

令和 3 年 5 月 28 日現在

機関番号：32675

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04085

研究課題名（和文）フレキシブルコイルを用いた磁界共振結合方式による一括無線給電に関する研究

研究課題名（英文）Research on SIMO WPT via magnetic resonance coupling using flexible coils

研究代表者

中村 壮亮（Nakamura, Sousuke）

法政大学・理工学部・准教授

研究者番号：20634695

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、主に2点の学術的成果を挙げた。一点目は、単一の給電対象を想定したものであるが、容量制御により共振状態を維持する形で、形状不定のコイルにおいて高効率の磁界共鳴式無線給電に成功したことである。二点目は、実機ではなくシミュレーションベースではあるが、複数の給電対象を想定した磁界共鳴式無線給電において、従来の負荷制御に加えて容量制御を用いることで高効率化が可能であることを示したことである。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来の磁界共鳴式無線給電では剛体コイルの使用が前提であったため、生活空間における環境（什器・家具など）や給電対象として数多く存在する柔軟物への組み込みが難しかった。本研究を通してフレキシブルコイルを用いた磁界共鳴式無線給電の手法がある程度確立したことで、柔らかい什器や家具へ送電コイルを内蔵することによる無線給電エリアの拡張や、柔らかい物体やデバイスへ受電コイルを内蔵することによる無線給電対象の拡大といった将来構想の実現可能性が一段と高まったと考えている。今後は、損失低減策を講じるとともに大電力化などにも取り組んでいきたい。

研究成果の概要（英文）：In this research, we have achieved two main academic results. The first is that we succeeded in achieving highly efficient magnetic resonance coupling type wireless power transfer in a coil of indefinite shape by maintaining the resonance state through capacitance control, although this was based on the assumption of a single power feeding target. Secondly, although it was based on simulation rather than actual equipment, it was shown that high efficiency could be achieved by using capacitive control in addition to conventional load control in magnetic resonance coupling type wireless power transfer assuming multiple power feeding targets.

研究分野：ロボティクス、制御工学

キーワード：フレキシブルコイル 磁界共鳴式無線給電 共振補償制御

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

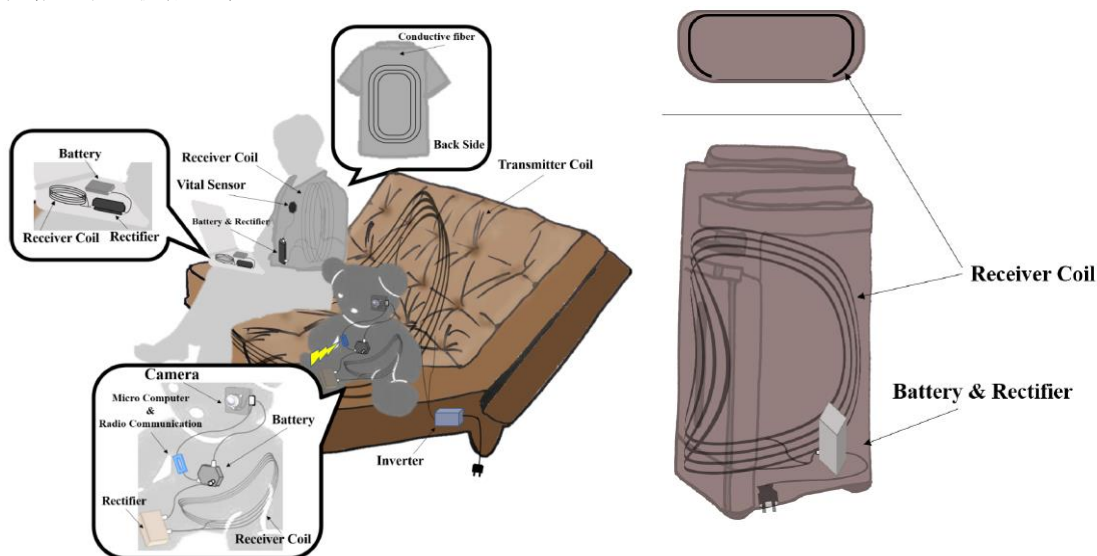
近年、モバイル機器やウェアラブル機器の増加に伴い、その電力管理が手間となっている。そこで、これら機器への給電方式として無線給電が注目されている。とりわけ、電磁誘導方式よりも広い伝送範囲を持ち、マイクロ波やレーザー方式よりも伝送効率が高く人体への影響も少ないことから、日常生活空間においては磁界共鳴式の無線給電への関心が高まっている。

しかし、これまでの磁界共鳴式無線給電では剛体コイルの使用が前提であったため、生活空間における環境(什器・家具など)や給電対象として数多く存在する柔軟物への組み込みが難しく、適用範囲が限定されていた。

柔軟変形可能なコイル(フレキシブルコイル)を用いた磁界共鳴式無線給電が実現できれば、柔らかい什器や家具へ送電コイルを内蔵することによる無線給電エリアの拡張や、柔らかい物体やデバイスへ受電コイルを内蔵することによる無線給電対象の拡大が見込める。例えば、ソファ、リクライニングチェア、背もたれクッションなどにフレキシブルコイルを内蔵することで給電エリアの拡張が可能となり、見守りカメラを搭載したぬいぐるみ、皮膚貼付型・身体巻き付け型の生体センサやEMS機器、グローブ型のハプティックデバイス、デバイスへ配電可能な衣服などにフレキシブルコイルを搭載して無線給電対応するといった事が可能となる(図1)。また、応用の方向性を変えると、フレキシブルコイルの柔軟性を活かし、様々な形状の家電に後付けてコイルを取り付けて無線給電化を図るといったことも考えられる。このように、フレキシブルコイルを用いた磁界共鳴式無線給電により様々な応用可能性が広がるが、現状では伝送効率低下などの問題により実施例は限定的である。

磁界共鳴式無線給電では回路系の共振周波数と電源周波数の一致が高効率給電の条件であり、フレキシブルコイルを利用した場合にはコイル変形に伴うインダクタンス変動により共振周波数が変化するため、伝送効率の低下が問題であった。そこで、フレキシブルコイルを用いて高効率な無線給電を行うためには、共振用の外付けキャパシタの容量値をコイル形状(インダクタンス値)に合わせた適切な値に設定ないしは制御するといった工夫が必要となる。

研究代表者は以前の研究プロジェクト(KAKENHI 16K18066)を通して、送受電一対のフレキシブルコイルを用いた磁界共鳴式無線給電において等価的な容量値の電子制御技術を組み込んだ自動での共振補償により伝送効率を維持する方法論を固めていた。しかし、実際の実機システムの構築には至っていなかった。さらに、実用の際には図1のように複数の受電コイルが存在し、それらへの一括給電が望ましい場面も多い。そこで、単一の送電コイルから複数の受電コイルへ一括給電する技術の確立も求められる。



(a) 柔軟物への内蔵イメージ

(b) 家電への搭載イメージ

図1 日常生活におけるフレキシブルコイルの利用イメージ

2. 研究の目的

本研究プロジェクトでは、以前の研究プロジェクト(KAKENHI 16K18066)で確立した方法論を発展させ、送受電一対のフレキシブルコイルでの実際のシステムを構築・評価するとともに、単一の送電コイルから複数の受電コイルへ一括で給電する際の方法論の基盤を新規に確立することを目的とする。これらをまとめると、下記の通りとなる。

- ・送受電一対のフレキシブルコイルを用いた実際の無線給電システムの構築と評価
 - ・単一の送電コイルから複数の受電コイルへの一括無線給電手法の考案と特性評価
- それぞれに対して、以降で詳説する。

3. 研究の方法

(1) 送受電一対のフレキシブルコイルを用いた実際の無線給電システムの構築と評価

等価的な容量値を電子制御可能なキャパシタとしては、図2のスイッチドキャパシタを用いた。これは図3に示すように、制御電圧 $\pm V_{ref}$ とベースキャパシタの両端電圧 V_c を比較して $+V_{ref}$ 以上および $-V_{ref}$ 以下のタイミングで制御用キャパシタの両端にある半導体スイッチをオフにするものである。ON/OFFのデューティ比に相当する V_c に対する V_{ref} の割合を制御対象と出来るよう、 V_c の振幅値に対する V_{ref} の比を指定できるフィードバック構造を有した回路を構築した（ここまではKAKENHI 16K18066の成果）。

等価容量値は、ベースキャパシタの容量にデューティ比に応じた制御用キャパシタの等価容量値を加算したものとなる。

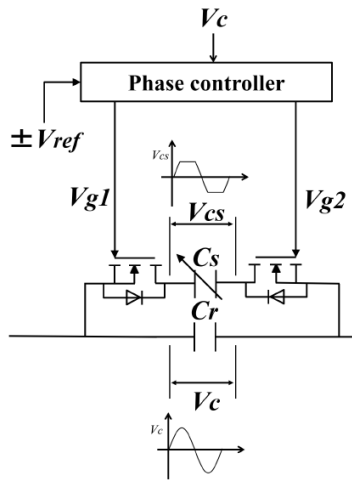
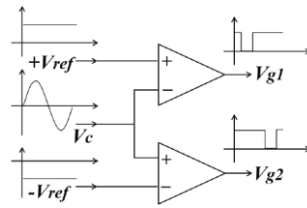
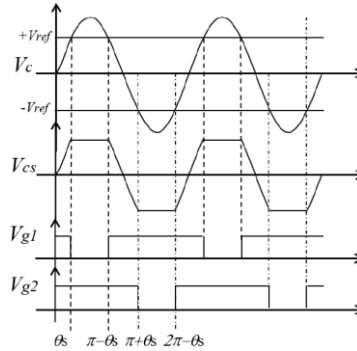


図2 スイッチドキャパシタ



(a) 位相制御器の詳細



(b) 各部の電圧波形

図3 スイッチドキャパシタの内部動作

実験システムとしては、これを受電側コイルの共振補償キャパシタとして用いたものを構築した。構築したシステムとその等価回路を図4および5に示す。

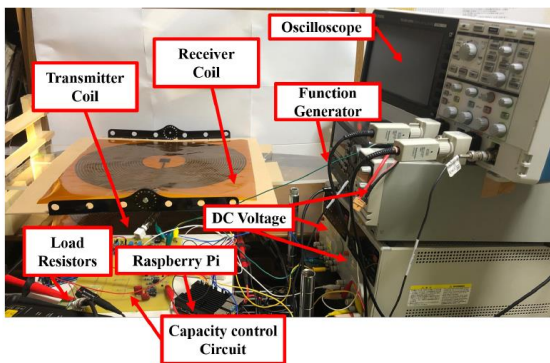


図4 構築した実験システム

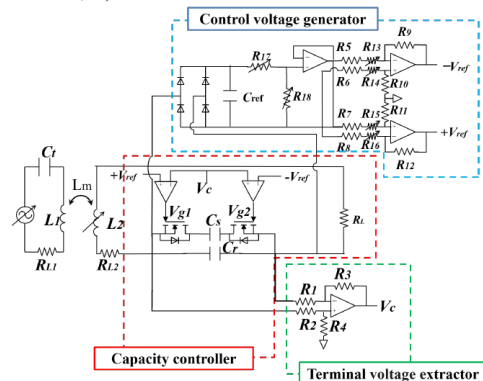


図5 システムの等価回路

構築したシステムにおいて、自動共振補償の全容とその心臓部となる山登り法部の詳細を図6および7に示す。ここでは、容易に計測可能な送受電の皮相電力比という物理量に着目し、それを最大化する条件が共振条件に一致するという性質を利用し、山登り法によって皮相電力比を最大化するアルゴリズムを採用した。

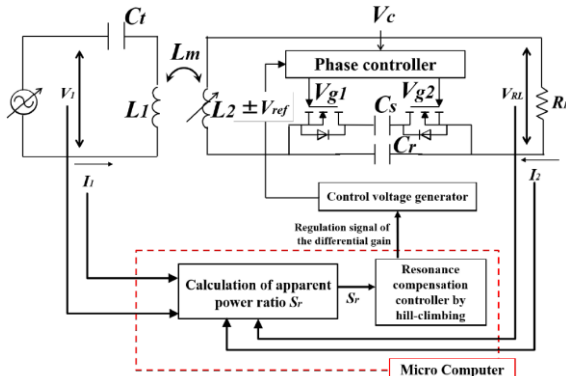


図6 自動共振補償の全容

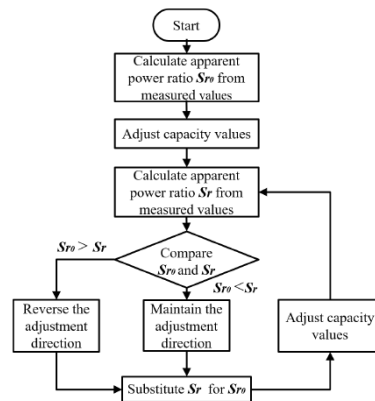


図7 山登り法部の詳細

(2) 単一の送電コイルから複数の受電コイルへの一括無線給電手法の考案と特性評価

本研究プロジェクトの主テーマであるフレキシブルコイルを用いた一括無線給電について手法の考案から始めた。ここでは、これまでの常套手段であったDCコンバータなどによる等価的な負荷値の制御では一括給電ならではの受電コイル間のクロスカップリングによる影響を排除し切れないと考え、新たに容量値制御を加えた構成を考案した。そして、手始めとして受電コイルが2個の場合を扱う事とした。これは、等価回路で表すと図8に相当する。

そして、85KHz および 13.56MHz 帯での運用を想定したシステム設計を行い、シミュレーションによって特性評価を行った。シミュレーションはあらゆる結合係数の組み合わせに対して網羅的に実施した理論特性を得るのが目的のものと、結合係数と紐づく実際のコイル配置(3パターン)を設定した現実に即したものの2種類を行った。

特に後者では、本研究で注目しているクロスカップリングのみを変動させる形で特性調査を行った。

ここでは紙面の都合により、13.56MHz 帯における2パターンのコイル配置(図9)での結果を示す。これらはいずれも、半径90mmの円周上を受電コイル2(Rx2)が移動するものとした。

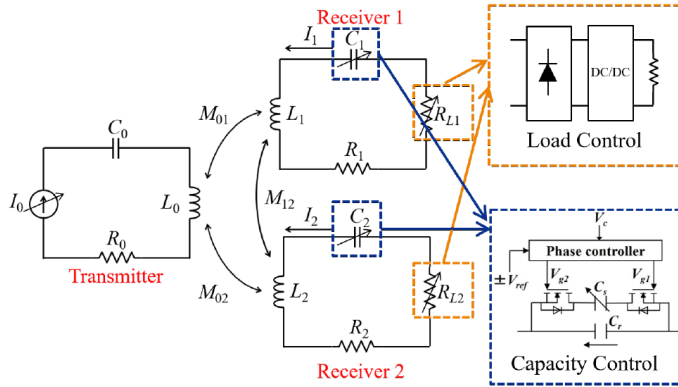
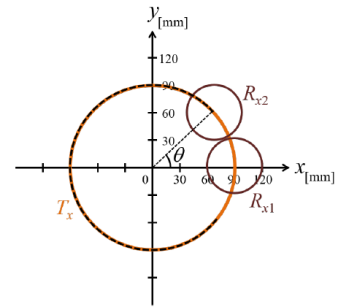
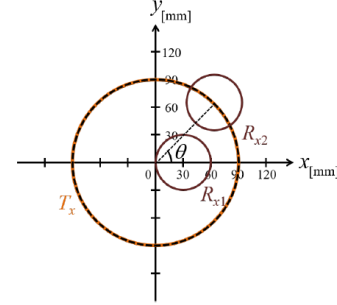


図8 一括無線給電の等価回路



(a) コイル配置 A



(b) コイル配置 B

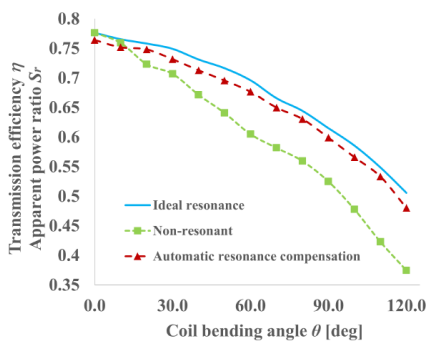
図9 解析を行ったコイル配置

4. 研究成果

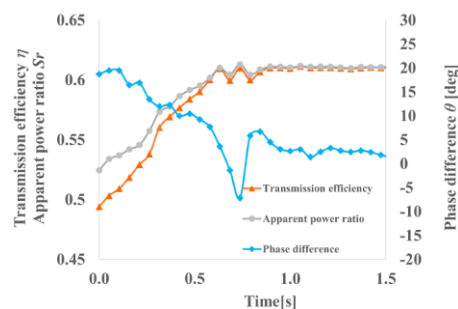
それぞれの研究項目に関して成果を示し、その学術的な位置づけとインパクト、今後の展望について述べる。なお、その際に想定外の知見などについても強調する。

(1) 送受電一対のフレキシブルコイルを用いた実際の無線給電システムの構築と評価

受電側のフレキシブルコイルを折り曲げて電力伝送実験を行った結果を図10に示す。また、参考までに折り曲げ角度90度の様子を図11に示す。

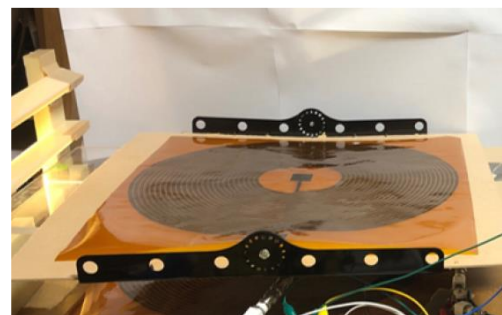


(a) 折り曲げ角度に対する伝送効率



(b) 伝送効率および位相差の時間応答 (折り曲げ90度)

図10 電力伝送実験の結果



(a) 折り曲げ角度 0度



(b) 折り曲げ角度 90度

図11 折り曲げの様子

結果より、1秒程度の即応性で理想共振と遜色のない伝送効率が得られていることが確認された。これは、形状不定のコイルにおいて、共振状態を維持する形で実際の磁界共鳴式無線給電に成功した初の事例であり、十分な学術的インパクトがあると考えている。この成果は国内会議での受賞という形で結実し、現在は IEEE の論文誌に投稿中である。今後に関しては、実用化に向け、損失低減策（半導体のスイッチング損失が主要因と考えている）を講じるとともに、大電力化の対応が必要であると考えている。

(2) 単一の送電コイルから複数の受電コイルへの一括無線給電手法の考案と特性評価

容量制御の導入によって伝送効率が5%以上向上する送受電コイル間の結合係数の組み合わせを調査した結果が図12である。ここでは、2つの受電コイルでの受電電力の比率 P_s にも影響を受けるため、3パターンの電力比で結果を求めた。受電電力が等しい $P_s=1.0$ の場合を見ると、送受電計3つのコイルのうち2つのコイルが近接して残り1つが離れている場合に伝送効率の向上が顕著である事が分かる。他の電力比の場合と見比べると、基本的にはこの傾向に従いつつも、電力比の影響も受ける事が見て取れる。

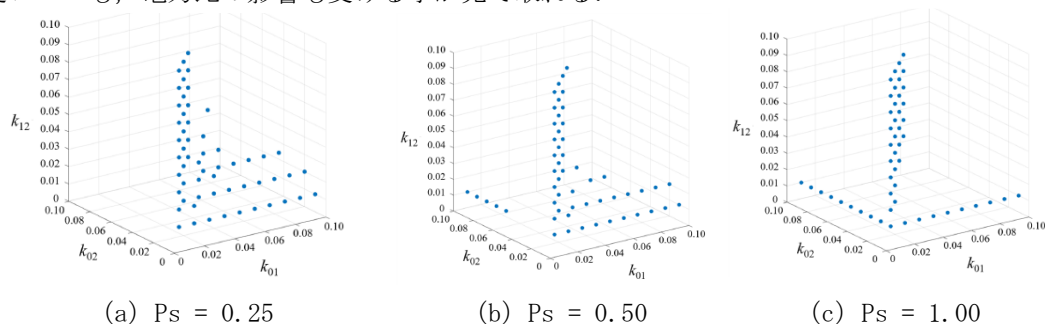


図12 伝送効率向上が5%以上となる送受電コイル間の結合係数の組み合わせ

次に、図9に示す2パターンのコイル配置に対して、クロスカップリングのみを変動させるように配置を変更する形で容量制御機構の有無が伝送効率に与える影響を調査した結果を図13に示す。いずれの配置においても容量制御の導入による伝送効率の向上効果が見られたが、配置Aではクロスカップリングの増加と共に伝送効率の向上分が増加したのに対して、配置Bではその逆の特性を示した。これは、配置Aでは送電コイルと2つの受電コイル間の結合係数が小さいため受電コイル同士のクロスカップリングが増加することで伝送効率向上の条件を満たすのに対して、配置Bでは既に送電コイルと受電コイル1との結合係数が大きいので、受電コイル同士のクロスカップリングが増加すると条件を満たさなくなるためである。この成果は国際会議での受賞および招待講演という形で結実するとともに、現在は IEEE の論文誌に投稿中である。

なお、研究プロジェクトを進める前の時点では、コイル配置に依らずにクロスカップリングの増加と共に伝送効率向上効果も上がるものと予想していたため、今回の結果は少なからず驚きであり伝送効率向上条件の理論的解釈については完結していない。

今後は「送受電計3つのコイルのうち2つのコイルが近接して残り1つが離れている場合に伝送効率の向上が顕著」という伝送効率向上の条件の理論的解釈を進めるとともに、受電コイル数を増やした場合まで適用可能な理論へ体系化することで、容量制御手法を洗練させたい。

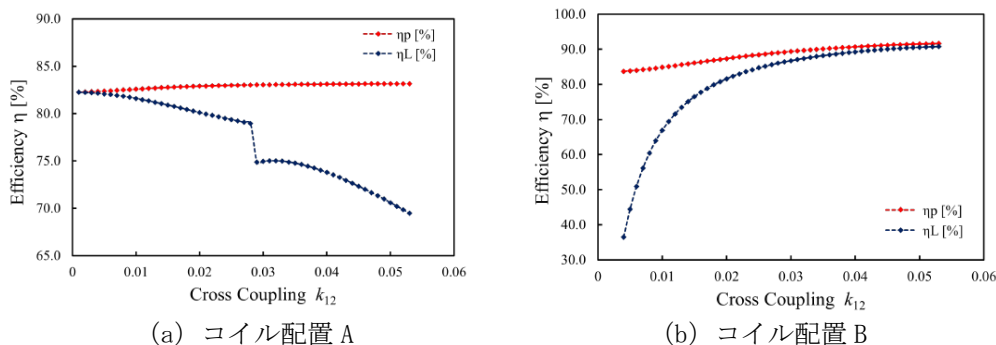


図13 クロスカップリングを変動させた際の容量制御機構の有無が伝送効率に与える影響

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 M. Yamamoto, T. Miyaura, Y. Tsuruda, S. Nakamura
2. 発表標題 Basic Study on Efficient Two-Receiver Wireless Power Transfer Satisfying Specified Power Ratio with Controllable Capacitance and Load Resistance
3. 学会等名 Asian Wireless Power Transfer Workshop (AWPT2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 馬場 勝規, 宮浦 隆宏, 鶴田 義範, 中村 壮亮
2. 発表標題 様々な形状の家具へ組み込み可能な柔軟変形コイルを用いた磁界共鳴型無線給電に関する基礎開発
3. 学会等名 第21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
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中村壮亮
2. 発表標題 柔軟アンテナ間の磁界共鳴式無線給電
3. 学会等名 電子情報通信学会 短距離無線通信研究会 (SRW) (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Miyaura, Y. Tsuruda, S. Nakamura
2. 発表標題 Characteristic Evaluation of Resonance Compensation Technology Using Low Loss Capacity Control Function in Wireless Power Transfer Via Magnetic Resonance
3. 学会等名 Asian Wireless Power Transfer Workshop (AWPT2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山本 真依, 宮浦 隆弘, 中村 壮亮
2. 発表標題 フレキシブルコイルを用いた磁界共鳴式無線給電における共振補償法の基礎検討
3. 学会等名 第20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
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 宮浦 隆宏, 鶴田 義範, 中村 壮亮
2. 発表標題 磁界共鳴式無線給電における容量制御機能を用いた共振補償特性の基礎評価
3. 学会等名 第19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
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 受電装置、ウェアラブルデバイス、及び非接触給電システム	発明者 中村 壮亮, 鶴田 義 範, 宮浦 隆宏	権利者 学校法人 法政大 学、株式会社 ダ イヘン
産業財産権の種類、番号 特許、2018-228149	出願年 2018年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------