

分散協調型の電波電力伝送における 位相最適化アルゴリズム

林 健太郎^{1,a)} 濱政 光² 田中 勇気³ 藤橋 卓也¹ 猿渡 俊介¹ 渡辺 尚¹

受付日 2021年5月27日, 採録日 2021年10月8日

概要: 広く分散配置した複数のアンテナから電波を放射して, 室内の IoT (Internet of Things) デバイスや UAV (Unmanned Aerial Vehicle) に対し無線で電力を供給する電波電力伝送が注目を集めている. これまで我々は, 各アンテナが放射する電波に適切な位相制御を与えることで, 給電対象の位置に強め合う干渉を意図的に作り出し, 電力供給を効率化する分散協調型の電波電力伝送の開発に取り組んできた. 本稿では分散協調型の電波電力伝送において, 受電端末の受信電力を最大化する最適な位相を求めるための新しい位相最適化手法を提案する. 提案手法は, 様々な位相のもとで受信電力を測定し, 適切な演算を行うことで最適な位相を得るものであるが, このとき非線形関数への曲線回帰を取り入れることによって, 受信電力の測定回数を削減しながら最適な位相を算出する点が特徴である. 計算機シミュレーションによる評価から, 既存の位相最適化手法と比較して, 受信電力の測定回数を削減できることと, 実環境において生じる観測する受信電力への雑音への耐性を持つことを確認した.

キーワード: IoT, 無線電力伝送, 電波電力伝送, 分散型アンテナ, 位相制御

Phase Optimization Algorithm for Distributed Cooperative Microwave Power Transfer

KENTARO HAYASHI^{1,a)} HIKARU HAMASE² YUKI TANAKA³ TAKUYA FUJIHASHI¹
SHUNSUKE SARUWATARI¹ TAKASHI WATANABE¹

Received: May 27, 2021, Accepted: October 8, 2021

Abstract: The technology of wireless power transfer to indoor Internet of Things (IoT) devices and unmanned aerial vehicle (UAV) by radiating microwaves from multiple widely distributed antennas has attracted much attention. We have been working on the development of distributed cooperative microwave power transmission, in which constructive interference is intentionally created at the target location by applying appropriate phase control to the microwaves emitted by each antenna to improve the efficiency of power supply. In this paper, we propose a new phase optimization method to find the optimal phase that maximizes the received power of the receiving terminal in the distributed cooperative power transmission. The proposed method obtains the optimal phase by measuring the received power under various phases. The feature of the proposed method is that it can calculate the optimal phase while reducing the number of received power measurements by incorporating the curve regression to a nonlinear function. From the evaluation of computer simulations, we confirm that proposed method can reduce the number of received power measurements compared to existing method, and that it is tolerant of noise on the observed received power that may occur in real environments.

Keywords: IoT, wireless power transfer, microwave power transfer, distributed antennas, phase control

¹ 大阪大学大学院情報科学研究科
Graduate School of Information Science and Technology,
Osaka University, Suita, Osaka 565-0871, Japan
² パナソニック株式会社コネクティッドソリューションズ社
Connected Solution Company, Panasonic Corporation,
Yokohama, Kanagawa 224-8539, Japan
³ 株式会社パナソニックシステムネットワークス開発研究所開発セ
ンター無線技術開発部
Panasonic System Networks R&D Lab. Co., Ltd., Yoko-
hama, Kanagawa 224-8539, Japan

1. はじめに

屋内に配置された IoT (Internet of Things) デバイスや UAV (Unmanned Aerial Vehicle) への給電に適した電力供給手段として, 無線電力伝送が注目されている. 無線電力伝送による給電は, 太陽光や風力, 振動などの環境エネル

^{a)} hayashi.kentaro@ist.osaka-u.ac.jp

ギーを用いたエネルギーハーベスティングによる方式 [1], [2] と比較すると、天候や時間帯によらない安定した電力供給が可能である。代表的な無線電力伝送の例として、電磁誘導を利用する方式 [3], [4], 電磁界共振結合を利用する方式 [5], [6], [7], そして電波を利用する方式 [8], [9], [10] があげられる。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 [3] をはじめとする多くの製品ですでに利用されている。しかしながら電磁誘導を利用して電力を得るためには、送電回路と受電回路を数 cm 以内に近接する必要がある。したがって、IoT システムへの適用は現実的ではない。電磁界共振結合を用いる方式は、同じ共振周波数を持つ 2 つの共振器を用いたうえで、各共振器の電磁結合を利用することで、遠隔に電力を供給する技術である。電磁誘導を用いる方式よりも遠方に電力を供給できるが、送電距離を伸ばすためには大型の共振器を用いる必要がある。たとえば文献 [7] では、約 1 m の距離で 90% 程度の高い伝送効率を達成している一方、直径が約 1 m の共振器を用いている。したがって電磁界共振結合を用いた電力伝送は、一般に小型である IoT デバイスには不向きといえる。

本稿では、電波を用いた無線電力伝送に着目する。電波電力伝送は、送信部から放射される電波をレクテナ (Rectenna: Rectifying Antenna) を用いて直流電力に変換する技術である。特徴として、数 m 程度までの長距離に電力伝送が可能である点と、電力伝送に変調波を用いることでデータ通信が同時に可能である点があげられる [11], [12], [13], [14]。無線通信と給電を同時に行う技術は Simultaneous Wireless Information and Power Transfer (SWIPT) と呼ばれ、今後の IoT 時代を支える重要な技術になると考えている。

電波による無線電力伝送の課題として、電波の空間伝搬損失に起因して、伝送効率が非常に小さい点があげられる。図 1 に、単一の送電アンテナを用いた電波電力伝送における、受信電力の分布を示す。自由空間では電波の強度は距離の 2 乗に反比例して減衰することから、1 台の送電アンテナでは限られた範囲にしか十分な電力を供給できない。広範囲に十分な電力を供給するためには送信電力を大きくする必要があるが、1 台のアンテナが放射できる電波の強度は、電波法によって制限される [15]。また、過度な電波が生体や他のデバイスに悪影響を与える可能性も指摘されている [16]。

1 台のアンテナからの送電電力を低減させつつ、より大きな電力を受電端末に給電することを目的として、我々は分散協調型の電波電力伝送に注目してきた [17], [18], [19], [20]。分散協調型の電波電力伝送は、小電力の電波を放射する多数の送電アンテナを空間内に分散配置するとともに、各アンテナの協調動作を促すことによって、高効率な給電を実現する手法である。図 2 に、分散協調型の電波電力伝送に

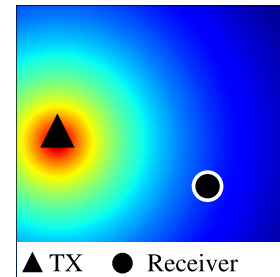


図 1 単一アンテナによる電波電力伝送

Fig. 1 Power transmission using single TX.

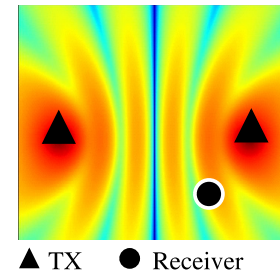


図 2 分散協調型の電波電力伝送

Fig. 2 Power transmission using distributed TX.

おける受信電力の分布を示す。複数の送電アンテナを分散して配置するとき、アンテナと受電端末間の最短距離は単一の送電アンテナを用いた場合と比べて小さくなるため、効率的に電力を供給できる。さらに、各送電アンテナが放射する電波の位相を適切に制御することによって、干渉のパターンを変化させ、受電端末の位置に建設的干渉を意図的に作り出すことが可能である。これにより、受電端末の位置だけに電力が集中することから、生体や他のデバイスに悪影響を与える可能性が低い。加えて、シャドーイングに耐性を持つ点や、送受電アンテナに低利得のアンテナを利用できる点においても優位性を持つ。

分散協調型の電波電力伝送では、給電対象の位置で建設的干渉を作り出すために、各アンテナが放射する電波の位相を最適化する必要がある。各アンテナに対する最適な位相はアンテナと受電端末間の位相差に相当する情報であり、チャンネルサウンディングなどを用いたチャンネル情報フィードバックにより算出することができる。たとえば文献 [21] や [22] では、受電端末によるチャンネル情報フィードバックを用いた分散協調型電波電力伝送の設計、実験が行われている。しかしながら、受電端末から中央制御装置へのチャンネル情報フィードバックを有線によって行っているため、受電端末の配置に制限が生じる点が問題となる。また、正確なチャンネル情報を算出するためには複雑な信号処理や精密な時刻同期が要求されることから、IoT デバイスにおける演算能力や消費電力の制約が問題となる。

こうした背景から、受電端末による受信電波強度 (RSSI: Received Signal Strength Indicator) のフィードバック情報から、位相の最適化を行う手法がこれまでに提

案されている [23], [24], [25], [26], [27], [28]. より具体的には, 各アンテナが様々な位相のもとで電波を放射し, 受電端末は測定した RSSI を別周波数のデジタル通信によってフィードバックする. 得られた位相と RSSI の対応関係を基に適切な演算を行うことで, 各アンテナが放射する信号の位相を制御するものである. しかしながら, 従来の手法は各アンテナの位相を 1 つずつ最適化するため, 多数のアンテナの位相を最適化する場合には, 各アンテナごとに位相を設定し, 最適位相を計算する必要がある. そのため, 受電端末の移動や周囲の電波環境の変動に対して位相の最適化が追従できない可能性がある.

本稿では, 分散協調型の電波電力伝送における新しい位相最適化手法として, 非線形関数への曲線回帰を用いる方法を提案する. 提案手法では, 複数の送電アンテナに対する位相を同時に切り替えながら電波を放射し, 受電端末は放射された電波の重ね合わせにより得られた RSSI をフィードバックする. このとき, 受電端末における RSSI を各アンテナが放射する電波の位相を引数とした非線形関数で表すことで, 最適位相を算出する点が特徴である. 各送電アンテナが放射する電波の位相を変数とした受信電力の関数を考えるとき, この関数は, 各アンテナが放射した電波の受電端末上における到達振幅と到達位相を未知のパラメータとして持つ非線形関数となる. 受信電力関数の形は既知であることから, 電力伝送に用いる位相を説明変数, 測定した RSSI の値を目的変数とした曲線回帰により, 受信電力関数を構成するパラメータの値を求めることができる. そして, 曲線回帰から求めたパラメータの値を用いて, 各アンテナが放射する電波に対する最適位相制御量を算出する. 計算機シミュレーションを用いて提案手法を既存手法と比較した結果, 既存の位相最適化手法と比較して, 受信電力の測定回数を削減できることと, 実環境において生じる観測する受信電力への雑音への耐性を持つことを確認した.

本稿の構成は, 以下のとおりである. 2 章において, 本稿で対象とする分散型電波電力伝送のシステムモデルについて述べる. 3 章では, 提案する非線形関数への曲線回帰を用いた位相最適化手法について述べる. 4 章では, 提案手法の性能を計算機シミュレーションによって評価し, 提案手法が既存手法よりも最適化に要する時間を削減できることと, 観測する RSSI に生じる雑音に対して耐性を持つことを示す. 最後に 5 章でまとめとする.

2. 分散協調型の電波電力伝送

2.1 ネットワークモデル

図 3 に, 本稿で想定する分散協調型の電波電力伝送のネットワークモデルを示す. 本システムでは, 広い範囲にわたって高効率な給電を実現するために, 空間に多数の送電アンテナを分散して配置する. 図 3 では, n 台の送電

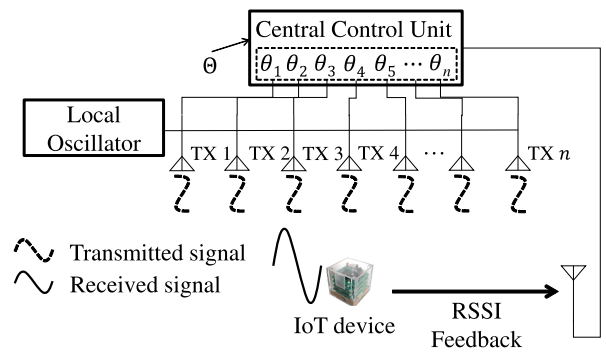


図 3 ネットワークモデル

Fig. 3 Network model.

アンテナを用いている. すべての送電アンテナは中央制御装置に接続されており, 共通の局部発振器を用いて同一周波数の電波を放射する. 中央制御装置は, 各送電アンテナが放射する信号の位相を位相制御器を用いて制御する. 各送電アンテナに対する位相制御量の組合せを, 位相セット $\Theta = (\theta_1, \dots, \theta_n)$ と呼ぶ. 受電端末は, 中央制御装置からの要求に応じて RSSI を測定し, フィードバックすることができる. 中央制御装置は, いくつかの位相セットのもとで電力伝送を行い, 各位相セットに対応する RSSI を受電端末からのフィードバックを通して取得する. 得られた RSSI フィードバックから, 適切な演算を行うことにより, 受電端末の受信電力を最大化する位相セットを算出する. 受電端末の受信電力を最大とする位相セットを最適位相セット Θ_{opt} と呼び, RSSI フィードバックの情報から最適位相セット Θ_{opt} を求めることを位相の最適化と呼ぶ. 位相の最適化により最適位相セット Θ_{opt} が得られたら, 以降は Θ_{opt} を用いた電力伝送を行う.

なお, 複数の受電端末が存在する場合は, 各受電端末に対し独立に位相の最適化を行い, 受電端末ごとに最適位相セットを算出する. 各受電端末に対して算出した複数の最適位相セットを時分割で切り替えながら電力伝送を行うことで, すべての受電端末の電力需要を公平に満たすことができる [20]. 簡単のために, 本稿では受電端末の台数は 1 台と仮定する.

2.2 受信電力の算出

本節では, 分散協調型の電波電力伝送において受電端末が受信する電力を算出する. P_i を送電アンテナ i から放射された信号の受電端末上での電力とし, ϕ_i を送電アンテナ i と受電端末間の伝搬経路上の位相シフト量とする. P_i と ϕ_i は, 一般には未知であることに注意が必要である. 送電アンテナ i と受電端末間の複素チャネル利得は, 次の式 (1) で表される.

$$h_i = \sqrt{P_i} e^{j\phi_i} \quad (1)$$

受電端末の受信電力を r と表す. 受電端末が受信する信号

は、各送電アンテナから到来した信号の合成信号であることから、 r は次の式 (2) で表される。

$$r = \left| \sum_{i=1}^n h_i \right|^2 = \left| \sum_{i=1}^n \sqrt{P_i} e^{j\phi_i} \right|^2 \quad (2)$$

次に、各送電アンテナに対して位相制御を行う場合を考える。位相セット $\Theta = (\theta_1, \dots, \theta_n)$ を用いた位相制御を行う際の受信電力を受信電力関数 $r(\Theta)$ として表すと、 $r(\Theta)$ は次の式 (3) で表される。

$$r(\Theta) = \left| \sum_{i=1}^n \sqrt{P_i} e^{j(\theta_i - \phi_i)} \right|^2 \quad (3)$$

$r(\Theta)$ は、次の式 (4) が成り立つときに最大値 $|\sum_{i=1}^n \sqrt{P_i}|^2$ をとる。

$$\theta_1 - \phi_1 = \theta_i - \phi_i \quad \forall i \quad (4)$$

式 (4) は、各送電アンテナから放射された信号の位相が受電端末の位置で一致することを意味する。式 (4) を満たす位相セットが、最適位相セット Θ_{opt} である。

3. 提案手法：Power-aware LM Algorithm

本章では、2章で述べた分散協調型の電波電力伝送システムにおいて、受電端末による RSSI フィードバックをもとに、最適位相セット Θ_{opt} を求める方法を提案する。提案する手法では、電力伝送に用いる位相セットを説明変数、その位相セットを用いて電力伝送したときの RSSI フィードバックを目的変数とした曲線回帰を行い、式 (3) の受信電力関数 $r(\Theta)$ を推定する。受信電力関数 $r(\Theta)$ には、 n 台の送電アンテナから到来した電波の電力 P_i ならびに位相 ϕ_i が未知のパラメータとして含まれるので、合計で $2n$ 個の実数パラメータを求める必要がある。非線形最小二乗問題を解くことにより得られた受信電力関数のパラメータの情報をもとに、式 (4) を満たす最適位相セット Θ_{opt} を構成する。

以上をより詳細に述べる。いま、 k 種類の位相セット Θ_i ($i = 1, 2, \dots, k$) それぞれのもとで電力伝送を行い、そのつど受電端末から RSSI フィードバックを受信することを考える。 k 種類の位相セット Θ_i ($i = 1, 2, \dots, k$) は、ランダムに決定することを想定している。また、位相セット数 k を決定する方法に関する議論は 4.2 節で行う。各位相セットに対応する RSSI フィードバックを v_i ($i = 1, 2, \dots, k$) と表すとき、 v_i は次の式 (5) のように表される。

$$v_i = r(\Theta_i) + N \quad (5)$$

式 (5) において N は、回路中に生じる熱雑音に起因する RSSI の測定誤差の影響を意味する。このとき、観測結果を最も説明するような受信電力関数 $r(\Theta)$ のパラメータ $\hat{\beta} = (\hat{\phi}_1, \hat{\phi}_2, \dots, \hat{\phi}_n, \hat{P}_1, \hat{P}_2, \dots, \hat{P}_n)$ は、次の関数 $J(\beta)$ を最小

化する非線形最小二乗問題を解くことにより得られる。

$$J(\beta) = \sum_{i=1}^k \|r(\beta, \Theta = \Theta_i) - v_i\|^2 \quad (6)$$

式 (6) において $r(\beta, \Theta = \Theta_i)$ は β の関数であり、受信電力関数を成す未知のパラメータを β とした際の $r(\Theta_i)$ の値である。式 (6) の非線形最小二乗問題の解 $\hat{\beta} = (\hat{\phi}_1, \hat{\phi}_2, \dots, \hat{\phi}_n, \hat{P}_1, \hat{P}_2, \dots, \hat{P}_n)$ に対し、 $\Theta = (\hat{\phi}_1, \hat{\phi}_2, \dots, \hat{\phi}_n)$ とすることで、式 (4) を満たす最適位相セットを構成する。

提案手法では、式 (6) の非線形最小二乗問題を LM (Levenberg-Marquardt) 法 [29] によって解く。LM 法は、ある初期解 β_1 から探索を開始し、勾配の情報をもとに解を適切に更新することを繰り返すことで、式 (6) を満たす最適なパラメータ $\hat{\beta}$ を得るアルゴリズムである。LM 法の特徴として、同じく非線形最小二乗問題を解く手法である最急降下法とガウス・ニュートン法を適切に組み合わせている点があげられる。より具体的には、更新式に対してダンピングファクタと呼ばれる毎回の反復で変化するパラメータを導入することで、最急降下法の安定性とガウス・ニュートン法の効率性を両立させている。

次に、LM 法の初期解 β_1 を決定する方法について述べる。LM 法をはじめとする勾配情報を用いた反復アルゴリズムにおいては、反復の初期解が収束の安定性に影響を与えることが知られており、性能の向上にあたっては初期解を適切に決定することが重要となる。いま、 k 種類の位相セット $\{\Theta_i (i = 1, 2, \dots, k)\}$ のうち、RSSI フィードバックを最大とした位相セットが $\Theta' = (\theta'_1, \theta'_2, \dots, \theta'_n)$ であり、その際の RSSI フィードバックが v' であったとする。この場合、LM 法の初期解 β_1 を次の式 (7) に示すように設定する。

$$\beta_1 = \left(\theta'_1, \theta'_2, \dots, \theta'_n, \frac{v'}{n}, \frac{v'}{n}, \dots, \frac{v'}{n} \right) \quad (7)$$

位相差を表す前半の n 要素には、説明変数として用いた k 種類の位相セットのうち、RSSI フィードバックを最大化した位相セットを設定する。RSSI を最大化する最適位相セット Θ_{opt} は、各送電アンテナから放射された電波の到達位相そのものであることから、RSSI が大きい位相セットほど最適解に近いためである。振幅を表す後半の n 要素には、RSSI フィードバックの最大値 v' を送電アンテナの台数 n で割った値を設定する。各送電アンテナから受電端末までの距離が等しいと仮定すると、各送電アンテナから放射された電波の到達電力は、各送電アンテナから放射された電波の位相が最適化されたときの合計受信力を送電アンテナの台数で割った値となるためである。本手法により、式 (6) の最適解の近傍から LM 法を開始できるため、最適化精度の向上や計算時間の短縮を達成できると考えられる。

Algorithm 1 は、以上の手順をまとめたものである。表 1 に変数の説明を、表 2 に関数の説明をそれぞれ示す。Algorithm 1 では、Power-aware LM algorithm によって最適

表 1 アルゴリズム 1 における変数の説明
Table 1 Variables in Algorithm 1.

変数	機能
k	説明変数として用いる位相セットの個数
n	送電アンテナの台数
Θ_i	説明変数として用いる i 番目の位相セット
v_i	電力伝送に位相セット Θ_i を用いたときの RSSI フィードバック
m	説明変数として用いた k 種類の位相セットのうち, RSSI フィードバックを最大化した位相セットの番号
β_1	LM 法における初期解. $2n$ 要素からなり, 前半 n 要素は到達位相を, 後半 n 要素は到達電力を表す.
$\hat{\beta}$	LM 法により得られた最適解. $2n$ 要素からなり, 前半 n 要素は到達位相を, 後半 n 要素は到達電力を表す.
Θ_{opt}	提案手法により得られた最適位相セット

表 2 アルゴリズム 1 における関数の説明
Table 2 Functions in Algorithm 1.

関数	機能
$\text{random}(a, b, n)$	a 以上 b 未満の乱数を n 個生成する関数
$\text{setRF}(\Theta)$	位相セット Θ を用いた電力伝送を行う関数
$\text{getRSSI}()$	受電端末から RSSI フィードバックを受信する関数
$\text{argmax}(X)$	配列 X における最大値のインデックスを返す関数
$\text{LM}(\Theta, \mathbf{v}, \beta_1)$	説明変数 Θ , 目的変数 $\mathbf{v}$ のもとで, 反復の初期解を β_1 とした LM 法を行い, 最適なパラメータ $\hat{\beta}$ を返す関数

Algorithm 1 Power-aware LM Algorithm

```

1: for  $i = 1$  to  $k$  do
2:    $\Theta_i \leftarrow \text{random}(0, 2\pi, n)$ 
3:    $\text{setRF}(\Theta_i)$ 
4:    $v_i \leftarrow \text{getRSSI}()$ 
5: end for
6:  $m = \text{argmax}(\mathbf{v})$ 
7:  $\beta_1[0:n] \leftarrow \Theta_m$ 
8:  $\beta_1[n:2n] \leftarrow [v_m/n, v_m/n, \dots, v_m/n]$ 
9:  $\hat{\beta} \leftarrow \text{LM}(\Theta, \mathbf{v}, \beta_1)$ 
10:  $\Theta_{\text{opt}} \leftarrow \hat{\beta}[0:n]$ 

```

位相セット Θ_{opt} を求めて, 最後に Θ_{opt} を用いた電力伝送を行っている. なお, LM 法の実装に関しては, たとえば Python では `scipy.optimize.leastsq()` などの関数を用いることを想定している.

4. 評価

4.1 評価環境

本章では, 計算機シミュレーションを用いて提案手法の性能評価を行う. 図 4 に, 本シミュレーションにおいて想定した環境を示す. 送電アンテナの台数は 8 台とし, 図 4 に示すように, 部屋の天井に等間隔に配置した. 受電アンテナの台数は 1 台とし, $0.25 \leq X \leq 2.75$, $0.25 \leq Y \leq 2.75$, $Z = 1.0$ を満たす範囲内にランダムに配置した. 各送電アンテナの送信電力を 100 mW, 送信周波数を 920 MHz とし, 電力利得は経路損失のみでモデル化されていると仮定した. 信号は直接波のみを考え, 反射波や回折波は存在しないものと仮定した. 位相の最適化は反射波や回折波の影響も含めた到達位相を受信電力について最適化するため, 反射波や回折波の存在が位相最適化アルゴリズムの性能に

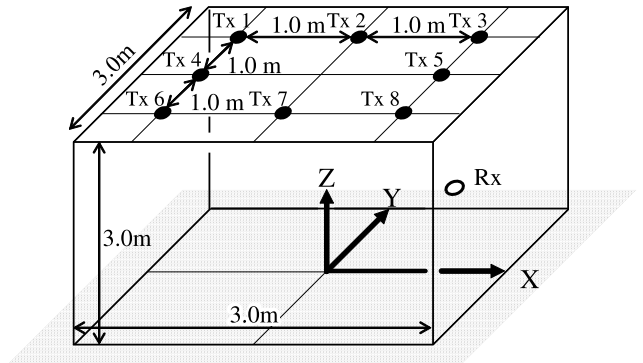


図 4 シミュレーション環境
Fig. 4 Simulation environment.

影響を与えることはない. 試行回数は 1,000 回とし, 各試行において受電端末の位置を変更した. 評価においては, 以下の 4 つを比較手法とした.

- (1) No control: 位相制御を行わない方法. 各送電アンテナに対する位相制御量を 0 とする.
- (2) Lee: 文献 [24] で提案されている方法. 二分探索に着想を得た位相最適化アルゴリズムである.
- (3) LM: 3 章で述べた, LM 法により位相の最適化を行う方法. LM 法の初期解 β_1 はランダムに設定する.
- (4) PA LM (Proposed): 3 章で述べた, LM 法により位相の最適化を行う方法. LM 法の初期解 β_1 は, 3 章で述べた最適解の近傍に設定する手法に従い決定する.

4.2 最適化精度に関する評価

はじめに, 受電端末が観測する RSSI に雑音が生じない理想的な環境における各位相最適化アルゴリズムの性能評価を行う. 図 5 に, 各位相最適化アルゴリズムが達成する

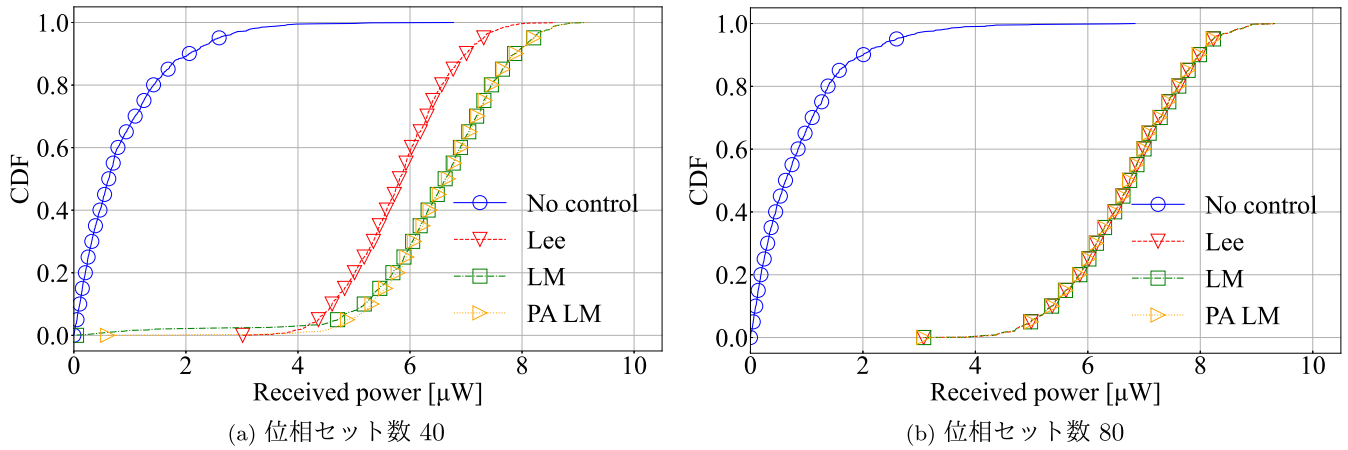


図 5 各アルゴリズムが達成する供給電力の累積分布 (雑音なし)

Fig. 5 Cumulative distribution of supplied power achieved by each algorithm (SNR = inf).

供給電力の累積分布を示す。図 5(a) は説明変数として用いる位相セット数を送電アンテナ数の 5 倍である 40 個とした場合、図 5(b) は送電アンテナ数の 10 倍である 80 個とした場合である。

結果から、次の 3 点を確認した。1 つ目は、No control を除くいずれのアルゴリズムにおいても、説明変数として用いる位相セット数が多い場合ほど供給電力は向上することである。たとえば Lee の手法に注目すると、40 個の位相セットを用いた場合の平均供給電力は $5.81 \mu\text{W}$ であるのに対し、80 個の位相セットを用いた場合には $6.70 \mu\text{W}$ となった。同様に Power-aware LM に関しては、位相セット数が 40 の場合の平均供給電力は $6.61 \mu\text{W}$ であるのに対し、位相セット数が 80 の場合には $6.70 \mu\text{W}$ となった。このことから、提案手法である Power-aware LM は、既存手法である Lee の方法と比較して位相セット数を少なくした場合の性能劣化が少ないことが確認できる。

2 つ目は、提案手法である Power-aware LM が達成する平均供給電力は、位相制御を行わない手法である No control と比較して約 7.7 倍となることである。たとえば位相セットを 80 個用いる場合において、No control が達成した平均供給電力は $0.88 \mu\text{W}$ となったのに対し、Power-aware LM の平均供給電力は $6.70 \mu\text{W}$ となった。位相が完全に最適化された場合における供給電力は、位相制御を行わない場合と比較して、最大で送電アンテナの台数倍となることが知られている [19]。したがって今回の環境においては 8 倍となることが期待されるが、最大改善量である 8 倍を達成するためには、すべての送電アンテナから受電アンテナまでの伝搬損失が等しくなる必要がある。実際にはそのようなことが起こる確率は低く、結果として約 7.7 倍の改善にとどまったものと考えられる。

3 つ目は、LM 法の初期解を RSSI フィードバックに基づき最適解の近傍に設定する手法は、位相セット数が少ない場合ほど有効性が高いことである。位相セット数が 40

の場合には、初期解をランダムに設定する手法である LM が達成する平均供給電力は $6.48 \mu\text{W}$ であるのに対し、初期解を最適解の近傍に設定する手法である Power-aware LM は $6.61 \mu\text{W}$ となり、2% の性能向上を達成している。一方で位相セット数が 80 の場合には、LM と Power-aware LM が達成する平均供給電力はともに $6.70 \mu\text{W}$ となり、両者の平均供給電力は一致した。これに関する議論は、4.3 節において詳細に行う。

次に、観測する RSSI に雑音が生じうる環境における各位相最適化アルゴリズムの性能評価を行う。雑音は回路中に生じる熱雑音を想定し、信号対雑音比 (SNR: Signal Noise-to-Ratio) により雑音の大きさを定めた。熱雑音の計算においては、加法的白色ガウス雑音 (AWGN: Additive White Gaussian Noise) を用いることとし、位相セット Θ を用いたときの RSSI フィードバックを次式でモデル化した。

$$v = r(\Theta) + N(0, r(\Theta) \times 10^{\frac{-\text{SNR}}{10}}) \quad (8)$$

x は SNR [dB] を表し、 $N(\mu, \sigma^2)$ は平均 μ 、分散 σ^2 に従う正規乱数である。

図 6 に、SNR を 5 dB と設定した場合において、各位相最適化アルゴリズムが達成する供給電力の累積分布を示す。また、図 7 に、SNR と各アルゴリズムが達成する平均供給電力の関係を示す。横軸は SNR [dB]、縦軸は対応する SNR において各アルゴリズムが達成した供給電力の平均値を意味する。図 7(a) は位相セット数を 40 個とした場合、図 7(b) は 80 個とした場合である。

結果から、提案手法が Lee の方法と比較して、測定する RSSI に加わる雑音に対して耐性を持つことを確認した。たとえば位相セット数を 80 としたとき、Lee の方法が達成できる平均供給電力は SNR が 15 dB の場合では $3.7 \mu\text{W}$ 、SNR が 5 dB となった場合には $2.6 \mu\text{W}$ となった。これに対し提案手法では、SNR が 15 dB の場合では $6.70 \mu\text{W}$ 、SNR が 5 dB となった場合でも $6.57 \mu\text{W}$ の平均供給電力を達成

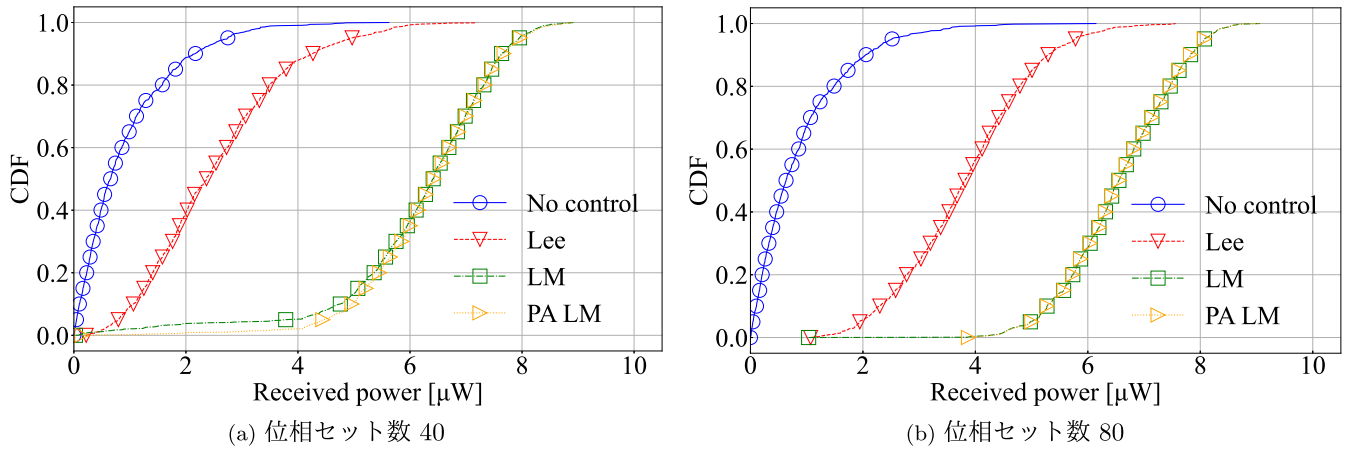


図 6 各アルゴリズムが達成する供給電力の累積分布 (SNR = 5 dB)
Fig. 6 Cumulative distribution of supplied power achieved by each algorithm (SNR = 5 dB).

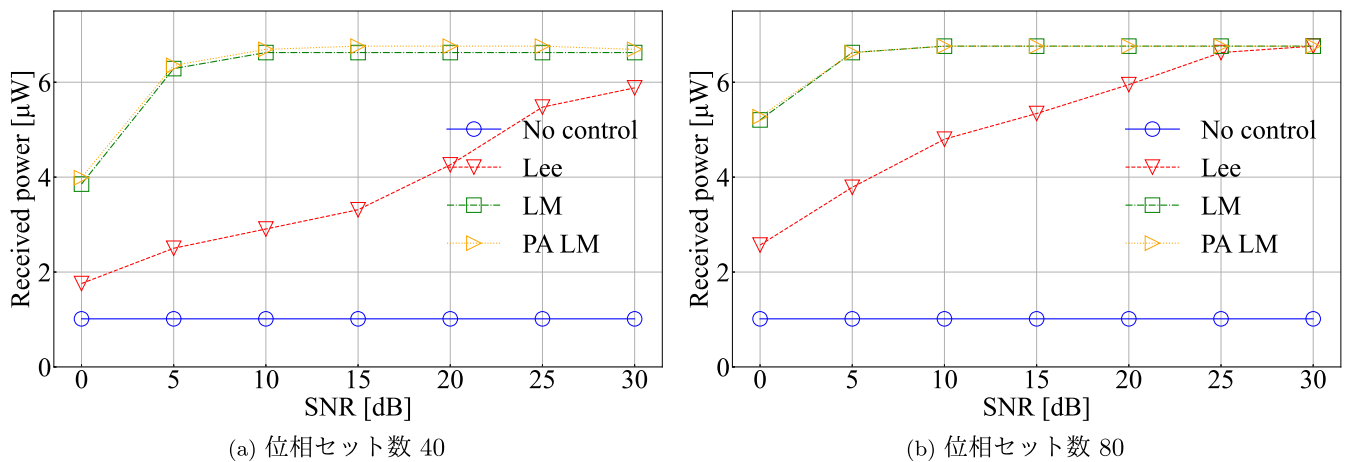


図 7 SNR と各アルゴリズムが達成する平均供給電力の関係
Fig. 7 Relationship between SNR and the average supplied power achieved by each algorithm.

している．また，雑音が存在する場合においても，LM 法の初期解を最適解の近傍に設定する手法の有効性は，位相セット数が少ない場合ほど顕著であることが確認できる．

4.3 最適な位相セット数に関する議論

本節では，提案手法において説明変数として用いる位相セット数 k をどのように決定するべきかに関する議論を行う．位相セット数の値は，電波の位相制御や受電端末が行う RSSI の測定，フィードバック回数に等しいことから，位相の最適化に要する実時間に対し大きなオーバーヘッドとなる．加えて，受電端末における RSSI の測定やフィードバックに要する消費電力を削減するという観点からも，少ない位相セット数のもとで位相の最適化を行えることは重要となる．このような観点から，送電アンテナ数と必要な位相セット数の関係を検証するためのシミュレーションを行う．より具体的には，送電アンテナ数を 8 台ならびに 16 台とした場合について，提案手法において用いる位相セット数を送電アンテナ数の 2 倍から 15 倍まで変化させたときの最適化精度を測定した．本節においては，送電アン

テナの位置は天井にランダムに配置することとした．

図 8 に，位相セット数に対して，提案手法が達成できる位相最適化精度の関係を示す．図 8(a) は送電アンテナ数が 8 台の場合，図 8(b) は 16 台の場合である．横軸は曲線回帰に用いた位相セット数の送電アンテナ数に対する倍率，縦軸はその際に達成できる受信電力の最適値に対する比率を表す．図 8 から，いずれの送電アンテナ数，雑音の大きさにおいても，多くの位相セットを用いるほど最適化精度が向上する傾向にあることが分かる．一方で Power-aware LM に注目すると，雑音が存在しない場合には送電アンテナ数の 5 倍の位相セット数，雑音が 5 dB である場合には 10 倍の位相セット数の時点で最適化精度が収束していることが確認できる．以上の議論から，雑音が少ないと考えられる環境ではアンテナ数の 5 倍，雑音が比較的強いと考えられる環境ではアンテナ数の 10 倍の位相セットを用いるべきと結論づけた．

また，提案手法における LM 法の初期解の設定方法による性能差は，位相セット数が小さい場合ほど顕著であることが分かる．前提として，LM 法は大域的最適解の発見を

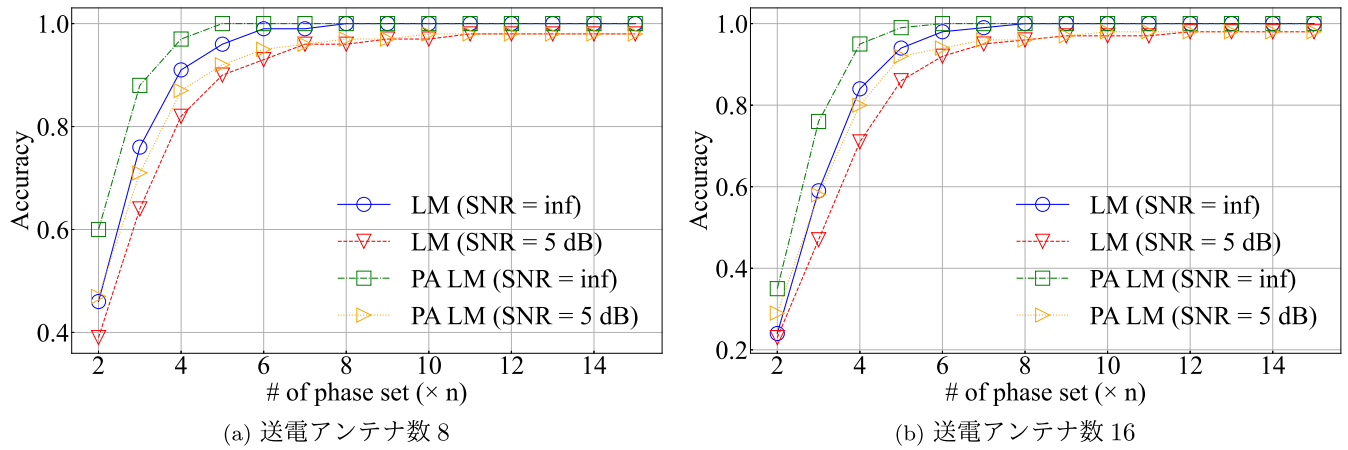


図 8 位相セット数と最適化精度の関係

Fig. 8 Relationship between the number of phase sets and optimization accuracy.

保証するアルゴリズムではないため、目的関数が複数の局所解を持つ場合には、最適解以外の局所解に収束する可能性が存在する。そのうえで、式 (6) の非線形最小二乗問題は一般には複数の局所解を持ち、したがって式 (6) を LM 法によって解くとき必ずしも最適解に収束するとは限らない。ここで式 (6) が持つ局所解とは、観測結果を説明するパラメータの候補に相当するものであり、パラメータの候補は一般に観測結果が少ない場合ほど多くなる。多数の局所解が存在する場合ほど最適解に収束する確率が低くなるため、結果として位相セット数が小さい場合ほど、初期解を最適解の近傍に設定する手法の有効性が増したと考えられる。一方で、十分多くの観測結果が存在する場合、観測結果を説明できるパラメータの候補は少なくなり、LM 法が最適解に収束する確率が高くなる。その結果、位相セット数を大きくした場合には初期解の設定方法による性能差が現れにくくなったものと考えられる。

5. 議論

5.1 関連研究

本稿の関連研究として、受電端末による RSSI フィードバックを利用したアンテナ重み制御技術があげられる。本技術は、受電端末が測定した RSSI を別周波数のデジタル通信によってフィードバックし、その情報をもとに、各アンテナが放射する信号の振幅や位相、周波数などを制御するものである [23], [24], [25], [26], [27], [28]。文献 [28] では、各アンテナの送信位相を一定の範囲内でランダムに摂動し、RSSI が良好化したか否かの判定を繰り返すことにより、最適位相を算出する手法が提案されている。文献 [24], [25] は二分探索に着想を得た、より効率的かつ安定した位相最適化手法を提案している。文献 [23] は、各アンテナの周波数を逐次的に変化させながら RSSI フィードバックを受信し続けることで、最適周波数選択を行う手法を提案している。本稿で提案した LM 法を用いた位相最適化手法も、

様々な位相に対する RSSI を取得し、その対応関係から最適位相を算出するものである。

一方で、受電端末における RSSI の測定、フィードバックの際の消費電力が無視できない場合には、アンテナ重みの最適化を行う際に供給電力が不足する可能性が存在する。こうした背景から、近年では RSSI フィードバックの消費電力を削減するために、backscatter 信号を用いて受電端末における RSSI を推定する手法が提案されている [19], [30]。backscatter とは、外部から飛来した搬送波を、アンテナのインピーダンスを高速に切り替えることにより変調する技術である [31]。backscatter が変調した信号の振幅は、backscatter が受信した信号の振幅に比例して連続的に変化するため、受電端末が変調した信号の振幅を取得することで、受電端末における RSSI を間接的に推定することができる。このとき受電端末自身は搬送波を生成しないため、超低消費電力での動作を実現することができる。文献 [30] では、受電アンテナの近傍に backscatter 信号を発生するアンテナを設置することで、受電端末における RSSI を間接的に推定する手法が提案されている。文献 [19] では、受電端末自身が backscatter 信号を生成することで、追加のアンテナを用いることなく RSSI のフィードバックが可能な回路構成を設計している。本稿で提案した位相最適化手法は、backscatter 信号を利用した RSSI フィードバック手法に適用できると考えている。

5.2 展開シナリオ

分散協調型電波電力伝送システムの展開シナリオとしては、天井に電球のように埋め込む方法、空間内の家庭用電源に接続された無線通信デバイスが協調する方法の 2 種類が考えられる。天井に電球のように埋め込む方法では、たとえば 1~2m ごとに等間隔に埋め込むような形を考えている。この方法は、スマートホームで提案システムが組み込まれた家を展開することにより、実現ができると考えて

いる。本稿の評価は、こちらのシナリオを想定したものである。家庭内の家庭用電源に接続された無線通信デバイスが協調する方法では、エアコンやテレビ、冷蔵庫をはじめとする家電がアクセスポイントとしての役割を持ち、空間のIoTデバイスに給電を行う形を考えている。この場合は、標準化を行って、無線LANの規格にこのような機能を組み込むなどの取り組みが必要になると考えている。

6. おわりに

本稿では、分散協調型の電波電力伝送における位相最適化手法として、LM法により非線形最小二乗問題を解くことで位相の最適化を行う手法であるPower-aware LM Algorithmを提案した。シミュレーションによる評価結果から、既存手法よりも高い収束速度と雑音耐性を持つことを示した。また、LM法における初期解をRSSIフィードバックに基づき最適解の近傍に決定する手法によって、より最適化性能を向上させることができることを示した。

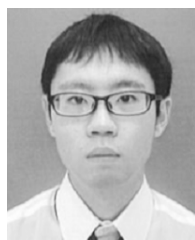
謝辞 本研究はJSPS科研費(JP19H01101, JP19K11923), JST さきがけ(JPMJPR2032), パナソニック株式会社の支援の下で行った。

参考文献

- [1] Dong, M., Guohao, L., Mahbub, H., Wen, H. and K, D.S.: Sensing, Computing, and Communications for Energy Harvesting IoTs: A Survey, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Vol.22, No.2, pp.1222–1250 (2019).
- [2] Neha, G. and Ritu, G.: Energy Harvesting in IoT Devices: A Survey, *International Conference on Intelligent Sustainable Systems (ICISS'17)*, pp.127–131 (2017).
- [3] Sony: FeliCa, available from (<https://www.sony.co.jp/Products/felica/>) (accessed 2020-04-20).
- [4] Mou, X. and Sun, H.: Wireless Power Transfer: Survey and Roadmap, *IEEE 81st Vehicular Technology Conference (VTC'2015 Spring)*, pp.1–5 (2015).
- [5] Xiaolin, M., T, G.D., Rui, Z. and Hongjian, S.: Survey on Magnetic Resonant Coupling Wireless Power Transfer Technology for Electric Vehicle Charging, *IET Power Electronics*, Vol.12, No.12, pp.3005–302 (2019).
- [6] Hui, S.R.: Magnetic resonance for wireless power transfer, *IEEE Power Electronics Magazine*, Vol.3, No.1, pp.14–31 (2016).
- [7] Kurs, A., Karalis, A., Moffat, R., Joannopoulos, J.D., Fisher, P. and Soljacic, M.: Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances, *Science Magazine*, Vol.317, No.82, pp.83–86 (2007).
- [8] Fan, X., Ding, H., Li, S., Sanzari, M., Zhang, Y., Trappe, W., Han, Z. and Howard, R.E.: Energy-ball: Wireless Power Transfer for Batteryless Internet of Things through Distributed Beamforming, *Proc. ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*, Vol.2, No.2, pp.65:1–65:22 (2018).
- [9] Huang, K. and Zhou, X.: Cutting the Last Wires for Mobile Communications by Microwave Power Transfer, *IEEE Communications Magazine*, Vol.53, No.6, pp.65:1–65:22 (2015).
- [10] Maehara, D., Tran, G.K., Sakaguchi, K. and Araki, K.: Experiments Validating the Effectiveness of Multi-point Wireless Energy Transmission with Carrier Shift Diversity, *IEICE trans. Comm.*, Vol.97, No.9, pp.1928–1937 (2014).
- [11] Kassab, H. and Louveaux, J.: Simultaneous Wireless Information and Power Transfer using Rectangular Pulse and CP-OFDM, *IEEE International Conference on Communications (IEEE ICC'19)*, pp.1–6 (2019).
- [12] Asiedu, D.K.P., Mahama, S., Jeon, S.W. and Lees, K.: Joint Optimization of Multiple-Relay Amplify-and-Forward Systems Based on Simultaneous Wireless Information and Power Transfer, *IEEE International Conference on Communications (IEEE ICC'18)*, pp.1–6 (2018).
- [13] Perera, T.D.P., Jayakody, D.N.K., Shree, K.S., Chatzinotas, S. and Li, J.: Simultaneous Wireless Information and Power Transfer (SWIPT): Recent Advances and Future Challenges, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Vol.20, No.1, pp.264–302 (2017).
- [14] Varshney, L.R.: Transporting Information and Energy Simultaneously, *IEEE International Symposium on Information Theory (IEEE ISIT'08)*, pp.1612–1616 (2008).
- [15] 総務省：無線設備規則 (1950).
- [16] Engels, S., Schneider, N.-L., Lefeldt, N., Maira Hein, C., Zapka, M., Michalik, A., Elbers, D., Kittel, A., Hore, P. and Mouritsen, H.: Anthropogenic electromagnetic noise disrupts magnetic compass orientation in a migratory bird, *Nature*, Vol.509, No.7500, pp.353–356 (2014).
- [17] Tanaka, Y., Kanai, K., Ryosuke, H., Hiroshi, S., Yoshio, K., Takuma, I., Hiroyuki, T., Manabu, G., Shoichi, K. and Shinohara, N.: Distributed Microwave Wireless Power Transfer with Backscatter Feedback, *IEEE Wireless Power Transfer Conference (IEEE WPTC'21)*, pp.1–4 (2021).
- [18] 濱政 光, 川崎慈英, 田中勇氣, 木崎一廣, 猿渡俊介, 渡辺尚: バッテリーレスセンサネットワークを実現する電波電力伝送手法の検討, *情報通信学会論文誌*, Vol.62, No.4, pp.1099–1112 (2021).
- [19] 田中勇氣, 金井一輝, 柳場亮祐, 佐藤 浩, 池田拓磨, 谷博之, 梶原正一, 小柳芳雄, 篠原真毅: バックスキャタリングを用いた分散協調型マイクロ波無線電力伝送システムの GNU Radio による実装, *情報通信学会論文誌 B*, Vol.103, No.11, pp.559–570 (2020).
- [20] Kawasaki, J., Hamase, H., Kizaki, K., Saruwatari, S. and Watanabe, T.: Phase-controlled Cooperative Wireless Power Transfer for Backscatter IoT Devices, *IEEE International Conference on Communications (IEEE ICC'20)*, pp.1–6 (2020).
- [21] Kim, J., Clerckx, B. and Mitcheson, P.D.: Prototyping and Experimentation of a Closed-loop Wireless Power Transmission with Channel Acquisition and Waveform Optimization, *IEEE Wireless Power Transfer Conference (IEEE WPTC'17)*, pp.1–4 (2017).
- [22] Kim, J., Clerckx, B. and Mitcheson, P.D.: Signal and System Design for Wireless Power Transfer: Prototype, Experiment and Validation, *IEEE Trans. Signal Processing*, Vol.19, No.11, pp.7453–7469 (2020).
- [23] Shen, S., Kim, J., Song, C. and Clerckx, B.: Wireless Power Transfer With Distributed Antennas: System Design, Prototype, and Experiments, *IEEE Trans. Industrial Electronics*, Vol.68, No.11, pp.10868–10878 (2020).
- [24] Seunghyun, L. and Rui, Z.: Distributed Wireless Power Transfer With Energy Feedback, *IEEE Trans. Signal Processing*, Vol.65, No.7, pp.1685–1699 (2017).
- [25] Seunghyun, L. and Rui, Z.: Distributed Energy Beam-

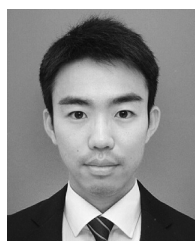
forming with One-Bit Feedback, *IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (IEEE WCNCW'16)*, pp.398–403 (2016).

- [26] Choi, K.W., Ginting, L., Rosyady, P.A., Aziz, A.A. and Kim, D.I.: Wireless-powered Sensor Networks: How to Realize, *IEEE Trans. Wireless Communications*, Vol.16, No.1, pp.221–234 (2016).
- [27] Jie, X. and Zhang, R.: Energy Beamforming with One-bit Feedback, *IEEE Trans. Signal Processing*, Vol.62, No.20, pp.5370–5381 (2016).
- [28] Raghuraman, M., Joao, H., Upamanyu, M. and Gwen, B.: Distributed Transmit Beamforming Using Feedback Control, *IEEE Trans. Information Theory*, Vol.56, No.1, pp.411–426 (2009).
- [29] Marquardt, D.W.: An Algorithm for Least-squares Estimation of Nonlinear Parameters, *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, Vol.11, No.2, pp.431–441 (1963).
- [30] Xiaoran, F., Longfei, S., Richard, H., Yanyong, Z., Yao, P., Jie, X., Yunfei, M. and Xiang-Yang, L.: Towards Flexible Wireless Charging for Medical Implants Using Distributed Antenna System, arXiv preprint arXiv:2001.07644 (2020).
- [31] Kellogg, B., Talla, V., Gollakota, S. and Smith, J.R.: Passive Wi-Fi: Bringing Low Power to Wi-Fi Transmissions, *13th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation (USENIX NSDI'16)*, pp.151–164 (2016).



林 健太郎 (学生会員)

1997 年生。2020 年大阪大学工学部電子情報工学科卒業。2021 年現在、大阪大学大学院情報科学研究科博士前期課程在籍。



濱政 光

1997 年生。2019 年大阪大学工学部電子情報工学科卒業。2021 年大阪大学大学院情報科学研究科博士前期課程修了。



田中 勇気 (正会員)

2013 年神戸大学工学部電気電子工学科卒業。2015 年同大学大学院電気電子工学専攻修士課程修了。同年パナソニック(株)入社。以来、無線給電技術の研究開発に従事。現在、(株)パナソニックシステムネットワークス開発研究所、京都大学大学院工学研究科電気工学専攻博士後期課程。電子情報通信学会、IEEE 各会員。



藤橋 卓也 (正会員)

2012 年静岡大学情報学部情報科学科卒業。2013 年同大学大学院情報科学研究科情報学専攻修了。2016 年大阪大学大学院情報科学研究科情報ネットワーク学専攻修了。博士(情報科学)。2014～2016 年日本学術振興会特別研究員。2014～2015 年 Mitsubishi Electric Research Laboratories 滞在。2017～2019 年愛媛大学大学院理工学研究科助教。2019 年より大阪大学大学院情報科学研究科助教。映像伝送、無線ネットワークに関する研究に従事。2014 年電気通信普及財団テレコムシステム技術賞奨励賞。電子情報通信学会、IEEE 各会員。



猿渡 俊介 (正会員)

2007 年東京大学大学院博士課程修了。博士(科学)。2003～2004 年 IPA 未踏ソフトウェア創造事業。2006～2008 年日本学術振興会学振特別研究員。2007～2008 年イリノイ大学客員研究員。2008～2012 年東京大学先端科学技術研究センター助教。2012～2015 年静岡大学大学院情報科学研究科助教(テニュアトラック)。2015～2016 年静岡大学大学院情報科学研究科講師。2016 年より大阪大学大学院情報科学研究科准教授。専門はワイヤレスネットワーク、センサネットワーク、システムソフトウェア等。2009 年電子情報通信学会論文賞。2010 年情報処理学会山下記念研究賞。電子情報通信学会、IEEE、ACM 各会員。



渡辺 尚 (正会員)

1982 年大阪大学工学部通信工学科卒業。1984 年同大学大学院博士前期課程修了。1987 年同大学院博士後期課程修了。工学博士。同年徳島大学工学部情報工学科助手。1990 年静岡大学工学部情報知識工学科助教授。1996 年静岡大学情報学部情報科学科教授。2008 年同大学創造科学技術大学院教授。2013 年大阪大学大学院情報科学研究科教授。1995 年文部省在外研究員(カリフォルニア大学アーバイン校)。計算機ネットワーク、分散システムに関する研究に従事。情報処理学会理事、電子情報通信学会アドホックネットワーク研究会副委員長等。訳書『計算機設計技法』、『802.11 無線ネットワーク管理』等。IEEE 会員。