよびデータ収集を行うためのネットワークを構築する。また、対象領域の端に基地局を設置する。基地局はバッテリー切れを起こさないものとする。

ソーラパネルを用いたエナジーハーベスティングでは、発電量は日射量によって変化する。また、日射量は日陰の領域と天候によって変化する。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。

作物は円錐状に成長するとし、成長速度は式 (1) のロジスティック成長曲線 [9] に従うものとする。

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

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。

また、時刻により太陽の位置が変化し、また、季節により太陽の軌道が変化する。さらに、日射量は天候によっても変化する。晴天時は日射量が大きく、曇天時は日射量が小さい。そこで、日射量モデルとして、時刻 t における晴天時の日射量の領域の日射量を $c_{sunny}(t)$ 、晴天時の日陰の領域の日射量を $c_{shadowy}(t)$ 、曇天時の日射量を $c_{cloudy}(t)$ とする。

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 (2) に従うものとする。

$$Charge(c) = c \times E_{gen} \quad (2)$$

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。

$x[\text{bit}]$ のデータを $d[\text{m}]$ 送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 (3)、(4) に従うものとする [10]。

$$Trans(x, d) = E_{elec} \times x + \varepsilon_{amp} \times x \times d^2 [J] \quad (3)$$

$$Recep(x) = E_{elec} \times x [J] \quad (4)$$

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 $D[\text{bit}]$ のデータを取得するための電力量 $Sens()$ は下式 (5) に従うものとする。

$$Sens(D) = E_{elec} \times D + E_{sens} \quad (5)$$

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 $d[\text{m}]$ 移動するための電力量 $Move(d)$ は下式 (6) に従うものとする [11]。

$$Move(d) = d \times E_{move} \quad (6)$$

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

3.3 問題の定式化

本問題の入力として、対象領域 $Field$ 、ノード数 k 、ノード n_i の位置 $n_i.pos$ 、ノード n_i のセンシング半径 $n_i.r$ 、ノード n_i の電池残量 $n_i.energy$ 、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_i の移動スケジュールとは、各時刻 t における n_i の位置 $n_i.pos(t)$ 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 ごとのタイムスロットに分け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。

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

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_i 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_i 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.

$$\begin{aligned} & \forall j \in \{1, \dots, m\}, n_i.energy(t_j) \\ & + Charge(c(n_i, [t_j, t_j + I))) \\ & - Trans(x, d) - Recep(y) - Sens(D) > 0 \quad (10) \end{aligned}$$

ここで, $c(n_i, [t_j, t_j + I))$ はノード n_i 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_i 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_i 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.

$$\begin{aligned} & \forall j \in \{1, \dots, m\}, n_i.energy(t_j) \\ & + Charge(c(n_i, [t_j, t_j + I))) - Move(l) > 0 \quad (11) \end{aligned}$$

ここで, l はノード n_i 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 k 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. 提案手法

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. 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

小領域A	B	A
B	A	B
A	B	A

図 1 対象領域の分割

の被覆を満たすようにノードを移動させる. しかし, 隣接する領域で同時にノードの移動スケジュールの決定を行うと, 領域の境界付近にいるノードが同時に複数の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 [13] で提案されている隣接する領域では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 1 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 でノードの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 稼働を保つため, センシング間隔毎に小領域内の最もバッテリーが多いノードがリーダーノードとなり, 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った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.

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. 3.3 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 に示すように, センサノードのセンシング半径 $n_i.r$ に対して, 対象領域を 1 辺 $\frac{n_i.r}{\sqrt{2}}$ の正方形のグリッドに分割する. 各スロットにおいて, グリッド内でセンサノードが 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とする. 図 1 における各小領域には複数のグリッドが含まれており, 各スロットにおいて, 小領域に含まれるすべてのグリッドにセンサノードが 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.

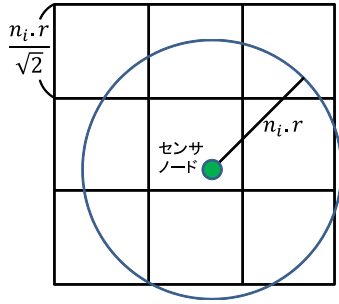


図 2 対象領域の分割

4.3 発電・消費電力予測

各センサノードは、各スロットの開始時刻 t_0 に現在の位置から移動しない場合の発電量と消費電力量の予測を行う。まず、センサノードは、自身の位置情報と日時から時刻 t_0 から $t_0 + I$ までの発電量の予測を行う。過去の日射量のデータ [12] のうち、晴天時の全天日射量を時刻 t_1 における日向の日射量 $c_{sunny}(t_1)$ 、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 $a_{cloudy}(t_1) = 1$ 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。

$$\begin{aligned}
 Charge(c) = & E_{gen} \times \sum_{k=t_0}^{t_0+I} (c_{sunny}(k) \times a_{sunny}(k) \\
 & + c_{shadowy}(k) \times a_{shadowy}(k) \\
 & + c_{cloudy}(k) \times a_{cloudy}(k)) \quad (13)
 \end{aligned}$$

次に、3.2 節の電力モデルを用いて、時刻 t_0 から $t_0 + I$ 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。

求めた予測発電量と予測消費電力量から、 $t_0 + I$ における予測電池残量を計算する。

また、同様にして、ノードが移動を行った場合の予測発電量と予測消費電力量を求め、 $t_0 + I$ における予測電池残量を計算する。

4.4 提案アルゴリズム

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することで、対象領域の全被覆を満たす。

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。

各領域で実行されるアルゴリズムを以下に記述する。

- (1) 小領域内の各ノードが自身の現在の電池残量、 $t_0 + I$ における予測電池残量と位置に関する情報を同じグリッドに属するすべてのノードと交換
- (2) 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
- (3) 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発見
- (4) 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、 $t_0 + I$ 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(後述)
- (5) 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
- (6) 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。そうでなければステップ (2) に戻る

移動ノード決定方法

対象領域の全被覆を満たすため、各タイムスロットの時間間隔 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ノードの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。

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 4 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 4 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センサノード a がリーダーノードに選ばれたとする。リーダーノード a は、図 4 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を行っていないグリッド g_1, g_3, g_7, g_9 を求める。次に、4.3 節で述べたように、センシングを行っ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の予測を行い、現在のタイムスロットの終了時刻の電池残量の予測を行う。そして、予測した電池残量の最小値が最大になるノード、すなわち、全体での電池残量の合計が最も大きくなるノードを目的地点まで移動させる。例えば、表 1 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、小領域 A のグリッド g_1 に移動した場合

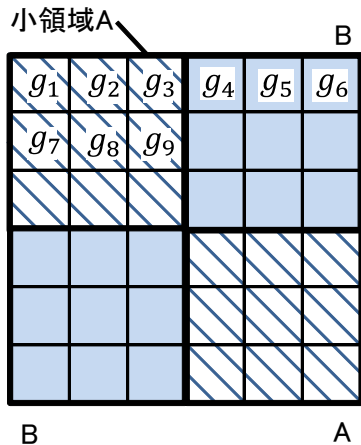


図 3 対象領域の分割の例

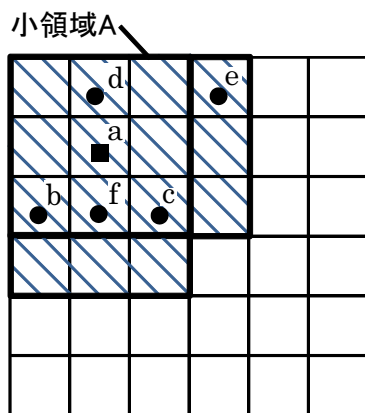


図 4 小領域 A における移動スケジュールを計算する領域

表 1 ノードの予測電池残量

	移動しない場合の 予測電池残量	移動した場合の 予測電池残量
ノード a	60%	55%
ノード b	55%	50%
ノード c	50%	35%
ノード d	55%	60%
ノード e	50%	45%
ノード f	50%	45%

の予測電池残量を求めたとする。ノード d の移動した場合の電池残量の方が移動しなかった場合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 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 まで移動する。そして、移動した場合の予測電池残量を用いて、残りのセンシングがされていないグリッドに対しても、同様に計算を行いノードの移動経路を決定する。



図 5 充電回路

5. 評価

本章では、提案手法を評価するため、簡単な設定のもとで WSN を運用した場合の領域の全被覆を一定期間保つために必要なノード数及び電力量についてシミュレーションにより評価を行った結果について述べる。

この評価を行うにあたって、パラメータをできるだけ現実に即したものとするため、予備実験としてソーラパネルによる太陽光発電機能と駆動機能を備えたセンサノードを制作し、太陽光発電量および消費電力量を計測した。

5.1 予備実験

5.1.1 ソーラパネルによる太陽光発電量

WSN で利用するセンサノードに充電することを想定し、図 5 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による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ほとんど発電量がなかった。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、5.2 節における評価では、平均値を用いて予測を行う。

5.1.2 駆動機能による消費電力量

駆動機構による消費電力の測定は、図 6 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/s] 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。表 3 にロボットを 50[cm/sec] で動かした場合の消費電力量を示す。

移動による消費電力は、送受信や待機電力に比べて非常に大きく、また駆動する時間も長い。そのため、消費電力を考慮し、効率的にノードを移動させる必要がある。

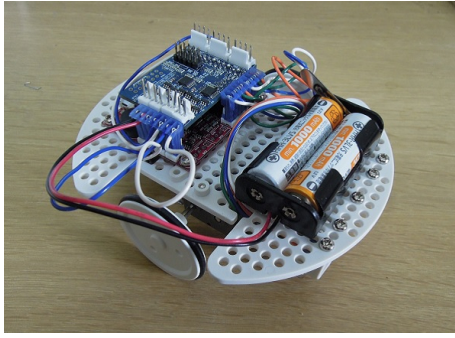


図 6 駆動ロボット

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]

表 3 駆動機能による消費電力量の計測結果 (移動速度 50[cm/sec])

移動による消費電力量	1680[mW]
------------	----------

5.2 ノード数および電池残量の評価

簡単な状況設定のもとで提案手法を用いて WSN を構築したときのノード数と電池残量について評価を行う。

5.2.1 シミュレーション環境

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。実験で利用するパラメータを表 4 に示す。4.2 節に従うとグリッドの 1 辺は $\frac{15}{\sqrt{2}} = 10.6[m]$ となるが、簡単のためにグリッドの 1 辺を 10[m] とする。ノードのバッテリーは 5.1 節と同様に単三電池 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。無線通信は XBee を利用し、送受信による消費電力や待機電力は文献 [15] をもとに設定した。60m × 60m の対象領域を 2 × 2 の小領域に分け、図 3 と同様に 1 つの小領域に 3 × 3 のグリッドが含まれるように設定した。

5.2.2 実験結果

ノード数を変化させて WSN を 90 日間運用した場合の、センサノードの電池残量の平均値と最小値を表 5 に示す。ノード数が 24 以上の時、どのノードもバッテリー切れを起こさずに WSN を 90 日間運用することができた。同じ制約条件のもと、静止ノードのみを用いて WSN を運用する場合、各グリッドに 1 つノードが必要になるため、ノード数が 36 必要である。そのため、提案手法を用いた場合、静止ノードのみを用いた場合に比べてノード数を 33% 減らすことができた。しかし、ノード数が 23 になると、74 日目で複数のノードがバッテリー切れを起こし、対象領域の被覆を保つことができなくなった。

5.2.3 考察

表 5 から、90 日間運用した後でも、平均電池残量と最小電池残量にあまり差がなく、均等にノードのバッテリーを利

表 4 パラメータ設定

対象領域のサイズ	60 × 60[m]
センシング半径	15[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]

表 5 WSN 運用後の電池残量

ノード数	平均電池残量	最小電池残量
30	8150101.6[mWs]	8113512[mWs]
25	7438098.7[mWs]	7400436[mWs]
24	1771668.0[mWs]	1735944[mWs]
23	15358.4[mWs]	0[mWs]

用できていることがわかる。これは、太陽光発電量と消費電力量から一定時間後の電池残量を予測することで、より電池残量が大きいノードを移動させることで、電池残量の平滑化ができたからであると考えられる。

また、ノード数が 24 の時、25 以上と比べて極端に電池残量が減っている。これは、ノード数が 24 以下において移動による消費電力がソーラパネルによる発電量より小さくなったためである。今回のシミュレーション環境では、ノード数が 1 つ減ると、1 つのタイムスロットで移動しなければならない地点が 1 つ増えるため、1 日でのノードの合計移動距離は最低でも 960[m] 伸びると考えられる。この移動距離の増加に伴う消費電力、特に充電できない夜間の消費電力が大きいため、バッテリー切れが起きたものと考えられる。

6. まとめ

本稿では、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した。シミュレーション評価において現実的なパラメータを設定するために、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、実際にセンサノードを制作して行った。また、簡単な設定のもとで WSN を運用した場合のノード数について評価を行い、提案手法を用いることで静止ノードのみを用いた場合に比べて 33% 少ないノード数で WSN を構築できることを示した。

今後は、さらに詳しい性能評価を行うため、ネットワークシミュレータ上に実装を行い、評価する予定である。

参考文献

- [1] 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.
- [2] Hwang, J., Shin, C., Yoe, H. "A Wireless Sensor Network-Based Ubiquitous Paprika Growth Manage-

- ment System,” *Sensors 2010*, 10, pp.11566–11589, 2010.
- [3] 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*
- [4] 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
- [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] NEDO, “日射量データベース”, <<http://www.nedo.go.jp/library/nissharyou.html>> (参照 2012-08-21)
- [13] 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.
- [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] Digi International Inc. , “XBee/XBee-PRO ZB RF Modules”, <<http://ftp1.digi.com/support/documentation/90000976.P.pdf>> (参照 2013-05-15).