

太陽光発電を適用した無線センサネットワークにおける 低発電量下でのデータ収集率向上のための センシング頻度の制限手法

石谷 直也^{1,a)} 小林 健太郎² 岡田 啓² 片山 正昭²

概要: 太陽光発電を適用した無線センサネットワークにおいて、低発電量下でのデータ収集率の向上を目指している。データ収集率を向上する方法として、あるノードのデータ送信時に他ノードがデータの中継を行う協力伝送方式がある。しかし、協力伝送を用いても低発電量となる曇天や夜間には電池残量不足によりデータ収集率が低下してしまう。これに対して、センシングを行わずデータ中継のみを行うノードを導入することで、低発電量下でのデータ収集率を向上できることをこれまでに明らかにしている。一方で、センシングを行わないノードを固定していたためにデータ収集率の向上には限りがあった。そこで本研究では、電池残量の少ないノードから順にセンシング頻度を制限する手法を提案する。センシングを行わないノードを固定した手法、センシング頻度を制限するノードをランダムに選択した手法との性能比較を行い、提案手法の有効性を示す。

キーワード: センサネットワーク, エナジーハーベスティング, 協力伝送

Limiting the Sensing Frequency to Improve the Data Collection Rate in Low Power Generation for Solar-powered Wireless Sensor Networks

NAOYA ISHITANI^{1,a)} KENTARO KOBAYASHI² HIRAKU OKADA² MASAOKI KATAYAMA²

Abstract: Our goal is improvement of the data collection rate in solar-powered wireless sensor networks (WSNs). One of the methods to improve the data collection rate is a cooperative transmission by which a node relays data from a source node. However, the cooperative node is not sufficient to prevent the data collection rate from decline in low power generation, such as in cloudy and at night. We tackled this problem by introducing nodes that only relay data without sensing data. As a result, we clarified that our proposal improved the data collection rate in the low power generation. On the other hand, it suppressed the improvement of the data collection rate because nodes that do not sense data are fixed in place. Therefore, we propose the method in which sensing frequency is limited for some nodes that do not have sufficient battery level. Then we compare the performance of our proposal with the one that fixed nodes do not sense data and the one that randomly selected nodes are limited in sensing frequency.

Keywords: sensor network, energy harvesting, repeater, cooperative transmission

1. はじめに

無線センサネットワーク (WSN) は、多数のセンサノードが観測した情報を無線通信により基地局の BS (ベースステーション) へ送ることで広範囲の情報を収集する技術である。センサノードは温度や光、振動などの実空間の情報

¹ 名古屋大学大学院 工学研究科 電子情報システム専攻
Dept. of Electrical Engineering and Computer Science, Graduate
School of Engineering, Nagoya University

² 名古屋大学エコトピア科学研究所
EcoTopia Science Institute, Nagoya University

^{a)} ishitani@katayama.nuee.nagoya-u.ac.jp

を取得する小型端末であり、電池駆動によって配線を必要としないため、自由度の高い配置が可能になる。無線センサネットワークの応用例は、山火事や水位の監視、温度や照度、交通情報の観測など様々である。

センサノードの長期稼働方法として、環境エネルギーを取得してノードを充電する方法が注目されている。これは、エネルギーハーベスティングと呼ばれる。エネルギーハーベスティングに利用可能な環境エネルギーとしては、太陽光や風力、振動などがある [1], [2], [3]。しかし、センサネットワークでは、ノード配置の自由度を保つために使用可能な電池や発電素子の大きさが制限がされ、取得できるエネルギーが限られている。そこで、取得した環境エネルギーを効率的に利用する研究がさかんに行われている [4], [5], [6]。本研究では屋外での用途を想定する。屋外で利用可能な環境エネルギーの中でも比較的安定的に大きなエネルギーを取得できる太陽エネルギーの利用を考える。

また、無線センサネットワークでは、無線通信によってデータを伝送するため、雑音などの影響によりデータ伝送に誤りが生じる場合がある。この問題は伝送に失敗した場合に、ノードが同一データの再送を繰り返すことで解決できる。しかし、BS から遠方にあるノードはデータの受信失敗確率が大きくなり、必要な再送回数が増加してしまう。従来手法では、協力伝送により遠方ノードの再送回数を低減していた [7-10]。しかし、いずれも曇天のような低発電量下の対応は検討されておらず、協力伝送を用いても電池残量不足により低発電量下に遠方ノードが早期に稼働停止してしまう場合がある。そのため、ネットワークが要求される機能を果たせなくなってしまう。

これに対し、文献 [11] において、低発電量下で遠方ノード付近にセンシングを行わないノードを導入し、このノードが遠方ノードのデータを低発電量下に積極的に中継することでデータ収集率が向上することを明らかにした。しかし、この手法ではセンシングを行わないノードを固定していたため、遠方ノード以外のノードの電池残量が少ない場合に対応出来ず、データ収集率の向上には限りがあった。

そこで本研究では、電池残量の少ないノードから順にセンシング頻度を制限する手法を提案する。そしてセンシングを行わないノードを固定した手法、センシング頻度を制限するノードをランダムに選択した手法との性能比較を行い、提案手法の有効性を示す。

2. システムモデル

図 1 のように 1 つの BS の電波到達範囲内に複数のセンサノードおよびセンシングしないノードが配置され、その範囲内を観測領域とするシステムを考える。BS は利用可能なエネルギーに制限は無いものとする。BS が伝送する信号は十分大きなエネルギーで伝送されるため、全ノード

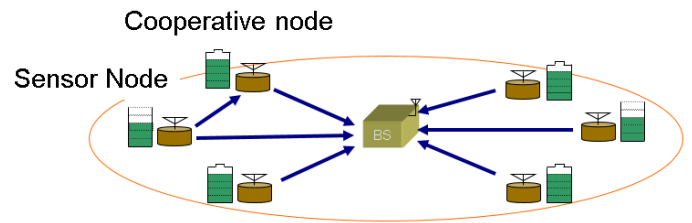


図 1 システムモデル

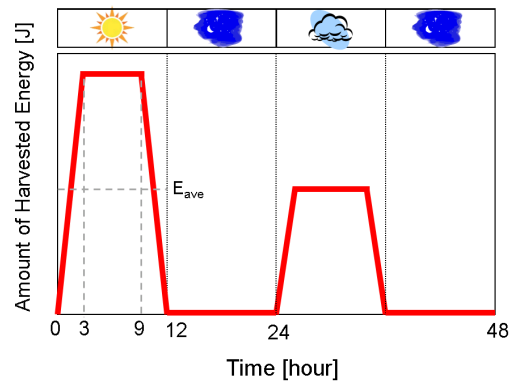


図 2 発電量モデル

で必ず受信に成功すると仮定する。また、BS は全ノードの位置を把握しており、BS により全ノードの送受信はスケジューリングされるためパケットの衝突は起こらないとする。データのセンシングは一定時間 T [hour] 毎に全ノードが行い、BS へデータパケットの伝送を行う。それ以外の期間では、ノードはスリープ状態をとり、エネルギーの消費は無視できるとする。

発電量は昼夜、天候及び時間による変化を考慮する。発電量の変化を図 2 に示すように昼夜及び、時間の変化によって変動するとする。想定する天候は、晴天・曇天の 2 つとし、晴天時と曇天時の発電量の比は 2 : 1 とする。晴天時の平均発電量を E_{ave} とし、また天候は 1 日毎に変化し、同日中での天候の変化は起こらないとする。なお、観測領域内の全ノードの発電量は同じであると仮定する。

3. 協力伝送

協力伝送の過程は以下のように行われる [7]。

- (1) BS が全ノードにスケジューリング情報をブロードキャストする。
- (2) 送信ノードが BS、協力ノードにセンシングを行わないデータパケットを送信する。
 - (a) BS が直接送信ノードから伝送されたパケットの受信に成功した場合、BS が送信ノード、協力ノードに ACK を送信して終了する。
 - (b) BS が送信ノードから伝送されたパケットの受信に失敗したが、協力ノードが受信に成功した場合、協力ノードが BS に送信する。BS が受信に成功した場合は送信ノード、協力ノードに ACK を送信。BS が受

信に失敗した場合は、送信ノードが再送する。

- (c) BS, 協力ノードが送信ノードから送られたパケットの受信に失敗した場合, 送信ノードはパケットを再送する。

なお, パケットの再送では, 送信ノードが ACK を受信するか, または送信回数が送信上限回数 N_0 に達するまで再送を繰り返す。送信上限回数 N_0 は次式を満たす最小の n である。

$$(P_{(i,BS)})^n < P_a \quad (1)$$

ただし, $P_{(i,BS)}$ は送信ノード i から BS への伝送誤り率, n は送信回数であり, P_a は許容する誤り率である。協力伝送では上記のように協力ノードを利用することで BS から遠方のノードの再送回数を低減し, エネルギー消費を軽減できる。

3.1 協力ノード選択手順

協力伝送では BS が各送信ノードに対して協力ノードを選択する。伝送可能条件 (3.2 節) を満たすノードについて下記 (1)~(3) を行う。

- (1) 送信ノード i に対して, その他のノード j との協力ノード選択基準値 $\Psi_{i,j}$ (3.3 節) を算出し, 次式のように協力ノード選択基準値が最も高いノードを送信ノード i の協力ノード r として選択する。

$$r = \arg \max_j \{\Psi_{i,j}\} \quad (2)$$

ただし, $\Psi_{i,i} \geq \Psi_{i,r}$ の場合は協力ノードを用いず, 送信ノード i が単独で BS へデータ伝送を行う。

- (2) 協力ノードを用いる場合は, 送信ノード i と選択された協力ノード r の電池残量を仮想的に更新し, 協力ノードを用いない場合は, 送信ノード i の電池残量のみを仮想的に更新する (3.4 節)。
- (3) ノード $i+1$ について (1), (2) を行い, 伝送可能条件を満たす全ノードに対して以上の操作を繰り返す。

3.2 伝送可能条件

以下の条件を満たすノード i のみパケットを生成し BS にパケット伝送を行う。

$$\Psi_{i,i} = \frac{B_i}{\mathcal{E}_{NC}[E_{c,i}]} \geq 1 \quad (3)$$

B_i は送信ノード i の電池残量であり, $0 \leq B_i \leq C_0$ (C_0 は電池容量) である。また, $\mathcal{E}_{NC}[E_{c,i}]$ は送信ノード i が単独で BS へ伝送する場合の送信ノード i の消費エネルギーの期待値である。つまり, 式 (3) は送信ノード i が単独で伝送を行う際における消費エネルギーの期待値以上の電池残量を持つ場合のみ伝送を開始することを示す。

$\mathcal{E}_{NC}[E_{c,i}]$ は次式のようにデータの送信エネルギーの期待値とルーティング情報, ACK の受信エネルギーの和で表せる。

$$\mathcal{E}_{NC}[E_{c,i}] = (1 - P_{(i,BS)})^{-1} L \cdot E_{TX} + (L_{RT} + L_{ACK}) E_{RX} \quad (4)$$

L はデータのビット数, E_{TX} は 1 ビット当たりの送信エネルギーである。また, L_{RT} はスケジューリング情報のビット数, L_{ACK} は ACK のビット数であり, E_{RX} は 1 ビット当たりの受信エネルギーである。

3.3 協力ノード選択基準値

送信ノード i , ノード j の電池残量と消費エネルギーの期待値の比が小さい方を協力ノード選択基準値 $\Psi_{i,j}$ とし, 次式で表す。

$$\Psi_{i,j} = \min \left\{ \frac{B_i}{\mathcal{E}_C[E_{c,i}]}, \frac{B_j}{\mathcal{E}[E_{c,j}]} \right\} \quad (5)$$

$\mathcal{E}_C[E_{c,i}]$ は協力ノードを用いる場合の送信ノード i の消費エネルギーの期待値である。また, B_j ($0 \leq B_j \leq C_0$) はノード j の電池残量, $\mathcal{E}[E_{c,j}]$ はノード j の消費エネルギーの期待値である。

$\mathcal{E}_C[E_{c,i}]$ は次式のようにデータの送信エネルギーの期待値とルーティング情報, ACK の受信エネルギーの和で表される。

$$\mathcal{E}_C[E_{c,i}] = \alpha^{-1} L \cdot E_{TX} + (L_{RT} + L_{ACK}) E_{RX} \quad (6)$$

α は次式で表される。

$$\alpha = 1 - P_{(i,BS)} P_{(i,j)} - P_{(i,BS)} (1 - P_{(i,j)}) P_{(j,BS)} \quad (7)$$

$P_{(i,j)}$ は送信ノード i からノード j への伝送誤り率, $P_{(j,BS)}$ はノード j から BS への伝送誤り率である。

また, $\Psi_{i,j}$ の算出のためには, 簡単化のため協力ノード自身が取得したデータは直接 BS へ送信され必ず伝送に成功すると仮定するとノード j の消費エネルギーの期待値は以下のように表せる。

$$\begin{aligned} \mathcal{E}[E_{c,j}] = & L \cdot E_{TX} + (L_{RT} + L_{ACK}) E_{RX} \\ & + P_{(i,BS)} (1 - P_{(i,j)}) \alpha^{-1} L \cdot E_{TX} \\ & + (\alpha^{-1} L + L_{ACK}) \cdot E_{RX} \end{aligned} \quad (8)$$

式 (8) の第 1 項はノード j 自身のデータの送信エネルギーであり, 第 2 項はルーティング情報と自身のデータに対する ACK の受信エネルギーである。第 3 項は送信ノード i から受信したデータを中継して BS へ送る送信エネルギーの期待値である。第 4 項は送信ノード i のデータの受信エネルギーと送信ノード i のデータに対する ACK の受信エネルギーである。

3.4 仮想電池残量の更新

各ノードは複数の送信ノードに対する協力ノードになりうるため、選択基準の計算において送信ノード i と協力ノード r は電池残量を仮想的に更新する必要がある。各ノードの仮想電池残量は送信ノード i のデータ伝送で消費するエネルギーの期待値を差し引くことで更新される。協力ノードを用いる場合、各ノードの仮想電池残量は次式のように更新される。

$$B_i^{(new)} = B_i^{(old)} - \{\alpha^{-1}L \cdot E_{TX} + L_{ACK} \cdot E_{RX}\} \quad (9)$$

$$B_r^{(new)} = B_r^{(old)} - \{(1 - P_{(i,r)})P_{(i,BS)}\alpha^{-1}L \cdot E_{TX} + (\alpha^{-1}L + L_{ACK}) \cdot E_{RX}\} \quad (10)$$

協力ノードを用いない場合、送信ノード i の仮想電池残量の更新は次式で表される。

$$B_i^{(new)} = B_i^{(old)} - \{(1 - P_{(i,BS)})^{-1}L \cdot E_{TX} + L_{ACK} \cdot E_{RX}\} \quad (11)$$

4. センシング頻度の制限手法

WSN 内にセンシングを行わない、すなわち自ノードのデータ送受信エネルギーを節約するノードを導入する。以下、センシングを行わないノードを固定配置する手法、センシングを行わないノードをランダムに選択する手法、低電池残量のノードをセンシングしないノードとして選択する提案手法の3通りの手法について説明する。

4.1 センシングを行わないノードを固定配置

遠方ノード付近にセンシングを行わない K 個のノードを固定的に設置する [11]。曇天の夜間に遠方ノードが電池残量不足で稼働停止するのを防ぐために、センシングを行わないノードは高発電量時に中継を控え積極的に充電を行い、低発電量下では高発電量時に十分蓄えたエネルギーを使って遠方ノードのデータを積極的に中継する。遠方ノードからのデータを確実に受け取り中継するために、センシングを行わないノードの設置場所は遠方ノード付近とする。以上のようにすることで遠方ノードは再送回数を減らすことができ、遠方ノードの稼働停止の抑制が期待できる。

4.2 センシングを行わないノードをランダムに選択

4.1 節に対し、ノードのセンシングの周期毎に、センシングを行わないノードを基地局が K 個ランダムに選択する。センシングを行わないことでデータの遅延が発生するが、自ノードのセンシングデータの送受信エネルギー消費を抑えることができる。ただし、センシングを行わないノードも 3.1 節の協力ノードの選択に従い、データの中継は行う。

4.3 低電池残量のノードをセンシングしないノードとして選択

ノードのセンシングの周期毎に、電池残量の小さい順に

センシングを行わないノードを基地局が K 個選択する。電池残量の情報は以前各ノードから収集したデータに含まれており、そのデータをもとにセンシングを行わないノードを電池残量の小さい順から選択する。ただし、4.2 節と同様に、データの中継は行う。この手法では、電池残量の小さいノードはセンシングを行わず、自ノードのデータ送受信エネルギーを節約できる。従って、4.2 節の手法と比べ、電池残量の小さいノードが夜間に停止して発電可能な朝までデータ収集が不可能になるような状況を回避できることが期待できる。

5. 性能評価

5.1 シミュレーション諸元

シミュレーション諸元を表 1 に示す。本文献では、低電池残量のノードをセンシングしないノードとして選択する提案手法の優位性の評価基準として、データ収集率を採用する。データ収集率を、時間あたりのノードの総数に対する BS で受信したデータパケット数の比で定義する。

BS を中心においたノード配置を図 3 に示す。ただし、四角の記号をセンサノード、丸の記号を固定的に配置したセンシングを行わないノードとし、各配置間隔を 10m とする。センシングを行わないノードの個数 K を 2, 4, 6 の 3 通りでデータ収集率を評価する。

センシング・伝送間隔に対し、データの送受信、及びデータ伝送失敗時の再送にかかる時間は十分に小さく無視できるとする。ノードがデータの送受信で消費するエネルギーは Crossbow 社のセンサノード MICAz の値であり、アンテナから放射されるエネルギーは送信エネルギー E_{TX} の $1/205.7$ である [12]。電池容量を伝送が必ず成功するとした場合にノードが 2 日間稼働可能なエネルギーとする ($C_0 = 2\Delta$)。ここで、 Δ を伝送が必ず成功するとした場合にノードが 1 日稼働可能なエネルギーとし、次式で表される。

$$\Delta = 24(L \cdot E_{TX} + (L_{RT} + L_{ACK})E_{RX}) \quad (12)$$

このとき、センシングを行わないノードを導入しない協力伝送方式（従来手法）の曇天において、常に少なくとも 80% のデータ収集率を達成できるように日中の 1 時間あたりの平均発電量を設定する ($E_{ave} = 0.1044\Delta$)。データ収集率 80% を WSN が要求するデータ収集率とする。

5.2 データ収集率の比較

図 4 は、晴天と曇天が等確率の場合における一日の平均データ収集率の比較 ($K = 4$) を表している。但し、以下点線および実線のグラフをそれぞれ晴天、曇天におけるデータ収集率の時間変化を示すグラフとする。晴天において、従来手法が高いデータ収集率を維持していることが分かる。これは、従来手法ではセンシングを行わないノードを導入せず、全てのノードからのデータを収集することによる。

表 1 シミュレーション諸元

BS の電波到達範囲	40m
1 ビットあたりの送信エネルギー E_{TX}	$0.6\mu\text{J}$
1 ビットあたりの受信エネルギー E_{RX}	$0.67\mu\text{J}$
データ, ルーティング情報のパケット長 L, L_{RT}	100bit
ACK のパケット長 L_{ACK}	56bit
データの採集・伝送間隔 T	1 hour
変調方式	BPSK
通信路	AWGN
伝播損失	3 乗則
許容する誤り率 P_a	0.1
再送上限回数 N_0	3
シミュレーション日数	100000 日

しかし、曇天の夜間において、従来手法のデータ収集率は大きく低下している。提案手法が従来手法やセンシングを行わないノードの固定配置、センシングを行わないノードをランダムに選択した手法と比べ最も高いデータ収集率を達成した。これは電池残量の小さいノードがセンシングを行わない事でエネルギー消費を抑え、曇天の夜間においても電池残量を確保したためだと考えられる。従って、提案手法では曇天の夜間において最も安定したデータ収集を実現している。

図 5 は、曇天の生起確率が 60 % の場合における一日の平均データ収集率の比較 ($K = 4$) を表している。図 4 と同様に、晴天のデータ収集率は従来手法が最も高いデータ収集率を実現しているが、曇天の夜間においては提案手法が最も高いデータ取得率を示している。曇天確率が 60 % において、従来手法やセンシングを行わないノードの固定配置手法、ランダムに選択する手法では曇天時に要求されるデータ収集率を満たせなくなっている。要求されるデータ収集率を満たすのは提案手法のみである。

図 6 は、晴天と曇天が等確率の場合における K の値に対する最低データ収集率の変化を示している。センシングを行わないノードの個数によらず提案手法が最も高い最低データ収集率を達成している。提案手法において最も高い最低データ収集率を示すのは $K = 4$ のときであることがわかる。

図 7 は、曇天の生起確率が 60 % の場合における K の値に対する最低データ収集率の変化である。図 6 と同様、 K の値に依らず提案手法が最も高い最低データ取得率を達成している。しかし、曇天確率が 60 % の場合、 $K = 6$ のときに最も高い最低データ収集率を実現している。そのため、曇天確率の変化により最適な K の値が異なるため曇天確率によって最適な K を決定する手法が今後必要になると考えられる。

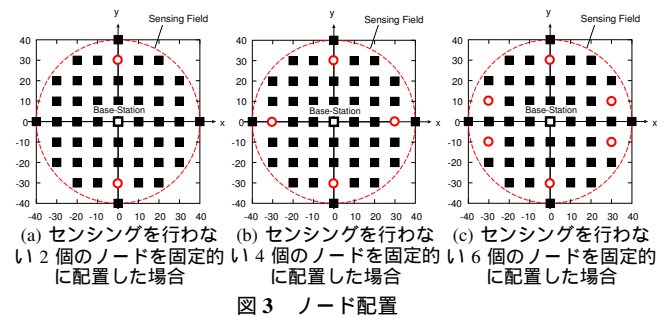


図 3 ノード配置

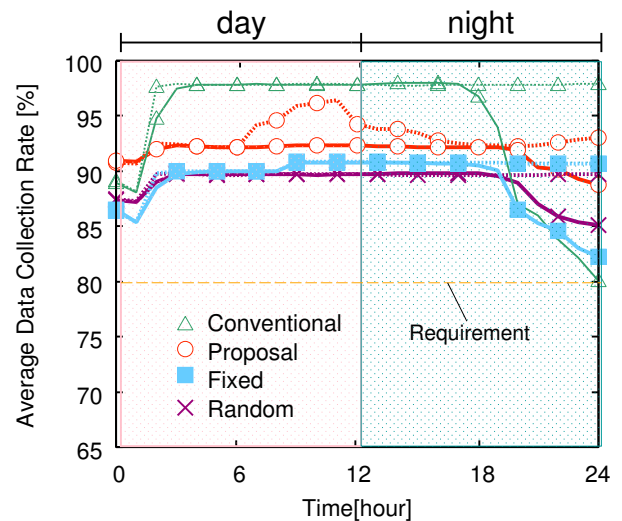


図 4 晴天と曇天が等確率の場合における一日の平均データ収集率の比較 ($K = 4$)

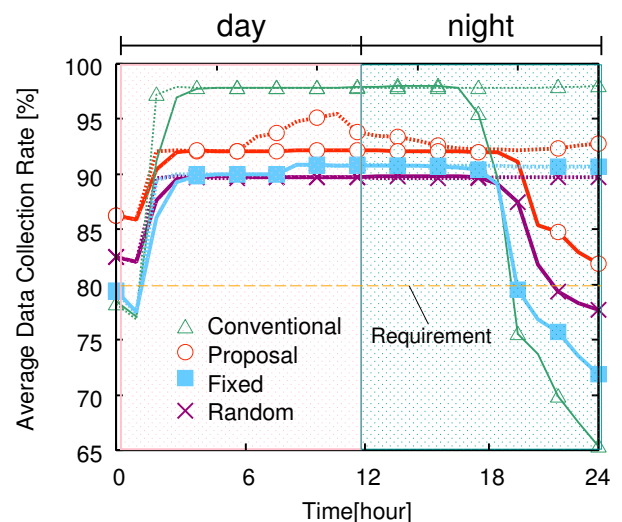


図 5 曇天の生起確率が 60 % の場合における一日の平均データ収集率の比較 ($K = 4$)

6. まとめ

協力伝送を用いたエネルギーハーベスティング・センサネットワークにおいて、低発電量下でのノード停止を防止するためにセンシングを行わないノードを電池残量の小さい順に選択する手法を提案した。シミュレーションにより

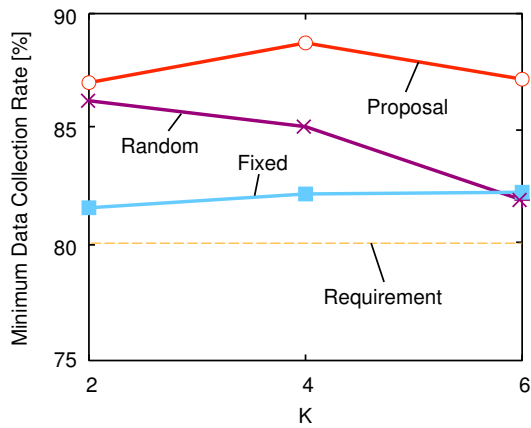


図6 晴天と曇天が等確率の場合における K の値に対する最低データ取得率の変化

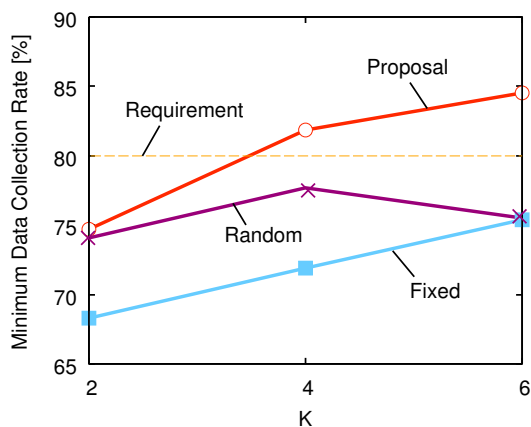


図7 曇天の生起確率が60%の場合における K の値に対する最低データ取得率の変化

ランダムにセンシングを行わないノードを選択する手法、センシングを行わないノードを固定する手法と比較したところ、曇天確率によらず低発電量下において提案手法が最も高いデータ収集率を示した。また、曇天確率によらずWSNで要求されるデータ収集率を常に保ったのは提案手法のみであった。しかし、曇天確率により最適な K の値が変化するため、今後最適な K の値を決定するモデルが必要であると考えられる。

謝辞 本稿をまとめるにあたり熱心にご指導くださった名古屋大学教養教育院教授山里敬也先生に感謝する。また、本研究の一部は、総務省SCOPEの助成を受けて行われたものである。記して謝意を表す。

参考文献

- [1] V. Raghunathan, A. Kansal, J. Hsu, J. Fruedman, and M. Srivastava, "Design considerations for solar energy harvesting wireless embedded systems," Fourth International Symposium on Information Processing in Sensor Networks, pp.457–462, Apr. 2005.
- [2] C. Park, and P. Chou, "Ambimax: Autonomous energy harvesting platform for multi-supply wireless sensor nodes," 3rd Annual IEEE Communications Society on Sensor and Ad

Hoc Communications and Networks, vol.1, pp.168–177, Sep. 2006.

- [3] H. Kulah, and K. Najafi, "Energy scavenging from low-frequency vibrations by using frequency up-conversion for wireless sensor applications," IEEE Sensors J., vol.8, pp.261–268, 2008.
- [4] S. Sudevalayam, and P. Kulkarni, "Energy harvesting sensor nodes: Survey and implications," IEEE Communications Surveys and Tutorials, vol.13, no.3, pp.443–461, Sep. 2011.
- [5] Y.K. Tan, and S.K. Panda, "Self-autonomous wireless sensor nodes with wind energy harvesting for remote sensing of wind-driven wildfire spread," IEEE Instrumentation and Measurement, vol.60, no.4, pp.1367–1377, Apr. 2011.
- [6] C. Alippi, R. Camplani, C. Galperti, and M. Roveri, "A robust, adaptive, solar-powered wireless sensor networks framework for aquatic environmental monitoring," IEEE Sensors Journal, vol.11, no.1, pp.45–55, Jan. 2011.
- [7] 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停止ノード再稼働条件を導入した協力伝送手法," 電子情報通信学会論文誌, vol.95, no.2, pp.246–256, Feb. 2012.
- [8] B. Medepally, and N.B. Metha, "Voluntary energy harvesting relays and selection in cooperative wireless networks," IEEE Wireless Communications, vol.9, no.11, pp.3543–3553, Nov. 2010.
- [9] H. Li, N. Jaggi, and B. Sikdar, "Relay scheduling for cooperative communications in sensor networks with energy harvesting," IEEE Wireless Communications, vol.10, no.9, pp.2918–2928, Sept. 2011.
- [10] M. Tacca, P. Monti, and A. Fumagalli, "Cooperative and reliable ARQ protocols for energy harvesting wireless sensor nodes," IEEE Trans. Wireless Communications, vol.6, no.7, pp.2519–2529, Jul. 2007.
- [11] 石谷直也, 小林健太郎, 岡田啓, 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における中継器導入による低発電量下でのデータ取得率の向上," 情報処理学会研究報告, vol.66, no.10, pp.1–5, May 2013.
- [12] G. Meulenaer, F. Gosset, F.X. Standaert, and O. Pereira, "On the energy cost of communication and cryptography in wireless sensor networks," IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing (WIMOB'08), pp.580–585, Oct. 2008.