

無線給電と位置推定同時実現のための分散協調電波電力伝送システムに関する一検討

林 健太郎¹ 濱政 光¹ 木崎 一廣¹ 田中 勇氣² 藤橋 卓也¹ 猿渡 俊介¹ 渡辺 尚¹

概要：

本稿では、屋内のセンサネットワークにおいて、センサノードに対する電力供給と位置特定を同時に実現する手法について述べる。センサノードへの電力供給に関しては、多数の送電アンテナを用いた電波電力伝送を行う。多数の送電アンテナから放出された電波が、センサノードの位置で強め合うように位相を制御することで、効率的な電力伝送を実現する。各送電アンテナに対する最適な位相制御量は、センサノードから受信する RSSI フィードバックに基づき決定する。さらに、決定された最適な位相制御量の値を用いて、センサノードの位置推定を行う。センサノードの位置で強め合うように制御された位相制御量の値は、送電アンテナとセンサノード間の空間的な位置関係を反映していることを利用する。提案手法をシミュレーションで評価した結果、効率的な電力伝送と、デシメートルレベルの位置推定精度を、同時に達成できることがわかった。

1. はじめに

無線センサネットワークの発展に伴い、屋内における応用が活発になってきている。屋内における無線センサネットワークの利用例として、防犯や物流、情報家電の制御などが考えられる。一方、無線センサネットワークは依然として様々な技術課題を抱えている。本稿では、屋内における無線センサネットワークの利用を想定し、その障壁となっている 2 つの問題を扱う。

1 つ目の問題は、センサノードへの電力供給である。電池をセンサノードに搭載する場合、個々のセンサノードに対する電池交換のコストが大きな問題となる。スリープ時間を大きくしたり、マルチホップ時の無駄を削減したりすることで、センサノードの消費電力を抑えるプロトコルが提案されている [1] もの、抜本的な解決とはならない。

電力供給の問題を解決するために、環境エネルギーを利用したセンサノードの自律駆動を目指す試みがなされている [2] [3]。しかしながら、環境エネルギーを利用する場合、得られる電力が天候や時間帯、場所に左右される点が問題となる。例えば、太陽光から電力を得る方式では、夜間や雨天時は発電ができない。常にセンシングを行うためには充電式のバッテリーを装備する必要があるが、センサノードの製造コストの増加やサイズの肥大化に繋がる。

2 つ目の問題は、センサノードの位置推定である。無線センサネットワークでは、センサノードに無線通信の機能を与えることで、センサノードに設置位置の柔軟性が加わった。センサノードの設置位置を真に自由にするためには、個々のセンサノードが取得した情報の発生源を知ることが重要となる。例えば、気温を測定するセンサノードが窓の近くやヒーターの上にあると、測定値の持つ意味が大きく変わる可能性がある。無線センサネットワークの屋内における利用を想定する場合、デシメートルレベルの位置推定精度が保証されることが望ましい。

位置情報を取得する方法の 1 つとして、全地球測位システム (GPS: Global Positioning System) が挙げられる。GPS では、基準点を利用して誤差を補正する RTK (Real Time Kinematic) 等の技術によって、既にセンチメートルレベルの位置推定精度が達成されている。しかしながら、高精度な GPS 受信機は高価であるため、膨大な数のセンサノードから構成されることもある無線センサネットワークにおいて、個々のセンサノードに GPS 受信機を搭載することは現実的でない。加えて、GPS は衛星から到達する電波の情報をもとに位置情報を取得するシステムなので、屋内での利用には不向きである。

本研究は、センサノードに対する電力供給と位置特定を同時に実現することを目的とする。まずセンサノードへの電力供給に関する問題は、電波電力伝送によって解決する。電波電力伝送とは、送電アンテナが放射した電波を、

¹ 大阪大学大学院情報科学研究科

² パナソニック株式会社

受信側がレクテナ (Rectenna: Rectflying Antenna) を用いて直流電流に変換することで、無線での電力供給を実現する技術である。効率的な電力伝送を実現するために、多数の送電アンテナを用いるとともに、各送電アンテナに対し位相制御を行い、センサノードの位置で複数の電波を重ね合わせる。各送電アンテナに対する位相制御量は、給電対象となるセンサノードからのフィードバックをもとに決定する。さらに、提案するシステムでは、電力伝送で得られた最適な位相制御量の値を用いて、センサノードの位置推定を行う。具体的には、センサノードからのフィードバックをもとに算出された最適な位相制御量が、送電アンテナとセンサノード間の空間的な位置関係を反映することを利用する。提案手法をシミュレーションで評価した結果、効率的な電力伝送と、デシメートルレベルの位置推定精度を達成できることを明らかにした。

以降の構成について説明する。2節では本稿で提案するシステムの全体像について述べる。3節では位相最適化技術について述べる。4節では位置推定技術について述べる。5節では提案手法の評価について述べる。6節で関連研究について述べたあと、7節でまとめとする。

2. 提案手法: 位置推定が可能な分散協調電波電力伝送システム

2.1 システムの概要

本稿で提案する分散協調電波電力伝送システムは

- (1) 電力伝送のための位相最適化手法 (3節)
- (2) 位相最適化を利用したセンサノードの位置推定手法 (4節)

の2つから構成される。

電波電力伝送では、電波の空間伝搬損失が課題となる。図1に、単一の送電アンテナを用いた電波電力伝送を示す。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。したがって、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。出力を大きくすれば、十分な電力を供給できる範囲を広げられるが、送電アンテナが放射できる電力は電波法で定められている [4]。

分散協調電波電力伝送システムでは、多数の送電アンテナを分散して配置するとともに、各送電アンテナに対する位相制御を行うことで、高効率な電力伝送を実現する。図2に、複数の送電アンテナを用いた電波電力伝送を示す。複数の送電アンテナを用いる場合、各送電アンテナが放射した電波の間で干渉が生じる。このとき、各送電アンテナに対する適切な位相制御によって、干渉のパターンを変化させ、給電対象となるセンサノードの位置に建設的干渉を作り出すことができる。

各送電アンテナに対する最適な位相制御量、すなわちセンサノードに最大の電力を供給できる位相制御量を決定するためには、各送電アンテナとセンサノード間の位相差が

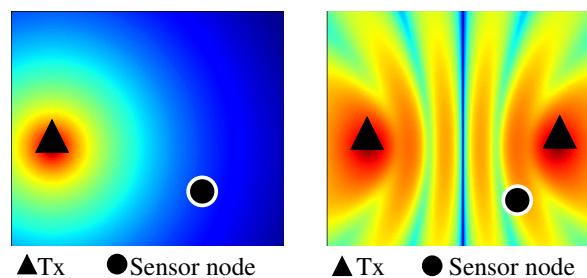


図1: 単一の送電アンテナを用いた電波電力伝送
 図2: 複数の送電アンテナを用いた電波電力伝送

必要となる。位相差を算出する際には、一般に、送電側が既知の信号を送信して、受信側で既知の信号と比較するという方法がとられる。しかしながら、正確な推定には複雑な信号処理が要求されるため、センサノードにおける演算能力や消費電力の制約が問題となる。

分散協調電波電力伝送システムでは、センサノードで容易に測定できる受信電波強度 (RSSI: Received Signal Strength Indication) の値をもとに、最適な位相制御量を算出する。センサノードは、測定した RSSI をフィードバックする。システムはフィードバックをもとに、最適な位相制御量を決定する。算出された最適な位相制御量のもとで、各送電アンテナは電波を放射する。センサノードからの RSSI フィードバックを用いて最適な位相制御量を算出することを、本稿では位相最適化と呼ぶ。位相最適化の具体的な方法については、3節で詳細に述べる。

分散協調電波電力伝送システムでは、算出した最適な位相制御量を電力伝送に用いるだけでなく、給電対象となるセンサノードの位置推定に利用する。センサノードからのフィードバックをもとに決定された最適な位相制御量は、送電アンテナとセンサノード間の空間的な位置関係を反映する。したがって、最適な位相制御量をもとに、センサノードの位置を推定できる。最適な位相セットを用いたセンサノードの位置推定手法については、4節で詳細に述べる。

2.2 システムモデル

図3および図4に、分散協調電波電力伝送システムの全体像を示す。図3に示すように、分散協調電波電力伝送システムでは、多数の送電アンテナを空間に分散して配置する。送電アンテナの台数を n 台とする。

図4に示すように、 n 台の送電アンテナは、1台の中央制御装置に接続される。中央制御装置は、位相制御器を用いて、各送電アンテナが放射する電波の位相を個別に制御する。各送電アンテナに対する位相制御によって、給電対象となるセンサノードの位置に建設的干渉を作り出し、高効率な電力伝送を実現する。 n 台の送電アンテナに対する位相制御量の組み合わせを、位相セット $\Theta = (\theta_1, \dots, \theta_n)$ と呼ぶ。各送電アンテナが放射する電波の周波数は、共通

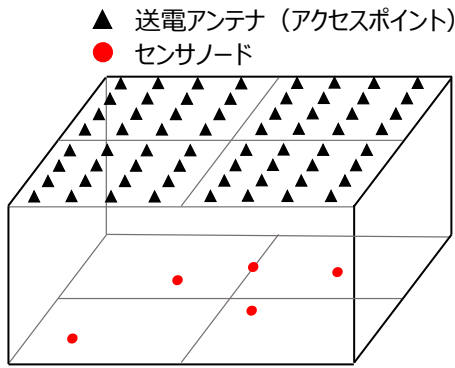


図 3: 分散協調電波電力伝送システム

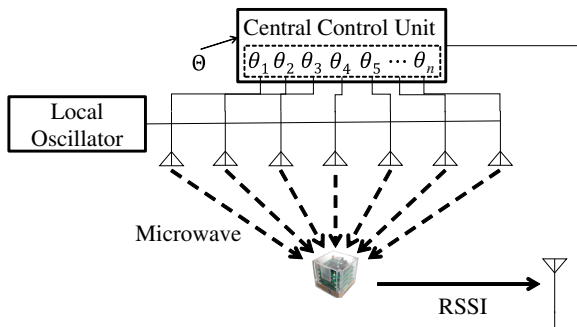


図 4: 分散協調電波電力伝送システムの全体像

の局部発振器を用いることによって同期する。センサノードは RSSI を中央制御装置にフィードバックする。

3. 電力伝送のための位相最適化手法

3.1 受信電力の算出と位相制御の影響

まず、 n 台の送電アンテナが電波を放射するときの、センサノードの受信電力を算出する。電波伝搬モデルとして、自由空間を想定する。 A_i を送電アンテナ i から放射された信号のセンサノード上での電力、 ϕ_i を送電アンテナ i とセンサノード間の伝搬経路上の位相シフト量とする。このとき、送電アンテナ i から放射された電波について、センサノード上における定常波 w_i は、次の (1) 式で表される。

$$w_i = A_i e^{j\phi_i} \quad (1)$$

n 台の送電アンテナから放射された電波が干渉することで、センサノードへの供給電力 y は、次の (2) 式で表される。

$$y = \left| \sum_{i=1}^n w_i \right| = \left| \sum_{i=1}^n A_i e^{j\phi_i} \right| \quad (2)$$

次に、位相セット $\Theta = (\theta_1, \dots, \theta_n)$ を用いた位相制御を行う場合に、1 台のセンサノードが受信する電力を算出する。送電アンテナ i に対して θ_i の位相制御を加えることによって、送電アンテナ i とセンサノード間の間の位相シ

フト量 φ_i は次の (3) 式で表される形になる。

$$\varphi_i = \phi_i + \theta_i \quad (3)$$

したがって、位相セット Θ を用いるときの供給電力 $y(\Theta)$ は、次の (4) 式で表される。

$$y(\Theta) = \left| \sum_{i=1}^n A_i e^{j\varphi_i} \right| = \left| \sum_{i=1}^n A_i e^{j(\phi_i + \theta_i)} \right| \quad (4)$$

(4) 式を最大とする $\Theta = (\theta_1, \dots, \theta_n)$ を、最適位相セット Θ_{opt} と呼ぶ。

(4) 式は $\phi_i + \theta_i$ の値がすべての i について等しいとき、すなわち、次の (5) 式の関係が成り立つとき、最大値 $\sum_{i=1}^n A_i$ をとる。

$$\theta_1 + \phi_1 = \theta_i + \phi_i \quad \forall i \quad (5)$$

3.2 位相最適化アルゴリズム

分散協調電波電力伝送システムでは、センサノードから受信する RSSI フィードバックに基づき、位相最適化を実現する。具体的には、位相セットを更新した電波の放射と、センサノードによる RSSI フィードバックを繰り返す。センサノードに対して最大の電力を供給できる位相セット、すなわち RSSI フィードバックを最大とする位相セットを、最適位相セット $\Theta_{\text{opt}} = (\hat{\theta}_1, \dots, \hat{\theta}_n)$ とする。

分散協調電波電力伝送システムにおける位相最適化は、以下の手順に沿って、最適な位相制御量を送電アンテナごとに逐次的に決定することによって行われる。

- (1) 送電アンテナ 1 だけが電波の放射を行う。一般性を失うことなく、送電アンテナ 1 に対する最適な位相制御量 $\hat{\theta}_1$ を 0 とする。
- (2) 送電アンテナ 2 が電波の放射を開始する。
- (3) 送電アンテナ 2 に対する位相制御量を変化させつつ、センサノードから RSSI フィードバックを受信することを繰り返す。センサノードの RSSI を最大とする位相制御量を、送電アンテナ 2 に対する最適な位相制御量 $\hat{\theta}_2$ とする。以降、送電アンテナ 2 は位相制御量 $\hat{\theta}_2$ のもとで電波を放射する。
- (4) 送電アンテナ 3 が電波の放射を開始する。
- (5) 送電アンテナ 3 に対する位相制御量を変化させつつ、センサノードから RSSI フィードバックを受信することを繰り返す。センサノードの RSSI を最大とする位相制御量を、送電アンテナ 3 に対する最適な位相制御量 $\hat{\theta}_3$ とする。以降、送電アンテナ 3 は位相制御量 $\hat{\theta}_3$ のもとで電波を放射する。
- (6) 同様の手順を、送電アンテナ n まで繰り返す。

上記の手順では、次の (6) 式の最大化を $i = 2$ から n ま

Algorithm 1 位相最適化

```

1: startRF(1,0)
2: for  $i = 2$  to  $n$  do
3:    $a \leftarrow 0$ 
4:   for  $j = 0$  to  $P - 1$  do
5:      $\theta_i \leftarrow 2\pi \frac{j}{P}$ 
6:     startRF( $i, \theta_i$ )
7:      $t \leftarrow \text{getRSSI}()$ 
8:     if  $a < t$  then
9:        $a \leftarrow t$ 
10:       $\hat{\theta}_i \leftarrow \theta_i$ 
11:    end if
12:    startRF( $i, \hat{\theta}_i$ )
13:  end for
14: end for

```

で繰り返すことによって、最適位相セットを求めている。

$$y(\theta_i) = \left| \sum_{k=1}^{i-1} A_k e^{j(\phi_k + \theta_k)} + A_i e^{j(\phi_i + \theta_i)} \right| \quad (6)$$

$\hat{\theta}_1$ から $\hat{\theta}_{i-1}$ は既に決定されていることに注意が必要である。 $\hat{\theta}_1 = 0$ とし、送電アンテナ $i-1$ までの位相最適化が正しく行われていると仮定した場合 (6) 式は

$$y(\theta_i) = \left| \sum_{k=1}^{i-1} A_k e^{j\phi_k} + A_i e^{j(\phi_k + \theta_k)} \right| \quad (7)$$

となる。

次に、(7) 式の変数 θ_i に対する最大化を考える。本稿では、最も簡単な方法として変数 θ_i に対する全探索を想定する。まず 0 から 2π の範囲をとる位相制御量を P 段階に分割する。 P 種類の位相制御量は $0, 2\pi \frac{1}{P}, \dots, \frac{P-1}{P}$ と表される。送電アンテナ i に対する位相制御量を P 段階にわたって変化させる。位相を変化させるたびに、センサノードに RSSI フィードバックを要求する。最終的に得られた合計 P 種類の RSSI フィードバックが得られる。RSSI フィードバックを最大とした位相を、送電アンテナ i に対する最適位相 $\hat{\theta}_i$ として採用する。次に、送電アンテナ $i+1$ に対する最適位相 $\hat{\theta}_{i+1}$ の探索に進む。

以上の手続きを、アルゴリズム 1 に示す。アルゴリズム 1 において、関数 startRF(i, p) は、送電アンテナ i が位相制御量 p のもとで電波を放射することを意味する。また、関数 getRSSI() は、センサノードに対して RSSI フィードバックを要求することを意味する。

アルゴリズム 1 に沿って位相最適化を行うとき θ_i の最適化には P 回の RSSI フィードバックが要求される。したがって、 n 台の送信アンテナに対する最適位相セット全体を決定するために要求される RSSI フィードバック回数は nP 回である。

4. 位相最適化を利用したセンサノードの位置推定手法

(5) 式から、送電アンテナ i に対する最適位相 θ_i は、送

電アンテナ i から放射された電波がセンサノードに到達するまでに受ける位相シフト量に依存する。また、送電アンテナ i とセンサノード間で生じる位相シフト量は、2点間の距離の情報を含む。したがって、最適な位相セットを構成する n 個の位相制御量をもとに、各送電アンテナとセンサノード間の空間的な位置関係を知ることができる。

空間に n 台の送電アンテナがあり、送電アンテナ i の座標を (x_i, y_i, z_i) とする。また、測位対象となるセンサノードの座標を $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})$ とする。

(5) 式から、次の (8) 式が成り立つ。

$$\theta_i - \theta_1 = \phi_1 - \phi_i \quad \forall i \quad (8)$$

また、送電アンテナ i から放射された電波が、センサノードに到達するまでに受ける位相シフト量 ϕ_i は、次の (9) 式で表される。

$$\phi_i = \text{mod} \left(2\pi \frac{\hat{L}_i}{\lambda}, 2\pi \right)$$

$$\text{where } \hat{L}_i = \sqrt{(\hat{x} - x_i)^2 + (\hat{y} - y_i)^2 + (\hat{z} - z_i)^2} \quad (9)$$

λ は電波の波長、 n_i は環境のマルチパスによる影響を表している。 \hat{L}_i は、送電アンテナ i とセンサノードの2つの位相中心間のユークリッド距離である。

(8) 式および (9) 式から、センサノードの座標 $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})$ は、次の (10) 式を最小化する (x, y, z) となる。

$$f(x, y, z) = \sum_{i=1}^n \left(\text{mod} \left(\frac{2\pi}{\lambda} (L_1 - L_i), 2\pi \right) - (\hat{\theta}_1 - \hat{\theta}_i) \right)^2$$

$$\text{where } L_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} \quad (10)$$

(10) 式を最小とする座標 (x, y, z) は、空間上の点を全探索することによって求める。具体的には、空間をグリッドに分割したうえで、各グリッドに対して $f(x, y, z)$ を計算し、 $f(x, y, z)$ を最小とする座標を推定座標とする。

全探索によってセンサノードの位置推定を行う場合、1度の推定に要求される計算量は $\mathcal{O}(wdhn)$ と表される。 w, d, h はそれぞれ、空間の縦・横・高さを何分割するかを表している。 n は位置推定に用いる送電アンテナの本数である。

5. 評価

5.1 位相最適化性能

シミュレーションを行って、分散協調電波電力伝送システムの位相最適化性能を評価した。評価対象として、3.3節で述べた位相最適化アルゴリズムに加え、供給電力の参考として、位相制御を行わない手法を考えた。位相制御の分解能 P を 4, 16, 64 の3通りとし、それぞれについて

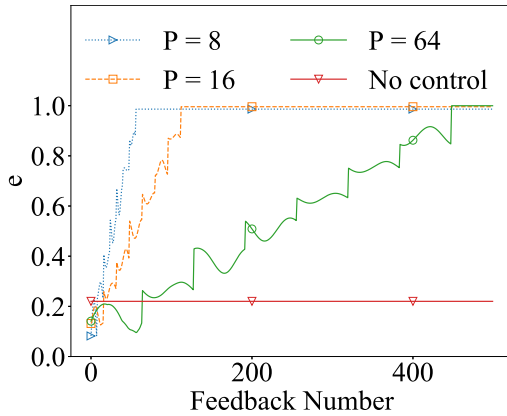


図 5: 位相最適化が進む様子 (雑音なし)

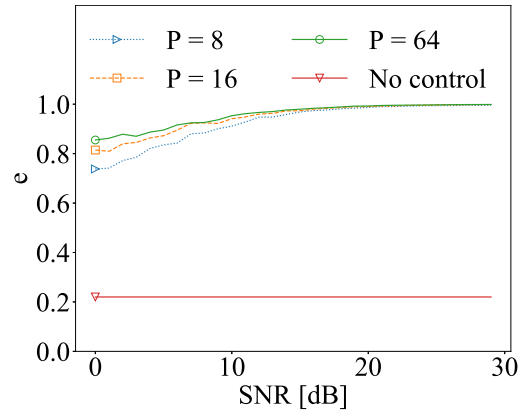


図 6: 雑音と位相最適化後の供給電力の関係

評価を行った。送電アンテナを 8 台、受電アンテナを 1 台とした。評価においては、送電アンテナ i から放射される電波の受電アンテナ上での電力 A_i 、および送電アンテナ i と受電アンテナ間の伝搬パスによる位相シフト量 ϕ_i をランダムに設定しながら、各位相分解能について位相最適化を 1000 回行った。 A_i や ϕ_i を変えることは、アンテナの位置を変えることに対応する。

本評価では、ある位相セットを用いたときの供給電力 Q に対し、効率 e を次の (11) 式で定義する。

$$e = \frac{Q}{Q_{\text{opt}}} \quad (11)$$

Q_{opt} はすべての送電アンテナに対して最適な位相制御を行ったときの RSSI であり $Q_{\text{opt}} = \sum_{i=1}^n A_i$ と表される。 e は $0 \leq e \leq 1$ の範囲をとり、すべての送電アンテナから放射される電波について位相が受電アンテナ上で完全に一致したときに $e = 1$ となる。

図 5 に、雑音がない場合において、位相最適化を行ったときの供給電力の推移を示す。横軸は RSSI フィードバックの回数を表している。縦軸は、対応するステップにおける RSSI である。No Control は、位相制御を行わない手法であるため、供給電力は一定となっている。

図 5 から、2 つのことがわかる。1 つ目は、位相最適化によって供給電力が増加することである。位相制御を行わない場合の効率は約 0.23 であった。一方で位相最適化を行う場合、各送電アンテナに対する最適位相制御量が逐次的に算出され、供給電力が徐々に増加する。最終的に、すべての送電アンテナに対する最適な位相制御量が算出され、効率の値が 1 となる。

2 つ目は、位相制御の分解能が位相最適化後の供給電力に与える影響は小さいことである。位相制御の分解能が高いほど、より細かく位相を探索できるので、供給電力は増加すると考えられる。しかしながら、位相階調 4 の場合でも約 0.9 以上、16 の場合で 0.95 以上、64 の時点で 0.99 以上の効率を達成した。

次に、センサノードがフィードバックする RSSI に雑音

が生じる場合を考え、位相最適化アルゴリズムの雑音耐性を検証した。RSSI の測定精度や、周囲の電波の干渉、通信路上で生じる誤りなどの影響を雑音として扱い、信号対雑音比 (SNR: Signal Noise-to-Ratio) で雑音の大きさを定めた。SNR の大きさは 0 から 30 dB まで 1dB 刻みで大きくしたものと、雑音が生じない場合 ($= \infty$) の 31 パターンとした。具体的には RSSI フィードバックに対する SNR を x dB とした場合、正しい RSSI 値に対して次の (12) 式のように雑音を加わった RSSI をフィードバックとして中央制御装置が受信するとした。

$$\hat{y}_{\text{RSSI}} = y_{\text{RSSI}} \cdot (1 + n) \quad (12)$$

ここで、雑音 n は平均 0、分散 $10^{-x/10}$ の正規分布にしたがうとする。評価においては、 A_i 、および ϕ_i をランダムに設定しながら、各 SNR 値および各位相分解能に対し位相最適化を 1000 回行った。

図 6 に、各 SNR が位相最適化に与える影響を示す。横軸は SNR を表している。縦軸は、対応する SNR における位相最適化によって得られた最終的な効率 e の値である。No Control は、位相制御を行わない手法であるため、SNR によらず供給電力は一定となっている。

図 5 から、2 つのことがわかる。1 つ目は、雑音が大きいくほど、位相最適化によって得られる最終的な供給電力が減少することである。雑音によって誤った RSSI をフィードバックとして受信するとき、本来の最適位相ではない位相を最適として判断することがある。具体的には、雑音が RSSI フィードバックを大きくする方向に働き、アルゴリズム 1 における 8 行目の比較を誤る可能性がある。

2 つ目は、位相分解能が高いほど、雑音耐性が高いことである。SNR が小さい場合、位相分解能 P の値が 8 のときの平均効率は約 0.65 であったのに対し、 P の値が 64 のときは、平均効率は約 0.85 であった。一方、SNR が 20dB を超えると、いずれの位相分解能においても、雑音の影響はほとんど無いことがわかる。

以上の議論から、分散協調電波電力伝送システムにおい

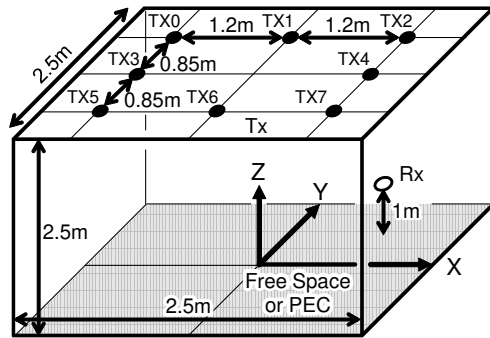
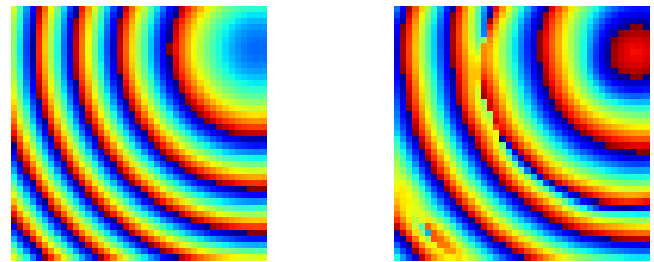


図 7: アンテナ配置



(a) 自由空間 (b) 床面反射が存在

図 8: 位置と位相差の関係

ては、大きな雑音が生じる環境ではない場合、低分解能の位相制御器でも十分効率的な電力伝送が実現できることがわかった。本結果は、位相最適化の高速化や、位相制御器の低コスト化につながるものである。

5.2 位置推定精度

次に、分散協調電波電力伝送システムにおける位置推定精度の評価を行った。評価においては、レイトレースシミュレーションによって、位相差のデータを取得した。受電アンテナからレイラウンチングを行うことにより、送受電アンテナ間の伝搬チャネルを計算した。シミュレータには CST Studio Suite 2019 (Dassault Systèmes) を用いた。空間の大きさを $2.5\text{m} \times 2.5\text{m} \times 2.5\text{m}$ とした。床面 ($Z = 0$) を自由空間および完全導体とし、それ以外の空間を自由空間とした。反射回数は 1 回とした。

アンテナ配置を図 7 に示す。送電アンテナの台数を 8 台とし、図 7 に示すような配置で、天井に設置されているとした。受電アンテナの台数は 1 台とし、 $-1.25 \leq X \leq 1.25, -1.25 \leq Y \leq 1.25, Z = 1.0$ の平面内に $62.5\text{mm} (= 0.19\lambda)$ 間隔で測定点を取り、各位置のもとで位置推定を行った。アンテナは、送電側、受電側ともにダイポールアンテナとした。

評価においては、位相最適化が正しく行われると仮定した。すなわち、送電アンテナと受電アンテナ間の位相差と、最適位相の間に (8) 式が成り立つものとした。空間を探索する際の粒度を 5cm と 1cm の 2 通りとし、それぞれについて評価を行った。

図 9 および図 10 に、位置推定誤差の累積分布を示す。図 9 が探索の粒度を 5cm とした場合、図 10 が探索の粒度を 1cm とした場合である。

結果から、2 つのことがわかる。1 つ目は、位置推定精度は探索粒度が細かいほど高くなることである。具体的には、推定誤差が 30cm 以内である割合に注目したとき、探索粒度が 5cm の場合は自由空間のとき 95% 、床面反射がある場合 90% であった。一方、探索粒度が 1cm の場合には、推定誤差が 30cm 以内である割合は、自由空間のとき

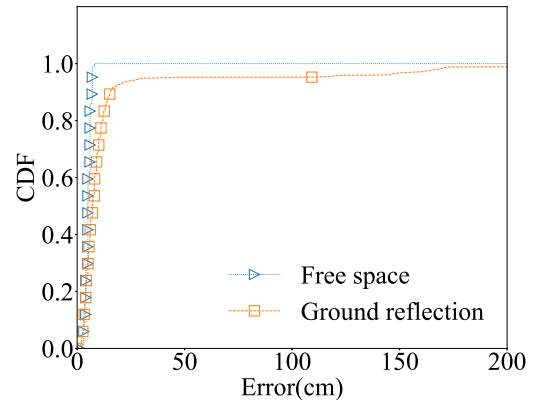


図 9: 位置推定誤差の累積分布 (探索粒度が 5cm の場合)

100% 、床面反射があるとき 95% であった。

2 つ目は、床面反射があると、位置推定精度が低下することである。床面反射によって生じるマルチパスフェージングに起因して、距離に基づく位相と実際の位相の間でずれが生じる。図 8(a) および図 8(b) に、自由空間、および床面反射がある場合における位置と位相差の関係を示す。自由空間である場合、図 8(a) に示すように、位相差は規則的な広がりを持つ。一方、床面反射がある場合、図 8(b) に示すように、マルチパスフェージングによって、位相差と距離の関係が崩れる部分がある。本手法は位相差をもとに距離を逆算するものなので、位置と位相差が図 8(b) のような関係にある場合、誤った推定をする可能性が高くなる。

また、1 度の位置推定に要する時間は、Intel Core i5 内蔵のノート PC のもとで、探索粒度が 5cm の場合は約 0.003 秒、 1cm の場合は約 0.6 秒であった。なお、位置推定に必要なものは最適位相セットのみであるため、最適位相セットを保存しておけば、オフラインで行うことができる。

次に、最適位相を求める際の位相分解能が、位置推定精度に与える影響を評価した。評価においては、位相制御器の分解能として $4, 16, 64, \infty$ の 4 通りを仮定して、それぞれの場合で位置推定を行った。図 11 に、位相制御の分解能と位置推定精度の関係を示す。横軸が推定誤差、縦軸が CDF である。座標の粒度を 5cm とし、床面を自由空間とした。結果から、位相制御の分解能が位置推定精度に与える影響は小さく、 16 程度で十分であることがわかる。5.1

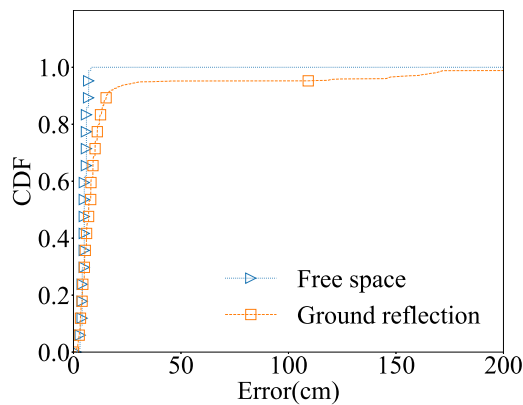


図 10: 位置推定誤差の累積分布 (探索粒度が 1 cm の場合)

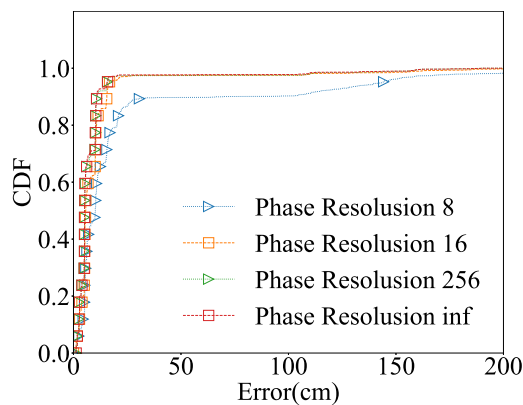


図 11: 位相分解能が位置推定誤差に与える影響. 座標の粒度が 5cm, 床面は自由空間.

節の結果とあわせて, 分散協調電波電力伝送システムにおいては, 高い位相分解能は要求されないことがわかった.

6. 関連研究

本研究は, 電波電力伝送, および無線信号を利用した位置測位技術と関連する.

6.1 電波電力伝送

電波電力伝送は, 無線センサネットワークとの親和性が非常に高い技術である. 電磁誘導や電磁界共鳴を用いる他の無線電力伝送技術と比較して, 長距離への給電が可能である. さらに, 電力伝送に変調波を用いることで, 電力伝送と同時にデータ通信ができる [5,6]. 電力伝送とデータ通信を並行して行う技術は SWIPT (Simultaneous Wireless Information and Power Transfer) と呼ばれる.

電波電力伝送が実用化された技術として, RFID が挙げられる. RFID は, 外部から放射された電波を利用して, タグが受動的に通信を行うシステムである. 文献 [7] 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. より大規模なシステムとしては, 人工

衛星に搭載した装置で太陽エネルギーを収集し, 電波電力伝送によって地上に伝送する宇宙太陽光発電システムに関する検討も進められている [8].

複数の送電アンテナを空間に分散して配置することで, 電波電力伝送の給電範囲や給電効率を拡大する試みは多数存在する [9-11]. 分散アンテナ型のシステムは, ビームフォーミングによって対象に指向性のある電波を作り出す方法と比較すると, 電波の空間伝搬損失やシャドーイングによる影響の大きな改善が見込める利点がある. 文献 [9] では, 複数の送電アンテナが自身の放射する電波に対する位相制御量を変化させ続ける手法が提案されている. 位相が絶えず変化し続けることで, 各地で建設的干渉と破壊的干渉が平均的に生じ, 干渉の影響を取り除くことができる. 一方で本稿では, 各送電アンテナが放射する電波の周波数を同期したうえで, 位相を適切に制御することで, 給電対象の位置に建設的干渉を意図的に作り出す手法を提案している. 送電アンテナの台数を n としたとき, 周波数の同期を行うことによって, 同期しない場合と比較して供給電力を最大 n 倍改善できることが示されている [11].

6.2 無線信号を利用した位置推定技術

無線信号を利用した位置推定手法は, レンジベースとレンジフリーに分けられる. レンジベースでは, 既知の座標に配置された複数のアンカーノードからターゲットまでの距離を, 何らかの方法で間接的に推定する. マルチラレーションを行うことで, 推定した距離からターゲットの位置を知ることができる. レンジベースは, コストが高い一方, 高精度の位置推定が可能である. 主に屋内において使用される. レンジフリーでは, 複数の受信機を使用し, ホップ数や通信可能性などをもとに, 位置推定を行う. レンジベースと比較するとコストが低い一方, 推定精度は低いとされる. 主に屋外において使用される.

代表的なレンジベースの手法として, 受信電波強度 (RSSI) [12], 到達時間 (ToA: Time of Arrival) [13], 到達時間差 (TDoA: Time Difference of Arrival) [14], 位相差 (PDoA: Phase Difference of Arrival) [15] [16] [17] [18] を利用した技術が挙げられる. RSSI を用いる手法では, それぞれのアンカーノードが放射した電波の強度に対する受信電波強度をもとに, アンカーノードからターゲットまでの距離を推定する. 自由空間では, 送電アンテナから放射された電波の強度に対する受信電波強度は, フリスの伝達公式にしたがう. フリスの伝達公式と測定した RSSI をもとに, 送信機と受信機間の距離 d を推定することが可能である. RSSI は測定が簡易であるため, 実現コストが低い点が特徴である. 一方, マルチパスに起因する精度の低下が問題となる.

到達時間や到達時間差を用いる方法では, 電波が到達するまでの時間をもとに, 送信機と受信機間の距離を推定す

る [13]. 到達時間ベースの位置推定技術は GPS で使用されており, 高い精度の推定が可能である. 一方, 高精度な時刻同期が必要となるため, 無線センサネットワークを想定する場合には, ハードウェアのコストが問題となる.

本稿で提案した位置推定手法は, PDoA ベースの手法である. 具体的には, アンカーノードとターゲット間でやりとりされる電波の位相差から, 2 点間の距離を推定する. 文献 [15] では, 位相ベースの位置推定が可能であることが示されている. 一方, 位相が観測できる範囲は 0 から 2π であるため, 同一の位相観測値をとる点が 1 波長ごとに存在する. 位相を用いた位置推定を行う際には, 位相周期に起因する曖昧さを取り除く必要がある. 例えば文献 [17] では, 1 台の移動可能なアンカーノードが, 電波の半波長よりも短い間隔でターゲットから到来する電波の位相を測定することで, 位相周期による曖昧さを取り除く手法が提案されている. しかしながら, 無線センサネットワークを想定するとき, 送電アンテナが高密度に配置されていたり, 常に移動したりする環境は, コストの面から考えにくい.

本稿で提案した位置推定手法は, 効率的な電波電力伝送を行うために算出した最適な位相制御量を, 位置推定に用いる点が特徴である. 本手法は位置推定を行うための追加のハードウェアが要求されず, 既存の電波電力伝送のシステムに適用できる. 位相周期の曖昧さに関しては, 得られた位相差を 2π で割った剰余をとることで取り除いている.

7. おわりに

本稿では, 屋内における無線センサネットワークが抱えるセンサノードの電源問題, およびセンサノードの位置推定問題を解決するために, 分散協調電波電力伝送システムを提案した.

謝辞

本研究は JSPS 科研費 (JP19H01101, JP19K11923, 18H03231) の支援の下で行った.

参考文献

[1] P. Huang, L. Xiao, S. Soltani, M.W. Mutka, and N. Xi, "The Evolution of MAC Protocols in Wireless Sensor Networks: A Survey," *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol.15, no.1, pp.101–120, April 2013.

[2] L.J. Chien, M. Driberg, P. Sebastian, and L.H. Hiung, "A Simple Solar Energy Harvester for Wireless Sensor Networks," 2016 6th International Conference on Intelligent and Advanced Systems (ICIAS 2016), pp.1–6, August 2016.

[3] K. Yoshihiro, B. Xiaoying, S. Ryo, V. Rushi., T.M. M., and A. Tohru, "Power Harvesting From Microwave Oven Electromagnetic Leakage," *Proceedings of the 15th International Conference on Ubiquitous Computing (UbiComp 2013)*, pp.373–382, September 2013.

[4] 総務省, "無線設備規則," November 1950.

[5] H. Kassab, and J. Louveaux, "Simultaneous Wireless In-

formation and Power Transfer using Rectangular Pulse and CP-OFDM," 2019 IEEE International Conference on Communications (IEEE ICC'19), pp.1–6, May 2019.

[6] V.L. R, "Transporting Information and Energy Simultaneously," 2008 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT 2008), pp.1612–1616, July 2008.

[7] J. Smith, A. Sample, P. Powledge, S. Roy, and A. Mamishev, "A Wirelessly-powered Platform For Sensing And Computation," 2006 Proceedings of International Conference on Ubiquitous Computing (IUCC' 06), pp.495–506, 2006.

[8] X. Li, B. Duan, L. Song, Y. Zhang, and W. Xu, "Study of Stepped Amplitude Distribution Taper for Microwave Power Transmission for SSPS," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol.65, no.10, pp.5396–5405, October 2017.

[9] M. Daiki, T.G. Khanh, S. Kei, A. Kiyomichi, and F. Minoru, "Experiments Validating the Effectiveness of Multi-point Wireless Energy Transmission with Carrier Shift Diversity," *IEICE transactions on Communication*, vol.97, no.9, pp.1928–1937, September 2014.

[10] S. Lee, and R. Zhang, "Distributed Wireless Power Transfer With Energy Feedback," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol.65, no.7, pp.1685–1699, December 2017.

[11] 田中勇氣, 金井一輝, 加場亮祐, 池田拓磨, 梶原正一, 谷博之, 小柳芳雄, "分散協調型マイクロ波無線電力伝送システムに関する実験的検討," 電子情報通信学会ソサイエティ大会, p.1, September 2019.

[12] S. Sadowski, and P. Spachos, "RSSI-Based Indoor Localization With the Internet of Things," *IEEE Access*, vol.6, no.4, pp.30149 – 30161, June 2018.

[13] S. Wu, S. Zhang, and D. Huang, "A TOA-Based Localization Algorithm With Simultaneous NLOS Mitigation and Synchronization Error Elimination," *IEEE Sensors Letters*, vol.3, no.3, pp.1–4, April 2019.

[14] M. Yang, D.R. Jackson, J. Chen, Z. Xiong, and J.T. Williams, "A TDOA Localization Method for Nonline-of-Sight Scenarios," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol.67, no.8, pp.2666 – 2676, January 2019.

[15] C. Hekimian-Williams, B. Grant, X. Liu, Z. Zhang, and P. Kumar, "Accurate Localization of RFID Tags Using Phase Difference," 2010 IEEE International Conference on RFID (IEEE RFID 2010), pp.1–8, April 2010.

[16] A. Naz, H.M. Asif, T. Umer, and B.S. Kim, "PDOA Based Indoor Positioning Using Visible Light Communication," *IEEE Access*, vol.6, no.30, pp.7557 – 7564, January 2018.

[17] H. Wu, B. Tao, Z. Gong, Z. Yin, and H. Ding, "A Fast UHF RFID Localization Method Using Unwrapped Phase-Position Model," *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol.16, no.4, pp.1698–1707, February 2019.

[18] E. DiGiampaolo, and F. Martinelli, "Mobile Robot Localization Using the Phase of Passive UHF RFID Signals," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol.61, no.1, pp.365–376, February 2014.