

磁場の視覚・触覚化による磁場体験システム

小林剛史^{†1} 重宗宏毅^{†2,3} 澤田秀之^{†2}

概要：送電コイルと受電コイルの相互誘導を利用したワイヤレス電力伝送が注目されている。我々はワイヤレス電力伝送を利用する際に、本質的に磁場を理解せずにツールとして利用することが多い。その理由として、磁場は五感で知覚できず、見る・触るという実体験が欠けていることが挙げられる。本稿では、磁場という抽象的概念の理解や学習サポートのため、実在コイルの磁束分布を可視化し、更に磁場エネルギーを形状記憶合金アクチュエータの駆動エネルギーに変換して触覚提示することで、磁場を体験できるシステムを構築した。本稿では、無線給電による触覚提示を中心として、磁場体験システムの構築について述べる。

1. はじめに

ワイヤレス電力伝送 (Wireless Power Transfer: WPT) は、電源と電子機器をケーブルなどにより直接結ぶことなく、コイルやアンテナなどを用いて、無線で電力を供給する技術である。WPT を使用したシステムは、その汎用性の高さから、産業だけでなく一般家庭など、多方面で普及し始めた。しかしながら、我々は日常生活で磁場や電波を利用した製品に囲まれているにも拘わらず、その背景にある物理現象に対する理解は容易ではない。事実、理科や物理学を学ぶ教育現場において、磁場や電場といった視認できない抽象的概念は理解が困難であるという学生の意見は多い。このような現状により、一般的な学習指導要領に沿った手法で電磁現象を理解することは、容易ではないことが明らかになっている[1]。この課題の解決策として、電場や磁場に関連した物理量を、五感を用いて実体験することにより、本質的な理解に繋がることが実証されている。例えば中本らは、抽象的な電磁気学分野の磁場という概念の理解を実体験によって促すために、磁場の三次元可視化教材を作成している[2]。その他にも、拡張現実 (Augmented Reality: AR) 技術を応用し、現実には見えないものを可視化するツールを使用する試みがある。AR は安価で扱いやすい、導入難度が低いという特徴を持つため、教育現場に取り入れやすい。AR を用いて、磁石などの磁界分布の可視化を行っている例もあるが[3][4]、磁場の存在を感じるためには、視覚だけでなく、より多くの五感で体験したほうが良い。五感の中でも、物が触れたという触覚情報は実感覚として脳に届くので、学習効率を上げることは広く知られている。磁場に触ることによってその存在を感じ取ることは、磁場理解に対する有効な手段の 1 つであると考えられる。

本研究では、磁場の理解補助を目的として、磁界分布の可視化と、磁場のエネルギーを利用した触覚感覚の提示に注目した。我々はこれまで、システムの小型化や省電力化を目的として、図 1 のような、ワイヤ状に加工した形状記憶合金 (Shape-Memory Alloy: SMA) を用いた触覚提示アクチュエータの研究を進めてきた[5][6]。このアクチュエータは小型で簡易な構造をしており、様々な形状の触覚ディスプレイを作成できる。省電力で駆動できるという特徴を持つ SMA アクチュエータは WPT と相性が良く、これらを組み合わせることで、ユーザビリティの高い触覚提示システムとデバイスの構築が可能となる。

そこで本稿では、磁場を実体験するために、コイルに高周波電流を流すことにより発生した磁束分布を、AR を用いて可視化するシステムならびに、WPT を利用した磁場エネルギーを触覚に変換したシステムを構築した。本稿では、これら 2 つを組み合わせた磁場体験システムについて述べる。

2. 従来研究

2.1 触覚提示アクチュエータ

物理的な刺激を人間の皮膚下にある触覚受容器に加えることで触覚を再現する研究が、様々な手法で検討されている。例えば、振動子、超音波、電氣を利用したアクチュエータが提案されているが、消費電力・応答性・煩雑な構造など、普及化には改善点や技術的課題が残されている。

これらの問題に対して本研究では、Ti-Ni-Cu 系 SMA を直径 50 μm 、長さ 5mm に加工したワイヤを使用する。この SMA ワイヤに熱を加えると、形状記憶効果によって長さ方向に数%程度収縮し、放熱によって温度が下がると収縮以前の長さに戻るといった性質を持っている。合金である SMA ワイヤは内部抵抗を持ち、電流を流すと発熱して収縮する。

^{†1} 早稲田大学先進理工学部
School of Advanced Science and Engineering, Waseda University

^{†2} 早稲田大学理工学術院
Faculty of Science and Engineering, Waseda University

^{†3} 芝浦工業大学工学部
School of Engineering, Shibaura Institute of Technolog

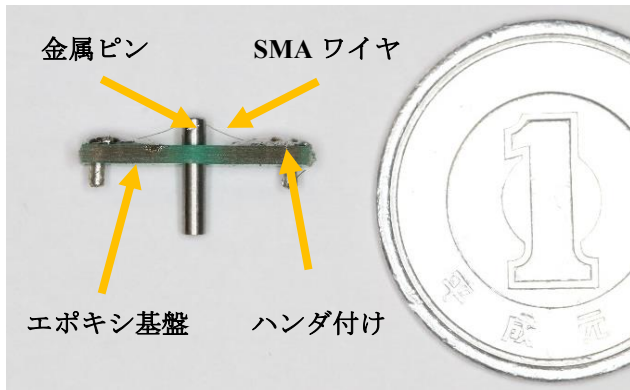


図 1 SMA アクチュエータ

また電流を止めると放熱して元の長さに戻る。パルス電流の周波数や振幅を操作することで、任意の伸縮運動を起こすことが可能となる。図 1 に示すように、SMA ワイヤに金属製のピンを取り付け、SMA の伸縮運動をピンの上下運動として取り出し、触覚提示アクチュエータとして利用する[5][6]。SMA アクチュエータの駆動電圧は 2~3V であり、パルス電流のデューティ比は 3~8% 程度であるため、数 mW の消費電力で駆動する。また、パルス電流の周波数を制御することで、最大 300Hz までの微小振動を生起できる。このアクチュエータは小型かつ省電力で高い応答性を持つので、多様な形状の物体に取り付けることが可能であり、様々な分野で実用的な触覚コンテンツへの展開が見込める。

2.2 ワイヤレス給電

コイルを利用した WPT は、送信側コイルから発生する磁界が、受信側コイルに鎖交すると誘起電力が生じる現象を利用したものである。本手法は、コイル同士の位置ずれや伝送距離の制限があり、これらが大きくなることで伝送効率が著しく減少してしまう問題がある[7]。この課題に対し、高効率で大ギャップの伝送を可能にする、磁界共振方式を MIT が提案した[8]。磁界共振方式は、電磁誘導方式において送電側と受電側の伝送周波数と共振周波数を同じにすることで生じる調相結合を利用する手法である[8][9][10]。これによって、送受電コイル間の位置ずれや伝送距離が大きいといった、結合係数の小さい条件下においても、高効率での電力伝送が可能となり、実製品への応用を目的として注目度が高まっている。しかしながら磁界共振は、送受電コイルの結合係数や負荷が変動する場合、伝送電力が変動するため、伝送効率を維持するためにはこれらの変動要因を制御する必要がある[9]。効率維持のためにシステムに制御系を加えてしまうと、デバイスの構造が複雑化し、ユーザの自由な動作を妨げる可能性がある。ユーザビリティを高くするためには、システムの構造は単純なものが好ましい。そこで伝送効率が低下しても駆動できる省電力な SMA アクチュエータを用いることによって、制御による最適化を用いることなく使用できると考えられる。

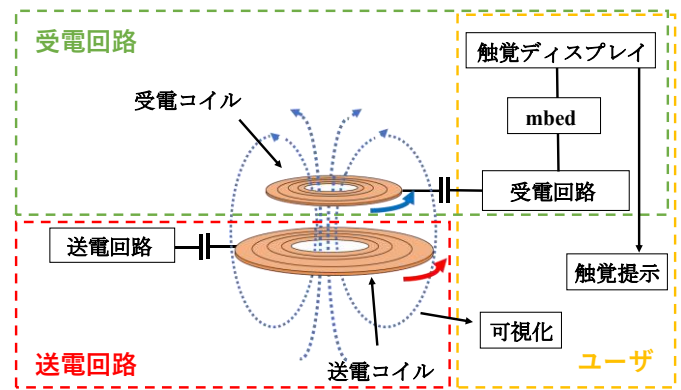


図 2 磁場体験システムの構成図

3. 磁場体験システム

本研究で提案するシステムの構成図を図 2 に示す。提案システムは、受電コイルを装着した手袋をつけたユーザの手が送受電コイルに接近した時に、ワイヤレス伝送された電力を触覚という物理的フィードバックに変換する。図 3 に示すように、WPT システムは大別すると、送電側回路と受電側回路から構成される。

ユーザは SMA アクチュエータを取り付けたグローブ型触覚ディスプレイを装着する。受電コイルに磁場が鎖交した時、磁場エネルギーが SMA アクチュエータの運動に変換される。ユーザが、この SMA アクチュエータからの触覚フィードバックを得ることで、磁界の存在を知覚することとなる。以下に、提案システムの実装について述べる。

3.1 送電回路

2.1 で述べた SMA アクチュエータの駆動電圧を満たす電力を送電するために、高周波スイッチングが可能な送電回路を設計した。この回路では、発信周波数とデッドタイムを変更可能な IC を使用したハーフブリッジ回路によって、MOSFET のスイッチングを行う。これにより、定電圧を高周波数の矩形波に変更し、任意の伝送周波数に変調することが可能となる。伝送周波数を調整することで、送受電コイルが離れていても、SMA アクチュエータの駆動要件を満たすことができる。また、送電回路に使用するコイルは、リッツ線(30 本/0.08mm)を 30 ターン巻いたものである。作成したコイルのパラメータの仕様を表 1 に示す。このコイルの背面にはフェライトを取り付けている。

3.2 受電回路・制御回路

受電コイルによって得た交流電圧は、SMA アクチュエータの駆動周波数よりも高いため、周波数変換が必要となる。そこで受電回路は、倍電流整流回路によって一度直流化し、SMA アクチュエータの駆動条件に合わせてパルス化することによって触覚アクチュエータを駆動させるように設計した。本研究では、パルス信号制御を目的として、マイコン(mbed LPC 1768, ARM Ltd)を使用する。mbed で PWM 信号を制御することにより、任意の周波数で SMA アクチュエータを駆動することができる。この回路で受電した電

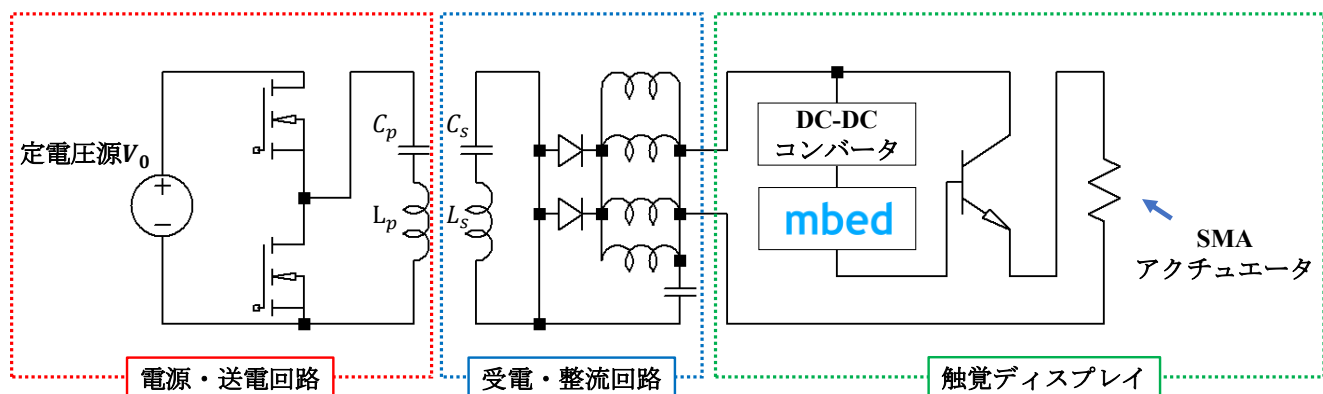


図3 提案システムの回路図

力は、mbed を起動・駆動する電力と、mbed の PWM 信号を増幅する電力に使用する。また、受電回路に使用しているコイルは送電回路と同様のリッツ線を使用しており、25 ターン巻いて作成されている。このコイルの背面にもフェライトを取り付けており、パラメータは表 1 に示したとおりである。

3.3 触覚ディスプレイ

図 4 に開発したグローブ型触覚ディスプレイを示す。この触覚ディスプレイは、受電コイルと整流回路、mbed、増幅回路、微小振動アクチュエータによって構成される。グローブの掌部に受電コイルを取り付け、アクチュエータは、掌側の各指に 1 個ずつ、計 5 個取り付けられている。これにより、送電コイルからでた磁場が受電コイル充分交した時、磁場エネルギーがアクチュエータの駆動エネルギーに変換される。このアクチュエータの振動が皮膚に伝わることによって、触知ピンの働きを行う。磁場エネルギーを運動エネルギーに変換することで、磁場に触ることを可能にしている。また、mbed 及び回路群に関しては、グローブの手の甲部分に取り付けることで、外部機器とのワイヤ接続をなくし、ユーザの自由な手の動きを可能にしている。

表 1 送受電コイルの各パラメータ

項目	記号	値
送電側コイルの半径[mm]	r_p	62.5
受電側コイルの半径[mm]	r_s	32.5
送電側自己インダクタンス[μH]	L_p	150
受電側自己インダクタンス[μH]	L_s	338
送電側コイル直流抵抗[Ω]	R_p	2.3
受電側コイル直流抵抗[Ω]	R_s	1.8

4. 伝送電力シミュレーション

磁界共振方式での WPT は、2.2 で述べたように、位置の整合性、伝送距離に大きく依存している。従ってシステムを構築する際は、送受電コイル間の垂直距離 $d[\text{m}]$ と伝送周波数 $f[\text{Hz}]$ の違いによる出力電力 $P_{\text{out}}[\text{W}]$ の変化する様子をシミュレートすることが有効である[11][12][13]。また、送電回路の回路方程式から導出できる計算式を用いることで、受電回路による出力電力を推定し、最大伝送効率となる条件をシミュレーションにより理解ができる。本章では、導出過程及び、本システムパラメータによるシミュレーションについて述べる。

4.1 磁界共振方式の伝送電力シミュレーション

磁界共振方式の等価回路モデルは、図 5 のように表すことができる[11][12]。送電側の入力電圧を V_{in} 、電流を I_p 、インダクタンスを L_p 、静電容量を C_p 、インピーダンスを Z_p 、内部抵抗を R_p 、受電側の負荷電圧を V_o 、電流を I_s 、インダクタンスを L_s 、静電容量を C_s 、インピーダンスを Z_s 、目的の負荷抵抗を R_o 、内部抵抗を R_s とし、伝送する際の角周波数を ω 、送受電コイル間の相互インダクタンスを M とすると、等価回路の回路方程式は式(1)のように表せる。

$$\begin{bmatrix} Z_p & -j\omega M \\ -j\omega M & Z_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_p \\ I_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{in} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式(1)より式(2)のように解くことができる。

$$Z_p = R_p + j\omega L_p + \frac{1}{j\omega C_p}, \quad Z_s = R_s + R_o + j\omega L_s + \frac{1}{j\omega C_s} \quad (2)$$

$$I_p = \frac{Z_s V_{in}}{Z_p Z_s + \omega^2 M^2}, \quad I_s = \frac{j\omega M V_{in}}{Z_p Z_s + \omega^2 M^2}$$

送電コイルの半径を r_p 、受電コイルの半径を r_s 、送受電コイル間の垂直距離を $d[\text{m}]$ とすると、結合係数 k は式(3)のように定義できる。

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_p L_s}} = (r_p r_s)^{\frac{3}{2}} (d^2 + r_s^2)^{-\frac{3}{2}} \quad (3)$$

$$I_p = \frac{Z_s V_{in}}{Z_p Z_s + \omega^2 (r_p r_s)^3 (d^2 + r_s^2)^{-3} L_p L_s}$$

$$I_s = \frac{j\omega (r_p r_s)^{\frac{3}{2}} (d^2 + r_s^2)^{-\frac{3}{2}} \sqrt{L_p L_s} V_{in}}{Z_p Z_s + \omega^2 (r_p r_s)^3 (d^2 + r_s^2)^{-3} L_p L_s}$$

従って、目的負荷における出力電力 P_{out} は式(4)のようになり、

$$P_{out} = I_s^2 R_o = \left| \frac{j\omega (r_p r_s)^{\frac{3}{2}} (d^2 + r_s^2)^{-\frac{3}{2}} \sqrt{L_p L_s} V_{in}}{Z_p Z_s + \omega^2 (r_p r_s)^3 (d^2 + r_s^2)^{-3} L_p L_s} \right|^2 R_o \quad (4)$$

のように、出力電力 P_{out} を導出することができる。この式(4)を使用し、入力電圧、共振周波数を設定すると伝送電力をシミュレーションすることができる。

4.2 数値計算シミュレーション

式(4)と表1に示す送受電コイルのパラメータ、送電側電圧を $14V_{rms}$ 、コンデンサの静電容量を共振周波数が250kHzとなるように設定したとき、SMAアクチュエータが駆動できるかシミュレーションを行った。その結果を図6に示すが、わずかな共振周波数のずれにより、伝送可能電力が急激に減少していることがわかる。また、パラメータを適切に調整することで、一定のコイル間距離があっても、SMAアクチュエータを駆動する電力供給が可能であることがわかる。従って、作成するシステムは、共振周波数、または発信周波数を微調整できるよう設計する必要がある。

5. 性能評価実験と電磁界解析

5.1 触覚知覚可能距離計測

ここではシミュレーションの結果を基に、提案システムを用いて、ユーザに対して実際に触覚を提示できることができるか、また提示可能な時、その提示可能距離はどの程度か計測を行った。

5.1.1 計測方法

テーブルに送電コイルを設置し、送電コイルの中心を基準に、垂直方向を z 軸、水平方向に x, y 軸を取り、送電コイルと受電コイルの中心位置距離 d を遠ざけていき、触覚を知覚することができる中心間距離 d を計測する。この際に、電流センサモジュール(INA219)とディスプレイを使用することで、受電した電圧と、送電効率についても計測・表示を行う。

5.1.2 計測条件

提案システムを用いて、送電回路に電圧 $14V_{rms}$ 、周波数250kHzを加える。実験参加者は、右手に受電コイルが取り付けられている触覚ディスプレイを装着し、送電コイルに近づく。この際、送電コイルと受電コイルの中心位置距離 d を0~10cmになるように1cmずつ増加させた。

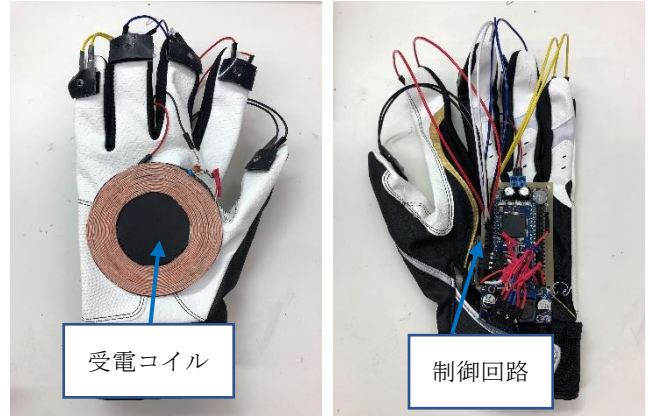


図4 触覚ディスプレイ

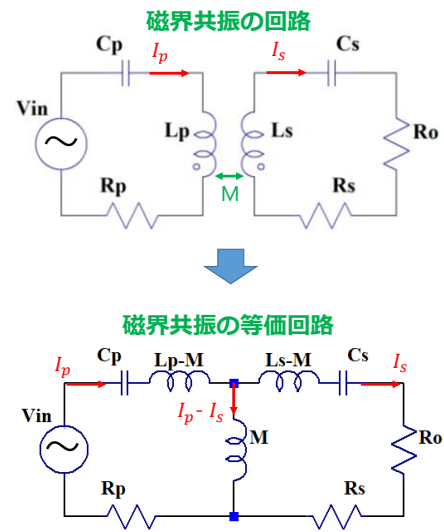


図5 磁界共振回路と等価回路

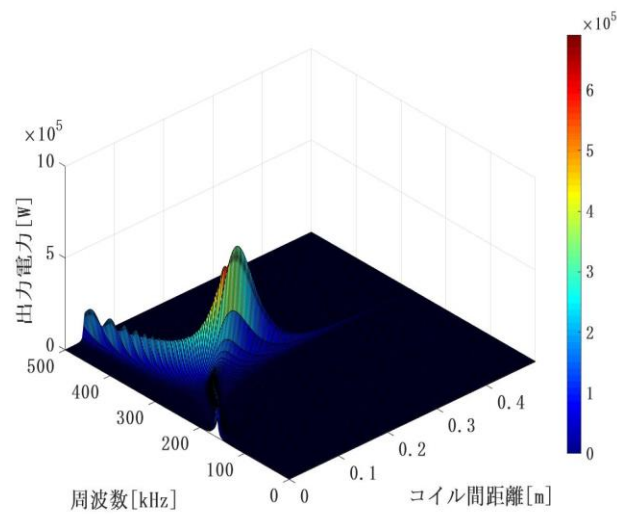


図6 出力電力の数値シミュレーション

5.1.3 実験結果

計測中のディスプレイの表示画面を図 7、計測結果を図 8 に示す。図 8 より、アクチュエータを駆動できる距離は約 0-5cm であった。mbed の駆動電圧は 4.5~9V であり、5-10cm では mbed を起動するだけの電力を供給できず、触覚提示を行うことができないことが分かった。また、0-1cm では受電効率は一上昇し、2-10cm では減少していることがわかる。この結果は 4.2 のシミュレーションと一致している。この 0-1cm での上昇要因として、近距離では周波数分割現象が生じているからと考えられる[13]。本実験により、WPT を用いた触覚提示が近距離間で可能であることがわかった。

5.2 電磁界解析

表 1 に示した、自作コイルのパラメータと電磁界シミュレーションソフト (Finite Element Method Magnetics: FEMM) を使用し、磁束分布のシミュレーションを行った。結果を図 9 に示す。図 9 は、図左端を対象軸とする線対称である。また、実験 5.1.3 を参考にし、垂直距離 d が 3cm と 5cm に青い補助線、5cm が境界となるように磁束密度のカラープロットを設定した。

6. AR を用いた磁束分布の可視化

磁束分布の可視化のための AR システム構築を目指し、開発環境には Unity と Vuforia を利用した。Vuforia は、AR ライブラリであり、位置特定用のマーカをカメラで認識することで、実空間の意図した位置に仮想オブジェクトを重ね表示させることができる。この仮想オブジェクトを、磁場をイメージしたオブジェクトとする。

本研究で構築した磁場体験システムを図 10 に示す。ユーザは、タブレット PC の画面を通して、画面の向こう側にある実空間上のコイルと、別に置いてあるマーカを認識する事によって重畳された磁束分布を見ることができる。ユーザがグローブ型触覚ディスプレイを装着した手を送電コイルに近づけると、磁場の分布を SMA アクチュエータによるフィードバックで知覚することができる。また同時に、磁界強度を図 7 のようなディスプレイの表示によって確認できるようにしている。5.2 の結果をもとに、AR で表示する磁束分布の可視化範囲は、触覚提示に使用できる程度の磁場が、受電コイルに鎖交できる範囲とした。実際にシステムを使用した際のタブレット PC 画面を、図 11 に示す。垂直距離 d が 3-5cm 程度の距離見えるように、画面上に重畳を行っている。

7. まとめと今後の課題

磁場の理解を促すため、AR を用いて磁束分布を可視化するシステムと、WPT を利用した磁場エネルギーを触覚に変換するシステムを提案した。今後は作成したプロトタイプの使用可能範囲を向上させるとともに、よりインタラクティブなアプリケーションにしていくことで、実際の教育現場に

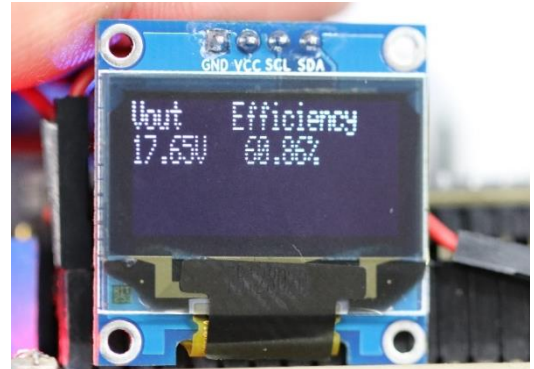


図 7 計測中のディスプレイ

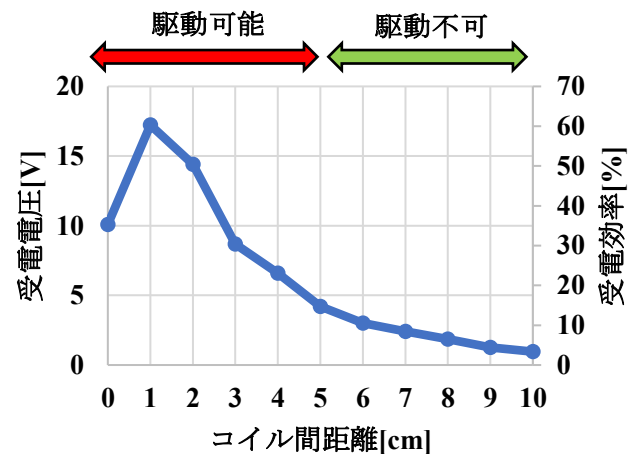


図 8 コイル間距離とアクチュエータ動作の関係

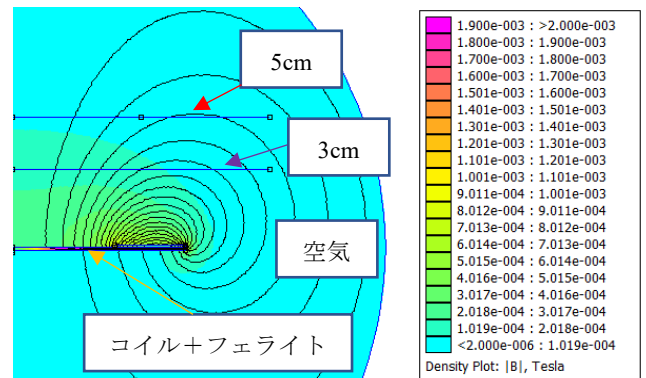


図 9 FEMM による電磁界シミュレーション

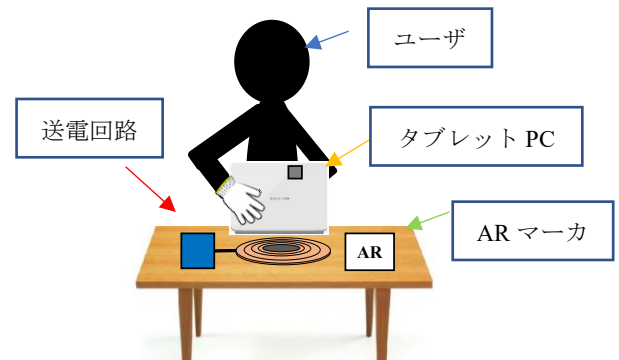


図 10 磁場体験システム図

おける、磁場の学習に役立つアプリケーションの構築を進めていく。また、他分野での本アプリケーションの使用も検討していく。アクチュエータの構造や、駆動パラメータを改善することで、AR 空間で実物を模した物体を扱い、その触感や質感を再現するなど、日常生活に有用なアプリケーションへと発展させていきたい。

謝辞

本研究は JSPS 科研費、新学術領域研究「ソフトロボット学」JP18H05465 及び JP18H05473、並びに早稲田大学特定課題研究助成費（課題番号: 2019R-039）の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] 仲里和子, 土佐幸子. 電磁気学分野における生徒の概念理解を促す指導法の開発研究: 五感を伴った手法に着目して. 新潟大学教育学部研究紀要自然科学編, Vol. 11, No.1, pp.17-35, 2018.
- [2] 中本剛, 中野徹. 磁場の三次元可視化教材の開発. 愛媛大学教育学部紀要, Vol. 62, pp. 163-168, 2015.
- [3] 宮内武紀, 松友真哉, 野口聡, 山下英生. 拡張現実感技術を利用した磁場可視化システムの一提案. 【全国大会】平成 23 年電気学会全国大会論文集, 2011.
- [4] 田村領太, 桐生徹, 中野博幸, 小松祐貴, 久保田善彦. 立体的な磁力線をイメージするための AR 教材の開発. 日本科学教育学会研究会研究報告, Vol. 31, No.1, pp. 17-20, 2016.
- [5] 水上陽介, 内田啓治, 澤田秀之. 糸状形状記憶合金の振動を利用した高次知覚生起による触覚呈示. 情報処理学会論文誌, Vol.48, No.12, pp. 3739-3749, 2007.
- [6] 高瀬裕史, 姜長安, 澤田秀之: 拡張現実空間における触感覚呈示による仮想キャラクタとのインタラクションシステム. 情報処理学会インタラクション 2011 論文集, pp.83-90, 2011.
- [7] 牛嶋, 他. グリーンエレクトロニクスキットで体験! C と L と非接触パワー伝送の実験, No.19, pp. 52-67, CQ 出版
- [8] Andre Kurs, Aristeidis Karalis, Robert Moffatt, John D Joannopoulos, Peter Fisher, and Marin Soljačić. Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances. Science, Vol. 317, No. 5834, pp. 83-86, 2007.
- [9] 平松敏幸, 黄孝亮, 加藤昌樹, 居村岳広, 堀洋一. ワイヤレス給電における送電側による最大効率と受電側による所望受電電力の独立制御. 電気学会論文誌 D (産業応用部門誌), Vol. 135, No.8, pp.847-854, 2015.
- [10] 居村岳広. 磁界共振結合を用いた複数負荷への一括ワイヤレス給電に関する研究. 電気学会論文誌 D, 産業応用部門誌 Vol. 134, No. 6, pp. 625-633, 2014.
- [11] 松本, 他. ワイヤレス給電用コイルの最適化検討, 昭和電線レビュー, Vol.62, pp.30-39, 2016.
- [12] Masaki Kato, Takehiro Imura, and Yoichi Hori. New characteristics analysis considering transmission distance and load variation in wireless power transfer via magnetic resonant coupling. Proc. Intelec 2012, pp. 1-5, 2012.
- [13] Ho Yeong Lee and Gwan Soo Park. Analysis of the resonance characteristics by a variation of coil distance in magnetic resonant wireless power transmission. IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 54, No.11, pp. 1-4, 2018.

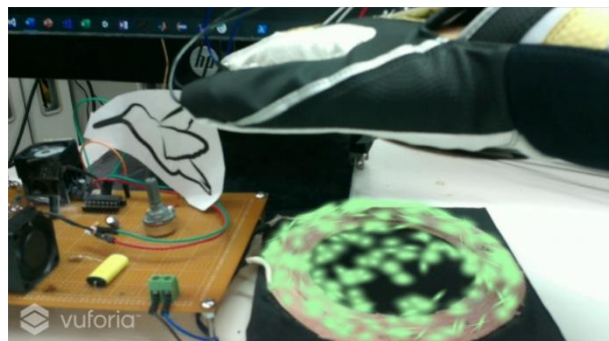


図 11 システム使用時のタブレット画面