作物の生育による日陰領域の変化を考慮したソーラーパネル付センサノードの移動スケジューリング法

江藤 大[1,a)]　勝間 亮[2,b)]　玉井 森彦[1,c)]　安本 慶一[1,d)]

概要：近年，太陽光や熱などの環境エネルギーから電力を獲得するエナジーハーベスティングを利用した無線センサネットワーク (WSN) が注目されている．エナジーハーベスティングによる電力供給を利用することによって，ネットワーク寿命の半永久化や，ネットワーク維持のためのコストの削減が期待される．しかし，太陽光を用いたエナジーハーベスティング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．既存研究では，天気による日照量の変化を考慮してネットワーク寿命を延長する手法が提案されている．しかし，農業用地で使用される WSN では日陰の領域が作物の生育状況や季節ごとの太陽高度によっても変化していく．そのため，発電量が不十分なノードが発生し，それらの電力が早急に枯渇することでネットワーク全体を長期間維持できなくなるという問題がある．また，農業用地などで定期的に温度や湿度の情報を収集するためにはセンサノードで対象領域を常に被覆することが求められる．そこで本研究では，対象領域を全被覆しつつ，位置と日時に応じた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をダイナミックに移動させる手法を提案する．ソーラーパネルを用いた充電機構および移動機構を装備したセンサノードを製作し，ネットワーク寿命の延長度合いについて，移動機構を持たないノードとの比較による評価を行う．

Movement Scheduling Method of Sensor Nodes with Solar Panel Considering Shadowy Area Change by Crop Growth

Eto, Masaru[1,a)]　Katsuma, Ryo[2,b)]　Tamai, Morihiko[1,c)]　Yasumoto, Keiichi[1,d)]

Abstract: In recent years, wireless sensor networks (WSNs) using energy harvesting have been attracting increasing attention. Power supply by energy harvesting is expected to increase lifetime of WSNs and to reduce the cost of network maintenance. However, electric power generation by energy harvesting using solar power is not always enough because it depends on intensity of solar radiation. In particular, intensity of solar radiation of shadowy area is low. Then, some methods to extend lifetime of WSNs are proposed that consider changing of intensity of solar radiation depending on weather. However, shadowy area changes by crop growth and solar altitude in agricultural site. Therefore, electric power generation of some nodes may become insufficient and cause a problem in maintenance of WSNs. Also, it is required that sensor nodes cover the field any time to periodically collect environmental information. In this paper, we propose a movement scheduling method that increases electric power generation of nodes with low battery by predicting amount of electric power generation based on position of node, time and date. We assemble a sensor node with charger using solar panel and moving apparatus and evaluate lifetime of WSNs by comparing our method with a method without moving apparatus of sensor node.

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
a) masaru-e@is.naist.jp
b) ryo-k@mi.s.osakafu-u.ac.jp
c) morihi-t@is.naist.jp
d) yasumoto@is.naist.jp

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

ⓒ2012 Information Processing Society of Japan

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，各センサ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．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 [3] 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る．ソーラー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，センサノードに電力を供給することができる．そのため，従来のセンサノードはバッテリ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．しかしながら，エナジ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．例えば，太陽光を利用した発電では，日射量によってソーラー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．

そこで，天候や太陽の軌道を考慮した WSN の研究が行われている．文献 [4] では，時間で変化する太陽のプロファイルによって，センサノードのセンシング範囲を制御し，最小のノード数で対象領域を被覆する手法を提案している．また，文献 [5] では，天候の変化を考慮した発電量の予測を行い，バッテリに余裕があるノードにデータ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ている．しかし，これらの研究では，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，センサノードのバッテリが枯渇してしまう可能性が高い．

そこで本研究では，対象領域を全被覆しつつ，位置と日時に応じた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をダイナミックに移動させる手法を提案する．

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．農業用地では，作物による日陰の領域が発生し，作物が生育することによって日陰の領域が変化していくため，位置や日時によって日射量が変化する．センサノードはソーラー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，各センサノードが現在の位置と日時から自身の発電量を予測する．予測した発電量を近隣のノードと比較し，移動による消費電力と移動後の発電量を考慮して，センサノードの電池残量が最大になるようにノードを移動させる．

以下，2 章では，問題設定について述べる．3 章では，提案手法について述べる．4 章では，センサノードの実装方法について述べる．5 章では，ネットワークの寿命について移動機構を持たないノードとの比較による評価方法を検討する．6 章で，まとめを述べる．

2. 問題設定

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．

2.1 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，定期的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するデータ収集型 WSN を対象とする．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し，基地局はバッテリ切れを起こさないものとする．

ソーラー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 [6] に従うものとする．

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

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し，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 $c_{shadowy}(t)$，曇天時の日射量を $c_{cloudy}(t)$ とする．

センサノードはソーラー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．農業用地においてセンサノードは，作物が植えられている箇所

ⓒ2012 Information Processing Society of Japan

や畝[*1]の箇所は移動することができない．そのため，センサノードは対象領域内の決められた領域のみでしか移動できない．

2.2 電力モデル

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

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

ここで，E_{gen} はソーラー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 (3)，(4) に従うものとする [7]．

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

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

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[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．

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

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[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 [8]．

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

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．

2.3 問題の定式化

本問題の入力として，対象領域 $Field$，ノード s の位置 $s.pos$，ノード s のセンシング半径 $s.r$，ノード s の電池残量 $s.energy$，定数 K，n，$c_{sunny}(t)$，$c_{shadowy}(t)$，$c_{cloudy}(t)$，E_{gen}，E_{elec}，ε_{amp}，E_{sens}，E_{move}，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である．ここで，ノード s の移動スケジュールとは，各時刻 t における s の位置 $s.pos(t)$ のことである．

ノードの移動は，対象領域の全被覆が保たれるようにしなければならない．対象領域の全被覆ができなくなる時刻を t_{life} とすると，この制約は以下の式 (7) で表すことができる．

$$\forall t \in [t_{start}, t_{life}), \forall pos \in Field, |Cover(pos,t)| \geq 1 \tag{7}$$

ここで，t_{start} は WSN の稼働開始時刻，$Cover(pos,t)$ 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．

$$\begin{aligned} &Cover(pos,t) \\ &= |\{s | |s.pos(t) - pos| \leq s.r \wedge s.energy(t) > 0\}| \end{aligned} \tag{8}$$

また，センサノードが自身のセンシング範囲を被覆するためには，各時刻でデータの送受信，および，センシングをするための電池残量が残っている必要がある．この制約を式 (9) で示す．

$$\begin{aligned} &\forall t \in [t_{start}, t_{life}), s.energy(t) \\ &-Trans(x,d) - Recep(y) - Sens() > 0 \end{aligned} \tag{9}$$

ここで，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，各時刻でノードが移動する場合，移動するための電力量以上の電池残量が残っている必要がある．この制約を式 (10) で示す．

$$\forall t \in [t_{start}, t_{life}), s.energy(t) - Move(l) > 0 \tag{10}$$

ここで，l はノードが一度に移動する距離 [m] である．

本問題は，ネットワーク寿命 t_{life} を最大化させる，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 (11) で示される．

$$maximize(t_{life})\ subject\ to\ (7), (9)\ and\ (10) \tag{11}$$

3. 発電量予測に基づくセンサノードの移動スケジューリング法

各センサノードは，t 時間後のソーラーパネルによる発電量とデータ送受信やセンシングによる消費電力量を予測し，電池残量を求める．予測した発電量，消費電力量，電池残量を近隣ノードと交換し，移動した場合と移動しなかった場合の t 時間後の電池残量を比較し，センサノードの t 時間後の電池残量の最小値が最大になるように移動する．

3.1 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．そこで，図 1 に示すように，センサノードのセンシング半径 $s.r$ に対して，対象領域を 1 辺 $\frac{s.r}{\sqrt{2}}$ の正方形のグリッドに分割する．各グリッド内にセンサノードが 1 つ以上存在していれば，そのグリッドは被覆していると

*1 作物を生育させるために土を盛り上げた箇所

ⓒ2012 Information Processing Society of Japan

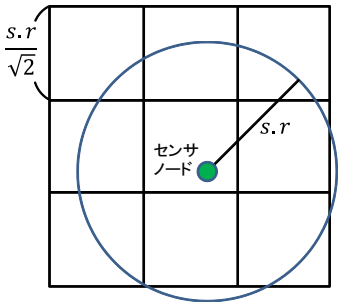

図 1 対象領域の分割

する．また，すべてのグリッドにセンサノードが 1 つ以上存在していれば，対象領域を全被覆していることになる．

センサノードは，移動によって現在のグリッドから出てしまう場合に，グリッド内に別のセンサノードが存在するか，他のグリッドからセンサノードが移動してくるかという情報を近隣ノードから取得する．もし，移動によって現在のグリッドにセンサノードが 1 つも存在しなくなる場合には移動しない．ただし，2 つのノード間で位置を交換する場合には被覆の状態は変わらないため，近隣ノードの状況に関係なく移動を行う．

3.2 発電・消費電力予測による移動

各センサノードは，非同期に発電量と消費電力量の予測を行い，移動の判断を行う．

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 時間後までの発電量の予測を行う．過去の日射量のデータ [9] 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ーパネルの性能を基に，式 (12) を用いて発電電力値を計算する．

$$
\begin{aligned}
Charge(c) = E_{gen} \times \sum_{k=t_0}^{t_0+t} & (c_{sunny}(k) \times a_{sunny}(k) \\
& + c_{shadowy}(k) \times a_{shadowy}(k) \\
& + c_{cloudy}(k) \times a_{cloudy}(k)) \qquad (12)
\end{aligned}
$$

次に，時刻 t_0 から t 時間後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の予測を行う．2.2 節の電力モデルを用いて，センシングを行う間隔やそれまでに送受信したデータから，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 時間後の予測電池残量を計算する．近隣ノードの予測電池残量を取得し，それぞれのノードと位置を交換した場合の予測電池残量を計算する．この時，予測消費電力量に移動時に発生する消費電力を足す．移動した場合と移動しなかった場合で，それぞれ近隣ノードの中で最小の予測電池残量を求める．移動した場合の最小予測電池残量の方が大きい場合には，ノードの移動を行う．

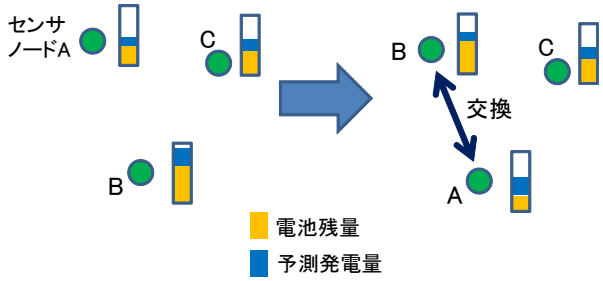

図 2 発電量と消費電力量の予測に基づくノードの位置交換の例

表 1 ノードの電池残量，予測発電・消費電力量

	ノード A	ノード B	ノード C
$i.energy$	30%	60%	40%
$Charge(c)$	15%	30%	20%
$Consumption(t, t', i.pos)$	10%	15%	10%

動作例を図 2 に示す．図 2 における各ノードの電池残量，予測発電量，予測消費電力量を表 1 に示す．$Consumption(t, t', i.pos)$ はノード i の位置 $i.pos$ における時刻 t の t' 時間後までのセンシングおよびデータ送受信での予測消費電力量である．また，各ノード間で位置を交換した場合に移動で消費する電力を 5%とする．ここで，移動しない場合のそれぞれの t 時間後の電池残量は，それぞれ 35%，75%，50%となる．また，ノード A と B が位置を交換した場合の t 時間後の電池残量は，それぞれ 40%，60%，50%となる．移動した場合の方が，電池残量の最小値が大きくなるためノード A と B が位置を交換する．

4. センサノードの実装方法

本章では，センサノードの実装方法について述べる．

センサノードは，センサ機構，通信機構，充電機構，移動機構からなる．

センサ機構は，温度センサと湿度センサを持ち，温度と湿度のセンシングを行う．

通信機構は，ZigBee による無線通信を行うことができ，センシングデータの基地局への送信およびノード情報の送受信を行う．また，ZigBee のメッシュルーティングを用いて，ネットワークの構築およびルーティングを行う．

充電機構は，ソーラーパネルによる発電を行うことができる．また，最大電力点追従 (MPPT) 回路により，ソーラーパネルからの電力を充電に必要な電圧・電流にコンバートする．

移動機構は，4 輪に対し左右 2 つの DC モータで駆動輪を動作させる．モータドライバにより，前転・逆転を制御

ⓒ2012 Information Processing Society of Japan

することで前進・後進・回転をすることができる．

5. 評価方法

本章では，今後行う予定である評価の概要について述べる．

提案手法の有効性を示すためにテストベッドでの実験と計算機シミュレーションによる評価を行う．評価は，対象領域にセンサノードを配置し，環境情報を一定時間ごとに収集したときのネットワークの寿命および，電池残量によって評価を行う．ネットワークの寿命とは対象領域が全被覆されている時間であり，WSN が構築されてから 1 つ以上のグリッドでノードが存在しない状況になるまでの時間である．また，電池残量はネットワーク寿命が尽きたときの電池残量の偏りを評価する．2 つの評価項目について，移動機構を持ったセンサノードを用いた場合と移動機構を持たないセンサノードを用いた場合とで比較を行う．

5.1 シミュレーションにおけるシナリオ

シミュレーションでは，対象領域にランダムにノードを配置し，WSN を構築する．この時，移動機構を持たないノードでも全被覆できるように各グリッドに 1 つ以上のノード配置する．各センサノードは定期的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によって基地局に送信する．

6. まとめ

本稿では，エナジーハーベスティングを利用した WSN において，対象領域を全被覆しつつ，位置と日時に応じた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をダイナミックに移動させる手法を提案した．今後は，センサノードを製作し，小規模なテストベッドによる評価とテストベッドで得られたデータを基にした大規模なシミュレーションによる評価を行う予定である．

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 Management System,” *Sensors 2010, 10*, pp.11566–11589, 2010.

[3] Chalasani, S., Conrad,J. “A survey of energy harvesting sources for embedded systems,” *Proc. of IEEE Southeastcon 2008*, pp.442–447, 2008.

[4] 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.

[5] 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.

[6] 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.

[7] 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.

[8] 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.

[9] NEDO,“日射量データベース”, <http://www.nedo.go.jp/library/nissharyou.html> (参照 2012-08-21)

ⓒ2012 Information Processing Society of Japan