



# 皮膚に固定した磁石とコイルによる触覚提示の検討

Pilot study of tactile presentation using magnets and coils fixed to the skin

真鍋光希<sup>1)</sup>, 牛山奎悟<sup>1)</sup>, 高橋哲史<sup>1)2)</sup>, 梶本裕之<sup>1)</sup>

Mitsuki MANABE, Keigo USHIYAMA, Akifumi TAKAHASHI, and  
Hiroyuki KAJIMOTO

- 1) 電気通信大学院 情報理工学研究科 (〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1, {manabe, ushiyama, a.takahashi, kajimoto}@kaji-lab.jp)  
2) 日本学術振興会

**概要**：従来のウェアラブルを前提とした小型触覚提示素子の多くは、振動子タイプでは圧覚を含めた低周波を提示することが難しく、押すタイプのはフレームやベルトで手指全体を覆う必要があった。本稿では、皮膚に磁石とコイルを接着し、磁石とコイル双方が皮膚を駆動する部分として作用することにより、小型軽量に幅広い周波数の振動を提示でき、さらに皮膚を引き上げる方向まで含めて提示できるデバイスを提案する。

**キーワード**：小型アクチュエータ、ウェアラブルデバイス、電磁石

## 1. はじめに

近年、振動子をはじめとするアクチュエータの小型化と高品位化の進歩により、触覚提示は単なる通知や警告の提供の用途以外にも、高度な感觸の再現への活用も積極的に試みられている。

接触物体のテクスチャや形状の触覚情報を表現するための皮膚に装着するウェアラブルデバイスが数多く提案されている。多くの場合 LRA (直動型振動子) の筐体を把持または身体に装着するが、筐体内で錘が振動する提示方式の場合、錘の動きに対する反作用で皮膚に触覚が生じるという原理上、低周波を提示することが難しいという課題がある。これに対して圧覚を提示するウェアラブルデバイスの提案も数多く行われている。例えばリング型デバイスにより空気圧等により指腹を圧迫する試みがなされている[1][2]。こうした提案では指腹側の皮膚を圧迫するために基部を爪側にまで配置し指周りを覆う必要があるため、装着箇所に制限がある。またこれらは空気圧や水圧を利用するチューブやフィルム状のアクチュエータを用いており、軽量である反面応答性や高周波振動の出力に課題がある。

身体のどの部位にも装着可能な、電磁石と永久磁石を用いピンで皮膚に圧覚を提示する提案がいくつかなされている[3][4]。これらの多くは図 1 のようにコイルと磁石を少し離れた位置に配置し、両者の間に働くローレンツ力でピンを動かす。しかしこの構成では、磁束が効率的にコイ

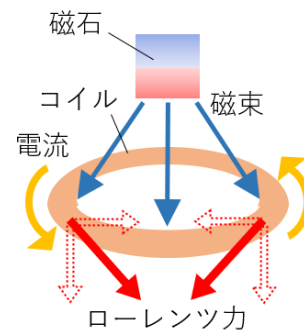


図 1 磁石とコイル間のローレンツ力

ルを通過しないためエネルギー効率が悪く、磁石とコイルの間に距離が必要になるため装置の厚みが増加する。またこうした提案は、磁石を垂直方向に動かすためのフレームとガイドや、磁石とコイルをつなげるゴムなど多くのパーツで構成されることが多い。

より効率よくローレンツ力を得るために N-S 配列やハルバッハ配列など磁束を集中させるように磁石を並べ、生み出された強い磁場を利用する振動子が提案されている[5][6]。中でも Tactile 社製の Haptuator Mark II では、反発する磁石同士を接近させた磁石ユニットを用い、磁束とコイルの電流を直交させ強いローレンツ力を生み出すことに成功している[7]。この工夫は、主に磁石の往復運動の反

力で振動を生み出す振動子に活用されており、皮膚を直接牽引する手法には用いられていない。

本研究では、この Haptuator の手法を援用した小型触覚提示素子を提案する。図 2 のように反発する永久磁石または電磁石同士を組み合わせ皮膚に貼ることで、小型ながら強い触覚刺激を提示可能な手法を提案する。図 2 左では、反発する磁石同士を貼り付け、側面方向に強力な漏れ磁束を発生させることで、より強いローレンツ力を生じさせる。この場合、コイルと磁石の間に垂直方向の距離を設ける必要がないため先行研究と比較し薄型の装置を作成可能と考えられる。図 2 右では反対方向に巻かれたコイルを 2 つ用意する構成を示している。この場合も磁束は効率的に利用され、より強い振動を提示可能と考えられる。

またこれらの提案手法では、コイルと磁石をそれぞれ皮膚に直接貼り付ける。このため振動に加えて持続的な皮膚牽引も提示可能であり、さらに押す方向だけではなく引き上げる方向にも牽引力を提示可能である。本稿ではプロトタイプの実験及び周波数特性の計測を行い、提案の有効性を確かめる予備実験を行った。

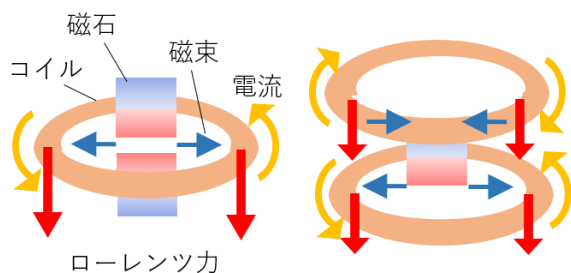


図 2 提案手法 (左) 反発する磁石の組み合わせ  
(右) 反発するコイルの組み合わせ

## 2. 構成

提案した手法に基づき製作したアクチュエータ機構のプロトタイプについて述べる。

### 2.1 コイル

図 3 のような三種類のコイルを作製した。(A) は 100 回巻コイル、(B) は 200 回巻コイル、(C) は 2 つの 100 回巻コイルを巻く方向を反対向きにして組み合わせたコイルユニットである。外径、内径、高さ、重量及び抵抗は表 1 のようになる。コイルはいずれも銅線(導体外径 0.1mm, 仕上外径 0.12mm)を用いて作成した。断線を防ぐため配線一部をホットボンドで補強した。サイズは指に載せられる寸法から決定した。3D プリンタを用いて製作したスペーサを、(A) と (B) に関しては片面に、(C) に関してはコイルのペアの間に接着した。

### 2.2 磁石

図 4 のような三種類の磁石ユニットを作製した。外径、高さ、重量は表 2 のようになる。反発する磁石同士を接着した磁石ユニットである (C) に関しては、間にコイル製作に利用したものと同様に絶縁体のスペーサを設けた。

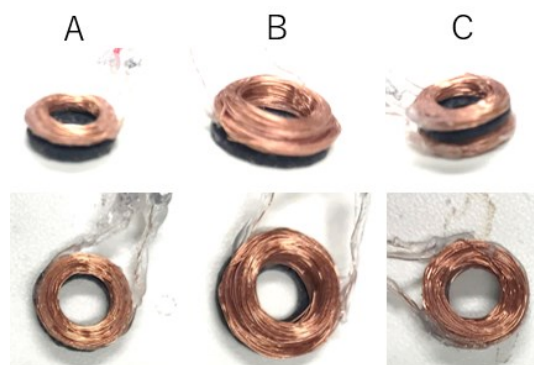


図 3 コイルのプロトタイプ  
(A) 100 回巻 (B) 200 回巻 (C) 100 回巻のペア

表 1 コイルの寸法

	外径 [mm]	内径 [mm]	高さ [mm]	重量 [g]	抵抗 [Ω]
A	10.4	5.28	3.27	0.89	3.9
B	13.6	5.53	4.96	1.43	10
C	10.4	5.36	5.12	1.52	8.6

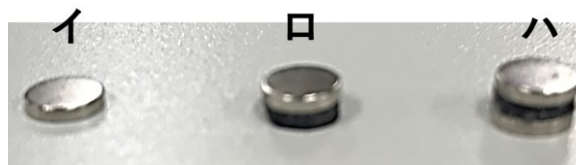


図 4 磁石のプロトタイプ

表 2 磁石の寸法

	外径[mm]	高さ[mm]	重量[g]
イ	5.00	1.07	0.16
ロ	5.00	2.93	0.18
ハ	5.00	3.81	0.31

### 2.3 電磁石アクチュエータ

図 5 のようにコイルの中に磁石を置くように配置し、双方を粘着テープで皮膚に設置した。粘着剤には皮膚に張り付ける用途の医療用テープ(3M 製, 1522H)を用いた。図 6 のようにスペーサを配置することにより、磁石ユニットの磁束とコイルが可能な限り直交するような配置にした。

## 3. 周波数特性の測定

提案手法が幅広い周波数帯域の振動を提示可能か検証するため、周波数特性の測定を行った。

### 3.1 実験セットアップ

実験では、ソフトウェア (Processing) により各周波数の正弦波を生成し、アンプを通し交流電圧をコイルに印加した。使用したアンプは定電圧駆動型のステレオパワーアンプ(North Flat Japan 社製, FX-AU DIO- FX202A/ FX-36A PRO)であった。

通常周波数特性の計測では電圧を統一する機会が多い。しかし電圧一定ではインピーダンスが異なるアクチュエータ間で比較することができない。よって今回の実験では



図 5 提案手法の外観

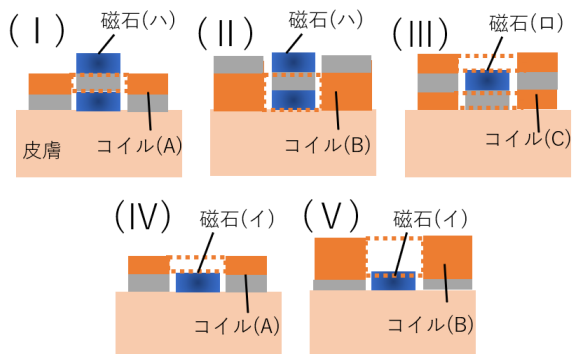


図 6 磁石とコイルの組み合わせ条件

電力を一定にして振動振幅を測定した。電力値を観察するために、オシロスコープ(RIGOL 社製, DS1054Z)のプローブをコイルの端子につなぐことで電圧値を、またコイルと直列につないだ抵抗 (メタルクラッド抵抗 25W 0.1Ω) の両端につなぐことで、電流に比例した電圧を観測し電流値を測定し、電圧値と電流値を乗算し電力値の波形を表示した。電力は 1W で統一した。

図 7 のように交流電圧を印加した際の磁石の変位をレーザ変位計 (KEYENCE 社製, LK-H050) を用いて計測した。サンプリング周波数は 2kHz であり、最小表示単位は 0.001mm であった。計測時アクチュエータは著者の右手人差し指の指腹に設置し、指は机上の粘土において固定した。



図 7 振幅測定の様子

### 3.2 実験条件

測定条件は構成で述べた図 6 の 5 条件とした。(I),(II) は反発する 2 つの磁石同士を接着したユニットと一つのコイルからなる条件,(III) は流れる電流が反対になるコイルのペアと一つの磁石からなる条件,(IV),(V) は従来の磁石とコイルを並べて配置する条件であった。周波数は 10 ~200Hz までの 10Hz 刻みとした。

### 3.3 結果

結果は図 8 のようになった。いずれの条件でも 10Hz で最も振幅が大きく、高周波になるにつれて小さくなり約 80Hz で 0.01mm 程度にまで収束した。しかし振幅が 0mm になることはなかった。0~80Hz までの間で最も大きかったのは条件 (III) であり、次に (IV),(V) , 最も小さかったのは条件 (I),(II) であった。巻き数のみが違う (I),(II) と (IV),(V) の条件間では、どちらも周波数特性に大きな差はなかった。

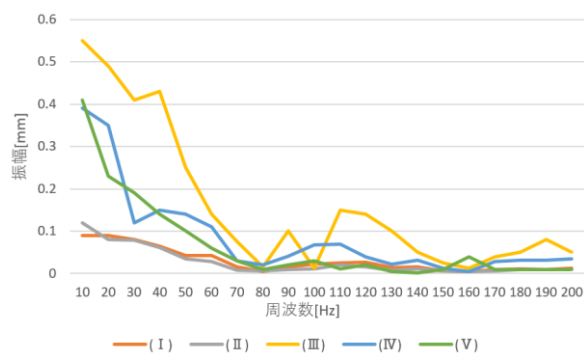


図 8 周波数特性

## 4. 考察

### 4.1 実験結果について

いずれの条件も 10Hz で最も振幅が大きくなったため、周波数特性のピークが 10Hz 以下の帯域にある可能性が考えられる。今回の周波数範囲では共振は見られなかった。

今回の実験では予想に反し従来手法にならった配置である (IV),(V) の方が提案手法 (I)(II) より大きくなった。これは磁石とコイルの高さやコイルとその中に収まる磁石との隙間の距離などの条件から可動域が狭まってしまったことが原因と考えられる。提案手法では磁石のペアがコイルを超えられずそこが可動域の限界になるが、従来手法では磁石とコイルが反発する向きに関しては制限がないため振幅が大きくなったと考えられる。

また今回計測したのが磁石の振動であったことも原因の一つと考えられる。条件(I)(II)は磁石部分の重量が他の条件に比べて 2 倍以上であり、それだけ振動しにくい。逆にコイルのほうが強く振動していた可能性があり、総合的な主観的強さについても検討する必要がある。

コイルのペアで磁石を挟む条件 (III) についても同様に可動域が狭まる可能性があったが、実験では最も振幅が

大きくなった。これはコイル同士の幅が大きく磁石が薄いことで十分な可動域を確保できたことが原因と考えられる。

より詳しく周波数特性について検証するためには、各手法に直流電圧を印加した場合の可動域、及び加速度に関する周波数特性についても追加調査する必要がある。

#### 4.2 減磁について

反発する磁石同士を接近させた状態で保管することで、磁石が減磁する可能性がある。今回は磁力の変化の測定は行わなかったため定かではないが、実験で用いた磁石も減磁の影響を受けていた可能性がある。加えて磁石ユニットは製作が困難であり、また使用中に接着面が剥離し破損するリスクがある。そのため二つのコイルで磁石を挟むように配置する手法の方がより適切であると考えられる。

#### 4.3 発熱について

提案手法はコイルを直接皮膚に付けるため発熱は重要な課題となる。そこで最も抵抗値が高い200回巻コイルに1Wの電気を1時間印加したのち、表面温度を計測した。室温は25度であった。その結果、温度上昇は27.8度にとどまっていたため、この程度の電力での駆動であれば安全と考えた。

### 5. おわりに

本稿では反発しあう永久磁石または電磁石同士を組み合わせ皮膚に貼ることで、小型ながら強い触覚刺激を提示可能な手法を提案し、それに基づくプロトタイプ製作及び予備実験を行った。実験では、磁石とコイルの配置パターンを用意し、それぞれで振動を提示した際の周波数特性を測定した。その結果、配置パターンによって周波数特性が変化し得ることが分かり、特に低周波においてその変化が顕著にあらわれた。

今後はモデル化により最適なコイルや磁石の配置及び寸法を求めプロトタイプを製作し、また被験者実験を実施することで提案の有効性について検証したい。

謝辞 本研究はJSPS科研費JP20K20627の助成を受けたも

のです。

#### 参考文献

- [1] Y. L. Feng, C. L. Fernando, J. Rod and K. Minamizawa, "Submerged haptics: a 3-DOF fingertip haptic display using miniature 3D printed airbags", SIGGRAPH '17: ACM SIGGRAPH 2017 Emerging Technologies, pp. 1-2, 2017
- [2] T. Han, F. Anderson, P. Iran and T. Grossman, "HydroRing: Supporting Mixed Reality Haptics Using Liquid Flow", ACM Symposium on User Interface Software & Technology, pp. 913-925, 2018
- [3] V. Vechev, J. Zarate; D. Lindlbauer; R. Hinchet; H. Shea and O. Hill, "TacTiles: Dual-Mode Low-Power Electromagnetic Actuators for Rendering Continuous Contact and Spatial Haptic Patterns in VR", 2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces, pp. 312-320, 2019
- [4] H. Kim, H. Yi, H. Lee, and W. Lee, "HapCube: A Wearable Tactile Device to Provide Tangential and Normal Pseudo-Force Feedback on a Fingertip", CHI '18: Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, pp. 1-13, 2018
- [5] S. H. Chae, S. Ju, Y. Choi, Ye-Eun Chi, and Chang-Hyeon Ji, "Electromagnetic Linear Vibration Energy Harvester Using Sliding Permanent Magnet Array and Ferrofluid as a Lubricant", Micromachines (Basel). 2017, 8(10), 288, 2017
- [6] M. Salauddin, M. A. Halim, J. Y. Park, "A magnetic-spring-based, low-frequency-vibration energy harvester comprising a dual Halbach array", Smart Materials and Structures, Volume 25, Issue 9, 2016
- [7] TactileLabs Haptuator Mark II, "http://tactilelabs.com/wp-content/uploads/2012/07/TL002-09-A\_v1.01.pdf, 2021/07/30