

令和 6 年 5 月 28 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K14154

研究課題名（和文）磁界結合型無線給電のための仮想的な機械的接続機構に関する研究

研究課題名（英文）Research on Virtual Mechanical Connection for Magnetically Coupled Wireless Power Transfer

研究代表者

成末 義哲（Narusue, Yoshiaki）

東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・准教授

研究者番号：70804772

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）：無線給電に向けた電磁力による機械的接続機構の技術基盤を確立した。無線給電におけるサイズ制約を加味した機械的接続機構の構成を示し、同一のフェライトコアで電磁石用コイルと無線給電用コイルの両者を実現する両用コイルの設計ならびに実験評価を実施した。電磁力性能については最大2N程度の引力ならびに斥力を発生させることができること、無線給電性能についてはQi規格対応コイルを受電器とした際に88%の最大効率を得られることを確認した。加えて、機械的接続機構に基づくユーザインタフェースに関する検討と、小型デバイス内に機械的接続機構を組み込む際に有用となるコイル自動設計機構の研究開発を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により得られた成果は、無線給電システムに力を提示する機構を付与する技術を示しており、より使いやすい無線給電システムの実現に寄与するものである。無線給電分野の研究開発は、給電可能範囲の拡大、給電効率の向上、電磁両立性の確保、人体防護など電気的機能に集中しており、本研究の成果は他に類を見ない独自性を備えている。本研究をきっかけとして、無線給電システムが備えるべき機能群を再定義するための足がかりともなりうる研究成果といえる。

研究成果の概要（英文）：This research project established a mechanical connection mechanism utilizing electromagnetic force for wireless power transfer (WPT) systems. We designed the configuration of the mechanical connection mechanism, considering the size constraints of WPT systems. This included the design and experimental evaluation of single-core dual coils that function both as an electromagnet coil and a wireless power transfer coil with a single ferrite core. It was experimentally confirmed that the single-core dual coils can generate an attractive and repulsive force of up to approximately 2N and provide a maximum WPT efficiency of 88% when using a Qi-standard compatible coil as a receiver. Additionally, we examined the user interface based on the mechanical connection mechanism and developed an automatic coil design mechanism, which is necessary for integrating the mechanical connection mechanism into small devices.

研究分野：無線工学

キーワード：無線給電 磁界結合 電磁力

1. 研究開始当初の背景

電子機器の充電を変革しうる技術として、無線給電が注目を集めている。すでに国際規格 Qi が普及している電磁誘導型のみならず、給電可能範囲の拡大が可能な磁界共振結合型の無線給電など、磁界結合を用いた無線給電システムの実用化が進行中である。

しかし、無線給電機能が備わっているスマートフォンを所有するユーザであっても、有線接続による充電を選択しているユーザが少なくない。無線給電ではなくケーブルによる有線接続を選択する理由の1つとして、「操作しながら充電していたらいつの間にか給電できていなかった」「朝起きたらスマートフォンの位置がずれていて充電できていなかった」といった予期せぬ動作不良がユーザの生活に重大な影響を与えてしまうことが挙げられる。

ケーブルを用いた有線接続の際に予期せぬ動作不良が生じづらいのは、有線接続ではケーブルおよびコネクタが電氣的接続のみならず機械的接続としての機能も果たしているためであると研究実施者らは考える。無線給電と同様に有線給電においても、給電可能範囲が存在し、その範囲はケーブル長で決まる。受電機器がケーブル長よりも遠くに離れようとする、ケーブルによる張力がコネクタを介して受電機器まで伝わり、その力が束縛力となって受電機器が遠ざかるのを妨げる。これにより、有線接続の場合には、意図せず給電可能範囲から逸脱することが阻止されるため、一度ケーブルにつなぎさえすれば確実に電子機器を充電することができる。

しかし、研究開始当初の時点では無線給電機構にはこのような束縛力が存在しない。給電可能範囲内から給電可能範囲外に移動しようとする端末に対してそれを妨げる力やその他の対策は存在しておらず、電子機器に外力が加わった際、電子機器は給電可能範囲外へと逸脱してしまう。このことが上記のような予期せぬ動作不良に繋がり、無線給電技術の普及を妨げる一因になっているものと考えられる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、無線給電のための機械的接続機構を確立することにある。電子機器が給電可能範囲を逸脱する方向に小さな外力が生じたとしても、給電可能範囲の内側に留まらせようとする遠隔力を発生させることで、予期せぬ動作不良を防止する。さらにはこの遠隔力を活用することで、無線給電機構を高度化するインタフェースの探求を行う。

3. 研究の方法

本研究では、従来の電気工学からなる無線給電分野の研究開発に、機械工学的アプローチを加えることで、機械的接続機構の研究開発を推進した。無線給電機構ではハードウェアサイズも重要な性能指標の1つであるため、機械的接続機構を実現するための遠隔力は電磁力により実現することとし、電磁力を発生させるための電磁石用コイルは無線給電用コイルと同一のフェライトコアを用いた設計ならびに実装を実施した。

4. 研究成果

機械的接続機構の構成を図 1(a)に示す。小型デバイスへの機械的接続機構の適用を考慮すると、送電器よりも受電器のハードウェアサイズに強い制約が課される。そこで本研究では、受電器側には永久磁石を用い、送電器側に電磁石を用いる構成とした。具体的には、受電器側はネオジウム磁石を具備し、送電器側は同一のフェライトコアで電磁石用コイルと無線給電用コイルを具備する。以下では、同一のコアで電磁石用コイルと無線給電用コイルの両者を実現する構造をコア両用コイルと呼ぶ。

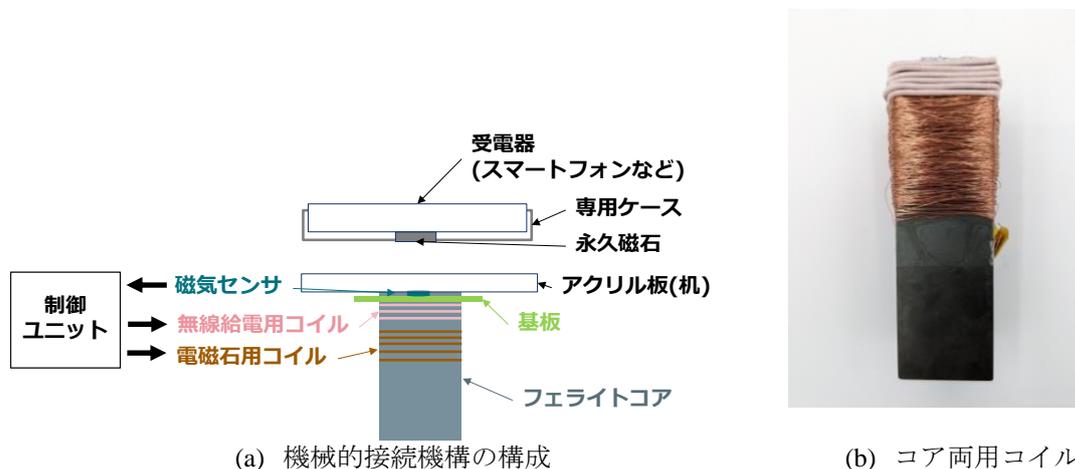


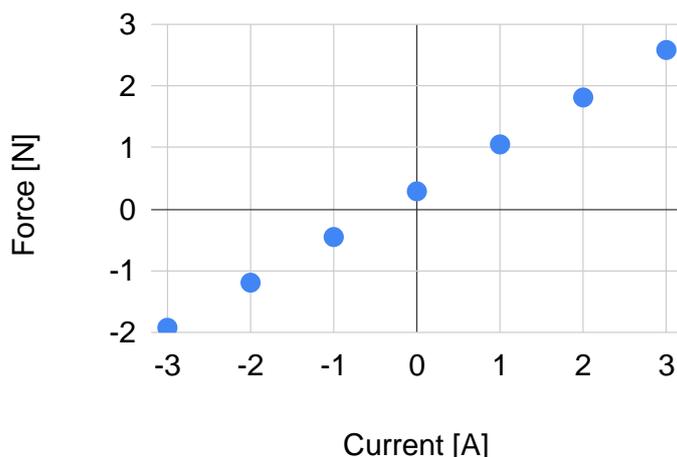
図 1 機械的接続機構

コア両用コイルを実装したものを図 1(b)に示す。Qi 規格に準ずる無線給電を想定すると 200kHz 程度でも損失が小さく、大きな電磁力を発生させるためにできるだけ大きな飽和磁束密度を有するフェライトコアがコア両用コイルには適しており、本研究では市販のフェライトコアのなかから入手性も考慮のうえ、TDK 製の B67345B0002X087 を選定した。電磁石用コイルは直径 0.4mm のエナメル線を 500 回巻き、無線給電用コイルは素線径 0.04mm・撚り本数 660 のリッツ線を 11 回巻くことで実装した。電磁石用コイルの機械的特性を明らかにするため、イマダ製のデジタルフォースゲージ ZTS-50N を用いて電磁力の計測を行った。実験環境を図 2(a)に示す。計測においては、電磁石用コイルに流す電流振幅を変化させながら電磁力の大きさを計測した。図 2(b)に示す計測結果より、電磁石用コイルは最大 2 N 程度の引力ならびに斥力を発生させることが可能であることを確認した。無線給電用コイルについては、日置電機製の LCR メータ IM3536 を用いて 100 kHz における性能を計測したところ、自己インダクタンスは 11.3 μH であり、Q 値は 32.1 であった。また、Qi 規格対応コイルを受電コイルとして 3mm のアクリル板を介して計測したところ、結合係数は 0.79 であり、負荷インピーダンスを最適化した際に得られる最大効率は 87% であった。今回使用した Qi 規格対応コイルを送受電の両者に使用した場合の最大効率が 88% であったことから、無線給電用コイルは Qi 規格対応コイルに遜色のない性能を有していることが示された。

上記のコア両用コイルは本研究課題の代表的な研究成果であるが、それ以外にも、受電器の永久磁石を活用した位置推定方式や、機械的接続機構を応用したユーザインタフェース、小型デバイス内にネオジウム磁石と受電コイルを共存させる際に有用となるコイル自動設計技術について研究開発を推進した。電磁力による引力と斥力を用いたユーザインタフェースの例を図 3 に示す。スマートフォン等の給電対象デバイスを送電器上に置かれた際や給電中に外力でずれが生じた際には、引力を用いて送電器側に引き戻す吸着力を発生させることにより固定されたことを直感的にユーザへ提示するとともに機械的にも固定する。一方で、充電が終了したあとには斥力を用いることにより、充電が終了していることを直感的にユーザへ提示する。



(a) 電磁力計測の実験環境



(b) 電磁力計測の結果

図 2 電磁力計測



図 3 機械的接続機構によるユーザインタフェースの検討

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 K. Matsuura, D. Kobuchi, Y. Narusue, and H. Morikawa	4. 巻 11
2. 論文標題 Communication-Less Receiver-Side Resonant Frequency Tuning for Magnetically Coupled Wireless Power Transfer Systems	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 23544 - 23556
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/ACCESS.2023.3251987	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 D. Kobuchi, K. Matsuura, Y. Narusue, and H. Morikawa	4. 巻 72
2. 論文標題 Cancellation of Harmonics in the Magnetic Field Leakage From Inductive Power Transfer Systems	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Vehicular Technology	6. 最初と最後の頁 4442 - 4452
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TVT.2022.3223762	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Y. Narusue, H. Morikawa	4. 巻 58
2. 論文標題 Magnetic Energy Minimization for Suppressing Magnetic Field Intensity of Inductive Power Transfer Systems	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Magnetics	6. 最初と最後の頁 pp.1-5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TMAG.2021.3090922	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 D. Kobuchi, K. Matsuura, Y. Narusue, H. Morikawa	4. 巻 13
2. 論文標題 Magnetic Field Leakage Cancellation in Multiple-Input Multiple-Output Wireless Power Transfer Systems	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Magnetics Letters	6. 最初と最後の頁 pp.1-4
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/LMAG.2022.3151065	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 成末義哲	4. 巻 15
2. 論文標題 共振結合型ワイヤレス電力伝送向け可変リアクタ	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 電子情報通信学会 B-plus	6. 最初と最後の頁 pp.23-33
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 D. Kobuchi, M. Fujishiro, H. Morikawa, Y. Narusue	4. 巻 11
2. 論文標題 An Automatic Coil Design Method for Wireless Power Transfer Systems by Current Distribution Analysis	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 94613 ~ 94622
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ACCESS.2023.3311041	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 D. Kobuchi, H. Morikawa, Y. Narusue	4. 巻 12
2. 論文標題 Automatic Design of Transmitter and Receiver Coils for Wireless Power Transfer Systems by Using Current Distribution Analysis	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 49987 ~ 49996
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ACCESS.2024.3384248	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 D. Kobuchi, H. Morikawa, Y. Narusue	4. 巻 11
2. 論文標題 Phase Retrieval-Based Z Parameter Estimation Method for Multiple-Input Multiple-Output Wireless Power Transfer Systems	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 129905 ~ 129913
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ACCESS.2023.3334222	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 A. Yamaguchi, Z. Lin, K. Matsuura (Supervisor: Y. Narusue)
2. 発表標題 MLAB-WPT
3. 学会等名 APMC Student and Young Engineer Design Competition WPT Track (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K. Matsuura, Y. Narusue, and H. Morikawa
2. 発表標題 Communication-Less Impedance Adjustment for Suppressing Magnetic Field Intensity of Inductive Power Transfer Systems
3. 学会等名 IEEE Wireless Power Transfer Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 D. Kobuchi, J. Ahn, Y. Narusue, and H. Morikawa
2. 発表標題 Z-Parameter Estimation for Multiple-Input Multiple-Output Wireless Power Transfer Systems via Phase Retrieval Method
3. 学会等名 IEEE Wireless Power Transfer Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 成末義哲
2. 発表標題 〔招待講演〕IoT/CPS基盤としての無線電力伝送技術の研究開発
3. 学会等名 電子情報通信学会無線電力伝送研究会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 成末義哲
2. 発表標題 [依頼講演] IoT/CPS基盤としての無線電力伝送技術の研究開発と展望
3. 学会等名 電子情報通信学会スマート無線研究会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松浦賢太郎, 成末義哲, 森川博之
2. 発表標題 キャパシタ充放電制御による共振型無線給電向け受電側FETブリッジ型可変リアクタの検討
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小淵大輔, 成末義哲, 森川博之
2. 発表標題 MIMO無線電力伝送システムにおける位相復元を用いたZ行列推定手法の実験評価
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小淵大輔, 松浦賢太郎, 成末義哲, 森川博之
2. 発表標題 磁界結合型無線電力伝送における入力電圧波形設計に基づく高調波磁界強度低減
3. 学会等名 電子情報通信学会 無線電力伝送研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 成末義哲, 生形 貴, 篠原笑子, 森川博之
2. 発表標題 IoT/CPS基盤としてのワイヤレス給電技術
3. 学会等名 電子情報通信学会 無線通信システム研究会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 R. Okubo, A. Yamaguchi, D. Kobuchi, Z. Lin, T. Morinaga, H. Morikawa, Y. Narusue
2. 発表標題 Single-Core Dual Coils in Wireless Power Transfer Systems With Force Display Functions
3. 学会等名 IEEE WPTCE 2024 (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 大久保諒一, 山口温大, 小淵大輔, 林政東, 森川博之, 成末義哲
2. 発表標題 力覚提示機構を有する無線給電システム向けコア両用コイルの検討
3. 学会等名 電子情報通信学会 総合大会
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔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
---------	---------