

# バッテリーレスセンサネットワークのための電波電力伝送手法

濱政 光<sup>1</sup> 川崎 慈英<sup>1</sup> 木崎 一廣<sup>1</sup> 猿渡 俊介<sup>1</sup> 渡辺 尚<sup>1</sup>

概要: 近年 IoT (Internet of Things) デバイスが普及して, 身の回りのあらゆるモノがインターネットに接続されるようになった. IoT デバイスがネットワークに接続するために重要な役割を果たしているのが, ワイヤレスセンサネットワーク技術である. ワイヤレスセンサネットワーク技術によって, 配線のコストの問題やデバイスの設置個所の柔軟性の問題が解決できる. しかしながら, ワイヤレスセンサネットワークにおける重要な課題に電力供給問題が存在する. 電力供給問題を解決できる手段の1つに電波電力伝送が考えられている. 電波電力伝送によるセンサへの電力供給は, 環境発電や電磁界共鳴電力伝送と比べてセンサネットワークに適した電力供給手法である. 電波電力伝送は, 電力伝送範囲の問題, 定常波問題, 供給電力の偏りの問題を抱えている. 本研究では, IoT デバイスのバッテリー問題を解決する手法として電波電力伝送である位相制御協調 (CPC: Cooperative Phase Controlled) 電力伝送を提案する. CPC 電力伝送は, 各アクセスポイントの送信電波の位相を制御して各センサノード上で強めあう定常波を意図的に作り出すことで供給電力の偏りの問題を解決する. 提案手法の有効性について実機を用いて評価したところ, 既存手法である CSD 電力伝送と比較して伝送電力の大きさは 151.2 %改善, 供給電力の偏りは 79 %改善した.

## 1. はじめに

ワイヤレスセンサネットワーク技術はあらゆるモノがネットワークに接続するために重要な役割を果たしているため IoT (Internet of Things) には欠かせない技術である. 私たちの身の回りのあらゆるモノにセンサが具備され, 複数のセンサノードで構成されたワイヤレスセンサネットワーク技術によって多数のデータが収集されている. 総務省が発表した平成 30 年度版の情報通信白書によると, 世界の IoT デバイスの数は年々増加しており 2020 年には 400 億台を越えることが見込まれている [1].

今後さらなる普及が予測される IoT デバイスが現在抱えている課題のひとつにバッテリーの問題がある. ワイヤレスセンサネットワークを想定すると, 多数のセンサに対してどのように給電するかが問題となる. 既存の IoT デバイスでは電池を用いることが主流であるが, 1 次電池を用いた場合, 定期的に電池交換が必要でありメンテナンスコストが大きい. 2 次電池を用いた場合, 2 次電池への電力供給手段が必要である. 太陽光発電のような環境発電も, 悪天候のときや夜間に発電できず電力の安定供給が見込めないという課題がある.

本研究ではワイヤレスセンサネットワークに適した電力供給手段として無線電力伝送に着目する. 代表的な無線電

力伝送の例として電磁誘導を利用したもの, 電磁界共鳴を利用したものがある. 電磁誘導を用いたものは数 mm~1 cm 程度の近距離では有用で, Sony 社の Felica [2] など, すでに多くの製品で利用されている. しかしながら電磁誘導を利用して電力を得るには 1 次コイルと 2 次コイル間の距離が小さい必要があるため, ワイヤレスセンサネットワークには適用できない. 電磁界共鳴を用いたものは 2007 年に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している [3]. 電磁界共鳴を利用すると長距離かつ大容量の電力伝送は可能だが, 複数のセンサを設置した場合, 共振コイルが結合してしまいキャリブレーションが困難であるためワイヤレスセンサネットワークには向いていない.

ワイヤレスセンサネットワークと長距離電力伝送に適した無線電力伝送として, 電波による電力伝送手法に着目する. 電波電力伝送の利点として数 m 程度までの長距離に電力伝送可能である点と, 電波を用いることでデータ通信も可能な点が挙げられる. 一方で欠点として単一アクセスポイントにおける電力伝送範囲の問題, 複数アクセスポイントにおける定常波問題, 単一・複数アクセスポイントにおけるセンサへの供給電力の偏りの問題が存在する.

これらの問題を解決するために, 本稿では位相制御協調 (CPC: Cooperative Phase Controlled) 電力伝送を提案す

<sup>1</sup> 大阪大学大学院情報科学研究科

る。CPC 電力伝送は、アクセスポイントの位相を変化させることでセンサが得られる電力を制御できる。複数のアクセスポイントの位相を複数のセンサノードが均等に電力を得られるように制御する。それぞれのアクセスポイントは、センサノードの RSSI フィードバックからそのセンサノードが最大の電力を得られるような位相制御量の組み合わせをセンサノードごとに決定する。給電対象のすべてのセンサノードについて位相組み合わせを決定したあと、アクセスポイントは時分割で位相組み合わせを切り替えながらセンサノードへの給電を行うことですべてのセンサノードに公平な電力供給を実現する。実機による評価によって、提案手法である CPC 電力伝送手法は既存手法よりも電力伝送範囲の問題、供給電力の偏りの問題を改善して定常波問題を解決することを示す。

本稿の構成は以下の通りである。2 節において電波電力伝送の課題と既存手法について述べる。3 節では課題を解決するために CPC 電力伝送を提案と仕組みについて説明する。4 節では実機を用いて実装して、5 節で供給電力の大きさと偏りの観点で提案手法と既存手法の評価をする。6 節で本研究の関連研究を述べ、最後に 7 節でまとめとする。

## 2. 電波電力伝送の課題

ネットワーク内のアクセスポイントがセンサノードに対して電波電力伝送を行ったときの課題として電力伝送範囲の問題、定常波問題、供給電力の偏りの問題の 3 つが挙げられる。アクセスポイントが 1 台のとき、電波の距離減衰の影響によって電力伝送範囲の問題が発生する。フリスの伝達公式から、電波は距離の 2 乗に反比例して電力を減衰するため、1 台のアクセスポイントでは電力伝送可能な範囲が限られる。複数のアクセスポイントを用いることで、1 台のアクセスポイントよりも広範囲に電力供給できるが定常波問題が発生する。図 1 に複数アクセスポイントを用いた電波電力伝送を示す。図 1 では 2 台のアクセスポイントからの電波の重ね合わせによって定常波が発生している。強めあう定常波の上にあるセンサノード A は十分な電力を得られるが、弱めあう定常波の上にあるセンサノード B はほとんど電力を得られない。また、センサネットワークにおいては各端末の消費電力に対する供給電力の比は一定であることが望ましく、電力伝送効率の面でもセンサ間の供給電力の偏りは問題となる。

定常波問題を解決するために、文献 [4] では CSD (Carrier Shift Diversity) 電力伝送が提案されている。CSD 電力伝送は、複数のアクセスポイントの位相をそれぞれ異なる一定速度で変化させ続けることで、空間全体に満遍なく電力伝送を行う手法である。図 2 に CSD 電力伝送を示す。CSD 電力伝送では、各センサ上で弱めあう干渉と強めあう干渉が交互に発生するため、すべてのセンサノードに対して電力を送ることができる。しかしながら、CSD 電力伝

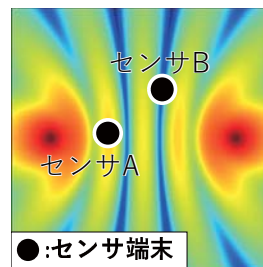


図 1: 複数アクセスポイントの電力伝送

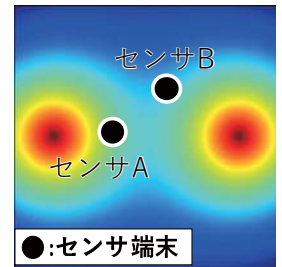


図 2: CSD 電力伝送

送においてもセンサノードの位置による供給電力の偏りの問題が解決できない。図 2 において、アクセスポイントに近いセンサ A と比べてアクセスポイントから遠いセンサ B の得られる電力は少ない。

## 3. 提案手法: CPC 電力伝送

複数アクセスポイントを用いた無線電力伝送で発生する定常波問題と供給電力の偏りの問題を解決するために、本稿では CPC 電力伝送を提案する。CPC 電力伝送は、各アクセスポイントの送信電波の位相を制御して各センサノード上で強めあう定常波を意図的に作り出すことで供給電力の偏りの問題を解決する。具体的には、まず、各センサノードに対して集中的に電力伝送できるようなアクセスポイントの位相制御量の組み合わせをセンサノードの数だけ決定する。次に、決定した位相制御量の組み合わせを時分割でスイッチングすることによって、センサノード間の供給電力量の偏りを抑制する。本稿では各アクセスポイントの位相制御量の組み合わせを位相セット  $\Theta$  と呼ぶ。

図 3 に CPC 電力伝送のシステムモデルを示す。空間内には複数のアクセスポイントと複数のセンサノードが存在している。アクセスポイントとセンサノードの位置は固定である。アクセスポイントはお互いバックホールで同一の位相制御器と電源、ネットワークコントローラに接続されており、共通の局部発振器を用いて同じ周波数の電波を放出する。各アクセスポイントは位相制御器を用いて放出電波の位相を制御する。センサノードはアクセスポイントの電波の重ね合わせによって得られた RSSI (Received Signal Strength Indication) の値をアクセスポイントに送信する。ネットワークコントローラは、センサノードからの RSSI フィードバック情報を用いて位相セットと電力伝送時間を決定して各アクセスポイントを制御する。

すべてのセンサノードの電力需要を満たす最適な電力伝送の位相セットと電力伝送時間は以下の組み合わせ最適化問題を解くことで得られる。ただし、 $n$  はセンサノード数、 $m$  はアクセスポイント数、 $k$  は位相セット数、 $S$  はセンサノードの集合、 $\Theta_i$  は  $i$  番目の位相セットで  $\Theta_i = \{\theta_{i1}, \theta_{i2}, \dots, \theta_{im}\}$ 、 $T_i$  は位相セット  $\Theta_i$  で電力伝送を行う時間、 $W_{ij} = \text{energy}(\Theta_i, j)$  は位相セット  $\Theta_i$  におい

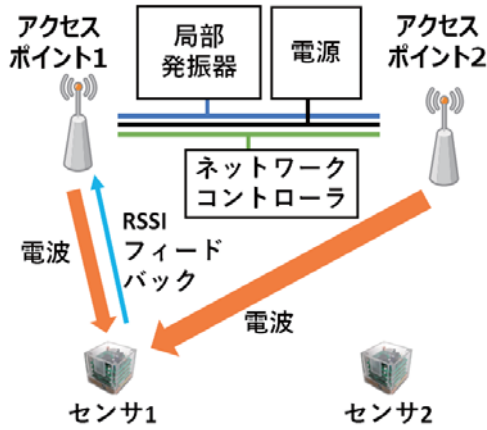


図 3: CPC 電力伝送のシステムモデル

てセンサノード  $j$  が得られる時間当たりの供給電力量,  $C_j$  はセンサノード  $j$  の単位時間当たりの需要電力量,  $E_j$  はセンサノード  $j$  がすべての位相セットを適用後に最終的に得た供給電力量である.

$$\text{minimize } \sum_{i=1}^k T_i \quad (1)$$

$$\text{subject to } E_j = \sum_{i=1}^k W_{ij} T_i, \quad \forall j \in \mathcal{S} \quad (2)$$

$$W_{ij} = \text{energy}(\Theta_i, j) \quad \forall j \in \mathcal{S} \quad (3)$$

$$E_j > C_j \sum_{i=1}^k T_i \quad \forall j \in \mathcal{S} \quad (4)$$

式 1 は式 2, 式 3, 式 4 を満たして, 電力伝送時間が最小となるものを最も効率の良い電力伝送とすることを表している. 式 2 は  $n$  台のセンサノードが位相セット  $i$  で供給される電力量の合計を表していて, センサノード  $j$  について供給される電力と伝送時間の積の総和で決定される. 式 3 は各位相セットにおける時間当たりの供給電力を表している. 式 4 は各センサノードの供給電力量が消費電力量よりも大きくなければならないことを表している.  $k$  は任意の自然数で上限がないため, 上記の組み合わせ最適化問題を総当たりで解くのは困難である. また,  $k$  に一定の上限を与えたとしても, すべての組み合わせを全探索した場合, 計算量は  $O(knp^m)$  となる.

そこで CPC 電力伝送では, センサノードごとに集中電力伝送を行う位相セットを決定した後で, RSSI に基づいて電力伝送時間を決めることで計算量を削減する. センサノード  $i$  における位相セットは次の方法によって計算量を減らして決定する.

1. アクセスポイント  $1 \dots i$  は決定された位相セットで電力伝送する
2. アクセスポイント  $i+1$  は位相制御量を変化させつつセンサノードで測定した RSSI を用いて最適位相セットを全探索で決定する

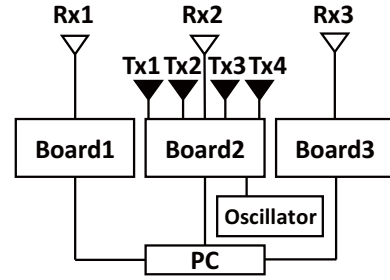


図 4: 実験機材の構成

3.  $i$  の値を 1 から  $m$  まで 1 ずつ増やしながらか 1, 2 を繰り返し実行する

各センサノードについてそれぞれ位相セットを求めて,  $n$  個の位相セットを決定する. 位相制御器の制御階調を  $p$  とすると,  $n$  台のセンサノードに対して  $m$  台のアクセスポイントでこのような仕組みによって位相セットを求める計算量は  $O(npm)$  となる.

各位相セットの電力伝送時間  $T_i$  は計算時間を削減するために位相セット  $\Theta_i$  のセンサノード  $i$  における供給電力  $S_i$  のみを考慮して決定する. 具体的には以下の式で  $T_i$  を求める.

$$T_i = \frac{\sum_{j=1}^n S_{ij}}{S_i}, \quad \forall i \in \mathcal{S} \quad (5)$$

各位相セットの電力伝送時間をセンサノードが得られる電力の逆数比にすることで, すべてのセンサノードに対して均衡に電力伝送を行うことができる.

## 4. 実装

提案手法の性能を評価するため, 実機実装を行ってセンサノードの供給電力を測定した. 図 4 に実験機材の構成を示す. 評価では, アクセスポイントとして 4 本の送信アンテナ, センサノードとして 3 本の受信アンテナを用いた. 受信アンテナはそれぞれ 3 つの自作のボードに接続されており RSSI を測定した. ボード 2 は 4 本の送信アンテナと 4 つの位相制御器を具備している. 各送信アンテナの位相は独立に制御可能である. 4 本の送信アンテナは 2.4 GHz の自作の局部発振器を共有している. 送信アンテナと受信アンテナとしてどちらも Inventek Systems 社製のモノポールアンテナ (W24-SSMA-M) を用いた. モノポールアンテナのアンテナ利得は 2.15 dBi である. 本稿では送信アンテナ  $i$  を  $Tx_i$ , 受信アンテナ  $i$  を  $Rx_i$  と記す.

ネットワークコントローラとして 1 台のノート PC を用いる. 3 つのボードは PC に接続されており, 受信アンテナで測定した RSSI はボードを通して PC に送信される. PC は送信アンテナに対して位相制御量を指定することが

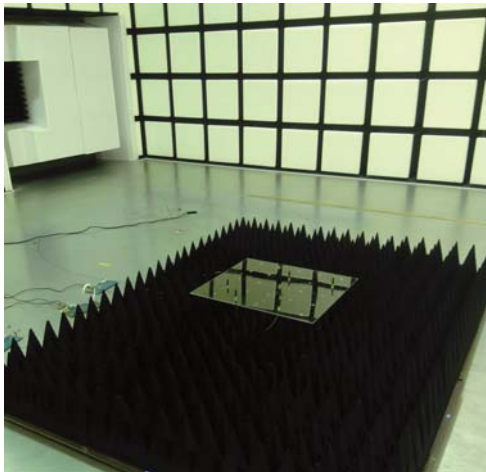


図 5: 実験環境

できる。PC-ボード間は USB ケーブル，ボード-送信アンテナ間とボード-受信アンテナ間とは同軸ケーブルで接続されている。図 5 に実験の様子を示す。外来電波を遮断するシールドテント内で RSSI を測定した。シールドテント内の側壁と床には電波吸収体を設置している。

#### 4.1 提案手法「CPC 電力伝送」の実装

CPC 電力伝送として各受信アンテナに対して位相セットを決めて時分割で電力伝送を行うシステムを実装した。実装したシステムは位相セット・伝送時間決定フェーズと電力伝送フェーズの 2 つのフェーズから成り立つ。位相セット・伝送時間決定フェーズでは各送信アンテナの位相を逐次的に変化させつつ，受信アンテナからの RSSI フィードバックを用いて位相セットと伝送時間を決定する。決定方法は 3 節で述べた通りである。

電力伝送フェーズでは，位相セット・伝送時間決定フェーズで決定した位相セットと伝送時間を用いて電力伝送を行いながら受信アンテナごとの供給電力を計算する。供給電力の計算は以下の手順で行われる。

1. 各受信アンテナの合計供給電力量を 0 に設定する
2. 送信アンテナは位相セット  $\theta_i$  で  $T_i$  の間，電力伝送を行う
3. 送信アンテナが電力伝送を行っている間，受信アンテナは RSSI を 0.5 秒ごとに取得する。取得した RSSI を電力に換算して，合計供給電力量に足し合わせる
4. 送信アンテナは  $\theta_i$  で電力伝送を終えた後， $\theta_{i+1}$  の位相セットに切り替えて再び 2. から 4. を実行する
5. すべての位相セットで電力伝送が終了したならば，各受信アンテナの合計供給電力量を合計伝送時間で割って平均供給電力を算出する

本実験において， $T_i$  は位相セット  $\theta_i$  のときの供給電力を足し合わせる回数とした。実際に伝送している時間は  $\sum T_i \times 0.5$  秒である。

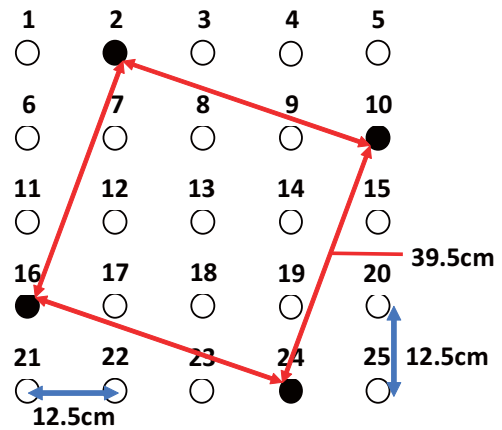


図 6: アンテナ配置図

#### 4.2 比較手法「CSD 電力伝送」の実装

CSD 電力伝送として送信アンテナの位相制御量を逐次的に変化させつつ電力伝送を行うシステムを実装した。各送信アンテナは自然数  $l$  ステップ ( $0 \leq l \leq 255$ ) で逐次的に位相を変化させて電波を放出する。例えば Tx1 の位相ステップ  $l$  を 32 としたとき，Tx1 から放出される無変調波の位相制御量は  $0, 32, \dots, 224$  と逐次的に変化する。このとき，位相制御の階調値  $p$  は  $\lfloor \frac{256}{7} \rfloor$  である。今回の実験では測定時間の都合上，すべての送信アンテナについて  $l = 16$  として  $(\frac{256}{16})^4$  通りの RSSI を測定した。CSD 電力伝送における供給電力は受信アンテナごとの RSSI から電力を計算した結果の平均とした。

### 5. 評価

4 節で実装したシステムを用いて提案手法の評価を行った。図 6 に送受信アンテナの配置図を示す。5×5 のグリッド上に 4 本の送信アンテナと 3 本の受信アンテナを配置した。隣接するグリッド間の距離は 12.5 cm である。隣接する送信アンテナ間の距離は約 39.5 cm である。各受信アンテナは，次の 3 点に留意して配置した。1 点目は，Rx1 はどの配置においても送信アンテナから等距離となる中心のグリッドに配置することである。配置パターンが異なっても Rx1 の位置は変えないことで他のアンテナに対して比較対象とした。2 点目は，Rx2 は送信アンテナが囲う正方形内に配置することである。Rx2 は送信アンテナに隣接して，かつ他の送信アンテナからの干渉を受けやすいような位置に配置した。3 点目は，Rx3 は送信アンテナが囲う正方形外に配置することである。Rx3 は送信アンテナに隣接して，かつ他の送信アンテナからの干渉を受けにくいような位置に配置した。以上から各配置における具体的な受信アンテナの位置について述べる。アクセスポイント，センサノードの配置パターンとして配置 A と配置 B の 2 種類の配置パターンで実験を行った。図 7，図 8 にそれぞれ配置 A，配置 B の配置パターンを示す。配置 A では Rx2 は

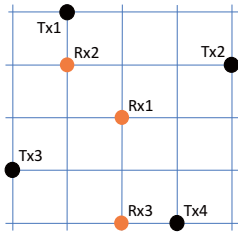


図 7: 配置 A

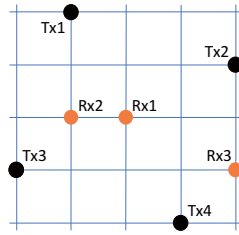


図 8: 配置 B

表 1: 配置 A の供給電力と伝送時間比

	Rx1	Rx2	Rx3	$T_i$
$\Theta_1$	66.67	29.92	22.09	4
$\Theta_2$	6.780	151.2	1.274	1
$\Theta_3$	8.490	14.28	59.30	4
CPC	32.87	34.73	29.67	-
CSD	13.08	35.78	15.91	-

表 2: 配置 B の供給電力と伝送時間比

	Rx1	Rx2	Rx3	$T_i$
$\Theta_1$	83.36	0.100	3.782	2
$\Theta_2$	5.114	118.4	11.48	1
$\Theta_3$	10.59	40.79	30.22	7
CPC	24.02	35.81	19.82	-
CSD	17.52	28.74	8.741	-

Tx1 から 1 グリッド, Rx1 から斜め 1 グリッド離れたグリッドに配置する. Rx3 は Tx4 から 1 グリッド, Rx1 から 2 グリッド離れたグリッドに配置する. 配置 B では Rx2 は Tx1 から 2 グリッド, Rx1 から 1 グリッド離れたグリッドに配置する. Rx3 は Tx2 から 2 グリッド, Tx4 から斜め 1 グリッド離れたグリッドに配置する. 各送信アンテナは 1 mW の無変調波を 4 つの各送信アンテナに分流する. ボード上の位相制御器およびアンテナスイッチの電力ロス約 10 dB のため, 各送信アンテナは約 25  $\mu$ W の無変調波を放出する. 提案手法では各配置パターンで 5 回ずつデータを取得して平均を評価した. CSD 電力伝送では, 実験時間の関係上 1 回ずつ測定して評価した.

表 1 と表 2 に各配置パターンでの実験結果を示す. 表内の数値は受信アンテナごとの供給電力で, 単位は nW である. 表の列は各受信アンテナ Rx1, Rx2, Rx3 および位相セット  $\Theta_i$  の電力伝送時間  $T_i$  を意味する. 表の行は提案手法における各位相セット  $\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3$  および, 提案手法の平均供給電力 (CPC), CSD 電力伝送の平均供給電力 (CSD) を意味する.

表 1 と表 2 より, 以下の 3 つのことがわかる. 1 つ目は, 提案手法は CSD 電力伝送で十分に電力を得られない受信アンテナに対して電力を供給できていることである. 表 1 において, CSD 電力伝送で最も低かった Rx1 の供給電力は 13.08 nW であったが, 提案手法で 32.87 nW であり

151.2 %増加している. 表 2 において, CSD 電力伝送で最も低かった Rx3 の供給電力は 8.741 nW であったが, 提案手法で 19.82 nW であり 126.7 %増加している. これは得られる電力が少ない受信アンテナに多くの電力伝送時間を割り当てたことによる効果だと考えられる.

2 つ目は, アンテナの配置に関わらず CSD 電力伝送よりも提案手法の方が受信アンテナ間の供給電力の偏りが小さいことである. 表 1 では, 提案手法を用いたときの各受信アンテナの供給電力の分散は 17.5 であるのに対して, CSD 電力伝送では 3.62 で 79 %改善している. 表 2 では, 提案手法を用いたときの各受信アンテナの供給電力の分散は 14.2 であるのに対して, CSD 電力伝送では 11.7 で 18 %改善している. これは位相セットの伝送時間を各受信アンテナの最大供給電力の逆数比で求めた効果であると考えられる.

3 つ目は, 受信アンテナの配置パターンによって提案手法の性能が変化するということである. 表 1 において, 提案手法の供給電力は CSD 電力伝送に比べて Rx1 で 151.2 %増加, Rx2 は 2.95 %減少, Rx3 で 86.4 %増加している. 表 2 において, 提案手法の供給電力は CSD 電力伝送に比べて Rx1 で 37.1 %増加, Rx2 は 24.6 %増加, Rx3 で 126.7 %増加している. 表 1 において, Rx2 で供給電力が減少した要因としては,  $\Theta_3$  において CSD 電力伝送よりも 40 %低い電力が全体の 44 %の時間で伝送されていたからだと考えられる. 表 2 において, すべての受信アンテナで供給電力が増加した要因としては, Rx1, Rx2 が自身への集中電力伝送以外で十分な電力を得られたことと, Rx3 が十分な大きさの電力が長時間伝送されていたからだと考えられる.

## 6. 関連研究

6 節では本研究についての関連研究について述べる. 最初に提案手法以外の無線電力伝送を紹介して, 次にバッテリーレスセンサネットワーク, 最後に無線電力伝送とバッテリーレスセンサネットワークの関連研究を紹介する.

### 6.1 無線電力伝送方式の概要

図 9 に無線電力伝送手法の種類を示す [5]. 無線電力伝送手法方式は主に非放射型と放射型に大別される. 非放射型は磁界結合式, 電界結合式, エバネセント波式の 3 種類に, 放射型は電波式やレーザ式の 2 種類にそれぞれ分けられる. 非放射型は近傍界で使われ, 放射型は遠方界で使われるという違いがある. それぞれの伝送方式によって伝送電力や伝送可能距離が異なり, 電力伝送対象によって向き不向きが異なる. 本節では, 無線電力伝送手法として広く使われている磁界結合式と電波式について, センサネットワークに適した電力伝送手法を考える.

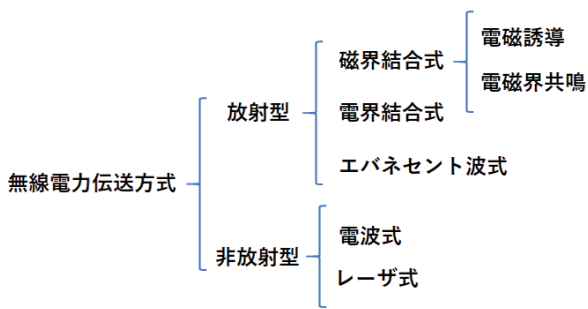


図 9: 無線電力伝送手法の種類

## 6.2 無線電力伝送：磁界結合式

磁界結合方式の無線電力伝送手法は、電磁誘導を用いたものと電磁界共鳴を用いたものの2種類に分けられる。電磁誘導の法則は1831年にファラデーによって発見され、以下の式で表される。

$$V = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

式中の  $V$  は誘導起電力、 $N$  は2次コイルの巻き数、 $\Phi$  は磁束を示す。電磁誘導を用いた電力伝送は、送電側の1次コイルから発生した磁界によって受電側の2次コイルに誘導電流が発生する。受電側のデバイスは誘導電流を電力に変換することで充電を行う。

電磁界共鳴における数メートル程度離れていても数 kW の電力を伝送できる特徴を利用して、電気自動車の無線充電に応用する研究もなされている。2016年にディズニースearch社は、 $54m^3$  の空間全体に1900 W の電力伝送を達成している [6]。さらに、端末間だけでなく他の端末を経由して無線電力伝送を行う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 [7]。電磁界共鳴を用いた電力伝送は40%～60%の効率での電力伝送が可能である [8]。しかしながら、伝送範囲を広げるためには大規模設備が必要となる。

## 6.3 電波電力伝送の種類

電波を用いた電力伝送は、かつてニコラ・テスラがウォーデンクリフタワーから電力伝送を試みるなど、古来より良く知られた無線電力伝送手法である。電波を用いた無線電力伝送の1つとして、送信部から位相や振幅を制御して電力を伝送する対象デバイス方向にビームを形成することで集中的に電力を送るビームフォーミングの手法が考えられる。送信部から放射された電波を受信部で直流に変換して、電力を得ることができる。文献 [9] では、室内でスマートフォンなどのモバイル機器を充電する無線電力伝送手法が提案されている。しかしながら、電波には距離減衰特性が存在しているため、伝送距離が2倍になると電力密度は $\frac{1}{4}$ 倍となって電力の伝送効率が低くなる。

出力を大きくすれば電力密度の問題はカバーできるが、文献 [10–12] では、過度な電波曝露が生体に悪影響を与え

る可能性について指摘されている。電力密度を高めながら電波曝露を抑える手法として、文献 [13] では、電力伝送の対象デバイスが位置する周囲以外の領域で高エネルギーを発生させない電力伝送手法を提案している。デバイスを囲うように送信機を設置することで、デバイスの静止・移動に関わらず空間全体においてデバイスにのみに対して電力供給を行うことに成功している。本研究では生体に対する電波曝露を考慮するだけでなく、センサの周囲にアクセスポイントを設置して時分割で位相セットを切り替えることにより、複数のセンサに公平な電力の供給を可能にした。

## 6.4 バッテリレスセンサネットワーク

センサネットワークに適した手法として、現在バッテリレスの通信技術も考案されている。代表的な例がRFIDやBackscatter、パッシブエナジーハーベスティングである。本節では、RFIDやBackscatter、パッシブエナジーハーベスティングについて紹介する。

### 6.4.1 RFIDとBackscatter

センサネットワークにおいて、電波を用いた通信技術としてRFID (Radio Frequency Identifier) が存在する。RFIDには電池を搭載しないパッシブ型と電池を搭載するセミパッシブ型、アクティブ型の3種類存在していて、通信距離はパッシブ型とセミパッシブ型が数 mm～数 m、アクティブ型が数 m～数十 m である。本節で用いるRFIDはパッシブ型を指す [14]。RFIDは、受信した電力を利用して受動的に通信を行うことが可能で、既に様々な場面で利用されている。RFIDの技術は既存のバーコードと異なり、データの読み取りだけでなくデータの書き込みが可能で、まとめて読み取り可能な点、金属以外でRFIDタグが遮蔽されている状態でも読み取り可能な点などで有用である。文献 [15] では、RFIDを拡張したWISP (Wireless Identification and Sensing Platform) が提案されている。WISPでは、タグのIDだけでなく、タグに付属するセンサのデータも読み取る事ができる。

RFID以外の電波を用いたバッテリレスセンサネットワークの手法としてBackscatter通信がある。Backscatter通信とは、自身とは異なる機器から発せられた電波を搬送波として利用する超低消費電力通信手法である。既存研究の例として、無線LANから送信される電波を利用して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Wi-Fi Backscatterの研究 [16] や、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が行われている [17, 18]。RFIDやBackscatterは消費電力が少ないセンサに対しては有用だが、本研究で意図しているような消費電力が数  $\mu\text{W}$ ～数 mW のセンサには不向きである。

### 6.4.2 パッシブエナジーハーベスティング

消費電力が非常に小さいセンサが電力を得る手法として、

環境内電波を利用したパッシブエナジーハーベスティングが考案されている。環境内電波とは、テレビや携帯電話などから発せられる微弱な電波のことを示す。環境内電波を収集して活用することで、バッテリー交換をせずとも端末間での通信が可能となる。既に文献 [19, 20] では、テレビ塔からの電波や電子レンジから発せられる電波からセンサを駆動できることが確認されている。環境内電波を用いた手法はマイクロワットレベルで動作するデバイスに適した手法である。一方で、より高い電力を必要とする IoT アプリケーションには不向きであることや、得られるエネルギーが安定しないという欠点がある。したがって、パッシブエナジーハーベスティングは一日中センサが駆動する必要があるセンサネットワークでは不向きである。

## 7. おわりに

本稿では複数アクセスポイントの位相を制御して CPC 電力伝送を行ったとき、既存手法の CSD 電力伝送と比較した伝送電力効率の改善とそれぞれのセンサノードにおける供給電力の偏りの改善を実験で検証した。提案手法によって伝送電力の点で 151.2 % 改善、供給電力の偏りは 40 % 改善することができた。提案手法は単一アクセスポイントよりも広範囲に電力伝送が可能で、位相を制御しない複数アクセスポイントの電力伝送と比較して定常波の影響は無く供給電力の偏りも改善できる。現在、電力伝送時間決定手法の改善と実際のセンサを用いた実機によるさらなる検証を進めている。

## 謝辞

本研究は JSPS 科研費 (JP16H01718, 18H03231, 19H01101) の支援の下で行った。

## 参考文献

- [1] 総務省, “平成 30 年度版 情報通信白書,” <http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h30/html/nd111200.html>, 2018, (2019/1/30 参照).
- [2] Sony, “Felica,” <https://www.sony.co.jp/Products/felica/>, (2019/1/30 参照).
- [3] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J.D. Joannopoulos, P. Fisher, and M. Soljačić, “Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances,” *Science*, vol.317, no.82, pp.83–86, 2007.
- [4] D. Maehara, G.K. Tran, K. Sakaguchi, K. Arai, and M. Furukawa, “Experiment Validating the Effectiveness of Multi-point Wireless Energy Transmission with Carrier Shift Diversity,” *IEICE transactions on Communication*, vol.97, no.9, pp.1928–1937, 2014.
- [5] 高橋俊輔, “ワイヤレス給電の技術概要,” <http://www.tokugikon.jp/gikonshi/279/279tokusyu1.pdf>, (2019/1/30 参照).
- [6] M.J. Chabalko, M. Shahmohammadi, and S.A. P., “Quasistatic Cavity Resonance for Ubiquitous Wireless Power Transfer,” *PloS one*, vol.12, no.2, 2017.
- [7] M.J. Chabalko, M. Shahmohammadi, and S.A. P., “Impedance matching method for any-hop straight wireless power transmission using magnetic resonance,” *Proceedings of the IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS'13)*, pp.193–195, 2013.
- [8] 庄木裕樹, “ワイヤレス電力伝送 (WPT) 技術の実用化に向けた動向と今後取り組み～制度化、国際協調、標準化の動向と普及に向けた活動～,” <http://www.tokugikon.jp/gikonshi/279/279tokusyu2.pdf>, (2019/1/30 参照).
- [9] V. Iyer, E. Bayati, R. Nandakumar, A. Majumdar, and S. Gollakota, “Charging a smartphone across a room using lasers,” *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*, vol.1, no.4, pp.143–163, 2018.
- [10] S. Engels, N.L. Schneider, N. Lefeldt, C. Maira Hein, M. Zapka, A. Michalik, D. Elbers, A. Kittel, P. Hore, and H. Mouritsen, “Anthropogenic electromagnetic noise disrupts magnetic compass orientation in a migratory bird,” *Nature*, vol.509, no.7500, pp.353–356, 2014.
- [11] O. P. Gandhi, M. L. Lloyd, A.A.d. Salles, Y.Y. Han, R. B. Herberman, and D. Lee Davis, “Exposure Limits: The underestimation of absorbed cell phone radiation, especially in children,” *Electromagnetic Biology and Medicine*, vol.31, no.1, pp.34–51, 2012.
- [12] H. Nittby, B. Widegren, M. Krogh, G. Grafström, H. Berlin, G. Rehn, J. L. Eberhardt, L. Malmgren, B. RR Persson, and L. G Salford, “Exposure to radiation from global system for mobile communications at 1,800 MHz significantly changes gene expression in rat hippocampus and cortex,” *The Environmentalist*, vol.28, no.4, pp.458–465, 2008.
- [13] X. Fan, D. Han, S. Li, M. Sanzari, W. Trappe, Y. Zhang, Z. Han, and R. Howard, “Energy-ball : Wireless Power Transfer for Batteryless Internet of Things through Distributed Beamforming,” *Proceeding of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*, vol.2, no.2, p.65, 2018.
- [14] オムロン, “RFID システム概要,” <https://www.fa.omron.co.jp/guide/technicalguide/47/219/index.html>, (2019/1/31 参照).
- [15] J. R. Smith, A. P. Sample, P. S. Powlledge, S. Roy, and A. Mamishev, “A Wirelessly-Powered Platform for Sensing and Computation,” *UbiComp 2006: Ubiquitous Computing*, pp.495–506, 2006.
- [16] B. Kellogg, A. Parks, G. Shyamnath, J.R. Smith, and D. Wetherall, “Wi-Fi Backscatter: Internet Connectivity for RF-Powered Devices,” *Proceedings of the Annual Conference of the ACM Special Interest Group on Data Communication (SIGCOMM'14)*, pp.607–618, 2014.
- [17] J.O. McSpadden, and J.C. Mankins, “Space Solar Power Programs and Microwave Wireless Power Transmission Technology,” *IEEE microwave wireless magazine*, vol.3, no.4, pp.46–57, 2002.
- [18] S. Sasaki, K. Tanaka, and K.i. Maki, “Microwave Power Transmission Technologies for Solar Power Satellites,” *Proceedings of the IEEE*, pp.1438–1447, 2013.
- [19] H. Nishimoto, Y. Kawahara, and T. Asami, “Prototype Implementation of Ambient RF Energy Harvesting Wireless Sensor Networks,” *Proceedings of the IEEE Sensors*, pp.1282–1287, 2010.
- [20] Y. Kawahara, X. Bian, R. Shigeta, R. Vyas, M.M. Tentzeris, and T. Asami, “Power Harvesting from Microwave Oven Electromagnetic Leakage,” *Proceedings of the 15th International Conference on Ubiquitous Computing (UbiComp'13)*, pp.373–382, 2013.