

無線給電による小型ヘリコプターの飛行と 高度に応じた自動インピーダンスマッチング

山川 将人[†] 石田 隼[†] 奥田 健太[†] 小紫 公也[‡] 小泉 宏之^{††}

[†] 東京大学工学系研究科 〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1

[‡] 東京大学新領域創成科学研究科 〒277-8561 千葉県柏市柏の葉 5-1-5

^{††} 東京大学先端科学技術研究センター 〒153-8904 東京都目黒区駒場 4-6-1

E-mail: [†] m.yamakawa@al.t.u-tokyo.ac.jp , [‡] komurasaki@k.u-tokyo.ac.jp

あらまし 小型モバイル機器への磁気共鳴結合を用いた無線電力伝送システムの一例として、小型電動ヘリコプターへの無線電力伝送デモンストレーションを行った。3次元空間を移動する対象への効率的な伝送のために反射波を参照して自動インピーダンスマッチングを行う手法を提案、導入し、最大で効率が25%改善された。さらに、負荷に一定電力を供給する電力制御を行う前段階として、受電側の伝送効率を送電側の状態から推定する手法を開発した。

キーワード 無線電力伝送, 磁気共鳴結合, インピーダンスマッチング, 状態推定

Small Helicopter Flight by Wireless Power Transmission and Automatic Impedance Matching Depending on Height

Masato YAMAKAWA[†] Jun ISHIDA[†] Kenta OKUDA[†] Kimiya KOMURASAKI[‡]

and Hiroyuki KOIZUMI^{††}

[†] Graduate School of Engineering, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8656

[‡] Graduate School of Frontier Science, The University of Tokyo, 5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa-shi, Chiba, 277-8561

^{††} Research Center for Advanced Science and Technology, The University of Tokyo, 4-6-1 Komaba, Meguro-ku, Tokyo 153-8904

E-mail: [†] m.yamakawa@al.t.u-tokyo.ac.jp , [‡] komurasaki@k.u-tokyo.ac.jp

Abstract Wireless power transmission (WPT) from a transmitter resonator on the ground to an electric-powered toy helicopter was challenged as one example of WPT application with magnetic resonance. The transmission efficiency was improved 25% by the method of performing Impedance Matching automatically. Furthermore, as a pre-stage of power supply control for transmitting constant power, a method of transmission efficiency estimation is proposed.

Keyword Wireless Power Transmission, Magnetic Resonance, Impedance Matching, State Estimation

1. まえがき

磁気共鳴を用いた無線電力伝送は、共振に使うコイル径と同程度の距離においてはマイクロ波伝送などの他の伝送方法に比べて格段に高い伝送効率で電力を伝送出来得るという特徴を持つ[1][2]。この技術の利用形態として、本研究では図1に示すような三次元を移動するモバイル機器への無線電力伝送システムの開発を行った。このアプリケーションを考えるに当たり、要求される技術項目は以下の三点である

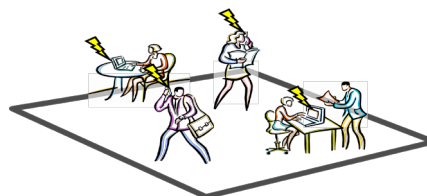


図1 モバイル機器への無線電力伝送イメージ

- 軽量、小型かつ高効率な受電システムの開発
- 送受電コイルの位置関係の変化に応じたインピーダンスマッチング
- 投入電力制御のための効率推定

磁気共鳴結合方式で用いられる自動インピーダンスマッチングの手法としては、可変キャパシタや可変インダクタを回路に挿入して制御を行う方法や[[1]]、複数のコンデンサを回路に挿入しておき、スイッチで任意のコンデンサを導通させてマッチングを行うもの[[2]]などがある。本研究ではトランス用のコイルを用いて、共振器との位置関係を変化させることでインピーダンス変換を行う。この方法の利点としては、Q値に影響がないことや、広い範囲を連続的にインピーダンス整合が行えることなどが挙げられる。

本研究では三次元を移動するモバイル機器の一例として小型ヘリコプターへの無線電力伝送を試み、デモンストレーションを通じて上記三点の技術項目の開発を行うことが本研究の目的である。

2. 磁気共鳴基礎理論

2.1 電力伝送効率

図2に示すように磁気共鳴に使用する送受電コイルは直列RLC共振回路の磁気結合として等価回路で表すことができ、回路を解くことにより伝送効率を導出することが出来る。

共振器の共振角振動数 ω_0 と電源の角振動数 ω を一致させると、共振器間の効率に関する関係式(1)が得られる。式中の文字は全て無次元数で、共振器のQ値($Q_T = \omega_0 L_T / R_T$, $Q_R = \omega_0 L_R / R_R$)、共振器間の結合係数 k 、インピーダンス比 r ($r_T = Z_{src} / R_T$, $r_R = Z_{ld} / R_R$)である(添え字Tは送電側、Rは受電側)。また、 $k\sqrt{Q_T Q_R} = fom$ と定義した。

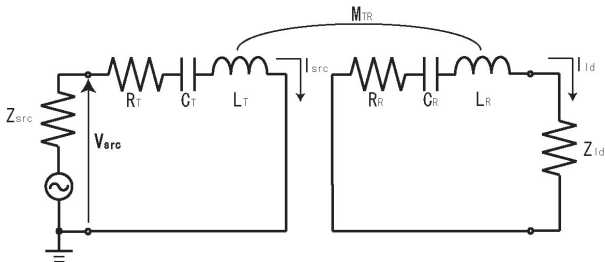


図2 無線電力伝送等価回路

$$\eta \approx \frac{4k^2 Q_T Q_R r_T r_R}{[k^2 Q_T Q_R + (1+r_R)(1+r_T)]^2} \quad (1)$$

式(1)の変数うち結合係数は送受電共振器の位置関係で決定し、Q値は送受電共振器固有の値であるのに対し、インピーダンス比は自由に操作することが可能である。与えられた結合係数、Q値すなわち fom に応じてインピーダンス比を最適化することをインピーダンスマッチングと呼び、 $r_T = r_R = \sqrt{1 + (fom)^2}$ のときに最大効率 η_{both} をとり式(2)のように与えられる[3][4]。また、送電側のみインピーダンスマッチングを行った際の効率 η_{one} は式(3)で与えられる。 fom は大きいほど効

率は高くなるため、高Q値、高結合係数であるほど効率は高くなる。

$$\eta_{both} = \frac{k^2 Q_T Q_R}{1 + \sqrt{1 + k^2 Q_T Q_R}} \quad (2)$$

$$\eta_{one} = \frac{r_R k^2 Q_T Q_R}{(1+r_R)(1+r_R + k^2 Q_T Q_R)} \quad (3)$$

2.2 インピーダンスマッチング理論

本研究ではインピーダンスマッチングをトランスコイルというインピーダンス変換用コイルを送受電に用いて行う(図3)。図4に送電側のトランスコイル(励起コイル)と送電用共振器の等価回路を示す。この二つのコイルは等価的に一つのコイルと見ることができ、このときインピーダンス比は式(4)で与えられる。但し M_{ET} は送電コイル間相互インダクタンス、 R_T , R_E は送電用共振器、励起コイルの抵抗である。このようにトランスコイルを導入し、コイル間相互インダクタンスを自由に变化させることでインピーダンス比を自由に变化させることが出来る。受電側も同様の議論が成り立つ。

$$r_T = \frac{(\omega M_{ET})^2}{R_T (R_E + Z_{src})} \quad (4)$$

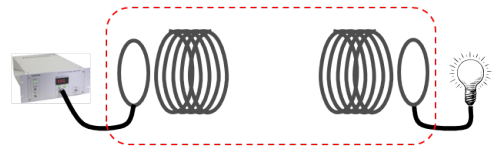


図3 トランスコイルを用いた無線電力伝送(左から励起コイル、送電用共振器、受電用共振器、ピックアップコイルと呼ぶ)

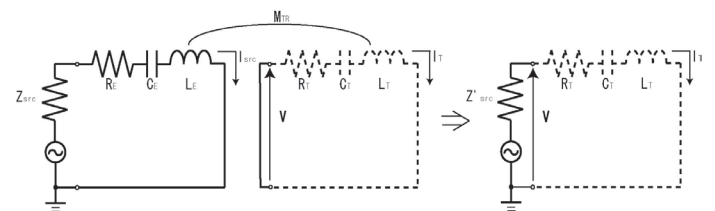


図4 送電側インピーダンス変換等価回路

本研究で提案するアプリケーションでは、受電側デバイスのコストや重量などの観点から出来るだけ簡単な構造にすることを考えているため、送電側のみでインピーダンスマッチングを行う。

3. デモンストレーション用送受電共振器

図5、表1に設計した共振器の写真及び性能を示す。

3.1 受電用共振器

高い伝送効率を得るためには2.1で述べたとおり fom を高くする必要があるため、高Q値の共振器が必要である。また受電用共振器は小型デバイスに搭載することが想定されるため、Q値を下げずに軽量化する

必要がある。そこで従来コイル作成に銅棒を使用していたが、高周波では表皮効果により導体表面にのみ電流が流れることを考慮し、図5に示す中空の受電用共振器を作成した。材料には銅はくを用い、中空形状を作り上げた。結果として同程度のサイズの数十～百g程度の共振器と比較し、Q値を落とさずに3.11gという軽量の受電共振器の製作に成功した。

3.2 送電用共振器

送電用共振器は受電用共振器と異なり大きさや重量に厳しい制約が存在しない。よって、大きなサイズにして受電用共振器との結合係数を出来るだけ高く取れるように設計を行い、図5に示す半径30cmのスパイラル共振器を製作した。材料は断面半径5mmで中空の銅なまし管である。

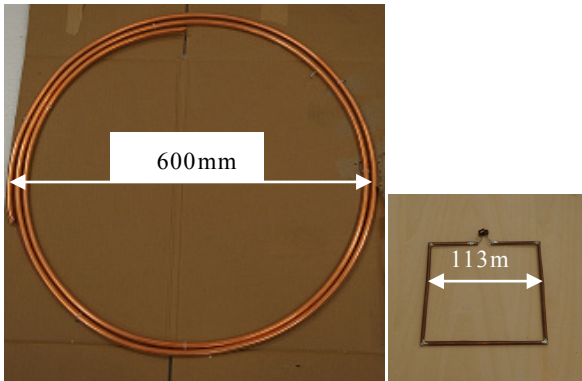


図5 送電用共振器(左)と受電用共振器(右)

表1 共振器の性能

	送電	受電
共振周波数[MHz]	13.561	13.561
サイズ[mm]	D=600	113×113
巻き数	2.25	1
Q値	197	313
付加コンデンサ[pF]	Open	430
重さ[g]	-	3.11
断面直径[mm]	10	3

4. デモンストレーションシステム

図6に受電システムを搭載したデモンストレーション用ヘリコプターを示す。受電システムを積んだヘリコプターに図7のように無線電力伝送を行う。この時励起コイルをアクチュエータで機械的に動かしてインピーダンスマッチングを行っている。

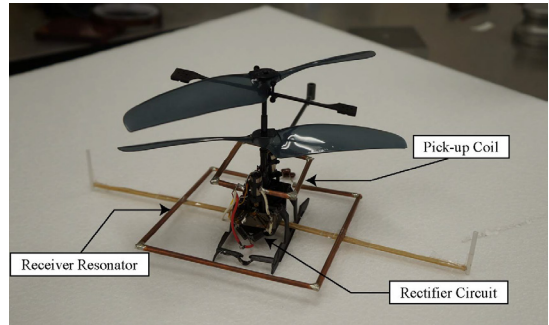


図6 デモンストレーション用ヘリコプター

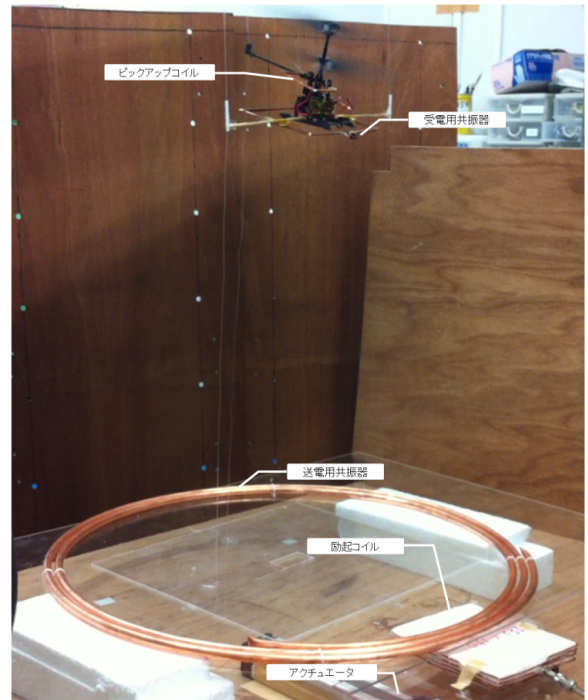


図7 ヘリコプターデモンストレーション

デモンストレーションにおいて使用したインピーダンスマッチングシステムの概略図を図8に示す。励起コイルまでケーブルで高周波を送電し、方向性結合器を介して送電電力をモニターする。同時に反射電力に応じて参照電圧を出力する電源の機能を使用し、反射電力をマイクロコンピュータでモニターする。マイクロコンピュータは反射電力に応じて、アクチュエータの制御信号をモーター駆動回路に送信するシステムになっている。制御は微分制御により反射電力が最小になる位置に励起コイルが動くようにプログラムされており、インピーダンスマッチングを行うことが出来る。マイコンによる反射波のサンプリング周波数は約4.9kHzとなっている。

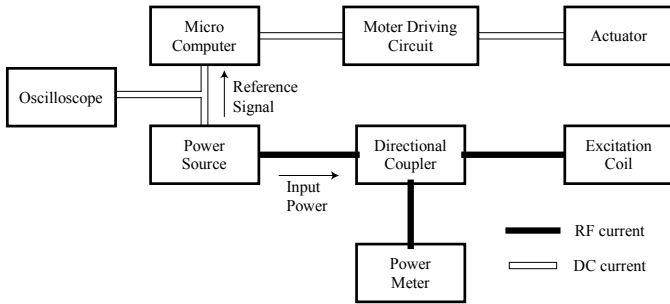


図 8 自動インピーダンスマッチングシステム

デモンストレーションでは 8W の電力を投入し、インピーダンスマッチングを行った場合はヘリコプターは自力で浮上したが、行わない場合は浮上しなかった。この事実からインピーダンスマッチングを行うことによる効率改善効果が確認できた。図 9 ヘリコプターのデモンストレーションを行った際に測定した反射電力の時間履歴を示す。電源の都合上投入電力は区間 T_1 で 0 から 8W まで電力を増やし T_2 の区間は 8W の一定投入電力、 T_3 では 8W から 0W まで電力を減らしている。また、 T_1 の区間では自動インピーダンスマッチングを行わず T_2 の区間以降自動インピーダンスマッチングを開始している。図 9 見られる通りインピーダンスマッチングの開始と同時に大幅に反射電力の減少を確認することができ、インピーダンスマッチングの効果を確認することが出来た。

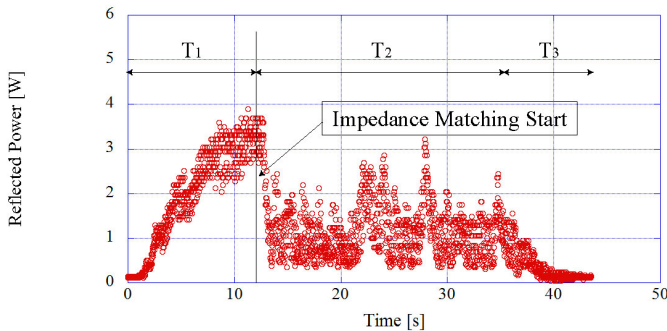


図 9 デモンストレーション時の反射電力の時間履歴

またデモンストレーションに使用した送受電共振器を用いて伝送効率測定をおこなった。図 10 インピーダンスマッチングの有無による測定値及び理論値の伝送距離依存性を示す。理論値と実測値は一致し、インピーダンスマッチングにより最大 25% 程効率が改善された。横軸は伝送距離をコイル直径で無次元化したもので、 $D' = \text{Transmission Distance} / \sqrt{D_T D_R}$ と定義した。今回は $D_T = 60\text{cm}$, $D_R = 12.8\text{cm}$ である。

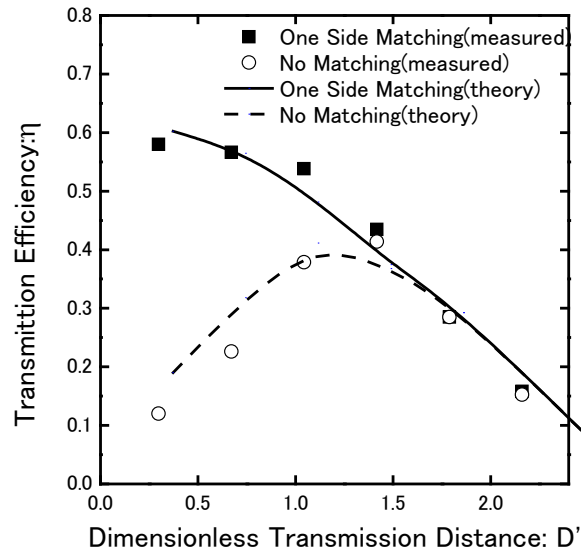


図 10 インピーダンスマッチングの有無と伝送効率

5. 効率推定

常に伝送効率に変化する環境下で定電力供給を行うには投入電力を制御する必要がある。このためにはリアルタイムで伝送電力を知る必要がある。しかし図 11 のように受電側共振器間結合係数 k が未知であったり、負荷が未知の場合は受電側インピーダンス比 r_R がわからない場合、効率は k や r_R の関数であるため、式 (1) を用いても導出することができない。

そこで本研究では入力電力をモニターしつつ効率を送電側状態量から推定することにより伝送電力を算出する方法を提案する。送受電間で通信を行い電力情報をモニターする方法も考えられるが、受電側の小型化や低コスト化という観点から送電側状態量のみで推定する方が望ましいと判断した。

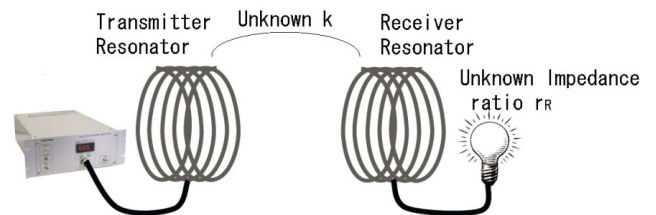


図 11 結合係数やインピーダンス比が未知の場合の電力伝送イメージ

効率推定のために送電側の状態量である送電側インピーダンス比 r_T 、入射電圧と反射電圧の比である S_{11} 、投入電力 P_i を測定する。さらに既知の値である送受電共振器の Q 値 Q_T, Q_R 、設計点結合係数 k_0 、送電側トランス効率 $\eta_{src} (=Z_{src}/(Z_{src}+R_E))$ を用いることで解析的に式 (5)、式 (6) のように未知数である結合係数 k 、受電側インピーダンス比 r_R の導出が出来る。但し Z_{src} は電源のインピーダンス、 R_E は励起コイルの抵抗である。

$$r_R = \sqrt{1 + k_0^2 Q_T Q_R} \quad (5)$$

$$k = \sqrt{\frac{1 + \sqrt{1 + k_0^2 Q_T Q_R} (1 - S_{11})(1 + r_T) - 2\eta_{src}}{Q_T Q_R} \frac{1 - S_{11} - 2\eta_{src}}{1 - S_{11} - 2\eta_{src}}} \quad (6)$$

結合係数の瞬時値が式(6)の様に得られるため式(3)から効率を推定することが出来、式(7)で与えられる。

$$\eta = \frac{(2\eta_{src} - (1 - S_{11}))(2\eta_{src} - (1 + r_T)(1 - S_{11}))\sqrt{1 + k_0^2 Q_T Q_R}}{(1 + \sqrt{1 + k_0^2 Q_T Q_R})r_T \eta_{src}} \quad (7)$$

この方法の妥当性を確認するため式(7)を用いて図6の実測値と推定値を比較した。その結果が図12、誤差を示したものが図13である。25cm以内では10%以内に収まった一方、それ以上の場合には大幅に誤差が増えた。これは効率が小さくなることで S_{11} や効率の測定誤差が大きくなったことが原因であると考えられる。

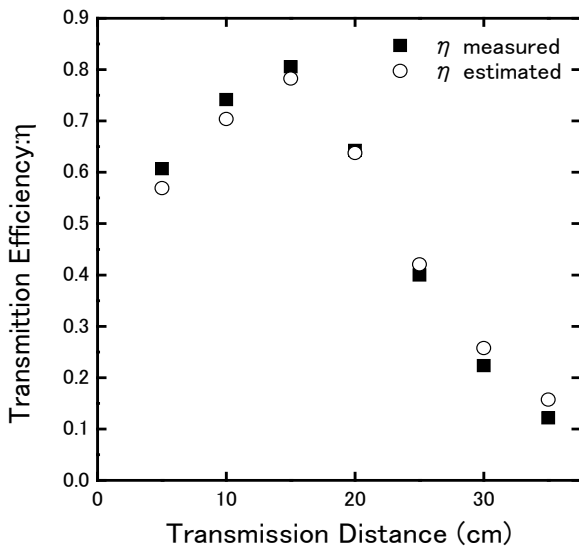


図12 伝送効率実測値と推定値の関係

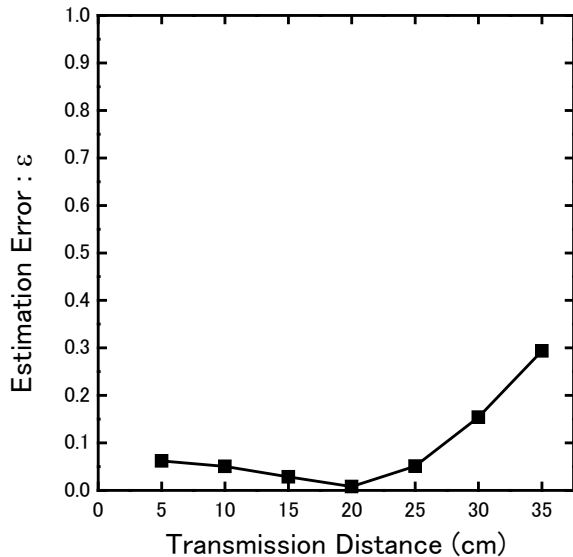


図13 伝送距離と誤差の関係

電気事業法におけるコンセントの供給電圧の許容誤差を電力に変換すると許容誤差は10%程度である。これを踏まえると磁気共鳴が電力源となるには±10%の誤差内に供給電力を納める必要があり、本研究の提案手法を用いて効率を推定し、電力制御を行えば達成できる。よって本研究の効率推定手法は有効な方法であるといえる。

6. まとめ

本研究では以下の三点の成果を上げた

1. 軽量でコンパクトな3.11gの共振器開発
2. 自動インピーダンスマッチング手法の提案
3. 効率推定手法の提案

1.2を組み合わせることで最長50cmの距離におけるヘリコプターへの無線電力伝送に成功した。このことから数Wクラスの三次元を自由に移動するモバイル機器への高効率無線電力伝送システムの一つの形を提案できたといえる。また、今後必要となる投入電力制御のための効率推定手法を提案することが出来た。

参考文献

- [1] A. Kurs, J.D. Joannopoulos, and M. Soljagic, "Efficient wireless non-radiative mid-range energy transfer," *Annals of Physics*, Vol. 323, Issue 1, pp. 34-48 2008.
- [2] A. Kurs, A. Karalis, R.Moffatt, J.D. Joannopoulos, P Fisher, and M. Soljagic, "Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonance," *Science Magazine*, Vol. 317, No. 5834, pp.83-86, 2007
- [3] Kenichiro Ogawa, Noriaki Oodachi, Shuichi Obayashi, and Hiroki Shoki, "A study of Efficiency improvement of wireless power transfer by impedance matching", *IMWS-IWPT2012 Proceedings*, pp155-157
- [4] Benjamin H. Waters, Alanson P. Sample, and Joshua R. Smith, "Adaptive Impedance Matching for Magnetically Coupled Resonators", *PIERS Proceedings 2012*, pp694-701
- [5] Teck Chuan Beh, Masaki Kato, Takehiro Imura, Sehoon Oh, and Yoichi Hori, "Automated Impedance Matching System for Robust Wireless Power Transfer via Magnetic Resonance Coupling", *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, VOL. 60, NO. 9, pp3689-3698
- [6] Michael Roland, Harald Witschnig, Erich Merlin, Christian Saminger, "Automatic Impedance Matching for 13.56 MHz NFC Antennas", *CNSDSP 2008*, 6th, pp288-291
- [7] 小丸 堯, 小泉正剛, 小紫公也, 荒川義博, 柴田貴行, 加納一彦, "高Q値アンテナによる強結合共鳴を用いた無線電力伝送", *電気学会産業応用部門大会講演論文集* 2, pp.363-pp.364, 2009.
- [8] T.Komaru, K.Komurasaki, M.Koizumi, T.Shibata, K.Kano, "Parametric Evaluation of Mid-range Wireless Power Transmission", *IEEE, ICIT 2010, Chile*, pp.789-792.