

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 7 日現在

機関番号：32641

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25870748

研究課題名(和文) 磁界共振結合を用いたセンシング・無線電力伝送の同時実現に関する研究

研究課題名(英文) Research on simultaneous realization of sensing and wireless power transmission via magnetic resonance coupling

研究代表者

中村 壮亮 (Nakamura, Sousuke)

中央大学・理工学部・助教

研究者番号：20634695

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：電磁波や電磁誘導の方式と比較して高効率あるいは潜在的に広範囲であるため、磁界共振結合方式の無線電力伝送が研究されている。本方式は、特定の位置関係に送受電アンテナが存在する場合に限り高効率での送電が可能であるため、センシング機能との併用が必要であった。しかし既存のセンシングと無線電力伝送の同時実現手法では、大規模化が難しく、有効範囲も狭く、大電力伝送時の発熱による共振崩れがセンシング精度劣化につながるといった実用時の課題が未解決であった。そこで、本研究ではこれらへの解決の糸口を示し、センシングと無線電力伝送の同時実現の概念を取り入れた実践的なシステム構築への足掛かりとした。

研究成果の概要(英文)：Wireless power transmission via magnetic resonance coupling is gaining attention due to the higher transmission efficiency and wider transmission range compared to electro-magnetic wave and electro-magnetic induction, respectively. However, though this method requires parallel use with sensing function, the current simultaneous realization of sensing and wireless power transmission has problem of difficulty in expanding the size, narrow effective range, and corruption of resonance caused by the electrical characteristic fluctuation driven by the heat generation. Therefore, major solutions to these problems are derived through this research project.

研究分野：ロボティクス・電力工学

キーワード：無線電力伝送システム 磁界共振結合 センシング

### 1. 研究開始当初の背景

電磁波と比較して高効率かつ電磁誘導と比較して潜在的に広範囲の無線電力伝送方式として、磁界共振結合を用いた方式が研究されている。しかし、単純に広範囲で送電可能な訳ではなく、電磁界分布の指向性から特定の位置関係に送受電アンテナが存在する場合に限り高効率での送電が可能である事が知られている。主流である直列共振構造のアンテナを利用した無線電力伝送において、送電効率が低い状況で送電を実施する事は、電力浪費のみならず送電側回路が短絡状態のように振る舞い、大電流により周辺回路に甚大な悪影響を及ぼす問題があった。そこで、送電すべきかどうかを判断するためのセンシング機能、具体的にはアンテナ間の磁界結合度ないしは相対位置のセンシング機能を組み込む事が望まれていた。そして、可能な限り構成要素を送電機能と共通化する同時実現の必要性が認識されていた。

しかしながら、当時の当該分野での傾向として、センシングと無線電力伝送は独立機能として研究されており、両機能の同時実現に関してはパッシブ型の電波タグ(RFID)を利用したものが唯一研究されているのみであった。これは、電磁波を利用してタグを無線駆動するとともにタグの位置推定を行うというものであったが、効率・安全性から伝送可能電力は極めて小さく、位置推定精度は0.05-0.15mと十分ではなかった。

そこで、申請者は、磁界共振結合方式における無線電力伝送の構成がセンシングへと転用可能であることを発案し、有効範囲は狭いものの、高効率・安全で大電力を伝送可能であり、位置推定精度は0.001-0.015mと高精度な同時実現手法を提案した。これは、磁界共振結合方式の無線電力伝送でのセンシング機能としては、非常に有効な手段として一定の評価を得た。しかし、幾つかの問題点が存在していた。

### 2. 研究の目的

既存のセンシングと無線電力伝送の同時実現手法では、2×2の最小構成に限定的なものである事や、有効範囲が狭い事、大電力の無線電力伝送との同時実現時に生じる発熱による回路定数の変動(による共振崩れ)といった実用時の実践的課題が未解決であった。そこで、本研究課題では、これらへの解決の糸口を示し、センシングと無線電力伝送の同時実現の概念を取り入れた実践的なシステム構築への足掛かりとする。

すなわち、運用可能なレベルまで同時実現機能を取り入れたシステムを引き上げる事が本研究課題の目的である。

### 3. 研究の方法

前述の通り、大きく以下の3つのサブテーマに関して取り組んできたので、それぞれに関して研究の方法を述べる。

- ・構成を2×2から拡張する大規模化手法
- ・有効範囲の拡大方法
- ・同時実現時の熱問題の対処方法

#### 構成を2×2から拡張する大規模化手法

当初のセンシング手法ではアレイ化された送電アンテナ全てに給電するためにアンテナ数だけの配線の取り回しが必要となり、大規模化の際には実用上の大きな弊害になるだけでなく、配線長の増大は有効範囲にダイレクトに関わる性能指標であるアンテナのQ値の大幅な低減につながっていた。

そこで、大規模化のために、中継アンテナを用いた配線レスの位置センシングを提案した。これは、ネットワーク化された配線レスの中継アンテナモジュールのON/OFFを切り替え、電力ネットワークを様々な形態に変化させる事で自由度を確保し、特定のアンテナ(基本的には受電アンテナ)の位置を推定するものである。さらに、X,Y,Zの3自由度を推定するためには3パターン以上の有効なネットワークが必要であり、姿勢まで推定するためには更に3パターンの有効ネットワークが生成可能である必要がある。

#### 有効範囲の拡大方法

センシングの有効範囲に関する性能指標として、アンテナのQ値が支配的である事が既存研究から明らかとなっていた。そこで、外部から適切なエネルギーを注入し、特定の機能の振る舞いを自然状態にはない狙ったものに変換する技術であるアクティブセンシングの考え方を導入し、新たなアンテナを提案した。提案したアンテナは仮想的にQ値の制御が可能なものである。ここでは、Q値が蓄積電力と消費電力の比に相当するため、消費電力を打ち消すような電力注入を自動で行うようなアクティブアンテナを設計する形でQ値制御を行った。具体的には、外部からの起電力に伴う消費電力をアナログ的にセンシングし、同位相の起電力を外部回路で発生させるという方法である。発生起電力を電子的に制御可能とする事で、Q値が電子制御可能となったかのような振る舞いを実現できる事となる。

#### 同時実現時の熱問題の対処方法

センシングと無線電力伝送の同時実現に際して、大電力が送電される場合には発熱によりアンテナ等の電気特性が変化し、共振が崩れる。そこで、熱問題に対する補償方法を提案した。ここでは、空冷による熱抑制手法、および空冷では十分な効果や即応性が得られない場合での利用を想定した外付けモータによる容量制御が可能な真空コンデンサを用いた共振補償手法を提案した。

### 4. 研究成果

上述した3つのサブテーマに関してそれぞれ研究成果を述べる。

### 構成を2×2から拡張する大規模化手法

提案した中継アンテナを用いた配線レスの位置センシングの有効性を検証するため、図1に示す2×2の最小構成の実験システムを構築した。簡易的な二次元位置推定を行った結果を図2に示す。このように、中継アンテナを利用した場合であっても十分な位置推定精度が確保出来ることが示された。

また、中継アンテナを用いる場合には大規模化を行う際にも2×2のような小規模な場合からの位置推定精度の劣化を抑える事が出来る反面、位置推定の計算量が增大するためリアルタイム性を維持できる限界がある。そこで、最小単位である2×2アンテナを複数配置して切り替えて推定を行う方法とn×nアンテナのnを増加させる方法の2通りに関して計算量を求めた結果は表1の通りとなった。これにより、nが増加するにつれて、2×2アンテナを複数配置する方法の方がリアルタイム性に優れる事が判明した。

さらに、位置のみならず姿勢の推定まで実現するためには、有効な電力パスを形成する中継アンテナの組み合わせを3パターン以上追加する必要がある事など、姿勢推定における要件を理論的に整理した。

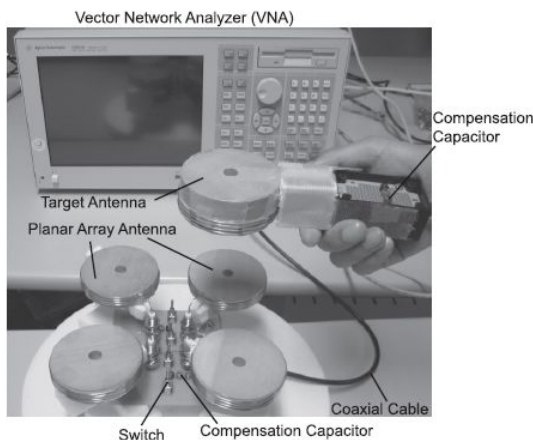


図1 2×2サイズの中継式位置推定システム

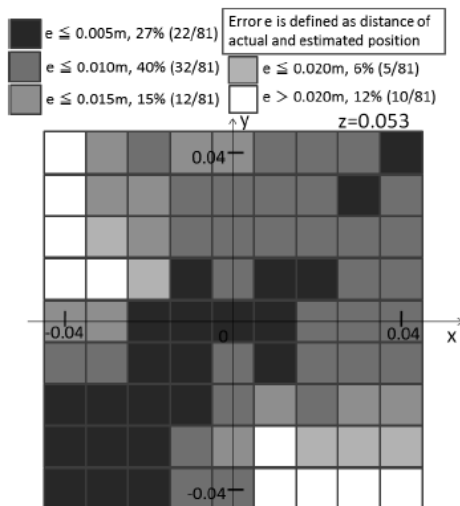


図2 二次元位置推定の結果(アレイアンテナの中心が8.5cm四方となる配置)

表1 2×2単位を複数利用とn×n単位でのシステムサイズがnの際の計算時間比較

Size n	Calc Time of 2×2 array [s]	Calc Time of Single n×n [s]
2	0.011	0.011
3	0.042	0.895
4	0.095	217.5
5	0.170	$1.8 \times 10^5$
6	0.265	$5.5 \times 10^8$
7	0.382	$6.2 \times 10^{12}$
8	0.520	$2.7 \times 10^{17}$
9	0.679	$4.5 \times 10^{22}$
10	0.859	$2.9 \times 10^{28}$

### 有効範囲の拡大方法

仮想的なQ値制御を可能とするアンテナを作成した(図3)。これは前述の通り、外部からの消費電力と同位相での電力注入によりアンテナの消費電力を仮想的に低減させ、Q値が向上したかのような電氣的振る舞いを実現したものである。外周の大型のヘリカルアンテナが本来のアンテナであり、その消費電力を引き出し、内側のスパイラルアンテナから誘導起電力という形で正帰還電力を与えるものである。帰還電力の調整率に相当する制御電圧を横軸としたアンテナのインピーダンス測定の結果を図4に示す。結果から、制御電圧の増加に伴い、インピーダンス実部の値が低下して消費電力が低減されている事が分かる。また、同時に実部と比べて虚部の値は低く抑えられている事から、共振状態は十分に維持されている事が見て取れる。

制御電圧の増加とともに、ほぼ一定値を取る虚部に対する実部の値が相対的に減少するため、共振が崩れる傾向を示している。ここで、虚部が実部に対して0.5倍程度の値となる条件で共振状態の限界を迎えると考えると、作成したアンテナでは40倍程度のQ値増幅率を達成した事となった。

さらに、作成したアンテナを用いて距離センシングを行った結果を図5に示す。Q値制御型アンテナを利用しない場合と比べて2倍以上のセンシングレンジを達成しており、Q値制御型アンテナはセンシングの有効範囲の拡大に効果的である事が実証された。

### 同時実現時の熱問題の対処方法

最初に、温度による電気特性の変化がどの程度であるかを確認するため、送受電の双方に利用したヘリカルアンテナに対して、温度と電気特性(インピーダンス変化)との関係を測定した。その結果、やはりリアクタンスに有意な影響が及ぼされ、共振状態の破綻につながり得る事が示された。

次に、温度上昇が電力伝送においてどの程度深刻なものであるかを確認するため、電力伝送時における送電アンテナおよび受電アンテナそれぞれの温度変化および電力伝送効率を測定した。ここでは、前述した温度-インピーダンス特性を参照する形で測定温度から推定されたインピーダンス値を(2つの直列共振回路が磁界結合している)標準的な等価回路に当て嵌める事で算出された電

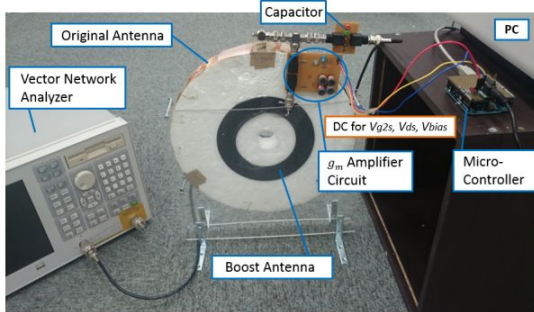


図3 開発したQ値制御型アンテナ

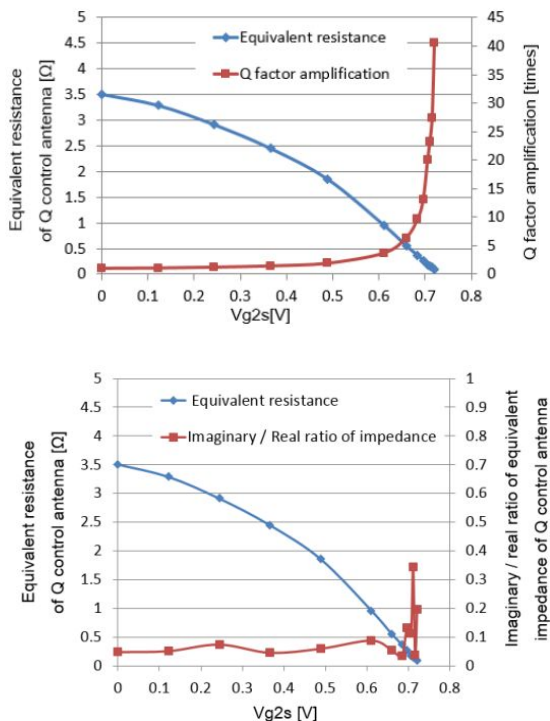


図4 Q値制御型アンテナの基礎特性  
(a) 制御電圧 vs 等価抵抗 & Q値増幅率  
(b) 制御電圧 vs 等価抵抗 & 実部虚部比率

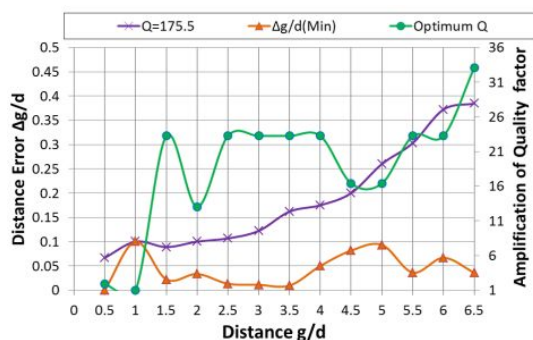


図5 距離センシングの結果  
(最適なQ値に制御した場合は距離誤差0.1以下の領域が2倍以上広がっている)

力伝送効率と実測した電力伝送効率とがほぼ一致した事から、発熱時においても上述した標準的な等価回路の成立が認められた。

このように、温度上昇により電力伝送効率は有意に悪化し得るものであり、温度-インピーダンス特性と標準的な等価回路から温度-電力伝送効率がある程度は推定可能であ

る事も示された。

そこで、実用化に向けた実践的な補償法として、基本的には空冷で温度変化自体を抑え、それでも発生する電気特性変化には容量制御を適用する形で共振状態を維持する方法を考えた。容量制御にはモータで容量値を自動制御可能な真空バリコンを用いた。なお、小サイズ化が要求される場合、このような大掛かりな装置は利用できず、空冷の性能を高めて対処する他ないと考えている。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計3件)

Sousuke Nakamura, Masato Namiki, Hideki Hashimoto, "Q Controllable Antenna as a Potential Means for Wide-Area Sensing and Communication in Wireless Charging via Coupled Magnetic Resonances", IEEE Transactions on Power Electronics, DOI: 10.1109/TPEL.2016.2535259, Accepted 2016.2

Sousuke Nakamura, Hideki Hashimoto, "Error Characteristics of Passive Position Sensing via Coupled Magnetic Resonances Assuming Simultaneous Realization with Wireless Charging", IEEE Sensors Journal, Vol. 15, No. 7, pp. 3675-3686, 2015.7

中村 壮亮, 胡間 遼, 鯨坂 志門, 久保田 孝, 橋本 秀紀, "磁界共振結合による中継アンテナ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. 49, No. 6, pp. 646-654, 2013.6

[学会発表](計5件)

Sousuke Nakamura, Masato Namiki, Hideki Hashimoto, "Reduction of phase shifting for range expansion in magnetic resonance coupling-based distance sensor with adjustable sensing range", IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII 2014), pp. 548-553, 2014.12

Sousuke Nakamura, Masato Namiki, Hideki Hashimoto, "Basic development of magnetic resonance coupling-based distance sensor with adjustable sensing range using active quality factor control", 40th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2014), pp. 2327-2332, 2014.10

Sousuke Nakamura, Hideki Hashimoto, "Basic study of magnetic resonance coupling-based distance sensor with adjustable sensing range using active quality factor control", IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII 2013), pp. 688-693, 2013.12

加納 安曇, 勝又 雅仁, 中村 壮亮, 橋本 秀紀, "大電力無線電力伝送・位置センシングの同時実現における諸問題の特定と解決方法の提案", 第14回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SI2013), 2M1-1, 2013.12

加納 安曇, 中村 壮亮, 橋本 秀紀, "磁界共振結合を用いたワイヤレス伝送および位置センシングの同時実現に関する基礎開発", 第31回日本ロボット学会学術講演会 (RSJ2013), 2D2-05, 2013.9

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕  
出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://s-nakamura-lab.ws.hosei.ac.jp/>

<http://www.elect.chuo-u.ac.jp/hlab/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

中村 壮亮 (NAKAMURA, Sousuke)

中央大学・理工学部・助教

研究者番号: 20634695