

二次元マルチホップ無線電力伝送における 受電器までの高さを考慮した位置推定

大竹 晋資[†] 島田 晃郎[†] 宮路 祐一^{††} 上原 秀幸^{†††} 大平 孝^{††}

[†] 豊橋技術科学大学大学院 工学研究科 電気・電子情報工学専攻 〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1

^{††} 豊橋技術科学大学大学院 電気・電子情報工学系 〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1

E-mail: [†]{ohtake,shimada}@comm.ee.tut.ac.jp, ^{††}miyaji@ee.tut.ac.jp, ^{†††}{uehara,ohira}@tut.jp

あらまし 磁界共鳴方式による二次元マルチホップ無線電力伝送では、受電器の位置に応じて使用する中継器を選択することで高い効率で電力伝送することができる。そのため、中継器を用いた電力伝送では受電器の位置を知ることが必要となる。我々はこれまで、受電器の設置高さが一定である場合について位置推定の検討を行ってきた。本稿では、二次元マルチホップ電力伝送において受電器の高さを考慮して位置推定精度を評価する。位置推定には反射係数を特徴量とした位置指紋方式を用いる。電磁界シミュレーションの結果より、学習の際に受電器を設置した高さよりも高い位置で推定精度が低下すること、一方、学習の際よりも低い位置では高い推定精度を保つことが示された。

キーワード 無線電力伝送 (WPT), 磁界共鳴結合, マルチホップ, 位置推定, 位置指紋

Location Estimation Considering Receiver Height in 2D Multi-hop Wireless Power Transfer

Shinsuke OHTAKE[†], Akiro SHIMADA[†], Yuichi MIYAJI^{††},

Hideyuki UEHARA^{††}, and Takashi OHIRA^{††}

[†] Graduate Program of Electrical and Electronic Information Engineering, Toyohashi University of Technology, 1-1 Hibarigaoka Tenpaku-cho, Toyohashi, Aichi 441-8580 Japan

^{††} Dept. of Electrical and Electronic Information Engineering, Toyohashi University of Technology, 1-1 Hibarigaoka Tenpaku-cho, Toyohashi, Aichi 441-8580 Japan

E-mail: [†]{ohtake,shimada}@comm.ee.tut.ac.jp, ^{††}miyaji@ee.tut.ac.jp, ^{†††}{uehara,ohira}@tut.jp

Abstract Two-dimensional multi-hop wireless power transfer via magnetic resonance is able to transmit electrical energy with high efficiency by selecting intermediate couplers in accordance with the location of a receiver. Therefore estimating receiver's location is required for power transfer using intermediate couplers. In this paper, we evaluate the location estimation accuracy considering receiver height in two-dimensional multi-hop wireless power transfer. We use a fingerprinting method using reflection coefficient as a feature value for location estimation. As results of electromagnetic simulation, estimation accuracy is degraded when the receiver height is higher than learned point. On the other hand, estimation accuracy maintains high precision when the receiver height is lower than learned point.

Key words wireless power transfer (WPT), magnetic resonant coupling, multi-hop, location estimation, fingerprinting

1. ま え が き

現在、我々はノートパソコンや携帯電話など様々なモバイル機器を使用している。これらの機器はバッテリーによって動作しているが、バッテリーを充電するには電力供給ケーブルを

接続する必要があり、移動範囲や同時に電力供給できる機器の数が制限される。そこで、電力供給にケーブル接続を必要としない無線電力伝送が研究されている。

無線電力伝送として電動歯ブラシや電気シェーバーなどには電磁誘導方式が利用され、製品化されている。電磁誘導方式は

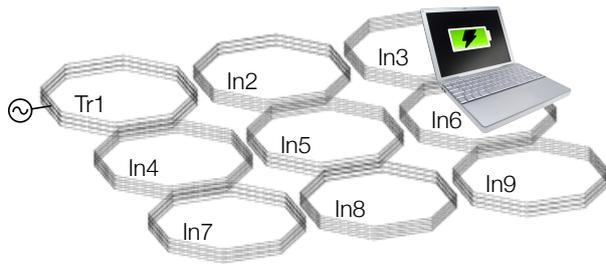


図1 二次元マルチホップ無線電力伝送

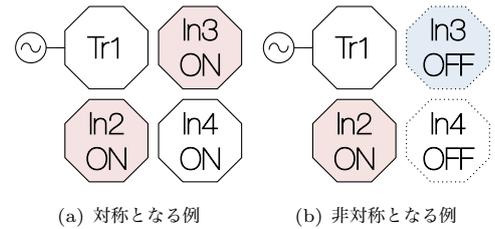
Fig. 1 Two-dimensional multi-hop wireless power transfer.

高効率で電力伝送を行うことができるが、伝送範囲が狭く、送電に用いるコイルが同軸に設置されていなければ電力を送ることができないという問題がある。一方、2007年にMITのグループは磁界共鳴結合を用いることで送電器から2m離れた受電器に電力伝送し、60Wの電球を点灯することに成功した[1]。この手法は磁界共鳴方式といい、電磁誘導方式に比べて長い距離の電力伝送が可能であることから、新たな無線電力伝送の技術として注目されている。

磁界共鳴方式の無線電力伝送では中継器を用いることで電力伝送距離を拡張することが可能である[2]。また、図1に示すように、複数の中継器を平面格子状に配置することで広い範囲へ電力伝送を行うことができる[3]。このように水平方向に電力をマルチホップして伝えていく二次元マルチホップ無線電力伝送を利用することで、室内のどこでもモバイル機器を充電可能になることが期待される。しかしながら二次元マルチホップ無線電力伝送では、受電器をどの中継器または送電器の上に設置するかによって著しく伝送効率が変化するという問題がある。文献[4]ではこの問題を理論的に解析しており、送電器から受電器までの経路差によって伝送効率が変化することを示している。この問題は受電器の設置位置に応じて使用する中継器を選択することで解決することができる。文献[5]では、受電器が設置された位置と送電器を対角とした範囲の中継器(図1の例ではIn2~In6)のみを使用する仮想パス制御を行うことで、電力伝送効率を改善することが可能であると述べられている。また、文献[6]では、受電器に対して単一の経路を作るように中継器を選択することで複数の受電器への公平な電力伝送が可能であると述べられている。

受電器の位置に応じた中継器の選択を行うためには、受電器がどの中継器または送電器の上に設置されているかを推定する必要がある。位置推定の技術には電波、超音波、赤外線などを用いた方法がある。また、これらの位置推定には、受信信号強度、到来時間差、到来角を測定して三辺測量や三角測量を行う方法[7]と位置指紋方式[8,9]とがある。これらの方法は位置推定される側が信号を発生する必要がある。そのため、位置推定に必要な信号を発生させられない機器やバッテリー残量がない機器の位置を推定することができないという問題が考えられる。

磁界共鳴方式の電力伝送システムを用いて位置推定する方法が提案されており、この方法では位置推定のために機器を搭載する必要がなくなる。文献[10]では反射係数から磁界共鳴する結合器間の距離を測定する距離センサをアレー化して、各共振



(a) 対称となる例 (b) 非対称となる例

図2 使用する中継器の変更による位置の区別

Fig. 2 Distinction of location by the change of intermediate couplers to use: (a) symmetry, (b) asymmetry.

器からの距離を用いて三辺測量によって位置を推定する方法を提案している。この方法は、平面格子状に配置した複数の送電器を順番に1つずつ動作させることで距離の測定を行う。一方、二次元マルチホップ無線電力伝送では格子状に配置した結合器の内1つを送電器、残りをの中継器として用いるため、受電器は複数の中継器、送電器と結合する。そのため、それぞれの結合器から受電器への距離を測定することは難しい。二次元マルチホップ無線電力伝送において受電器の位置を推定する方法として、著者らは位置指紋方式を用いた位置推定手法を提案している[11,12]。この方法では受電器の設置高さが変化しない場合において高精度で位置推定可能であることが述べられている。

本稿では二次元マルチホップ無線電力伝送における位置指紋方式による受電器の位置推定について、送電器もしくは中継器から受電器までの高さを変化させた場合の位置推定精度を評価する。

2. 位置指紋方式による受電器の位置推定

本節では、位置指紋方式による受電器の位置推定手法について述べる。位置推定は受電器が設置されている座標の推定は行わず、受電器がどの中継器もしくは送電器の上に設置されているかを求める。

位置指紋方式は学習と位置推定の2段階によって受電器の位置を推定する。位置指紋に用いる特徴量、学習、位置推定のそれぞれについて以下に述べる。

2.1 特徴量

二次元マルチホップ無線電力伝送では、受電器の設置位置によって電力伝送効率が変化するため、反射係数も異なる。これを利用して、受電器が設置されている位置を推定する。しかし、図2(a)に示す中継器In2と中継器In3の位置のように送電器から対称的になる位置では、反射係数が類似する値を取る。そのため、これらの位置を区別することができず、位置推定を誤る。そこで、使用する中継器の組み合わせを変更することで、対称性を崩して区別できなかった位置を区別できるようにする。例えば、図2(b)に示すように中継器In3と中継器In4を使用しないことで、中継器In2と中継器In3の上での反射係数が変化し、区別することができる。しかしながら、対称性を崩した場合でも位置によっては反射係数が類似してしまい、区別できなくなる位置が存在する。そこで、使用する中継器の組み合わせを複数用いて特徴量とすることで、各位置を区別して位置推定の精度を向上させる。

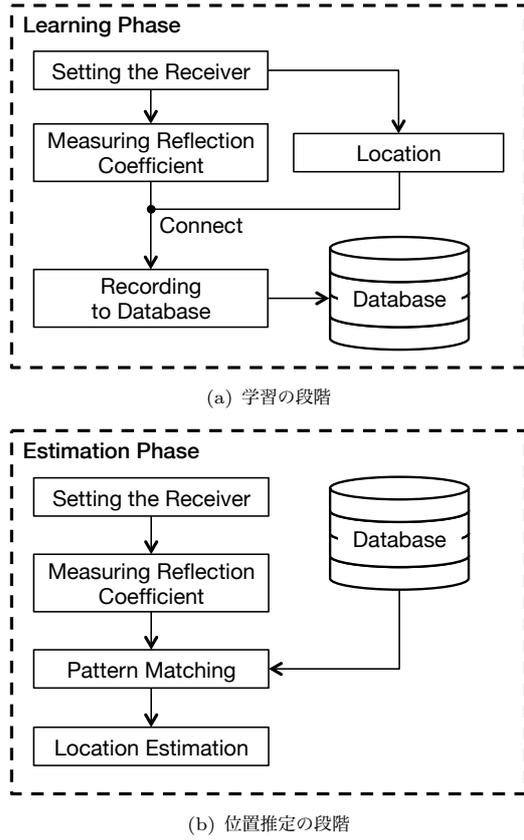


図3 受電器位置推定

Fig.3 Location estimation of receiver: (a) Learning phase, (b) Estimation phase.

2.2 学習

図3(a)に学習の段階のフローチャートを示す。学習の段階では、受電器を設置して使用する中継器の組み合わせを変更して得た多次元の特徴量と、受電器の位置情報とを対応付けした位置指紋をデータベースに記録する。ここで位置情報とは、受電器がどの中継器もしくは送電器の上に設置されているのかという情報である。学習は、各結合器上の複数点で行い、それぞれの結合器上での学習データを1つのクラスとして扱う。

2.3 位置推定

図3(b)に位置推定の段階のフローチャートを示す。位置推定の段階では、学習の段階と同様に特徴量を測定し、最近傍法を用いて学習によって作成した位置指紋データベースとパターンマッチングする。最近傍法は測定した特徴量と全ての学習値との距離を計算し、最も近い学習値のクラスに分類する方法である。

位置推定を行う際に特徴量 $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ を測定し、データベース内の各学習値 $\mathbf{p}_i = (p_{i,1}, p_{i,2}, \dots, p_{i,n})$ に対するユークリッド距離を式(1)より計算する。次に、式(2)に従って最近傍点を求め、その学習値が属するクラスに位置推定する。

$$D(\mathbf{x}, \mathbf{p}_i) = \sqrt{\sum_{j=1}^n (x_j - p_{i,j})^2} \quad (1)$$

$$C_i = \arg \min_i D(\mathbf{x}, \mathbf{p}_i) \quad (2)$$

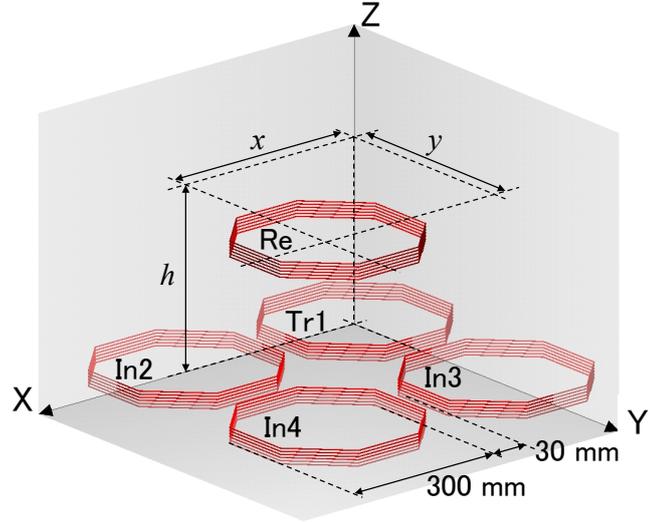


図4 二次元マルチホップ無線電力伝送の解析モデル

Fig.4 Analysis model of two-dimensional multi-hop wireless power transfer.

表1 シミュレーション諸元

Table 1 Parameters of simulationccv.

Parameter	Value
Resonant frequency of antenna	14 MHz
Coil Turn of antenna	6
Diameter of antenna	300 mm
Height of antenna	25 mm
Number of transmitters	1
Number of receivers	1
Number of intermediate couplers	3
Antennas distance of array antenna	30 mm
Receiver height from array antenna	100 - 300 mm
Number of training samples	25 samples/antenna
Number of localization samples	441 samples/antenna

ここで、 $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ は位置推定時に測定する特徴量、 $\mathbf{p}_i = (p_{i,1}, p_{i,2}, \dots, p_{i,n})$ はデータベースに i 番目に学習された特徴量、 C_i は i 番目に学習された特徴量が属するクラスである。

3. シミュレーション

位置指紋を用いた受電器位置推定方法の特性を電磁界シミュレーションを用いて評価した。シミュレータには高次基底モーメント法を用いて解析を行う WIPL-D を使用する。まず、解析する二次元マルチホップ無線電力伝送のモデルおよびシミュレーション諸元について述べる。次に、シミュレーション結果を用いた位置推定の精度について述べる。

3.1 解析モデル

電磁界シミュレーションで解析する二次元マルチホップ無線電力伝送のモデルを図4に、シミュレーション諸元を表1に示す。送電器、受電器および中継器に使用する共振器には14 MHzで共振する直径300 mmの八角形ヘリカルアンテナを用いる。送電器には共振器に交流電源を接続して14 MHzで動作させ、受電器には共振器に50 Ωの負荷抵抗を接続する。また、中継器は図5に示すように共振器を途中で切断することに

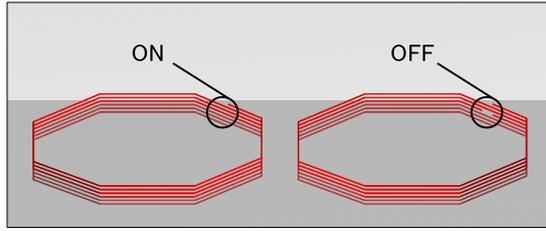


図 5 中継器の ON/OFF

Fig. 5 ON/OFF switching of intermediate coupler.

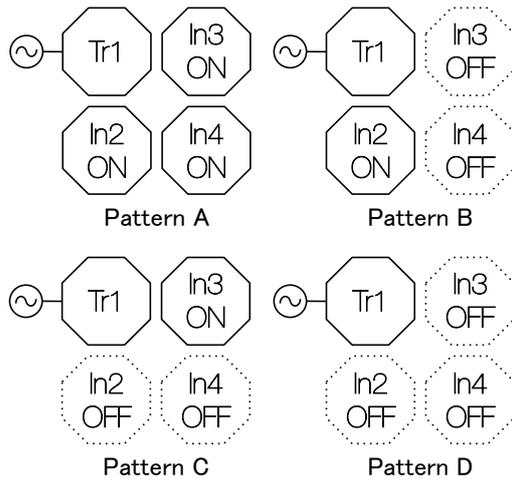


図 6 使用する中継器の組み合わせ

Fig. 6 intermediate couplers pattern.

よって共振周波数をずらして ON/OFF を切り替えることができ、使用する中継器の組み合わせを変更できる。使用する中継器の組み合わせは図 6 に示す 4 通りを用いる。送電器と中継器は 30 mm の間隔で格子状に配置し、受電器をこれらの上方に設置する。受電器を設置する高さについて、学習の段階での高さを h_L 、位置推定の段階での高さを h_E と記述する。

学習の段階では、受電器をある一定の高さ h_L に設置し、図 7 に示すように受電器を各結合器の中心から x 軸、y 軸方向に 60 mm および 120 mm ずつ移動させた点での反射係数を求める。使用する中継器の組み合わせを変更して同様に反射係数を求め、各組み合わせの反射係数を用いた特徴量をデータベースに記録していく。

位置推定の段階では、はじめに受電器を高さ $h_E = 100$ mm、送電器からの軸ずれ $x = -150$ mm、 $y = -150$ mm の位置に設置して X 軸方向に 15 mm ずつ、 $x = 480$ mm まで移動させていく。次に、Y 軸方向に 15 mm 移動させて、再び $x = -150$ mm から 480 mm まで X 軸方向へ移動させる。これを繰り返す、 $x = 480$ mm、 $y = 480$ mm の位置まで移動させた後、高さを 10 mm 高くし、先ほどと同様に X 軸、Y 軸方向の移動を行う。 $h_E = 300$ mm まで移動させてシミュレーションを行い、各点での反射係数を得る。使用する中継器の組み合わせを変更して同様のシミュレーションを行い、各組み合わせの反射係数を用いた特徴量をデータベースにパターンマッチングして最近傍法によって位置推定を行う。

学習する高さを $h_L = 100$ mm, 150 mm, 200 mm, 250

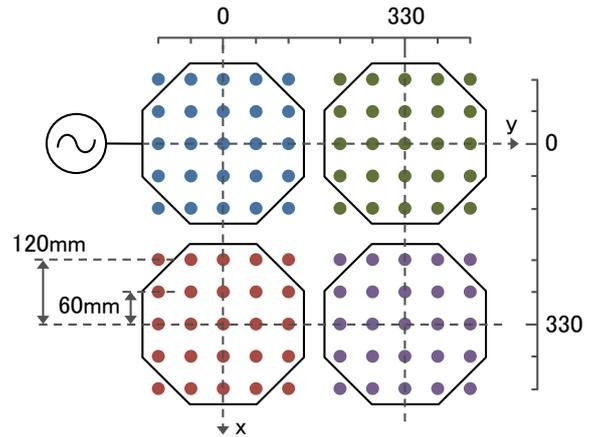


図 7 学習する位置

Fig. 7 Location of learning.

mm, 300 mm に変化させた場合の位置推定を行い、推定精度を比較する。

3.2 位置推定精度

シミュレーション結果より求めた受電器の設置位置による位置推定精度の変化を図 8 に示す。 $h_L = 100$ mm で学習した場合、学習する高さと同じ $h_E = 100$ mm での推定精度は約 100%であるのに対して、 $h_E = 300$ mm での推定精度は約 65%となり推定精度が大幅に低下していることが確認できる。一方、 $h_L = 300$ mm で学習した場合には、学習する高さと同じ $h_E = 300$ mm での推定精度は約 100%であるのに対して、 $h_E = 100$ mm での推定精度は約 98%となり、推定精度の低下は少ないことが確認できる。このように、学習点よりも高い位置での推定精度は大幅に低下し、低い位置での推定精度の低下は少ないということがわかる。 $h_L = 150$ mm で学習した場合の各結合器上での推定精度を図 9 に示す。中継器 In4 の上での推定精度は受電器の設置高さが変わっても低下せず、また、中継器 In2, In3 の上での推定精度の低下も約 10%以内と少ないことがわかる。一方、送電器 Tr1 の上での推定精度は $h_E = 300$ mm で 80%程度低下しており、これによって受電器の設置位置が高くなることで推定精度が低くなることがわかる。 $h_L = 150$ mm で学習した際の特徴量を図 10 に、 $h_L = 300$ mm で学習した際の特徴量を図 11 に示す。図 10, 11 の横軸は反射係数の実部、縦軸は反射係数の虚部を表している。使用する中継器の組み合わせを 4 通り用いており、それぞれの反射係数に実部と虚部が存在するため、特徴量は 8 次元の値となる。図 10 と図 11 のパターン A 及びパターン D の特徴量を比べると、送電器 Tr1 は中継器 In2 と In3 の特徴量付近へ移動している。そのため $h_L = 150$ mm で学習して $h_E = 300$ mm で位置推定すると推定を誤り、推定精度が低下する。一方、 $h_L = 300$ mm で学習して $h_E = 150$ mm で位置推定する場合は、パターン A において送電器 Tr1 の特徴量が学習点から離れるものの、最近傍となるクラスは変わらないため、推定精度は低下しない。このように特徴量に変化するの、受電器の設置位置が高くなることで位置による電力伝送効率の違いが少なくなるためであると考えられる。

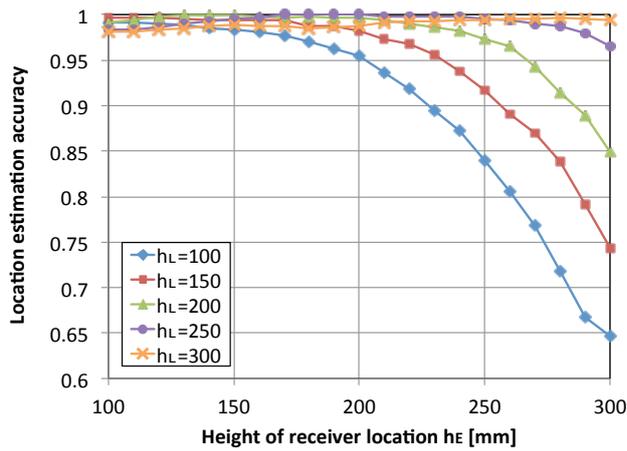


図 8 学習点の高さと位置推定精度の関係

Fig. 8 Location estimation accuracy as function of estimation height for different learning height h_L .

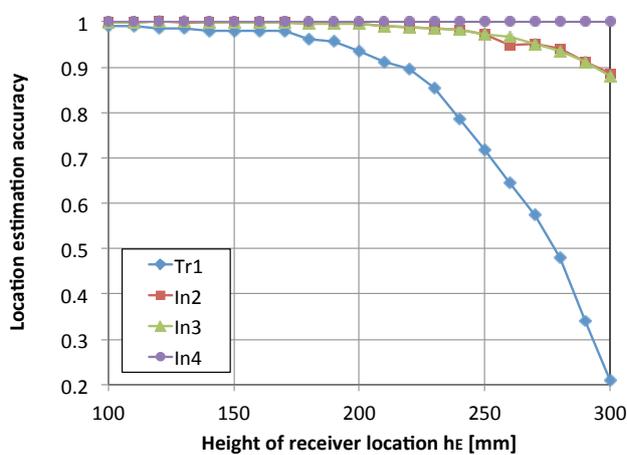


図 9 $h_L = 150\text{mm}$ で学習した場合の各共振器上での位置推定精度
Fig. 9 Location estimation accuracy as function of estimation height for different location ($h_L = 150\text{ mm}$).

4. まとめ

本稿では二次元マルチホップ無線電力伝送における位置指紋方式を用いた受電器の位置推定について、受電器の設置高さが増える場合について評価した。シミュレーションを用いた検証より、学習した高さよりも高い位置では大幅に推定精度が低下し、低い位置では推定精度が低下しないことが分かった。また、学習した高さよりも高い位置で位置推定する場合には、送電器の上での推定精度の低下が大きい。これは、受電器の設置位置が高くなることで電力伝送効率が低下していき、位置による特徴量の違いが少なくなるためであると考えられる。

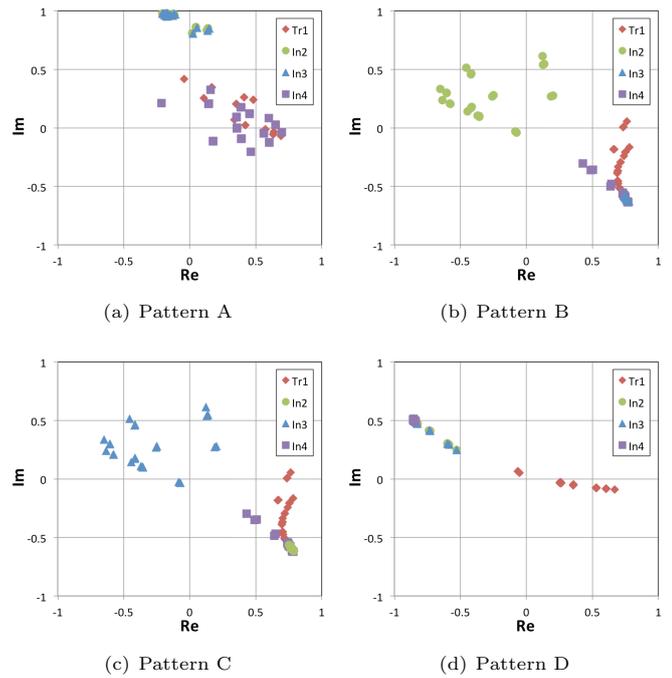


図 10 学習点の特徴量 ($h_L = 150\text{ mm}$)

Fig. 10 Feature value of learning locations ($h_L = 150\text{ mm}$).

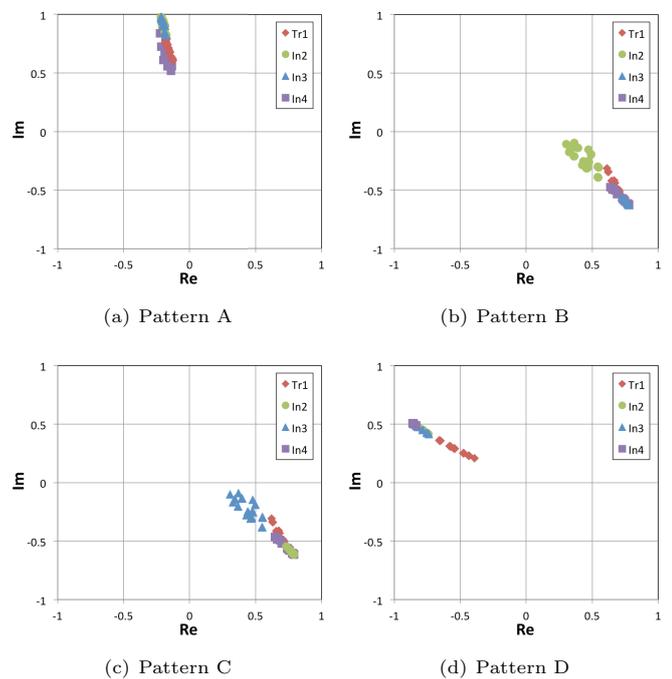


図 11 学習点の特徴量 ($h_L = 300\text{ mm}$)

Fig. 11 Feature value of learning locations ($h_L = 300\text{ mm}$).

文 献

- [1] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher, M. Soljacic, "Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances," *Science*, Vol. 317, No. 5834, pp. 83-86, Jul. 2007.
- [2] 小川 健一郎, 工藤 浩喜, 大館 紀章, 尾林 秀一, 庄木 裕樹, 諸岡 翼, "磁界共鳴方式における第 3 のコイルおよびアレー化による電力伝送効率の向上," 第 4 回無線電力伝送時限研究会, WPT2010-13, Jan. 2011.
- [3] 西村 太, 安倍 秀明 "磁気共鳴型ワイヤレス電力伝送コイルの面方向へのアレー化に関する一検討," 第 4 回無線電力伝送時限研究会, WPT 2010-17, Jan. 2011.
- [4] 伊藤 有基, 島田 晃郎, 上原 秀幸, 大平 孝, "磁界共鳴型二次元マルチホップ無線電力伝送における伝送効率と経路差について," 信学東海連合大, Po1-32, Sep. 2012.
- [5] 宮坂 拓也, 澤上 佳希, 川原 圭博, 浅見 徹, "磁界共振結合による二次元無線電力伝送に置ける仮想パス制御方式," 信学ソ大, B-20-21, Sep. 2010.
- [6] 伊藤 有基, "磁界共鳴型 2 次元マルチホップ電力伝送による複数受電器への公平な電力分配手法," 豊橋技術科学大学大学院 修士論文, 2012.
- [7] F. Gustafsson, F. Gunnarsson, "Mobile positioning using wireless networks," *IEEE Signal Processing Magazine*, Vol. 22, No.4, pp.41-53, Jul. 2005.
- [8] K. Sano, Tran, G. K., K. Sakaguchi, K. Araki, D. Hayashi, T. Yamagushi, S. Arata, "Multi-sensor Location Estimation for Illegal Cell-phone Use in Real-Life Indoor Environment," *IEEE ICCS 2012*, pp.80-84, Nov. 2012.
- [9] M. Seifeldin, A. Saeed, A. Kosba, A. El-Keyi, M. Youssef, "Nuzzer: A Large-Scale Device-Free Passive Localization System for Wireless Environments," *IEEE Trans. Mobile Comput.*, Vol.12, No.7, Jul. 2013.
- [10] 中村 壮亮, 胡間 遼, 久保田 孝, 橋本 秀紀, "磁界共振結合を用いた位置センサの提案と実験的検討," 計測自動制御学会論文集, Vol.48, No.9, pp. 545-552, Sep. 2012.
- [11] 大竹 晋資, 島田 晃郎, 伊藤 有基, 宮路 祐一, 大平 孝, 上原 秀幸, "磁界共鳴型二次元マルチホップ無線電力伝送システムにおける受電器の位置推定," 信学総大, B-1-18, Mar. 2013.
- [12] 大竹 晋資, 島田 晃郎, 宮路 祐一, 大平 孝, 上原 秀幸, "磁界共鳴を用いた二次元マルチホップ電力伝送における位置推定方法の検討," 信学ソ大, B-1-46, Sep. 2013.