

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

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低発電量下でのデータ取得率の向上を目指している。ノード全体の消費エネルギーを削減する方法の一つにソースノードのケット送信時に他ノードがケットの中継を行う協力伝送方式がある。しかし、曇天のような低発電量下の対応は検討されおらず、協力伝送を用いても電池残量不足により低発電量下にノードが稼働停止してしまう場合がある。そこで本研究では低発電量下でのノードの停止を防ぐために中継器を導入する。中継器は高発電量時に中継を控え積極的に充電を行い、低発電量下では十分蓄えたエネルギーによりケットを積極的に中継することでノードの停止を防ぎ、データ取得率を向上させる。

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, 中継器, 協力伝送

Improvement of the Data Acquisition Rate in Low power Generation by Introducing Repeaters for a Solar-Powered Wireless Sensor Network

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

Abstract: Our goal is improvement of the data acquisition rate in a solar-powered wireless sensor network (WSN). One of the methods to reduce the amount of the energy consumption within the entire network is a cooperative transmission that uses a relay node when a source node transmits data. However, it does not focus on the management in low power generation, such as cloudy. Thereby there are the cases where nodes stop during the time due to the lack of energy in the battery. Therefore, here in our research we will introduce repeaters in WSN in order to prevent nodes from stop. The repeaters refrain from relay and instead mainly focus on battery charge in high power generation, such as daytime. And in low power generation, as repeaters relay packets from far-nodes positively by using sufficient amount of energy they charge during the daytime, we will try to prevent more nodes from stop and improve data acquisition rate.

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って BS (ベースステーション) へ送ることで広範囲の情報を取得する技術である。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

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

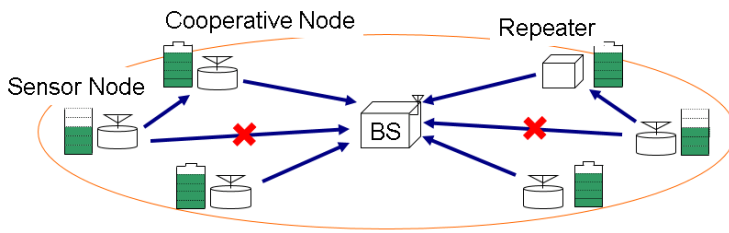


図1 システムモデル

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。

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、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。

本研究では文献 [7] の協力伝送において、低発電量下でのノードの停止を防ぐために中継器を導入する。中継器は高発電量時に中継を控え積極的に充電を行い、低発電量下では十分蓄えたエネルギーによりパケットを積極的に中継することで遠方ノードの早期稼働停止を防ぎ、データ取得率を向上させる。

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中継器が配置され、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。データの採取は一定時間 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、エネルギーを消費しないとする。

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

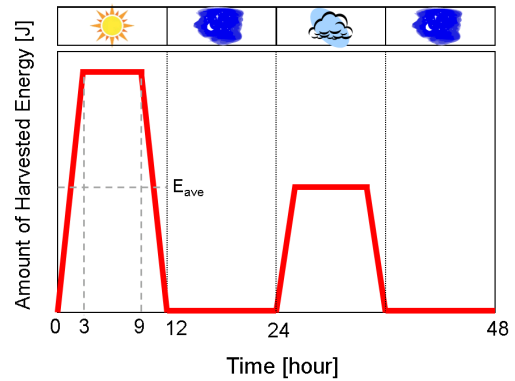


図2 発電量モデル

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。データ伝送が成功した場合はBSは肯定応答 (ACK) をノードへ返信しデータ伝送サイクルを終了する。データ伝送に失敗した場合、ノードは一定時間後に同一データをBSへ再送する。

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_i に達するまで再送を繰り返す。送信上限回数 N_i 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 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。

$$\Psi_{i,i} = \frac{B_i}{\mathcal{E}_{NC}[E_{c,i}]} \geq 1 \quad (2)$$

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 (2) 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。

$$\mathcal{E}_{NC}[E_{c,i}] = (1 - P_{(i,BS)})^{-1} L \cdot E_{TX} + (L_{RT} + L_{ACK}) E_{RX} \quad (3)$$

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。

3.2 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。

$$\Psi_{i,j} = \min \left\{ \frac{B_i}{\mathcal{E}_C[E_{c,i}]}, \frac{B_j}{\mathcal{E}[E_{c,j}]} \right\} \quad (4)$$

$\mathcal{E}_C[E_{c,i}]$ 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。

$$\mathcal{E}_C[E_{c,i}] = \alpha^{-1} L \cdot E_{TX} + (L_{RT} + L_{ACK}) E_{RX} \quad (5)$$

α は次式で表される。

$$\alpha = 1 - P_{(i,BS)} P_{(i,j)} - P_{(i,BS)} (1 - P_{(i,j)}) P_{(j,BS)} \quad (6)$$

$P_{(i,j)}$ 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。

$$\begin{aligned} \mathcal{E}[E_{c,j}] &= L \cdot E_{TX} + (L_{RT} + L_{ACK}) E_{RX} \\ &+ P_{(i,BS)} (1 - P_{(i,j)}) \alpha^{-1} L \cdot E_{TX} \\ &+ (\alpha^{-1} L + L_{ACK}) \cdot E_{RX} \end{aligned} \quad (7)$$

式 (7) 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。

3.3 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。

- (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 $\Psi_{i,j}$ (3.2 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。

$$r = \arg \max_j \{\Psi_{i,j}\} \quad (8)$$

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。

3.4 仮想電池残量の更新

仮想電池残量の更新は BS がルーティング情報をブロードキャストする前に、協力ノードを決定するために行う。

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。

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

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

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.

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

4. 中継器の導入

中継器は遠方ノード停止を防止するために遠方ノード周辺に導入する. 中継器はパケットを生成せず, 協力ノードと同様に遠方ノードのパケットを中継してBSに伝送する. BSでは協力ノードの選択の際に, 中継器を優先してパケットの中継先に選択する. 低発電量下で遠方ノードの停止を防止するために, 以下のように発電量が高いときと発電量が低いときの稼働条件を定める.

4.1 発電量が高いときの動作

昼間のような高発電量のとき, 遠方ノードは十分な電池残量が確保できるため, 中継器はパケットを中継しない. この際, 低発電量時における遠方ノードの電池残量不足に備えて電力を蓄えるが, 電池残量が電池容量を超えるとエネルギーを損失してしまうため, 電池残量が電池容量 C_0 から伝送間隔時間分の平均発電量 E_{ave} を引いた閾値 B_{th} を超えたときのみ, 中継器はパケットを中継する. すなわち, 閾値 B_{th} は次式で与えられる.

$$B_{th} = C_0 - T \cdot E_{ave} \quad (12)$$

4.2 発電量が低いときの動作

中継器は充電したエネルギーを利用して遠方ノードのパケットを中継する. 従来の協力伝送では協力ノードからBSへの伝送が失敗した場合, 送信ノードが再送を行っているため遠方ノードのエネルギー消費が大きくなる. そこで, 中継器がパケットを受信できた場合, BSへのパケット再送は中継器が行う. ただし, 中継器の上限再送回数を N_0 とする. 提案手法では, 中継器は遠方ノード付近に配置されており, 遠方ノードから中継器への伝送失敗確率が小さいため中継器はほぼ確実に遠方ノードのパケットを受信できる. 遠方ノードの伝送回数はほぼ1回で済むため, エネルギー消費の低減が期待できる.

5. 性能評価

シミュレーション諸元を表1に示す. BSを中心においた従来手法および提案手法でのノード・中継器の配置を図3に示す. ただし, 四角の記号をセンサノード, 丸の記号を中継器, 各配置間隔を10mとする. また, データ取得率を, 時間あたりのノードと中継器の総数に対するBSで受診したデータパケット数の比で定義する.

データ採取・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

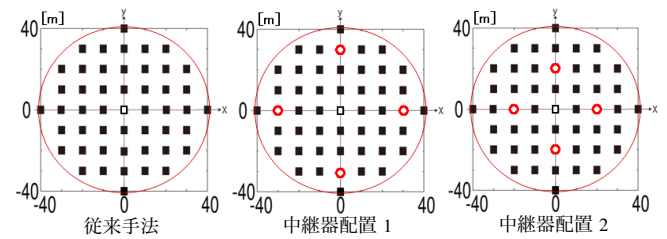


図3 ノード・中継器の配置

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 [11]. 電池容量を伝送が必ず成功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.

$$\Delta = 24(L \cdot E_{TX} + (L_{RT} + L_{ACK})E_{RX}) \quad (13)$$

このとき, 従来の発電量予測を用いない協力伝送の場合で曇天時において, 常に少なくとも75%のデータ取得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 ($E_{ave} = 0.14\Delta$).

図4は晴天, 曇天の生起確率が等しい時における従来手法・提案手法(配置1)において, 電池の初期残量の影響が十分無視できる時間が経過した後の晴天ごと, 曇天ごとの1日のデータ取得率を平均したグラフを示している. 提案手法では中継器がパケットを生成しない分だけ最大のデータ取得率は減少するため, 最大平均データ取得率が約91.7%に低減している. しかし, 発電量が低い曇天では, 提案手法は平均データ取得率の変動を抑え, 最小平均データ取得率が約7%向上した.

図5は中継器の配置方法における平均データ取得率の特性評価を表している. 図5から, 配置1の方が配置2よりも最小平均データ取得率特性が高いことが分かる. これは配置1では配置2よりも中継器が遠方ノードに近い, 遠方ノードから中継器へのパケット誤り率が小さくなり, 遠方ノードの再送回数が低下し, 電池消費を低減できたためである.

図6は曇天の割合を変化させたときの最小平均データ取得率の比較を示している. いずれの曇天の割合でも提案手法が従来手法を上回り, また図5の結果と同様に, 遠方ノード付近に中継器を配置したほうが最小平均データ取得率が高いことがわかった. 以上より, 天候の変動による無線センサネットワークの安定性が向上した.

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中継器を導入した. シミュレーションにより低発電量下においてノードの停止数を減少させ, 平均データ

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 μ J
1ビットあたりの受信エネルギー E_{RX}	0.67 μ 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
中継器の上限再送回数 N_0	3
シミュレーション日数	500000 日

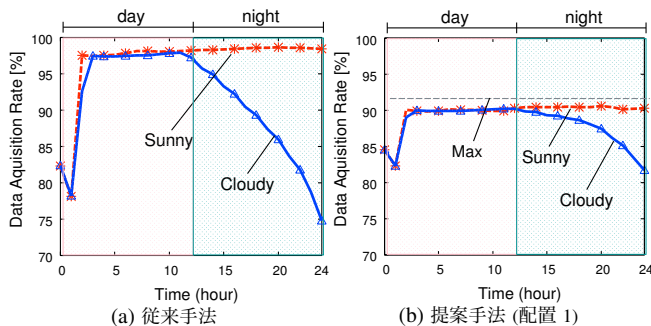


図4 従来手法と提案手法における平均データ取得率の時間変化

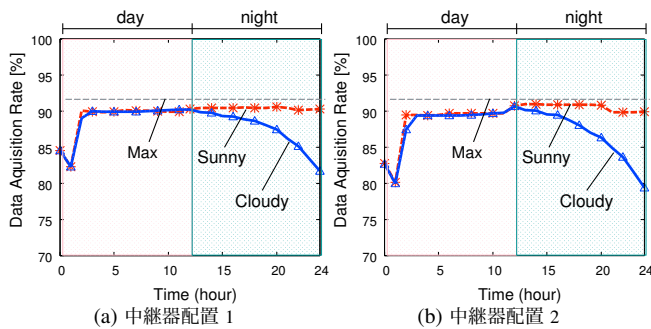


図5 中継器配置による平均データ取得率の特性評価

取得率の変動を抑えると同時に最小平均データ取得率の向上を確認した。また天候条件に依らず、提案手法の最小平均データ取得率特性が向上した。

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心より深く感謝致します。

参考文献

[1] V.Ragunathan, A.Kansal, J.Hsu, J.Friedman, and M.Srivastava, "Design considerations for solar energy harvesting wireless embedded systems," Fourth International Symposium on Information Processing in Sensor Networks, pp.457-462, 2005.

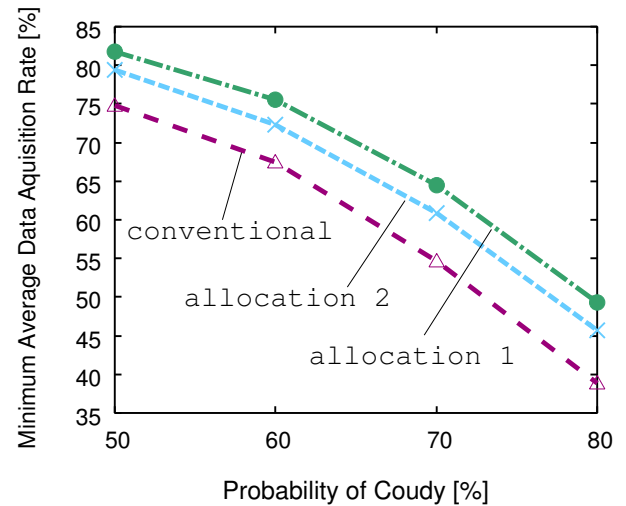


図6 曇天の割合に対する最小平均データ取得率の比較

[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, 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, 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, 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, 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, 2007.

[11] 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, 2008.

正誤表

< 誤 >(P.4 右側式 (13) 以降の文)

このとき，従来の発電量予測を用いない協力伝送の場合で曇天時において，常に少なくとも 75 % のデータ取得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 ($E_{ave} = 0.14\Delta$) .

< 正 >

このとき，従来の発電量予測を用いない協力伝送の場合で曇天時において，常に少なくとも 80 % のデータ取得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 ($E_{ave} = 0.1044\Delta$) .

< 誤 >(P.4 右側中段)

しかし，発電量が低い曇天では，提案手法は平均データ取得率の変動を抑え，最小平均データ取得率が 約 7 % 向上した .

< 正 >

しかし，発電量が低い曇天では，提案手法は平均データ取得率の変動を抑え，最小平均データ取得率が 約 3 % 向上した .

< 誤 >(P.5 の図 4 , 5 , 6)

< 正 >

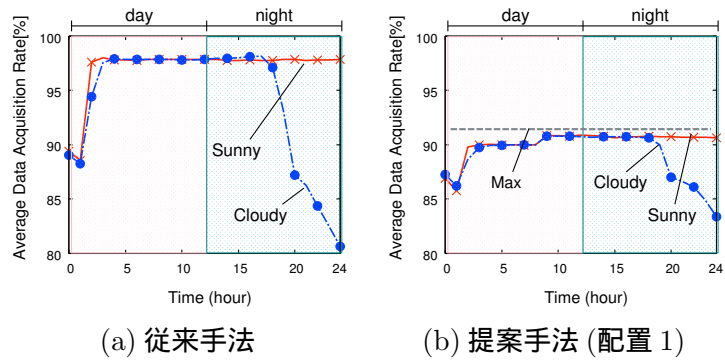


図 4: 従来手法と提案手法における平均データ取得率の時間変化

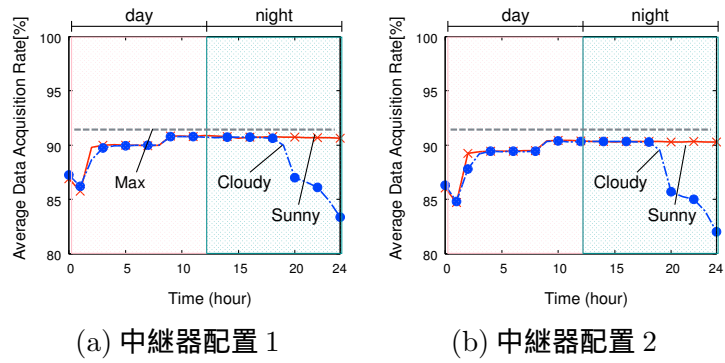


図 5: 中継器配置による平均データ取得率の特性評価

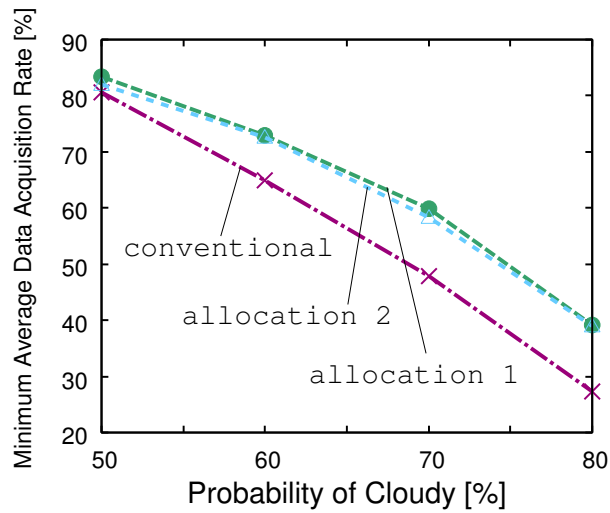


図 6: 曇天の割合に対する最小平均データ取得率の比較