

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 停止ノード再稼動条件を導入した協力伝送手法

太田健太郎^{†a)} 小林健太郎^{††} 山里 敬也^{†††} 片山 正昭^{††}

Cooperative Transmission Scheme with the Reactivation Condition of Inactive
Nodes in Solar-Powered Wireless Sensor Networks

Kentaro OTA^{†a)}, Kentaro KOBAYASHI^{††}, Takaya YAMAZATO^{†††},
and Masaaki KATAYAMA^{††}

あらまし 太陽エネルギーの取得を行う無線センサネットワークにおけるデータ伝送成功率の向上を目指している。ネットワーク全体の消費エネルギーを低減する方法として、データ送信時にノードがデータの中継を行う協力伝送方式の適用を考える。本論文では、まずノードの電池残量、消費エネルギーを考慮した中継ノード選択手法を提案し、全体的なデータ伝送成功率の向上を行う。しかし、取得エネルギーの変動を考慮しない場合、夜間にデータ伝送成功率が低下する問題が生じる。そこで、協力伝送に電池切れにより停止したノードの再稼動条件を導入することで昼夜のデータ伝送成功率の平滑化を行い、要求される高いデータ伝送成功率を達成する。

キーワード 無線センサネットワーク, エネルギーハーベスティング, 太陽エネルギー, 協力伝送, 停止ノード再稼動条件

1. ま え が き

無線センサネットワークは配置された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。その用途は建造物の強度監視、農業、交通、セキュリティなど多岐にわたりいずれの用途でもセンサノードの長期稼動が求められる。しかし、センサノードは電池駆動であるため稼動時間に限界がある。そこで、センサノードの長期稼動方法として環境エネルギーの利用による電池の充電が注目されている [1]~[3]。本論文では建造物の強度監視、農業支援などの屋外での用途を想定する。屋外で利用可能な環境エネ

ギーの中でも比較的安定的に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。

しかし、環境エネルギーを利用する環境下でも、電池切れによってノードが停止することがある。その要因の一つとしてデータの再送による消費エネルギーの増加がある。伝送に失敗したノードが同一のデータを再送する場合、BSから遠方のノードほど伝送誤り率が高く、再送回数が増加してしまう。これにより、BSから遠方の一部のノードの消費エネルギーが大きくなり、早期に停止する。ノードの早期停止によって、ネットワーク全体のデータ伝送成功率が低下してしまう。

この問題に対して協力伝送の適用を考える。協力伝送ではBSから遠いノードのデータ伝送に他のノードを中継ノードとして利用することで送信ノードの再送回数を低減でき、全ノードの電池残量の均一化が可能になる。中継ノードを用いたルーティング方法に関する先行研究として [4]~[6] がある。本論文では、中継ノードを送信ノードのデータ伝送回数低減のために用いる。文献 [4] では一つの送信ノードに対して一つの中継ノードが割り当てられる。しかし、文献 [4] において中継ノードは、伝送失敗時の再送ではなく、干渉除去のために送信ノードのデータを必ず目的ノードへ

[†] 名古屋大学大学院工学研究科電子情報システム専攻, 名古屋市
Dept. of Electrical Engineering and Computer Science,
Graduate School of Engineering, Nagoya University, C3-1
(631) Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, 464-8603 Japan

^{††} 名古屋大学エコトピア科学研究所, 名古屋市
EcoTopia Science Institute, Nagoya University, C3-1 (631)
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, 464-8603 Japan

^{†††} 名古屋大学教養教育院, 名古屋市
Institute of Liberal Arts Sciences, Nagoya University, C3-1
(631) Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, 464-8603 Japan
a) E-mail: ohta@katayama.nuee.nagoya-u.ac.jp

中継する．一方，文献 [5], [6] では，一つの送信ノードに対して複数の中継ノードを割り当てた場合の評価が行われている．環境エネルギーを利用する環境下での協力伝送手法としていくつかの先行研究がある [7]～[9]．文献 [7] では送信ノードと目標ノードとの中間点に中継ノードを配置することで，再送によるデータ伝送の遅延時間が削減されスループットが向上することが示されている．文献 [8] ではノードが多数存在する場合に，各ノードの電池残量と消費エネルギーの期待値から BS が中継ノードを選択する方法が提案されている．しかし，文献 [8] ではノードの充電が常に十分に行われる理想的な環境を想定しており，伝送開始時に各ノードの電池残量は一定としている．文献 [9] では発電量がランダムに変動する環境を想定しているが，ノードの電池残量の情報はそのノードが中継ノードの候補になるかどうかの判断のみに用いられており，中継ノードは伝送誤り率のみをもとに選択されている．

本論文ではまず太陽エネルギーにより充電を行う環境での協力伝送方式の適用を行い，電池残量の変動を考慮した中継ノードの選択手法を提案する．ここで，太陽エネルギーを利用するため，昼夜の取得エネルギーの変動への対応策が必要になる．そこで，夜間に多数のノードが停止することを防止するため，電池切れによって停止したノードに再稼働条件を設けることを提案する．平均データ伝送成功率で評価を行うことで，提案手法によって太陽エネルギーを利用する環境で高いノード稼働率の維持が可能になることを示す．

本論文は，以下のように構成される．**2.** ではシステムの簡単な説明と各伝送手法での通信手順を述べる．**3.** では協力伝送におけるノードの電池残量，消費エネルギーを考慮した中継ノード選択方法を提案する．想定する太陽エネルギーによる電池残量の更新について **4.** で説明する．**5.** では提案する停止ノード再稼働条件について述べる．**6.** で提案手法の平均データ伝送成功率に対する効果を示す．最後に，**7.** において本論文をまとめる．

2. システムモデル

本論文では文献 [8] と同様に図 1 のように全ノードが BS の電波到達範囲内に配置され，その範囲内を観測領域とするシステムを考える．各ノードは BS からの信号は必ず受信に成功するとし，BS は全ノードの位置を把握しているとする．BS によって全ノードの送受信はスケジューリングされ，衝突は起きない．ま

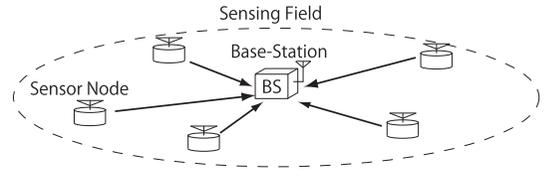


図 1 システムモデル
Fig. 1 System model.

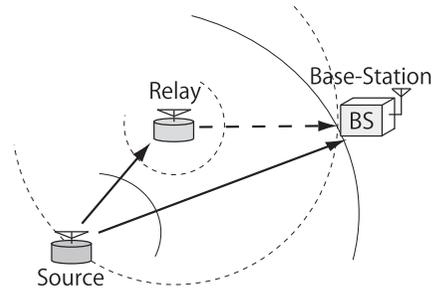


図 2 協力伝送
Fig. 2 Cooperative transmission.

た，各ノードはデータの採取，伝送は一定時間ごとに行い，それ以外の期間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．

2.1 非協力伝送

非協力伝送では各ノードは取得したデータを単独で BS に伝送する．データ伝送が成功した場合は BS は ACK (肯定応答) 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はノードは一定時間後に同一のデータを BS へ再送し，ACK が返信されるか，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．

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

$P_{(i,BS)}$ 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．

2.2 協力伝送

協力伝送では各ノードは自身のデータを送信する送信ノードと，他のノードのデータを中継して BS へ送信する中継ノードの役割をもつ．図 2 にノードの協力の様子を示す．送信ノードのデータは以下の手順に従って BS に伝送される．

(1) BS が各ノードについて中継ノードを選択しルーチング情報をブロードキャスト．

(2) 送信ノードが取得したデータを中継ノードと BS に送信．

(3)

(a) BS が送信ノードから直接送られたデータの受信に成功した場合：

BS は送信ノード，中継ノードに ACK を返信して伝送サイクルを終了。

(b) BS は送信ノードから送られたデータの受信に失敗したが，中継ノードは受信に成功した場合：

中継ノードが送信ノードのデータを BS に送信。中継ノードから送られたデータを BS が受信できれば BS は送信ノード，中継ノードに ACK を返信して伝送サイクルを終了。中継ノードから送られたデータを BS が受信できなければ，一定時間後に送信ノードが同一のデータを再送。ただし，送信回数が上限 N_i に達していた場合は再送せず伝送失敗として伝送サイクルを終了。

(c) 送信ノードから送られたデータの受信に中継ノード，BS がともに失敗した場合：

送信ノードが一定時間後に同一のデータを再送。送信回数が上限 N_i に達していた場合は再送せず伝送サイクルを終了。

非協力伝送ではデータの再送を行う場合，BS から遠方のノードほど再送回数が増加してしまう。協力伝送では上記のように中継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。

なお，中継ノードの利用によって送信ノードの再送が増加することはない。送信ノードは中継ノードと BS に個別にデータを送信するわけではなく，1 度の送信で中継ノード，BS の両方にデータを送信する。BS にのみデータを伝送する非協力伝送に対して，協力伝送では，中継ノードによる中継が加わるが，送信ノードの再送回数は増加しない。中継ノードに関しては，自身のデータ伝送に加え他のノードのデータを中継するため，再送回数は増加する可能性がある。

3. 協力伝送における中継ノード選択方法

協力伝送では BS が各送信ノードに対して中継ノードを選択する。3.1 の伝送可能条件 ($\Psi_{i,i} \geq 1$) を満たす全ノードで以下の (1), (2), (3) を行う。本論文の中継ノード選択アルゴリズムは文献 [8] の手法に従う。文献 [8] では，電池残量の変動及びルーチング情報，ACK の受信エネルギーを含む消費エネルギーの期待値が考慮されていないが本論文では考慮する。

(1) 送信ノード i についてその他のノード j との

中継ノード選択基準値 $\Psi_{i,j}$ (3.2) を算出し，次式のように中継ノード選択基準値が最も高いノードを送信ノード i の中継ノード r として選択。

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

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

(2) 中継ノードを用いる場合は，送信ノード i と選択された中継ノード r の電池残量を仮想的に更新し，中継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 (3.3)。

(3) ノード $i+1$ について (1), (2) を行い，以降伝送可能条件を満たす全ノードで繰り返す。

3.1 伝送可能条件

伝送開始時に以下の条件を満たすノード i のみ伝送を行う。

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

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 (1) 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も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チング情報，ACK の受信エネルギーの和で表せる。

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

λ_i は送信ノード i が取得したデータの packets 数， L はデータのビット数， E_{TX} は 1 ビット当りの送信エネルギーである。また， L_{RT} はルーチ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 ビット当りの受信エネルギーである。文献 [8] ではルーチング情報と ACK の受信で消費するエネルギーは考えられていないが，本論文では考慮する。

3.2 中継ノード選択基準値

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中継ノード選択基準値 $\Psi_{i,j}$ とし，次式で表す。

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

$\mathcal{E}_C[E_{c,i}]$ は中継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チング情報、ACK の受信エネルギーの和で表される。

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

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、簡単化のため中継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。

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

λ_j はノード j が取得したデータの packets 数である。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 項はルーチ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 仮想電池残量の更新

仮想電池残量の更新は BS がルーチング情報をブロードキャストする前の中継ノード選択時に行う。各ノードは複数の送信ノードに対する中継ノードになり得る。選択基準の計算において送信ノード i と中継ノード 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。中継ノードを用いる場合、各ノードの電池残量は次式のように更新される。

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

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

中継ノードを用いない場合、送信ノード i の電池残量の更新は次式で表される。

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

4. 太陽エネルギーによるノードの充電

本論文では、太陽光発電は昼夜の違い及び時間による発電量の変化を考慮する。観測開始時の全ノードの電池残量を 0 [J] とし、電池残量は次のように更新されるとする。

$$\begin{cases} (B_i)_t = 0 & (t = 1) \\ (B_i)_t = (B_i)_{t-1} - (E_{c,i})_{t-1} + (E_{h,i})_t & (t \geq 2) \end{cases} \quad (12)$$

$(B_i)_t$ はノード i の t 回目のデータ伝送開始時の電池残量、 $(B_i)_{t-1}$ は $t-1$ 回目のデータ伝送開始時の電池残量、 $(E_{c,i})_{t-1}$ は $t-1$ 回目のデータ伝送で消費したエネルギーである。 $(E_{h,i})_t$ は $t-1$ 回目のデータ伝送サイクル終了時から t 回目のデータ伝送開始時まで取得したエネルギーである。太陽エネルギーを利用の際に予想される影響として発電量の変動がある。天候の変化、附属させるソーラーパネルの大きさによ

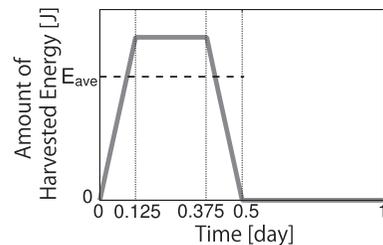


図 3 発電量の変化
Fig. 3 Variations of harvested energy.

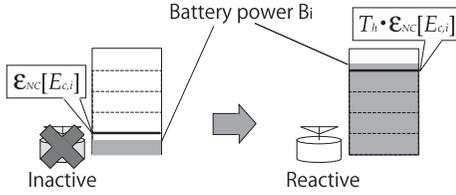


図 4 停止ノード再稼働条件
Fig. 4 Reactivation condition for inactive nodes.

て発電量は左右される。本論文では、発電量の大きさについてのみ考慮する。ここでは、各ノードの充電量は等しく、天候による発電量の変化は考慮しないとす。発電したエネルギーは完全に電池に充電できるとする。発電量は図 3 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。\$E_{ave}\$ は日中の平均発電量を表す。

5. 停止ノードの再稼働条件

3.1 で述べたように伝送開始時に式 (3) を満たさないノードは伝送を開始せず停止ノードとみなす。式 (3) の条件のみでは充電が行われる日中では停止したノードは 1 データの伝送に消費するエネルギーの期待値が充電されると伝送を再開し、再びエネルギーを消費し始める。しかし、この場合、停止したノードは夜間の稼働に必要なエネルギーを確保できない場合が起こり得るため、夜間では停止するノードが増加し、データ伝送成功率が低下してしまう。この問題の解決のために、本論文では停止したノードの再稼働に次の条件を新たに設けることを提案する。

$$\Psi_{i,i} = \frac{B_i}{\mathcal{E}_{NC}[E_{c,i}]} \geq T_h \quad (13)$$

\$T_h\$ はノードの再稼働のしきい値を示す値である。式 (13) は停止したノードは電池残量が 1 データの伝送に消費するエネルギーの期待値の \$T_h\$ 倍に充電されるまで伝送を行わないことを示す。この条件の概念図を図 4 に表す。これにより停止したノードは一定量充電されてから伝送を再開するため、夜間の電池残量の枯渇を防止し、データ伝送成功率の低下を改善できると考えられる。

6. 数値例

提案した協力伝送、及び停止ノード再稼働条件の平均データ伝送成功率に対する効果を計算機シミュレーションによって評価する。本論文では再送回数にか

表 1 シミュレーション諸元
Table 1 Simulation parameters.

BS の電波到達範囲	40 m
1 ビット当りの送信エネルギー \$E_{TX}\$	0.60 \$\mu\$J
1 ビット当りの受信エネルギー \$E_{RX}\$	0.67 \$\mu\$J
データ、ルーティング情報のパケット長 \$L, L_{RT}\$	100 bit
ACK のパケット長 \$L_{ACK}\$	56 bit
データのバケット数 \$\lambda_i, \lambda_j\$	1
データの採取・伝送間隔 \$T\$	1 時間
変調方式	BPSK
通信路	AWGN
伝搬損	3 乗則
許容する誤り率 \$P_o\$	0.1

わらず最終的にデータ伝送に成功したノードを伝送成功ノードと定義し、全ノード数に対する伝送成功ノード数の比をデータ伝送成功率とする。また、伝送可能条件を満たし、データ伝送が可能なノードを稼働ノードとし、全ノード数に対する稼働ノード数の比をノード稼働率とする。シミュレーションに用いる共通のパラメータを表 1 に示す。データ採取・伝送の間隔 \$T\$ に対し、データの送受信、及びデータ伝送失敗時の再送の間隔は非常に小さいと想定する。シミュレーション上では、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 (0 秒) 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 [10]。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、\$\Delta\$ 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、1 日当りのデータの送信エネルギー、ルーティング情報、ACK の受信エネルギーの和として次式で表される。

$$\Delta = 24(\lambda_i L \cdot E_{TX} + (L_{RT} + \lambda_i L_{ACK}) E_{RX}) \quad (14)$$

このとき非協力伝送を行う場合に、常に少なくとも 75% の平均データ伝送成功率を達成するエネルギーを日中の 1 時間当りの平均発電量とする (\$E_{ave} = 0.0974\Delta\$)。ノード配置は図 5 のように均等配置とし、配置間隔を 10m、ノード数を 48 個とする。本システムでは、BS の電波到達範囲を観測領域としており、BS は全ノードへ誤りなく信号を送送できる。また、ノードの通信可能な領域は平均誤り率にのみ依存し、どのノードにもデータは届き得る。そのため、中継ノードの選択の計算では、送信ノード以外の全てのノードが

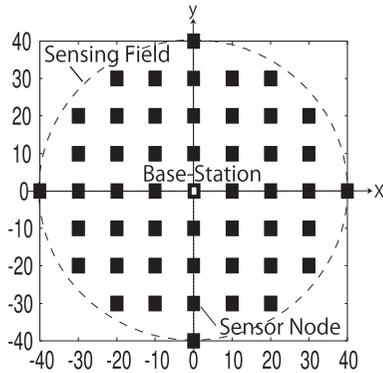


図 5 ノード配置
Fig. 5 Node allocation.

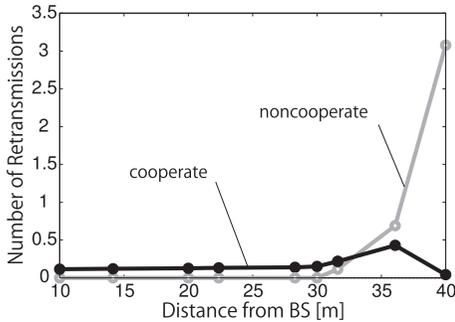


図 6 BS からのノードの距離に対する平均再送回数
Fig. 6 Average number of retransmissions to distance from BS.

中継ノード候補になる。しかし、送信ノードから BS よりも遠方にあるノードを中継ノードにした場合、中継ノードが誤りなく送信ノードのデータを受信する確率は、BS が送信ノードのデータを受信する確率よりも低くなり、データの中継が必要なくなる確率が高くなる。

図 6 に非協力、及び協力伝送の場合の BS からの距離による平均再送回数の変化を示す。ここで平均再送回数は、伝送に成功、若しくは再送上限に達して再送中止した場合の平均再送回数である。電池切れによって伝送を行わない、あるいは伝送サイクル中に電池切れによって再送中止した場合は平均値の計算から除外している。また、協力伝送の場合は中継ノードとして他のノードのデータの再送を行う場合も再送回数として計算している。図 6 より、非協力伝送では BS からの距離が増加するにつれて平均再送回数が増加する。一方、協力伝送では、BS から近距離のノードは非協力伝送に対して平均伝送回数がわずかに増加している

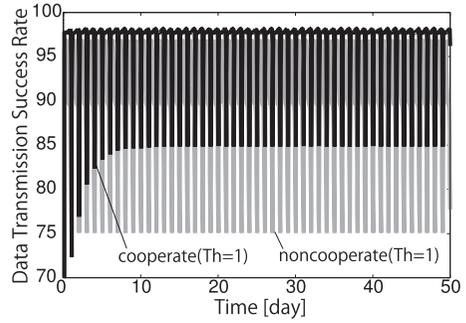


図 7 各伝送方式を用いた場合の平均データ伝送成功率
Fig. 7 Average data arrival rate for each transmission method.

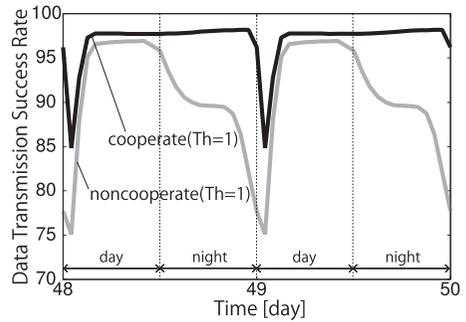


図 8 各伝送方式を用いた場合の平均データ伝送成功率
Fig. 8 Average data arrival rate for each transmission method.

が、遠方のノードは平均再送回数を大幅に削減できている。これは、BS から近距離のノードは他のノードのデータの中継によって再送回数が増加し、遠方のノードは中継ノードを利用することで再送回数が減少するためである。これより、協力伝送によって各ノードの再送回数の均一化ができていていることが分かる。

停止ノード再稼動条件を未導入の場合 ($T_h = 1$) の非協力、及び協力伝送の観測時間に対する平均データ伝送成功率の変化の様子を図 7 に示す。図 7 の黒色、灰色の線はそれぞれ協力伝送、非協力伝送の場合の平均データ伝送成功率の変動を示している。図 7 では観測開始から 50 日間の平均データ伝送成功率を示しているが、平均データ伝送成功率は昼夜の取得エネルギーの変動に伴って 1 日ごとに変動している。そのため、図 7 で平均データ伝送成功率は帯状に見える。また、平均データ伝送成功率の変動は一定時間後に一定の変動に収束している。これは、電池残量の初期値 (0 [J]) の影響が時間経過とともになくなるためである。非協力伝送では、平均データ伝送成功率が観

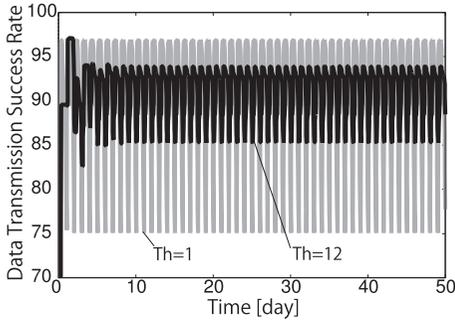


図 9 非協力伝送への停止ノード再稼動条件を導入した効果

Fig. 9 Effect of introduction of inactive node reactivation condition to noncooperative transmission.

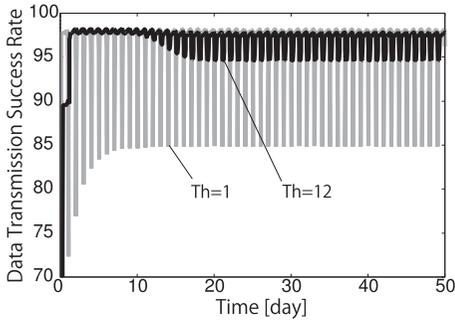


図 10 協力伝送への停止ノード再稼動条件を導入した効果

Fig. 10 Effect of introduction of inactive node reactivation condition to cooperative transmission.

測開始からすぐに一定の変動に収束するのに対し、協力伝送では一定の変動に収束するのにしばらく時間がかかっている。これは、時間経過とともに BS から近いノードと遠いノードの電池残量が均一化されるためである。なお、4. で述べたように、観測開始時の全ノードの電池残量を 0 [J] としているため、観測開始時の平均データ伝送成功率は伝送方法にかかわらず 0 [%] だが、図 7 では 70 [%] 以上の範囲のみを示している。図 7 の変動が一定に収束してからの 2 日間の平均データ伝送成功率の変動の様子を拡大して図 8 に示す。協力伝送によって平均データ伝送成功率の最大値、最小値がともに向上できていることが分かる。また、非協力、協力どちらの場合でも充電量の大きい日中に平均データ伝送成功率の最大値を示し、最小値は前日の日没から期間が長く、充電量が小さい明け方に示すことが分かる。図 7、図 8 から、協力伝送を用いても平均データ伝送成功率の明け方に起こる最小値は低く、改

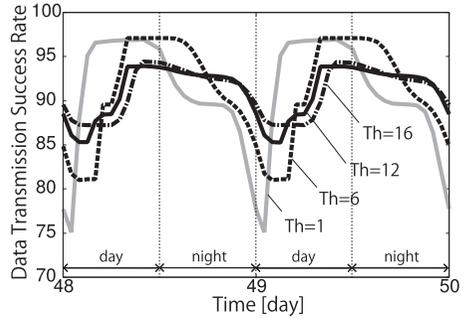


図 11 非協力伝送における再稼動しきい値 (T_h) による特性比較

Fig. 11 Characteristics comparison in noncooperative transmission by reactivation threshold (T_h).

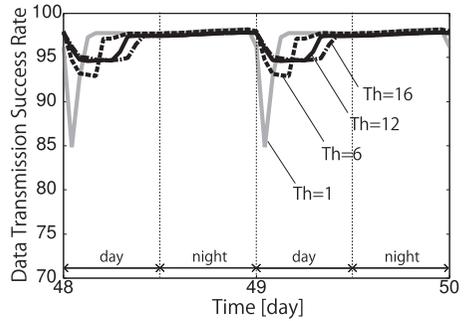


図 12 協力伝送における再稼動しきい値 (T_h) による特性比較

Fig. 12 Characteristics comparison in cooperative transmission by reactivation threshold (T_h).

善の余地があることが分かる。

図 9、図 10 にそれぞれ非協力伝送、協力伝送の場合のノードの再稼動条件を導入したことによる影響を示す。しきい値の値は $T_h = 12$ とした。これは電池切れにより停止したノードは半日稼動可能なエネルギーを充電されることで再稼動することを意味する。図 9、図 10 で再稼動条件を導入した場合に、平均データ伝送成功率が 1 度高い値を示している。これは、再稼動条件を導入した場合に、観測開始からしばらくノードがデータの伝送を行わず充電のみを行うことで、多くのノードが大きい電池残量をもった状態で伝送を開始するためである。また、非協力伝送の場合は、1 度高い平均伝送成功率を示した後すぐに一定の変動に収束するが、協力伝送の場合は、ノードの電池残量が均一化されるため、徐々に一定の変動に収束する。非協力伝送、協力伝送のどちらの場合でも停止ノード再稼動条件を設けることで平均データ伝送成功率の最小値が

約10%向上していることが分かる。しかし、図9の非協力伝送では停止ノード再稼動条件の導入によって平均データ伝送成功率の最大値が約4%低下してしまっている。一方、協力伝送では停止ノード再稼動条件の導入による平均データ伝送成功率の最大値の低下は約0.5%であり、非協力伝送に比べて平均データ伝送成功率の最大値の低下が小さく抑えられている。これより、協力伝送では停止ノード再稼動条件の導入によって平均データ伝送成功率を高い値に維持することが可能になることが分かり、停止ノード再稼動条件の導入の効果は協力伝送の場合に特に大きいといえる。

図11、図12にデータ伝送成功率の変動が収束してからの非協力伝送、協力伝送の場合におけるノードの再稼動しきい値 T_h を変更したときの稼働率の2日間の変動の様子を示す。ここでしきい値の最大値を $T_h = 16$ としている。これは T_h の値を16より大きくすると非協力伝送の場合に T_h 回分のデータ伝送に消費するエネルギーの期待値が電池容量を超えてしまい ($T_h E_{NC}[E_{c,i}] > C_0$)、再稼動できないノードが生じるためである。

図11に示す非協力伝送において T_h の値を大きくするほど夜間のデータ伝送成功率の低下を改善できていることが分かる。しかし、 T_h を大きくするほど停止したノードが再稼動するまでの時間が長くなるため、日中のデータ伝送成功率が増加するまでの期間が延長している。また、 T_h の値によってデータ伝送成功率の最高値が上下しているが、これは電池切れにより停止するノード数と充電のみを行い再稼動を待つノード数にトレードオフがあるためである。

図12に示す協力伝送では T_h の増加にしたがって夜間のデータ伝送成功率の改善と日中のデータ伝送成功率が増加するまでの時間が延長している点は非協力伝送と同様だが、日中のデータ伝送成功率の最大値がほとんど低下していないことが分かる。これは協力伝送ではノードごとのエネルギー消費の偏りが小さく日中に停止するノードが少ないためである。

図13に各伝送方法を用いた場合の二つのノードの電池残量の変化の様子の一例を示す。表示期間は、図9、図10の平均データ伝送成功率が一定の変動に収束してからの5日間である。図示しているのは、BSから最も遠いノードと最も近いノードの一つである。また、これはシミュレーションの試行回数1回の結果である。非協力伝送ではノードごとの電池残量の差が大きく、遠方のノードが夜間では電池切れにより停止し

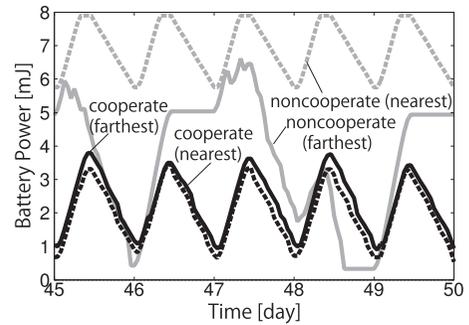


図13 再稼動条件を導入した非協力伝送、協力伝送のノードの電池残量の変化

Fig. 13 Changes of battery power of nodes in non-cooperative and cooperative transmission with reactivation condition.

ていることが分かる。一方、協力伝送では、ノードごとの電池残量の差は小さく抑えられ、近いノード、遠いノードともに稼働し続けている。これより、協力伝送ではデータ再送時の中継ノードの利用によってノードごとの電池残量の均一化されていることが分かる。

非協力伝送では、遠方のノードのエネルギー消費が大きいため、図13では46日の明け方と48日の中頃に遠方のノードは電池切れによって停止している。再稼動条件を導入した場合、1度停止したノードは電池残量が十分充電されるまでデータ伝送を行わず充電のみ行う。図13中では、非協力伝送の場合の遠方のノードは、46日の明け方から47日の明け方まで、及び48日の中ごろから50日の明け方まで充電のみを行い、停止し続けている。このように、日中に伝送を行わないノードが生じるため図9の平均データ伝送成功率の最大値の低下が起こる。

一方、協力伝送では、ノードごとの電池残量の差は小さく抑えられ、どちらのノード共に稼働し続けている。これより、協力伝送ではノードごとの電池残量が均一化されていることが分かる。ノードごとの電池残量の均一化により、電池切れによるノード停止が避けられているため、日中に充電のみを行い停止し続けることを避けられる。これにより、協力伝送では、図10に示すように再稼動条件の導入による平均データ伝送成功率低下は小さい。

また、図13に示すように、協力伝送ではノードの再送回数、電池残量が均一化されており、一部のノードだけが停止・充電・再稼動を繰り返しているわけではない。一方、非協力伝送では、遠方のノードが停止・充電・再稼動を繰り返すことになる。

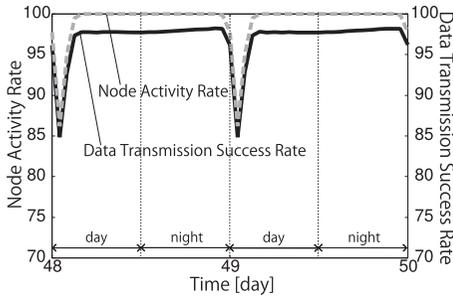


図 14 協力伝送 ($T_h = 1$) におけるデータ伝送成功率とノード稼働率の関係

Fig. 14 Relationship between data transmission success rate to node activity rate in cooperative transmission ($T_h = 1$).

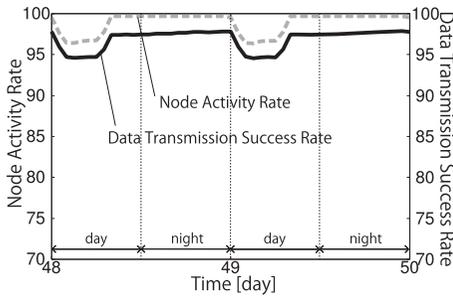


図 15 協力伝送 ($T_h = 12$) におけるデータ伝送成功率とノード稼働率の関係

Fig. 15 Relationship between data transmission success rate to node activity rate in cooperative transmission ($T_h = 12$).

平均ノード稼働率と平均データ伝送成功率の関係を示す。図 14 に再稼働条件未導入の場合 ($T_h = 1$) の平均ノード稼働率と平均データ伝送成功率を示し、図 15 に再稼働条件を導入した場合 ($T_h = 12$) の平均ノード稼働率と平均データ伝送成功率を示す。図 14, 図 15 から、平均ノード稼働率よりも平均データ伝送成功率の方が常に 1~2% 低くなっていることが分かる。これは、再送回数が式 (1) の再送上限に達したために、データ伝送を中止するノードがあるためである。図 14, 図 15 より、再稼働条件を導入することで平均ノード稼働率、平均データ伝送成功率がいずれも向上するが、平均ノード稼働率と平均データ伝送成功率の差は変わっていない。これより、再稼働条件の導入によって、ノード稼働率が向上したことでデータ伝送成功率が向上したといえる。

図 16 に均等配置ではなく、全ノードを観測領域内にランダムに配置した場合の、協力伝送の平均データ

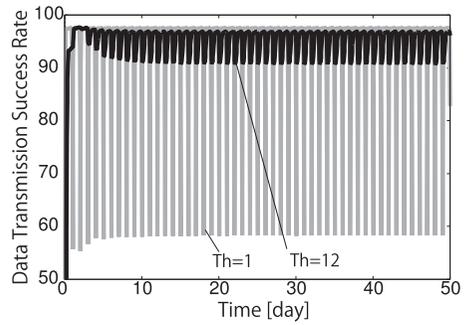


図 16 ランダム配置の場合の協力伝送における平均データ伝送成功率 ($T_h = 1, T_h = 12$)

Fig. 16 Average data transmission success rate in cooperative transmission in the case of random node allocation ($T_h = 1, T_h = 12$).

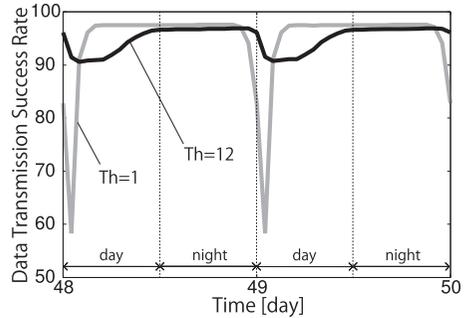


図 17 ランダム配置の場合の協力伝送における平均データ伝送成功率 ($T_h = 1, T_h = 12$)

Fig. 17 Average data transmission success rate in cooperative transmission in the case of random node allocation ($T_h = 1, T_h = 12$).

伝送成功率の変動の様子を示す。また、平均データ伝送成功率が一定の変動に収束してからの 2 日間の様子を図 17 に示す。ただし、配置が異なるケースでの試行を 10 万回行い、その平均値を示す。均等配置の場合と同様にデータ伝送成功率の最大値は低下するものの、明け方に示すデータ伝送成功率の最小値を大きく改善できていることが分かる。また、配置に偏りがある場合でも評価を行う。配置に偏りがある場合の例としてガウスランダム分布配置による評価を行う。

ガウスランダム分布配置は x 軸, y 軸方向の平均は $(\mu_x, \mu_y) = (0, 0)$ であり、標準偏差は $(\sigma_x, \sigma_y) = (15 [m], 15 [m])$ である。この配置では、ノードが BS 付近に集中して配置されます。このときの平均データ伝送成功率を図 18 に示す。BS に近いノードは伝送誤りが起きず、1 度の送信でデータを伝送できるため、電池切れを起こすことが少なくなる。そのため、再稼

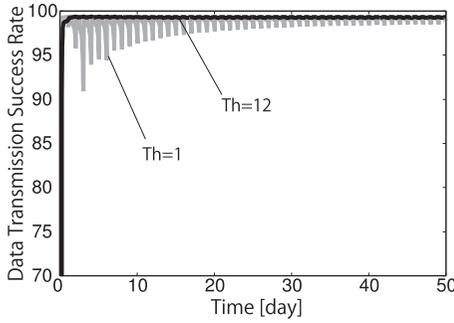


図 18 ガウスランダム分布配置の場合の協力伝送における平均データ伝送成功率 ($T_h = 1$, $T_h = 12$)

Fig. 18 Average data transmission success rate in cooperative transmission in the case of gaussian random distributed node allocation ($T_h = 1$, $T_h = 12$).

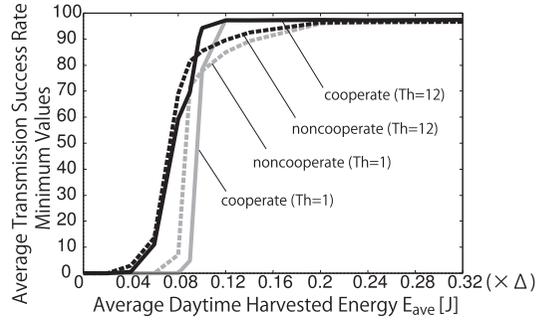


図 20 ランダム配置の場合の発電量に対する平均データ伝送成功率の最小値の変化

Fig. 20 Minimum value variation of the average data transmission success rate depending on the amount of energy harvested in the case of random node allocation.

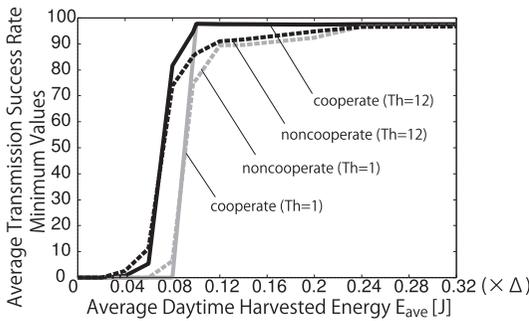


図 19 均等配置の場合の発電量に対する平均データ伝送成功率の最小値の変化

Fig. 19 Minimum value variation of the average data transmission success rate depending on the amount of energy harvested in the case of even node allocation.

動条件を導入した効果は小さくなる。

次に、これまで固定としてきた日中の平均発電量を変化させた場合で各伝送方法の評価を行い、提案手法の有効性を示す。各伝送方法の特性は変動が収束してからの平均データ伝送成功率の最小値を比較することで評価する。図 19, 図 20 にそれぞれノード配置を均等配置, ランダム配置にした場合の各伝送方法の日中の 1 時間当りの平均発電量に対する平均データ伝送成功率の最小値を示す。いずれの伝送方法でも発電量が小さくなればデータ伝送成功率の最小値は 0 [%] に収束し、発電量が大きくなれば約 98 [%] に収束している。なお、発電量が大きい場合でも平均データ伝送成功率が 100% に達しないのは、再送上限を設けているためである。このとき、電池残量が十分にあるノードでも伝送が成功する前に再送を中止する場合がある。

ノード配置にかかわらず提案手法が最も小さい発電量で平均データ伝送成功率の最小値が 90% 以上の高い値に達することが分かる。これより、提案手法は厳しい発電環境下でも高いデータ伝送成功率を維持できるといえる。

7. む す び

本論文では、まずセンサノードが太陽エネルギーを取得する環境に協力伝送を適用し、電池残量を考慮した中継ノード選択法を提案した。更に昼夜の取得エネルギーの変動を考慮して停止ノード再稼動条件の導入を提案した。

協力伝送によって全体的にデータ伝送成功率を向上させることができたが、停止ノード再稼動条件を未導入の場合では夜間のデータ伝送成功率の低下が依然として大きいことを明らかにした。停止ノード再稼動条件の導入によって非協力伝送、協力伝送のどちらの場合でも夜間のデータ伝送成功率の低下を改善でき、特に協力伝送では日中のデータ伝送成功率の低下が小さく、高いデータ伝送成功率を維持できる。適切な停止ノードの再稼動しきい値を選択することで所望の高いデータ伝送成功率を達成できることを示した。更に、提案手法はノードの配置方法にかかわらず有効であることを示した。提案手法によって小さい発電量で高いデータ伝送成功率が達成可能であることを示した。

謝辞 本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究 (C) の助成を受けて行われたものである。記して謝意を表する。

文 献

- [1] J.A. Paradiso and T. Starner, "Energy scavenging for mobile and wireless electronics," *IEEE Pervasive Computing*, vol.4, no.1, pp.18-27, Jan. 2005.
- [2] S. Roudy, D. Steingart, L. Frechette, P. Wright, and J. Rabaey, "Power sources for wireless sensor networks," *1st European Workshop on Wireless Sensor Networks (EWSN)*, vol.2920, pp.1-17, Jan. 2004.
- [3] E. Sazonov, H. Li, D. Curry, and P. Pillay, "Self-powered sensor monitoring of highway bridges," *IEEE Sensors J.*, vol.9, no.11, pp.1422-1429, Nov. 2009.
- [4] A. Zaidi, S.P. Kotagiri, J.N. Laneman, and L. Vandenborpe, "Cooperative relaying with state available noncausally at the relay," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol.56, no.5, pp.2272-2298, July 2010.
- [5] J. Kim, D.S. Michalopoulos, and R. Schober, "Diversity analysis of multi-user multi-relay networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol.10, no.7, pp.2380-2389, July 2011.
- [6] A. Bletsas and A.G. Dimitriou, "Interference-limited opportunistic relaying with reactive sensing," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol.9, no.1, pp.14-20, Jan. 2010.
- [7] I. Cerutti, A. Fumagalli, and P. Gupta, "Delay models of single-source single-relay cooperative ARQ protocols in slotted radio networks with poisson frame arrivals," *IEEE Trans. Netw.*, vol.16, no.2, pp.371-382, April 2008.
- [8] M. Tacca, P. Monti, and A. Fumagalli, "Cooperative and reliable ARQ protocols for energy harvesting wireless sensor nodes," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol.6, no.7, pp.2519-2529, July 2007.
- [9] B. Medepally and N.B. Mehta, "Voluntary energy harvesting relays and selection in cooperative wireless networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol.9, no.11, pp.3543-3553, Nov. 2010.
- [10] 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.

(平成 23 年 5 月 26 日受付, 9 月 21 日再受付)



太田健太郎 (学生員)

平 22 名大・工・電気電子情報卒。同年同大大学院博士課程前期課程入学, 現在に至る。センサネットワーク, エネルギーハーベスティングなどの研究に従事。IEEE 学生員。



小林健太郎 (正員)

平 17 名大・工・電気電子情報卒。平 19 同大大学院博士課程前期課程了。平 22 同大大学院博士課程後期課程了。博士(工学)。同年名大・エコトピア科学研究所・助教, 現在に至る。平 21 より平 22 まで日本学術振興会特別研究員・DC。センサネットワーク, 分散検出理論, 分散符号化・統合復号方式などの研究に従事。情報処理学会, IEEE 各会員。平 22 本会モバイルマルチメディア通信研究専門委員会若手研究奨励賞受賞。



山里 敬也 (正員)

昭 63 信州大・工・電子卒。平 2 同大大学院修士課程了。平 5 慶大大学院博士課程了。工博。同年名大・工・電子情報・助手。平 10 同大・情報メディア教育センター・助教, 平 16 同大・エコトピア科学研究所, 平 19 同大・エコトピア科学研究所・准教授, 平 22 同大・教養教育院・教授, 現在に至る。平 9 より平 10 まで, ドイツカイザースラウテルン大・客員研究員。センサネットワーク, 変復調理論, 誤り制御, eラーニングなどの研究に従事。情報理論とその応用学会, IEEE 各会員。平 7 本会学術奨励賞受賞。平 17 本会基礎・協会ソサイエティ特別功労賞受賞。平 17,20 本会通信ソサイエティ活動功労賞受賞。IEEE Communication Society 2006 Best Tutorial Paper Award 受賞



片山 正昭 (正員:フェロー)

昭 56 阪大・工・通信卒。昭 61 同大大学院博士課程了。工博。同年豊橋技術科学大助手。平元阪大・講師。平 4 名大・講師, 平 5 助教, 平 13 教授。現在, 名大・エコトピア科学研究所・教授(工学研究科電子情報システム専攻教授及びグリーンモビリティ連携研究センター教授兼務)。1995 年 10 月より 1996 年 4 月まで, 名大工学部との学术交流協定により, 米国ミシガン大学アンアーバ校工学部電気電子計算機科学科に滞在。信号伝送と変復調理論, 誤り制御, 多元接続方式, トラヒック制御, ソフトウェア無線技術などの研究に従事。小型衛星研究会, 日本信頼性学会各会員。IEEE シニア会員。昭 61 本会篠原記念学術奨励賞, 平 11, 13, 18 本会通信ソサイエティ功労感謝状受賞。平 18 電波の日総務省東海総合通信局長表彰。