

全二重無線データ電力同時伝送を用いた 機器内センサネットワークのワイヤレス化の検討

川崎 慈英¹ 小林 真^{1,2} 猿渡 俊介¹ 渡辺 尚¹

概要: 機器の設計性, メンテナンス性, 軽量化の観点から, 機器内センサネットワークの無線化が求められている. 機器内センサネットワークの完全な無線化のためには, データ通信と電源供給の無線化が必要である. データ通信と電源供給の無線化を実現するために, 本稿では限られた周波数資源の中で無線電力伝送を実現する FD-SWIPT (Full-duplex Simultaneous Wireless Information and Power Transfer) に着目する. 具体的には, 機器内センサネットワークのための複数アクセスポイントを用いた無線データ電力同時伝送手法 FD-SWIPT-mAP (FD-SWIPT with Multiple Access Points) を提案する. FD-SWIPT-mAP は集中制御によるメディアアクセス制御とセンサ端末間の電力不均衡を抑制するためのアクセスポイント割り当てを行うことで, センサデータの収集率を向上させる. 計算機シミュレーションの結果, FD-SWIPT-mAP は半二重通信を用いた HD-SWIPT と比較して約 30% 高いデータ収集率を達成することを示す.

キーワード: 無線センサネットワーク, 無線データ電力同時伝送, 無線全二重通信, 機器内センサネットワーク

1. はじめに

現在の機器内センサネットワークでは, 複数のセンサ端末や機器がワイヤハーネスと呼ばれる通信線や電力線を用いて接続されている. 自動車, 飛行機, 電車, 自動販売機, プリンタ, ATM などの機器内部では, 多数のセンサ端末や機器がワイヤハーネスを用いて相互に接続されて電力やデータをやりとりしている. 安全性や利便性の向上のために増加する機器内のセンサ端末数とともに, ワイヤハーネスの量も増加の一途をたどっている.

ワイヤハーネスを用いた機器内センサネットワークでは, センサ端末や機器はワイヤハーネスのハードウェア制約により再構成する事ができない [1, 2]. さらに自動車などの機器内センサネットワークでは, ワイヤハーネス自体の重量も問題となる [1-4]. 具体的には, 200 を越えるセンサを相互接続するために, ワイヤハーネスの重量が総重量の 10% を越えることもある [2]. このようなワイヤハーネスによるハードウェア制約から, 機器内センサネットワークを解放するために, ワイヤレスハーネスによる機器内センサネットワークの無線化が求められている [1, 2].

本稿では通信だけでなく電力線も無線化することで, 機器内センサネットワークのためのワイヤレスハーネスを実現する事を目指す. これまでの無線センサネットワークの

研究は, 無線通信を利用してセンサデータを集める事に着目して行われてきた. データのやりとりのみを前提とした無線センサネットワークでは, 機器内センサネットワークのためのワイヤレスハーネスを実現することができない. 無線センサネットワーク技術を利用して機器内通信を行ったとしても, 電源を供給するためのワイヤハーネスが依然必要となる.

電力線を無線化するために, 本稿では電波を用いた無線電力伝送に着目する. 電波を用いた無線電力伝送では, アクセスポイントが意図的に放出する電波で電力を供給する. 整流器とアンテナを組み合わせた整流アンテナ (レクテナ) によって, センサ端末は電波から電気を得る. 無線ネットワークで扱うトラフィックの増加により周波数資源が逼迫するため, 無線電力伝送用の帯域を新たに確保することは困難である.

周波数資源の逼迫する中で無線電力伝送を実現するために, これまで SWIPT (Simultaneous Wireless Information and Power Transfer: 無線データ電力同時伝送) [5-9] を用いて 1 つの帯域でデータと電力を同時に伝送する手法が検討されてきた. これらの SWIPT の研究では, 単一のアクセスポイントがデータと電力を同時に送信する HD-SWIPT (Half Duplex SWIPT: 無線半二重 SWIPT) を想定している. 機器内センサネットワークではデータ伝送と電力伝送が双方向であるために, HD-SWIPT を機器内センサネットワークに適用する事はできない. 具体的に機器内では,

¹ 大阪大学大学院情報科学研究科

² 日本学術振興会特別研究員 DC

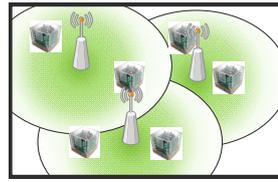
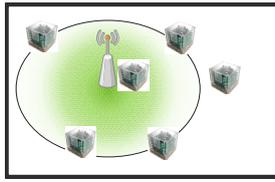


図 1: 単一 AP を用いた電力伝送 図 2: 複数 AP を用いた電力伝送

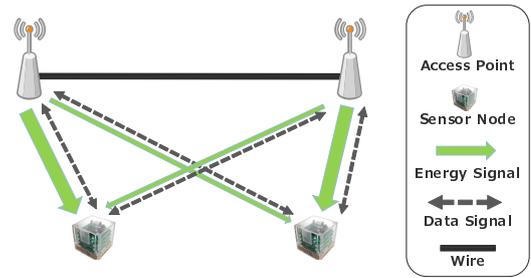


図 3: 機器内センサネットワークにおけるワイヤレスハーネス

アクセスポイントはセンサ端末に電力信号を送信して、センサ端末はアクセスポイントにデータ信号を送信するために、データ伝送と電力伝送は双方向となる。

本稿では、機器内センサネットワーク通信におけるデータ伝送と電力伝送の双方向性に着目して、SWIPTの中でもデータ伝送と電力伝送の双方向通信を同時に可能にする FD-SWIPT (Full Duplex SWIPT: 無線全二重 SWIPT) [10,11] を利用する。FD-SWIPT では、同一周波数帯で同時に 2 つの無線端末がそれぞれ電力とデータを双方向に伝送する事が可能となる。文献 [11] では、機器内センサネットワークにおいて、1 対 1 の FD-SWIPT が実現可能であることが示されている。

しかしながら、機器内センサネットワークにおいて、1 対 1 通信による FD-SWIPT を用いるとセンサ端末における受信電力量の偏りが発生する。図 1 に単一アクセスポイントを用いた電力伝送の例を示す。単一アクセスポイントを用いる場合、電波の距離減衰によって機器内全体に電力を伝送する事ができない。さらに、電力伝送デバイスの制約から送信できる電力量が不足することも問題となる。

機器内センサネットワークにおける FD-SWIPT の実現において、センサ端末における受信電力量の偏り問題と電力不足問題を解決するために、複数のアクセスポイントを利用した FD-SWIPT-mAP (FD-SWIPT with multiple Access Points) を提案する。複数のアクセスポイントを用いる事で機器内全体に電力を伝送することが可能となる。図 2 に複数アクセスポイントを用いた電力伝送の例を示す。複数アクセスポイントを用いると、アクセスポイント数の増加に従って電力伝送可能な範囲が広がるために、機器内全体への電力伝送が可能となる。

FD-SWIPT-mAP では、複数のアクセスポイントによる電力とデータの同時伝送を実現するための、集中制御によるメディアアクセス制御とアクセスポイント割り当てを行う。FD-SWIPT-mAP のアクセスポイント割り当てでは、各センサの蓄電量が等しくなるように通信時間を制御する。計算機シミュレーションの結果、FD-SWIPT-mAP を用いることで、他のデータ電力同時伝送手法に比べて、データ収集率を大きく改善できることが確認できた。例えば、半二重通信を用いたデータ電力同時伝送手法の HD-SWIPT と比較して提案手法はデータ収集率を最大 30%改善する。

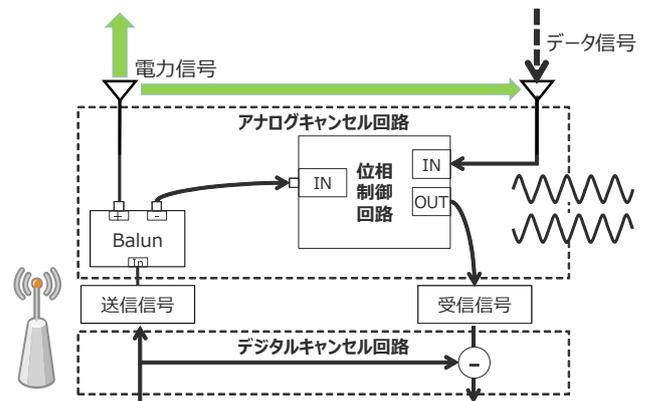


図 4: アクセスポイントの構成

本稿の構成は以下の通りである。2 節において複数アクセスポイントを用いて FD-SWIPT を行う際の課題について述べる。3 節では、機器内ネットワークにおいて複数アクセスポイントを用いた FD-SWIPT を実現するための制御手法を述べる。4 節でシミュレーションによって性能を検証する。5 節において本稿に関連する研究について述べて、6 節でまとめとする。

2. 複数アクセスポイントによる FD-SWIPT の課題

機器内センサネットワークのワイヤレスハーネスの実現に向けた複数アクセスポイントによる FD-SWIPT には 2 つの課題がある。1 つ目はメディアアクセス制御の課題、2 つ目はセンサ端末受信電力量不均衡の課題である。2 つの課題を述べる前に、本稿で想定する複数アクセスポイントによる FD-SWIPT について述べる。

図 3 に本稿で想定する複数アクセスポイントによる FD-SWIPT の全体像を示す。図 3 では、複数台のアクセスポイントが有線接続を介して協調することでセンサ端末に電力を伝送して、データはアクセスポイントとセンサ端末の間で双方向にやりとりされる。

複数アクセスポイントを用いた FD-SWIPT では、複数のアクセスポイント同士、各アクセスポイントと電源は有線で相互に接続されている。アクセスポイントは自身の送信電力をキャンセル可能な自己干渉除去機能を具備しているため、電力信号を送信しながらデータ信号を受信するこ

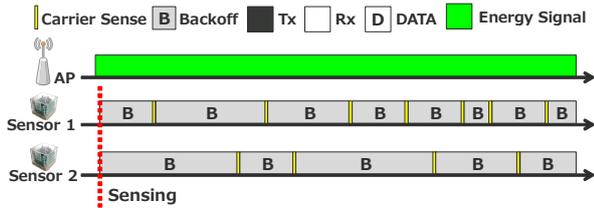


図 5: CSMA/CA を FD-SWIPT に適用した場合の動作例

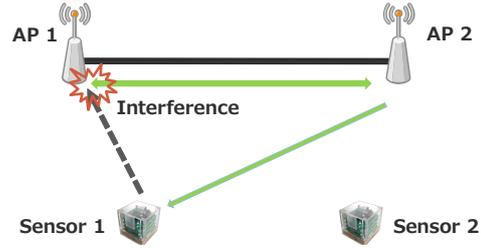


図 6: 電力信号・データ信号衝突

とが可能である。アクセスポイント同士は相互に情報をやりとりすることで協調動作を行う。

図 4 に無線全二重通信によるデータと電力同時伝送に対応したアクセスポイントの構成図を示す。アクセスポイントでは、アナログキャンセル回路とデジタルキャンセル回路を組み合わせることによって自己干渉信号を除去する。まず、アナログキャンセル回路によって自身が送信した信号と逆位相の信号を受信信号と足し合わせる。次に、デジタルキャンセル回路を用いて非線形な自己干渉成分を除去する。文献 [11] では、機器内センサネットワークにおいて FD-SWIPT の実現に十分な干渉除去が行えることが実機実験により示されている。

一方、センサ端末はレクテナとキャパシタを具備する。電力信号をレクテナにより受信して、キャパシタに電力を蓄電する。機器内センサネットワークでは、センサ端末は定期的にセンシングを行って、得られたセンサデータをアクセスポイントに送信する。

2.1 メディアアクセス制御手法の課題

無線全二重通信による同時伝送を利用した FD-SWIPT では、全二重通信を前提としていない既存のメディアアクセス方式は利用できないという問題が発生する。例えば、通常の CSMA/CA (Carrier Sense and Multiple Access with Collision Avoidance) では、無線端末はキャリアセンスを行って、他の端末による電波の送信を検知した場合には送信を抑制する。アクセスポイントは無線全二重通信の仕組みを用いて、電力信号を送信しながらデータ信号を受信することが可能である。しかしながら、アクセスポイントが送信した電力信号をキャリアセンスで検知したセンサ端末は、アクセスポイントがセンサ端末からのフレームを受信できるにも関わらず、センサ端末が送信を抑制してしまう。

図 5 に既存の CSMA/CA を FD-SWIPT に適用した場合の動作例を示す。通常の CSMA/CA では、フレームが発生すると他のセンサ端末との衝突を避けるためにランダム時間バックオフする。バックオフ時間が経過すると、キャリアセンスして他のセンサ端末が通信していないか確認する。他のセンサ端末が通信していない場合にはフレームの送信を開始する。他のセンサ端末の通信を検知した場合には再度ランダム時間バックオフする。このようなメディアアクセス制御方式を、無線全二重通信を用いたデータ電力

同時伝送環境に適用すると、センサ端末はいつまで経っても自身のフレームを送信することができない。アクセスポイントが常に電力信号を送信していることで、キャリアセンスしても他の端末が通信していると判断してしまうからである。FD-SWIPT を実現するにはキャリアセンスを用いずに電力信号とデータ信号の衝突を回避するメディアアクセス制御手法が必要となる。

2.2 センサ端末受信電力不均衡の課題

複数アクセスポイントによる FD-SWIPT を行う場合、各センサ端末の受信電力量に不均衡が発生する。複数アクセスポイントによる FD-SWIPT では電力信号・データ信号衝突を避けるために、センサ端末からのデータを受信中のアクセスポイント以外は電力信号を送信することができないためである。データ通信が行われていない時間は全てのアクセスポイントが電力伝送を行えるものの、データ通信中には 1 つのアクセスポイントしか電力を送信できないためにセンサ端末における受信電力量に不均衡が発生する。

図 6 に、電力信号・データ信号衝突の例を示す。図 6 では、アクセスポイント 1 がセンサ端末 1 からのデータ信号受信中に、アクセスポイント 2 が電力信号を送信している。アクセスポイント 2 からの電力信号の干渉を受けて、アクセスポイント 1 はセンサ端末 1 からのデータ信号を受信する事ができない。電力信号・データ信号衝突を回避するためには、データ信号受信中のアクセスポイント以外は電力信号の送信を抑制する必要がある。

センサ端末のデータ信号送信中は、データ信号受信中のアクセスポイント 1 台しか電力伝送を行う事ができないことから、センサ端末の受信電力量不均衡が発生する。具体的には、各アクセスポイントのデータ信号受信時間に応じて各センサ端末の得られる電力量が偏る。センサ端末の得られる受信電力量不均衡の発生すると、一部の端末の動作時間が著しく低下して、機器内センサネットワークの動作時間の低下をまねく。

センサ端末の受信電力不均衡を防ぐために、各センサ端末のデータ送信先アクセスポイントの割り当てを適切に行うことで、各アクセスポイントのデータ信号受信時間を制御する必要がある。最適なセンサ端末のデータ送信先アクセスポイントの割り当てを求める問題は、式 (1) から式 (4)

の最適化問題で表すことができる.

$$\text{maximize} \quad \sum_{i=1}^n P_i \quad (1)$$

subject to

$$\sum_{i=1}^n \frac{1}{n} (P_i - \bar{P})^2 < \alpha \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^m R_{ij} = 1, \quad \forall i \quad (3)$$

$$P_i = f(\mathbf{R}), \quad \forall i \quad (4)$$

ただし, P_i はセンサ端末 i の蓄電量, \bar{P} はセンサ端末全体の蓄電量平均, $R_{ij} (\in \mathbf{R})$ はセンサ端末 i とアクセスポイント j のデータ送信先割り当て関係を表す. $R_{ij} = \{0, 1\}$ は 0 または 1 の値をとって, $R_{ij} = 1$ ならばセンサ端末 i のデータ信号をアクセスポイント j が受信することを表す. \mathbf{R} はデータ送信先割り当て (R_{ij}) の集合である.

最適化問題の各数式が表す具体的な内容は以下の通りである. 式 (1) は各センサ端末の蓄電量の合計を表す式である. 式 (2) は各センサ端末の蓄電量の偏りを抑えるための制約式である. 蓄電量の分散が閾値 α 以下となるようにアクセスポイントの割り当てを行う. 閾値 α はアプリケーションの要求によって定まる値である. 式 (3) は全てのセンサ端末に対して, 1 つのアクセスポイントが割り当てられていることを表す制約式である. 電力信号・データ信号衝突回避のために, $\sum_{j=1}^m R_{ij} = 1$ でなければならない. 式 (4) は全てのセンサ端末の送信先アクセスポイントの割り当てと, 各センサ端末の蓄電量との関係を表す制約式である.

全てのセンサ端末の送信先アクセスポイントの割り当てと, センサ端末 i の蓄電量との関係 ($P_i = f(\mathbf{R})$) は以下のように導出される. まず, センサ端末 i の蓄電量 P_i は, センサ端末 i の供給電力 S_i と消費電力 C_i を用いて式 (5) で表される.

$$P_i = S_i - C_i \quad (5)$$

ただし, センサ端末 i の供給電力 S_i は次の式 (6) で表される.

$$S_i = L(D_{ij}) P_{\text{ap}} \{W_j + W_{\text{all}}\} \quad (6)$$

D_{ij} はセンサ端末 i とアクセスポイント j の距離, $L(D_{ij})$ は距離 D_{ij} による伝搬損失を表す関数, W_j はアクセスポイント j が電力伝送を行う時間, W_{all} は全てのアクセスポイントが一斉に電力伝送を行う時間を表す. 各アクセスポイントが電力伝送を行う時間 (W_j) は式 (7) で表される. T_i は各センサ端末のデータ送信時間で, ビットレートとセ

ンサデータサイズによって決まる. ビットレートとセンサデータサイズは既知の情報である.

$$W_j = \sum_{i=0}^n R_{ij} T_i \quad (7)$$

全てのアクセスポイントが一斉に電力伝送を行う時間 (W_{all}) は式 (8) で表される.

$$W_{\text{all}} = T_{\text{next}} - \sum_{i=0}^n T_i \quad (8)$$

T_{next} は次のセンシングが開始するまでの時間で, 既知の情報である各センサ端末のセンシング間隔から計算される.

式 (1) から式 (4) で表される組み合わせ最適化問題は NP 困難である. 機器内ネットワーク内のアクセスポイントがネットワークの制御を行うことを考えた場合, 式 (1) から式 (4) の最適化問題を解いてセンサ端末とアクセスポイントの組み合わせを求めるのは現実的ではない.

3. 提案手法

2 節での議論を基に, 機器内センサネットワークにおいて複数アクセスポイントによる FD-SWIPT を実現するための FD-SWIPT-mAP を設計した. FD-SWIPT-mAP は集中制御による時分割メディアアクセス制御手法と, 電力量推定に基づくアクセスポイント割り当て手法の 2 つの手法から構成される.

FD-SWIPT-mAP は集中制御によるネットワークの制御を行う. 機器内センサネットワークでは, ネットワークの情報を利用することができる点に着目する. FD-SWIPT-mAP では, 機器内のセンサ端末の仕様や設置位置を利用してネットワークの制御を行う. 具体的には, ネットワーク内のセンサ端末とアクセスポイントの位置, センサ端末のセンシング間隔, 消費電力量, 送受信に必要な電力量, 各センサ端末のセンシングデータサイズを既知の情報としてネットワークの制御に利用する.

FD-SWIPT-mAP では, ネットワーク内の 1 つのアクセスポイントがセンサ端末と他のアクセスポイントを制御する. 本稿では, ネットワークを制御するアクセスポイントをマスターアクセスポイント, 残りのアクセスポイントをスレイブアクセスポイントと呼称する. スレイブアクセスポイントは, マスターアクセスポイントから有線接続を介して制御されて, センサデータの受信や電力信号の送信を行う. マスターアクセスポイントはセンサデータの受信や電力信号の送信の他に, 制御フレームの送信や, アクセスポイント割り当てアルゴリズムを実行する.

3.1 メディアアクセス制御手法

機器内ネットワークにおいて FD-SWIPT-mAP を実現するためのメディアアクセス制御手法を設計した. 提案す

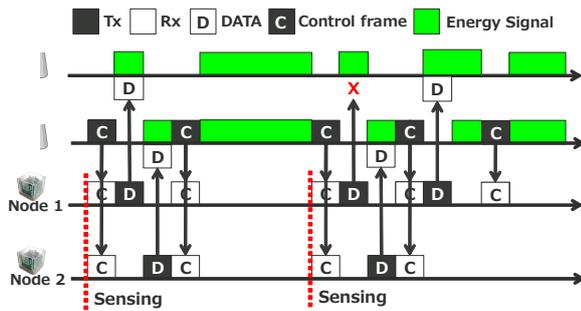


図 7: 提案手法の動作例

るメディアアクセス手法は、マスターアクセスポイントがネットワーク全体を集中制御することで衝突回避を行う。

図 7 に提案手法による衝突回避の動作例を示す。図 7 の例では、センサ端末 1 とセンサ端末 2 が固定されたセンシング間隔でセンシングを行っている。センサ端末 1 はセンサデータをスレイブアクセスポイントに、センサ端末 2 はセンサデータをマスターアクセスポイントにセンサデータ送信先が割り当てられている。送信先アクセスポイント割り当て手法の詳細は 3.2 節で述べる。

全てのセンサ端末は、センシング間隔毎にスリープ状態からアウェイク状態へ移行してセンシングを行う。センサ端末は電力消費を抑えるために、センシングとデータ送受信時以外はスリープ状態である。マスターアクセスポイントはセンシング間隔に合わせて、制御フレームを全てのセンサ端末宛てに送信する。スレイブアクセスポイントは、マスターアクセスポイントによる制御フレーム送信中、電力信号の送信を停止する。センサ端末は、端末自身の内部時計をアクセスポイントからの制御フレームと同期する。

制御フレームを受信した、センサ端末は制御フレーム内の送信スロット情報に基づいてデータ信号をアクセスポイントに送信する。送信スロット情報には、各センサ端末が送信を行う時間スロットが含まれている。センサ端末は、割り当てられた送信時間スロットにデータ信号を送信して、他の端末に割り当てられた送信時間は消費電力を削減するためにスリープする。センサ端末のデータ信号送信中、データ信号を受信しているアクセスポイントは電力信号を送信する。この時、電力信号を送信するアクセスポイントは、データ信号受信中のアクセスポイントだけである。なぜならば、データ信号受信中にはないアクセスポイントが電力信号を送信すると、データ信号と電力信号が衝突してデータ信号を受信することができないためである。

図 7 の例では、制御フレーム送受信後、センサ端末 1 がスレイブアクセスポイントにデータ信号を送信して、その間にスレイブアクセスポイントは電力信号を送信する。センサ端末 1 のデータ信号送受信後、センサ端末 2 がマスターアクセスポイントにデータ信号を送信して、その間にマスターアクセスポイントは電力信号を送信する。

全てのセンサ端末に割り当てた送信時間スロットが終了

したら、マスターアクセスポイントは再度制御フレームを送信する。全てのセンサ端末からのデータ信号を受信できた場合は、送信スロット情報が空の制御フレームを送信する。これは ACK (ACKnowledgement) の役割を果たす。センサ端末からのデータ信号の受信に失敗した場合は、マスターアクセスポイントは失敗したセンサ端末に対して再度送信スロットを割り当てて、制御フレームにより全てのセンサ端末に通知する。制御フレームによって、再度の送信スロットを割り当てられたセンサ端末は、再びデータ信号をアクセスポイントに送信する。一方、制御フレームに自身の送信スロットが割り当てられていなかった場合、センサ端末はデータ送信が正しく行われたと判断して、次のセンシングまでスリープする。

図 7 の例では、センサ端末 1 からスレイブアクセスポイントへのデータ信号の送信が失敗している。そこで、マスターアクセスポイントはセンサ端末 1 のための時間を割り当てて、コントロールフレームの送信スロット情報でセンサ端末に通知する。センサ端末 2 は、自分自身に送信スロットが割り当てられていない事を確認して、スリープ状態へ移行する。センサ端末 1 は、再度割り当てられた送信スロットにデータ信号を送信する。センサ端末 1 からのデータ信号を正しく受信した後、マスターアクセスポイントは送信スロット情報が空の制御フレームを送信する。マスターアクセスポイントが送信スロット情報が空の制御フレームを送信した後、全てのアクセスポイントは電力信号の送信を開始する。センサ端末のデータ送信先一方、全てのアウェイク状態のセンサ端末は送信スロット情報が空の制御フレーム受信後、スリープ状態へ移行する。

3.2 アクセスポイント割り当て手法

FD-SWIPT-mAP では、各ユーザ端末の受信電力量に不均衡が発生しないように、センサ端末のデータ送信先アクセスポイントの割り当てを行う。2 節で述べたセンサ端末受信電力不均衡の問題を基に、電力推定に基づいて逐次的にアクセスポイント割り当てを行う手法である PEBS (Power Estimating and Balancing Scheduling) を設計した。PEBS は既知の情報から各センサ端末の蓄電量の推定を行い、蓄電量の偏りに応じてアクセスポイント割り当てを変更する。

Algorithm1 に FD-SWIPT-mAP のアクセスポイント割り当て手法である PEBS のアルゴリズムを示す。PEBS で使用するパラメータの初期化、各ユーザ端末への送信先アクセスポイントの割り当て、PEBS で使用するパラメータの更新の 3 種類の処理から構成される。

表 1 に **Algorithm1** で使われる変数を示す。集合 A はネットワーク内すべてのアクセスポイントの集合、集合 N はセンサデータを送信するセンサ端末の集合、集合 M は N をコピーするための作業用集合である。変数 x と変数 y

Algorithm 1 Power Estimating & Balancing Scheduling

```

1:  $\forall_i \forall_j R_{ij} \leftarrow 0$ 
2:  $\forall_i P_i \leftarrow \sum_{j \in \mathbb{A}} L(D_{ij}) P_{ap} W_{all} - C_i$ 
3:  $\mathbb{M} \leftarrow \mathbb{N}$ 
4: while  $|\mathbb{M}| \neq 0$  do
5:    $x \leftarrow \text{getNode}(\mathbb{M})$ 
6:   if  $\text{var}(P_1, \dots, P_{|\mathbb{N}|}) < \alpha$  then
7:      $y \leftarrow \{j \in \mathbb{A} \mid \max[\sum_{i \in \mathbb{S}} L(D_{ij}) P_{ap} T_x] \cap \text{varplus}(R_{xj}) < \alpha\}$ 
8:   else
9:      $y \leftarrow \{j \in \mathbb{A} \mid \min[\text{varplus}(R_{xj})]\}$ 
10:  end if
11:   $R_{x,y} \leftarrow 1$ 
12:   $\forall_i P_i \leftarrow P_i + L(D_{iy}) P_{ap} T_x$ 
13:   $\mathbb{M} \leftarrow \mathbb{M} - x$ 
14: end while

```

表 1: **Algorithm1** で使われる変数

変数名	アルゴリズム中での役割
R_{ij}	センサ端末 i へアクセスポイント j の割り当て
P_i	センサ端末 i の蓄電量
W_{all}	全てのアクセスポイントが一斉に電力伝送を行う時間
C_i	センサ端末 i の消費電力
\mathbb{A}	アクセスポイント集合
\mathbb{N}	データ送信を行う予定のセンサ端末集合
\mathbb{M}	作業用のセンサ端末集合
x	作業用のセンサ端末変数
y	作業用のアクセスポイント変数
T_i	センサ端末 i のデータ送信時間

は作業用の変数で、それぞれセンサ端末とアクセスポイントを一時的に格納するために使われる。その他の変数は2章で述べた通りである。関数 $\text{getNode}(\mathbb{M})$ は \mathbb{M} に含まれるセンサ端末の中からセンサ端末を1つランダムに取得する関数、関数 $\text{var}(P_1, \dots, P_{|\mathbb{N}|})$ は式(2)に基づいて各センサ端末の蓄電量の分散を求める関数、関数 $\text{varplus}(R_{xj})$ は現在のアクセスポイント割り当てに、センサ端末 x に対するアクセスポイント j の受信割り当てを加えた場合の蓄電量の分散を求める関数である。

1つ目の処理である PEBS で使用するパラメータの初期化では、センサ端末の割り当てアクセスポイント、センサ端末の蓄電量、作業用のセンサ端末の集合を初期化する。**Algorithm1** の1行目で、アクセスポイント割り当てを表す変数 R_{ij} を0で初期化する。変数 R_{ij} を0で初期化することで、いずれのセンサ端末もアクセスポイント割り当てがされていない状態となる。次に **Algorithm1** の2行目で、センサ端末 i の蓄電量を表す変数 P_i を初期化する。 $\sum_{j \in \mathbb{A}} L(D_{ij}) P_{ap} W_{all} - C_i$ は全てのアクセスポイントが一斉に電力伝送を行う際に得られる電力量から、消費電力を差し引いたものである。最後に **Algorithm1** の3行目で、作業用集合 \mathbb{M} をセンサ端末集合 \mathbb{N} で初期化する。

2つ目の処理である各ユーザ端末への送信先アクセスポイントの割り当てでは、アクセスポイント割り当てを繰り返

返し行うことで全てのセンサ端末に対してアクセスポイントを割り当てる。**Algorithm1** の4行目から10行目では、全てのセンサ端末に対してアクセスポイントの割り当てが行われるまで、アクセスポイントの割り当て処理が繰り返し行われる。ランダムに選択したセンサ端末に対してアクセスポイント割り当てを行う。**Algorithm1** の6行目で、各センサ端末の蓄電量の偏りに応じてアクセスポイントの割り当てを行う。蓄電量の偏りが小さい時、つまり関数 $\text{var}(P_1, \dots, P_{|\mathbb{N}|})$ の値が閾値 α より小さい場合、伝送電力量が最大になるようにアクセスポイントを選択する。蓄電量の偏りが大きいとき、つまり関数 $\text{var}(P_1, \dots, P_{|\mathbb{N}|})$ の値が閾値 α より大きい場合、センサ端末間の蓄電量の偏りが最小になるようにアクセスポイントを選択する。

3つ目の処理である PEBS で使用するパラメータの更新では、センサ端末の送信先に割り当てたアクセスポイントを更新して保存する。**Algorithm1** の11行目から14行目では、パラメータの更新を行う。**Algorithm1** の11行目では、センサ端末 x に対するアクセスポイント y の割り当てを保存するために $R_{x,y}$ の値1に変更する。**Algorithm1** の12行目では、アクセスポイント y がセンサ端末 x との通信中に送信する電力信号から得られる電力を各センサ端末の蓄電量 P_i に加える。**Algorithm1** の13行目で割り当てたアクセスポイントを集合 \mathbb{M} から取り除いて、4行目に戻る。

4. 評価

FD-SWIPT-mAP の性能を確かめるために、計算機シミュレーションを用いてデータ収集率を評価した。データ収集率とは、センサ端末で発生したセンサデータのうち、アクセスポイントが受信することが出来たセンサデータの割合である。データ収集率は機器内センサネットワークが正しく動作している事を表す指標となる。

4.1 評価環境

性能評価では、機器内センサネットワークを想定して 100×100 [cm²] の空間にセンサ端末の数は300個のセンサ端末と1個から8個のアクセスポイントをランダムに配置した。アクセスポイント同士は有線によって理想的に相互に接続されているものとする。センサ端末の送信ビットレートは、IEEE802.15.4 [12] に基づいて250 [kbps] とした。センサ端末の消費電力は MICAz [13] や TelosB [14] で用いられている Texas Instruments 社の CC2420 [15] に基づいて、送信時の消費電力を62.64 [mW]、受信時の消費電力を70.92 [mW]、スリープ中の消費電力を0 [mW] と定めた。センサデータ送信エラーは衝突が発生時と、電力不足によってセンサデータの送信が出来なかった場合に発生する。提案する FD-SWIPT-mAP で用いる、許容する各ユーザ端末の受信電力量不均衡の閾値 α は7とした。閾値

α はいくつかの値でシミュレーションを行ってネットワーク全体のデータ収集率が最も良くなるような結果を示した値を採用した。

電波電力伝送における電波伝搬モデルを電力伝送実験結果と文献 [1,2] を基に作成した。電力伝送実験では、アクセスポイントから放出した電波からレクテナを介してセンサノードが得られる電力を測定した。アクセスポイントには Mango Communications 社の WARPv3 を、アンテナには 2.40 GHz 帯-2.48 GHz 帯に対応した 3dBi の VERT2450 を、レクテナには日本電業工作の 2.4 GHz 帯域レクテナを用いた。アクセスポイントが OFDM 信号を放出した場合、10 [cm] 地点で得られる電力は 75 [μ W] であった。実験結果と文献 [1] で提案されている機器内電波伝搬モデルを用いて、機器内ネットワークにおける伝送電力の電波伝搬モデルを作成した。具体的には、伝送電力量はセンサ端末とアクセスポイント間の距離が 200 [mm] 以下の場合には距離の 5.5 乗に従って反比例的に減少し、センサ端末とアクセスポイント間の距離が 200 [mm] 以上の場合には距離の 0.65 乗に従って反比例的に減少する。

4.2 メディアアクセス制御手法の比較

FD-SWIPT-mAP のメディアアクセス制御手法の性能を評価することを目的として、機器内に設置するアクセスポイント数に対する収集率を評価した。FD-SWIPT-mAP の性能を相対的に評価するために、無線電力伝送を用いた機器内センサネットワークのためのメディアアクセス制御である HD-SWIPT (Half-Duplex SWIPT) と P-CSMA/CA [10] と比較した。HD-SWIPT は、半二重通信を用いて時分割でデータ電力同時伝送を行う集中制御型のデータ電力同時伝送手法である。P-CSMA/CA は電力を固定長のフレームとして、電力伝送を行う前にキャリアセンスを行うことで、電力信号とデータ信号の衝突を回避する分散制御型のメディアアクセス制御手法である。

各手法におけるセンサ端末のセンシング間隔は 1 秒とした。ただし、分散制御型の衝突回避手法である P-CSMA/CA の評価では、1 秒間に平均 1 回センサデータが発生するようなポアソン分布に基づいてセンシング間隔を定めた。

図 8 に評価結果を示す。横軸が機器内アクセスポイント数、縦軸が平均データ収集率である。図 8 より以下の 3 つの事が分かる。

1 つ目に、全ての手法においてアクセスポイント数が増加するほど高いデータ収集率を達成する。複数アクセスポイントを設置することによって機器内全体に偏り無く電力を伝送することが可能になった効果である。偏り無く電力を伝送することが可能になることで、全てのセンサ端末が動作を続ける事ができるようになる。

2 つ目に、提案手法の FD-SWIPT-mAP は半二重通信を用いた手法の HD-SWIPT TDMA よりも高い性能を達

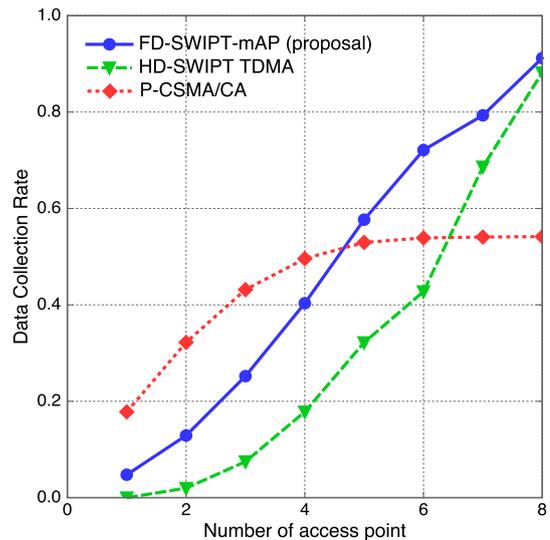


図 8: メディアアクセス手法ごとのデータ収集率

成する。アクセスポイント数が 6 の時、FD-SWIPT-mAP は、HD-SWIPT TDMA と比較して 30% データ収集率を改善している。提案手法が全二重通信を用いる事で、電力を伝送できる時間が増加する効果によるものである。

3 つ目に、アクセスポイント数が 4 台以下の場合、P-CSMA/CA が提案手法である FD-SWIPT-mAP よりも高い性能を達成する。アクセスポイント数が少ない場合、FD-SWIPT-mAP は制御フレームのオーバーヘッドによってデータ収集率が P-CSMA/CA より低くなる。一方、アクセスポイント数が 5 台以上の場合、P-CSMA/CA のデータ収集率は上昇しなくなる。多くのセンサ端末が電力不足を起こさず動作を続ける状況で、P-CSMA/CA の分散制御によるアクセス制御を用いると衝突が発生するためである。

4.3 アクセスポイント割り当て手法の評価

FD-SWIPT-mAP のアクセスポイント割り当て手法である PEBS の性能を評価するために、FD-SWIPT-mAP のアクセスポイント割り当て手法を変更した手法とデータ収集率の性能を比較した。提案するアクセスポイント割り当て手法である PEBS、最近傍割り当て (nearest)、ランダム割り当て (random) を比較した。最近傍割り当ては、センサ端末の送信先アクセスポイントとして、各センサ端末の最近傍アクセスポイントを割り当てる手法である。各センサ端末は双方向データ電力同時通信中に最大の電力を得られるアクセスポイントと通信を行う。ランダム割り当ては、各センサ端末の送信先アクセスポイントを全てのアクセスポイントからランダムに選択して割り当てる手法である。

図 9 に、アクセスポイントの設置数を変化させた時のデータ収集率を示す。横軸がアクセスポイント数、縦軸が平均データ収集率である。図 9 から、提案したアクセスポイント割り当ては最近傍割り当てやランダム割り当てと比較してデータ収集率を最大で 20% 改善していることが分か

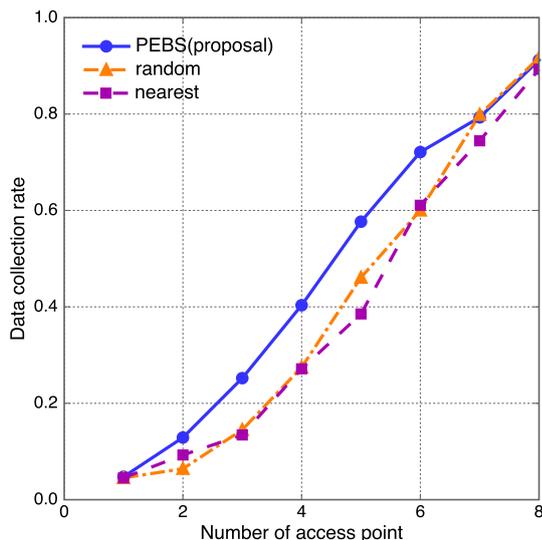


図 9: アクセスポイント割り当て手法ごとのデータ収集率

る。提案手法がセンサ端末の送信先アクセスポイントの割り当てを変更する事で、センサ端末の総受信電力量を最大化する効果の表れである。

5. 関連研究

本稿の関連研究として、無線電力伝送技術、無線全二重通信技術、バッテリーレス無線センサネットワークが挙げられる。

5.1 無線電力伝送技術

無線電力伝送技術は、電磁誘導を用いたもの [16]、電磁界共鳴を用いたもの [17–21]、電波を用いたもの [7–11, 22–29] とに分けられる。電磁誘導を用いたものでは、電動歯ブラシの充電器や Sony 社の Felica [16] など、既に多くの製品で利用されている。電磁誘導を用いた電力伝送は安定的に電力を送ることができるものの、離れた距離に有るデバイスに対しては電力を送ることができないという欠点がある。

電力伝送距離を長距離化するために、電磁界共鳴を利用した電力伝送の研究が進められている [17–21]。コイルやコンデンサが共鳴・結合することを利用して 1[m] 程度離れた距離でも効率的に電力を無線伝送する手法が実現されている [17]。また、電磁界共鳴の数メートル程度離れていても数 kW の電力を送ることができるという特徴を利用して、電気自動車の無線充電に応用する研究もなされている [18–20]。さらに、無線電力伝送をマルチホップすることでさらなる長距離無線伝送を実現する手法が提案されている [21]。

さらなる長距離無線電力伝送を実現する手法として、電波を用いた無線電力伝送が検討されている [7–11, 22–29]。電波を用いた電力伝送としては、受信した電力を利用して受動的に通信を行う RFID (Radio Frequency Identifier) が既に様々な場面で実用されている。文献 [26] では、RFID を拡張した WISP (Wireless Identification and Sensing Plat-

form) が提案されている。WISP では、タグの ID だけではなく、タグに付属するセンサのデータも読み取る事ができる。さらに、既に展開している無線 LAN から送信される電波に相乗りする形で通信することで電力なしで 2.1 m の距離を 1 kbps で通信する WiFi Backscatter の研究も進められている [27, 28]。一方、大型のシステムとして、宇宙に配置した太陽光発電パネルで発電した電気を電波電力伝送を用いて伝送する宇宙発電システムの研究も行われている [22, 23]。

電波を用いた電力伝送に加えて、本稿では無線電力伝送とデータ通信を組み合わせた手法を検討している。電波を用いた電力伝送とデータ通信を組み合わせた手法として、文献 [24, 25] では、ホーンアンテナによる電力伝送と、通常の IEEE 802.11 によるデータ通信を組み合わせた場合に生じる現象を実機を用いて検証している。これらの研究では、本稿とは異なりデータ伝送と電力伝送は時分割あるいは周波数分割でチャンネルを共有することを前提としている。それに対して、電力を同時に送信する SWIPT が提案されている [5–9]。文献 [7–9] では、複数アンテナからの電波を重ね合わせて指向性のある電波を作り出すビームフォーミングを用いることで SWIPT の伝送電力量や伝送距離を増加できることが示されている。これらの SWIPT の研究が同一端末からの半二重伝送を想定していたのに対して、データ伝送と電力伝送の双方向通信を可能にする FD-SWIPT が検討されている [10, 11]。文献 [11] では、無線電力伝送とデータ通信の双方向通信が無線全二重通信の機能を用いることで実現できることが示されている。それに対して、本稿では複数のアクセスポイントを用いて伝送電力量を増加させるとともに、無線電力伝送とデータ通信の双方向通信を実現している。

5.2 無線全二重通信技術

無線全二重通信 [30–32] の研究では、混入した自身の送信電波が非常に大きいことから、AGC (Auto Gain Control) や ADC (Analog to Digital Converter) の性能を超えた干渉除去として、デジタル信号だけでなくアナログ信号に対しても干渉除去を行っている。文献 [32] では、アナログ信号とデジタル信号に対する干渉除去を専用の送受信機に実装することで、最大 110 dB もの高い干渉除去性能を達成している。データ通信を対象とした無線全二重通信は 2 つの端末が送信するタイミングを揃える必要があるため、メディアアクセス制御も無線全二重通信に対応した方式を用いる必要がある [31]。

干渉除去技術という観点では、干渉除去技術の同時通信の特性を用いて通信品質を改善するための研究がなされている。衝突した 2 つのデータ信号を受信側で分離する研究 [33–36] では、2 つのデータ信号の電力差を利用して干渉除去を行う。衝突した信号をそのまま復号することに

よって弱いデータ信号をノイズとして強いデータ信号を復号したのち、受信側で再度複製した強いデータ信号を衝突した信号から減算することで干渉除去を実現して弱い信号を復号する。この一連の信号除去は、AGCやADC後のデジタル信号に対して行っている。

これらの既存の研究はデータ伝送のみを対象として干渉除去技術を用いている。それに対して、本稿では干渉除去技術を用いてデータと電力の同時伝送を目指している。さらに、機器内のセンサネットワークの用途を対象としているので想定しているトラフィックパターンも異なるため、結果としてメディアアクセス制御方式の設計も異なっている。

5.3 バッテリレス無線センサネットワーク

無線センサネットワーク電源の制約を根本的に解決するために、バッテリレス無線ネットワークの実現へ向けた研究が行われている [10,29,37-42]。バッテリレス無線センサネットワークにはセンサ端末自体が周囲の環境からエネルギーを得る環境発電方式 [38-41] と、外部の機器からセンサ端末に電力を無線伝送する無線電力伝送方式 [10,29,42] の2つに分けられる。

環境発電方式のバッテリレス無線センサネットワークでは、センサ端末はソーラーパネル、レクテナ、熱差発電機などを具備して電力を自給する。文献 [38] では、発電用のソーラーパネルと蓄電用のキャパシタから構成されるセンサ端末である Solar Biscuit が提案されている。また、文献 [39,40] では、環境中の電波からエネルギーを取得するエナジーハーベスト技術を実現している。実際に東京タワーから放出される電波でLEDを点灯させることや [39]、電子レンジの漏れ電波を利用して温度計を動作させることに成功している [40]。

本稿では無線電力伝送方式のバッテリレス無線センサネットワークを対象としている。文献 [29] では、外部機器から伝送した電力信号によりバッテリなしで ZigBee 端末の駆動が可能であることが示されている。具体的には、2.4GHz帯の電力信号を用いて、2.46GHz帯で ZigBee 通信を行う。さらに文献 [42] では、基地局から無線電力伝送を行うことで1km先のモバイル端末を駆動する手法が検討されている。一方、本稿は機器内バッテリレスセンサネットワークを対象として、同一周波数帯で電力信号とデータ通信を同時に行う。

6. おわりに

本稿では、機器内センサネットワークのためのワイヤレスハーネスを実現するために、複数のアクセスポイントを用いた無線データ電力同時伝送手法であるFD-SWIPT-mAPを提案した。FD-SWIPT-mAPは集中制御によるメディアアクセス制御とアクセスポイント割り当てを行う事で、機器内センサネットワークにおいて高いデータ収集率を実現

した。評価の結果、FD-SWIPT-mAPは機器内センサネットワークのデータ収集率を向上させるとともに、センサ端末間のデータ収集率の不均衡を抑制することが分かった。現在、本稿で提案したFD-SWIPT-mAPの実機を用いた性能評価を進めている。

7. 謝辞

本研究はJSPS科研費JP16H01718の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] Ohira, M., Umaba, T., Kitazawa, S., Ban, H. and Ueba, M.: Experimental characterization of microwave radio propagation in ICT equipment for wireless harness communications, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 59, No. 12, pp. 4757-4765 (2011).
- [2] 伴弘司, 北沢祥一, 小林聖: 省資源・省エネに有用なワイヤレスハーネス技術, 電子情報通信学会通信ソサイエティマガジン, Vol. 7, No. 1, pp. 25-32 (2013).
- [3] Ahmed, M., Saraydar, C. U., ElBatt, T., Yin, J., Talty, T. and Ames, M.: Intra-Vehicular Wireless Networks, *Proceedings of IEEE Globecom Workshops (IEEE Globecom Wkshp '07)*, IEEE, pp. 1-9 (2007).
- [4] Leen, G. and Heffernan, D.: Expanding Automotive Electronic Systems, *Computer*, Vol. 35, No. 1, pp. 88-93 (2002).
- [5] Varshney, L. R.: Transporting information and energy simultaneously, *Proceedings of IEEE International Symposium on Information Theory (IEEE ISIT'08)*, IEEE, pp. 1612-1616 (2008).
- [6] Grover, P. and Sahai, A.: Shannon meets Tesla: Wireless Information and Power Transfer, *Proceedings of IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT'10)*, IEEE, pp. 2363-2367 (2010).
- [7] Khandaker, M. R. and Wong, K.-K.: SWIPT in MISO multicasting systems, *IEEE Wireless Communications Letters*, Vol. 3, No. 3, pp. 277-280 (2014).
- [8] Fang, Z., Yuan, X. and Wang, X.: Distributed energy beamforming for simultaneous wireless information and power transfer in the two-way relay channel, *IEEE Signal Processing Letters*, Vol. 22, No. 6, pp. 656-660 (2015).
- [9] Shi, Q., Peng, C., Xu, W., Hong, M. and Cai, Y.: Energy Efficiency Optimization for MISO SWIPT Systems with Zero-forcing Beamforming, *IEEE Transactions on Signal Processing*, Vol. 64, No. 4, pp. 842-854 (2016).
- [10] 猿渡俊介, 小寺志保, 成末義哲, 川原主博, 渡辺尚: 無線全二重通信によるデータと電力同時伝送のためのメディアアクセス制御方式, 情報処理学会研究報告, Vol. 2015-CDS-14, No. 7, pp. 1-8 (2015).
- [11] Yamazaki, K., Sugiyama, Y., Kawahara, Y., Saruwatari, S. and Watanabe, T.: Preliminary Evaluation of Simultaneous Data and Power Transmission in the Same Frequency Channel, *Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference (IEEE WCNC'14)*, pp. 1237-1242 (2015).
- [12] IEEE: IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks (2015). <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.15.4-2015.pdf> Access on 3 February 2017.

- [13] MEMSIC: MICAz (2011). http://www.memsic.com/userfiles/files/Datasheets/WSN/micaz_datasheet-t.pdf
Access on 24 April 2017.
- [14] MEMSIC: TELOSB (2011). http://www.memsic.com/userfiles/files/Datasheets/WSN/micaz_datasheet-t.pdf
Access on 24 April 2017.
- [15] Texas Instruments: 2.4GHz IEEE 802.15.4/ZigBee-ready RF Transceiver (2013). <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc2420.pdf>
Access on 3 February 2017.
- [16] : Sony Global: FeliCa Web Site (2010). <http://www.sony.net/felica/>
Access on 28 February 2017.
- [17] Kurs, A., Karalis, A., Moffatt, R., Joannopoulos, J. D., Fisher, P. and Soljačić, M.: Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances, *Science*, Vol. 317, No. 5834, pp. 83–86 (2007).
- [18] Wang, C.-S., Stielau, O. H. and Covic, G. A.: Design Considerations for a Contactless Electric Vehicle Battery Charger, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 52, No. 5, pp. 1308–1314 (2005).
- [19] Imura, T., Okabe, H. and Hori, Y.: Basic experimental study on helical antennas of wireless power transfer for electric vehicles by using magnetic resonant couplings, *Proceedings of Vehicle Power and Propulsion Conference, 2009. (VPPC'09)*, IEEE, pp. 936–940 (2009).
- [20] Li, S. and Mi, C. C.: Wireless power transfer for electric vehicle applications, *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, Vol. 3, No. 1, pp. 4–17 (2015).
- [21] Narusue, Y., Kawahara, Y. and Asami, T.: Impedance matching method for any-hop straight wireless power transmission using magnetic resonance, *Proceedings of Radio and Wireless Symposium (RWS'13)*, IEEE, pp. 193–195 (2013).
- [22] McSpadden, J. O. and Mankins, J. C.: Space solar power programs and microwave wireless power transmission technology, *IEEE microwave magazine*, Vol. 3, No. 4, pp. 46–57 (2002).
- [23] Sasaki, S., Tanaka, K. and Maki, K.-i.: Microwave power transmission technologies for solar power satellites, *Proceedings of the IEEE*, IEEE, pp. 1438–1447 (2013).
- [24] Yamashita, S., Imoto, N., Ichihara, T., Yamamoto, K., Nishio, T., Morikura, M. and Shinohara, N.: Implementation and feasibility study of co-channel operation system of microwave power transmissions to IEEE 802.11-based batteryless sensor, *IEICE Transactions on Communications*, Vol. 97, No. 9, pp. 1843–1852 (2014).
- [25] Imoto, N., Yamashita, S., Ichihara, T., Yamamoto, K., Nishio, T., Morikura, M. and Shinohara, N.: Experimental investigation of co-channel and adjacent channel operations of microwave power and IEEE 802.11 g data transmissions, *IEICE Transactions on Communications*, Vol. 97, No. 9, pp. 1835–1842 (2014).
- [26] Smith, J. R., Sample, A. P., Powledge, P. S., Roy, S. and Mamishev, A.: A wirelessly-powered platform for sensing and computation, *Proceedings of International Conference on Ubiquitous Computing (IUCC'16)*, Springer, pp. 495–506 (2006).
- [27] Bharadia, D., Joshi, K. R., Kotaru, M. and Katti, S.: Backfi: High throughput wifi backscatter, *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, Vol. 45, No. 4, pp. 283–296 (2015).
- [28] Kellogg, B., Parks, A., Gollakota, S., Smith, J. R. and Wetherall, D.: Wi-Fi Backscatter: Internet Connectivity for RF-powered Devices, *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, Vol. 44, No. 4, pp. 607–618 (2015).
- [29] Shinohara, N. and Ichihara, T.: Coexistence of wireless power transfer via microwaves and wireless communication for battery-less ZigBee sensors, *Proceedings of International Symposium on Electromagnetic Compatibility (IEEE EMC'14)*, pp. 445–448 (2014).
- [30] Choi, J. I., Jain, M., Srinivasan, K., Levis, P. and Katti, S.: Achieving single channel, full duplex wireless communication, *Proceedings of the sixteenth annual international conference on Mobile computing and networking (MobiCom'10)*, ACM, pp. 1–12 (2010).
- [31] Jain, M., Choi, J. I., Kim, T., Bharadia, D., Seth, S., Srinivasan, K., Levis, P., Katti, S. and Sinha, P.: Practical, real-time, full duplex wireless, *Proceedings of the 17th annual international conference on Mobile computing and networking (ACM MobiCom'11)*, pp. 301–312 (2011).
- [32] Bharadia, D., McMilin, E. and Katti, S.: Full duplex radios, *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, Vol. 43, No. 4, pp. 375–386 (2013).
- [33] Tse, D. and Viswanath, P.: *Fundamentals of wireless communication*, Cambridge university press (2005).
- [34] Halperin, D., Anderson, T. and Wetherall, D.: Taking the Sting Out of Carrier Sense: Interference Cancellation for Wireless LANs, *Proceedings of the 14th ACM international conference on Mobile computing and networking (ACM MobiCom'08)*, ACM, pp. 339–350 (2008).
- [35] Gollakota, S. and Katabi, D.: *Zigzag decoding: combating hidden terminals in wireless networks*, Vol. 38, No. 4, ACM (2008).
- [36] Gudipati, A., Pereira, S. and Katti, S.: AutoMAC: Rateless wireless concurrent medium access, *Proceedings of the 18th annual international conference on Mobile computing and networking*, ACM, pp. 5–16 (2012).
- [37] 猿渡俊介, 森川博之: ユビキタスセンサネットワーク, 日本ロボット学会誌, Vol. 28, No. 3, pp. 284–287 (2010).
- [38] Minami, M., Morito, T., Morikawa, H. and Aoyama, T.: Solar biscuit: A battery-less wireless sensor network system for environmental monitoring applications, *Proceedings of the 2nd International Workshop on Networked Sensing Systems* (2005).
- [39] Nishimoto, H., Kawahara, Y. and Asami, T.: Prototype implementation of ambient RF energy harvesting wireless sensor networks, *Proceedings of Sensors 2010*, IEEE, pp. 1282–1287 (2010).
- [40] Kawahara, Y., Bian, X., Shigeta, R., Vyas, R., Tentzeris, M. M. and Asami, T.: Power harvesting from microwave oven electromagnetic leakage, *Proceedings of the 2013 ACM international joint conference on Pervasive and ubiquitous computing (ACM Ubicomp'17)*, pp. 373–382 (2013).
- [41] Piñuela, M., Mitcheson, P. D. and Lucyszyn, S.: Ambient RF energy harvesting in urban and semi-urban environments, Vol. 61, No. 7, pp. 2715–2726 (2013).
- [42] Xie, L., Shi, Y., Hou, Y. T. and Sherali, H. D.: Making Sensor Networks Immortal: An Energy-renewal Approach with Wireless Power Transfer, *IEEE/ACM Transactions on networking*, Vol. 20, No. 6, pp. 1748–1761 (2012).