

# 簡便なウェアラブル触覚提示のための磁石の遠距離駆動の検討

## Tactile Presentation by Long-distance Driving of Magnets using a Remote Coil

○学 浅津 秀行 (電通大) 学 田中叡 (電通大)  
梶本 裕之 (電通大)

Hideyuki ASAZU, The University of Electro-Communications, asazu@kaji-lab.jp  
Satoshi TANAKA, The University of Electro-Communications, tanaka@kaji-lab.jp  
Hiroyuki KAJIMOTO, The University of Electro-Communications, kajimoto@kaji-lab.jp

Small devices that present a tactile sensation and can easily be mounted on skin have been proposed by attaching a magnet to a fingertip and setting a remote driving coil on the environment side. However, such devices have been used only at a distance of several centimeters from the coil. We show that a coil of practical size and power consumption can convey sufficient vibration for tactile presentation at a distance of 50 cm or more.

**Key Words:** Haptic Feedback, Magnet, Virtual Reality, Wearable.

### 1. 序論

触覚提示の有無は様々な装置の操作性を向上させるとともにVR体験において非常に重要な要素であり、触覚ディスプレイは数多く提案されている。触覚ディスプレイはその形態から、環境設置型とウェアラブル型に分けることが出来る。環境型の触覚ディスプレイ [1] [2] [3]は装置が環境に設置されているために正しい触覚を表現しやすく、ウェアラブル型の触覚ディスプレイ [4]はユーザの行動を制限しないという利点がある。ただしいずれの形態も、ユーザが手にある程度複雑な機械的ないし電気的要素を装着しなければならないという煩雑さがある。

こうした装着の煩雑さを避ける方法として、環境設置型触覚ディスプレイとして空気流 [5] や超音波 [6] [7]、レーザー [8] [9]を用いて皮膚に刺激を与える方法が提案されている。一方でこれらの手法はユーザと装置の間の障害物に大きく影響されるとともに、比較的特殊な装置が必要となる手法であると言える。

そこで、比較的簡単な手法として、磁石を用いることがこれまで繰り返し提案されている [10] [11] [12] [13]。基本的な構成としては環境にコイルを、身体に磁石を装着し、外部のコイルによって身体に磁石を駆動するというものである。磁石は非磁性の障害物では影響を受けないため例えばユーザの身体自身で場が変化することがない。また磁石のみを装着すればよく非電源のため、例えば手袋に磁石を貼る程度で済み、装着の煩雑さは一般的なウェアラブル装置に比べると低いと考えられる。さらに、磁束の計測によってトラッキングが同時に可能である [14] [15]。

ここで、磁石を触覚提示装置に用いることの問題点として、提示範囲が狭いこと、および複数個の磁石の個別駆動が検討されていないことがあげられる。従来の研究の多くはスマートフォンやタッチパネルの表面付近のホバリング状態の指への触覚提示を前提としており、コイルから数 cm の距離の範囲で動作を確認している。しかし VR 用途での利用を考えると手先を簡単に動かす範囲として 30cm 程度の提示範囲が必要と考えられる。また、例えば人差し指と親指に異なる触覚提示を行うためには、2つの磁石の片方を独立に駆動する方法が必要となる。

そこで、本研究では、30 cm先にある磁石を簡便な回路構成で現実的なサイズのコイルによって振動させることが可能であることを示す。また、磁石の向きが提示振動に強く影響し、これによって複数の磁石を独立に振動させる可能性があるこ

とを報告する。

### 2. 提案手法

本システムを Fig. 1 に示す。最大 36.9V、電流リミット 1.5A の CVCC 電源(constant voltage, constant current)と静電容量 1000 $\mu$ F のコンデンサ、FET(サンケン電気、2SK3004)およびコイルによって構成されている。FET の ON 抵抗は 0.2 $\Omega$  である。コイルは直径が 17cm の正円状であり、直径 1mm のエナメル線を 300 回巻いている。この時、コイルの抵抗は 2 $\Omega$  であった。

本システムでは、コンデンサに充電される電荷は  $Q=CV$  により 0.037 クーロンであり、1.5A の定電流で充電すれば約 25ms で充電は完了する。実際にはいくつかの内部抵抗とインダクタンスの影響、および電源電圧の制約により、コンデンサへの充電はおおよそ 100ms かかっている (Fig. 2)。放電についてはおおよそ 50ms で完了することが読み取れるため、理想的には 150ms 周期でパルス波形を生成することが可能である。

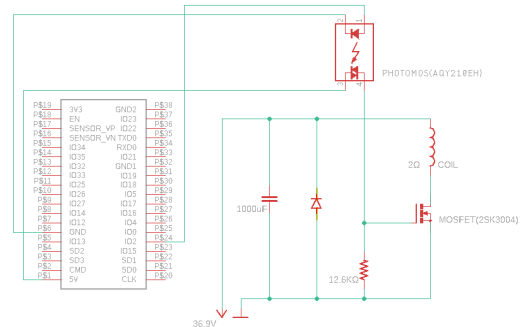


Fig. 1 Schematic diagram.

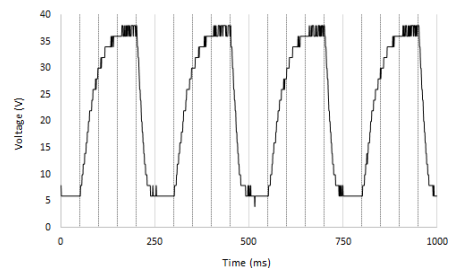


Fig. 2 Voltage of the capacitor.

### 3. 実験

本システムにより磁石が振動し、ユーザがその振動を知覚できる範囲を測定した。ユーザには親指と人差し指で磁石を把持してもらい、磁石の姿勢の影響を考慮するため Fig. 3 に示す 4 つの磁石の条件（条件 1：磁石を横に倒し N 極がコイルに対して左を向く、条件 2：磁石を横に倒し N 極がコイルの軸方向を向く、条件 3：磁石を横に倒し N 極がコイルの逆の方を向く、条件 4：磁石を倒さず N 極が上方を向く）を用意した。すべての場合において手は Fig. 4 のようにコイル正面を向く。

本研究では磁石の振動計測に関する実験と被験者実験、提示可能な距離に関する実験の 3 つの実験を行った。実験 1 では指に装着した加速度センサにより指の振動の計測を行い、実験 2 では被験者が自身で振動を感知する範囲の計測を行った。実験 3 では電源電圧を最大 100V に変更した場合の計測を行った。

実験 1、2 の計測範囲は Fig. 4 の通りであり、コイルの中心を基準とし、横幅はコイルの左右に 10cm ずつ、奥行きは実験 1 では 30cm、実験 2 では最大 50cm までとした。実験 3 では実験 1、2 のような横幅方向にずれた場合の計測は行わず、コイルの中心からの奥行きをみの計測を行った。実験時、高さはコイルの中心の高さとなるよう、Fig. 5 のように台を用いて固定した。

実験 1、2 では Fig. 2 のような 250ms 周期の波形でシステムを駆動した磁場を用いた。実験 3 も同様の波形でシステムを駆動したが電圧は 100V ほどであった。また、すべての実験では 2cm×0.7cm の円柱状のネオジウム磁石と Fig. 4 のような 5cm 毎に点が付けられたマップ、コイルの中央の高さに磁石を把持した指を持ち上げ固定する台座を使用した。



Fig. 3 Orientation of the magnet (N pole at the red end). In all cases, the hand faces the front of the coil, as shown in Fig. 5

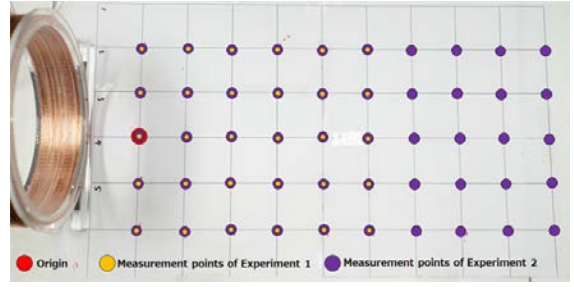


Fig. 4 Measurement range.

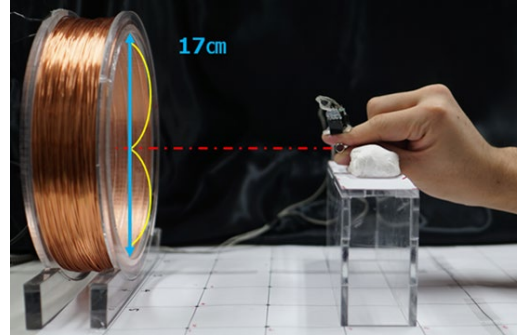


Fig. 5 Scene of the experiment.

#### 3.1 実験 1：加速度センサを用いた振動計測

実験 1 では磁石の振動の機械的計測を行うために、加速度センサを用いて、振動の計測を行った。親指と人差し指で磁石を把持し、測定時に Fig. 5 のように磁石を把持する手の人差し指の爪に加速度センサを装着し、磁石を振動させたときの加速度を計測した。この時、加速度の大きさとしては三軸の加速度ベクトルのノルムを計算した[16]。各測定位置で測定前加速度センサのキャリブレーションを約 1 秒の間行った。その後システムを起動し、磁石の振動を開始させ 1kHz 周期で 1 秒の間計測を行った。

計測は磁石の姿勢条件 1 つにつき 30 地点で行った。条件は 4 つあるため、合計で 120 回の計測を行った。

#### 3.2 実験 2：被験者閾値計測

実験 2 では本システムで磁石を振動させた場合に、人間が知覚する範囲の計測を行った。被験者 6 人（男性：5 人、女性：1 人、22~25 歳、平均年齢 24 歳）に対して実験を行った。

実験内容は実験 1 と同様の 4 姿勢をとった際に、被験者自身が振動の有無を回答するものであった。実験 1 と同様に、被験者は親指と人差し指で磁石を把持し、振動の有無を回答した。

実験中、視覚と聴覚を遮断するために被験者は目を閉じイヤーマフを装着していた。

#### 3.3 実験 3：提示可能距離の最大値計測

実験 3 では本システムで充電に用いる CVCC 電源の電圧を上げた際に振動提示可能な距離がどの程度変化するかを計測を行った。被験者 5 人（男性：4 人、女性：1 人、22~25 歳、平均年齢 24 歳）に対して実験を行った。CVCC 電源を最大 100V、電流リミット 1A のものに変更し、それに合わせて FET の変更を行った(TOSHIBA、2SK3176)。FET の ON 抵抗は 52mΩ であった。

実験内容は実験 1 と同様の 4 姿勢をとった際に、被験者自身が振動の有無を回答するものであった。実験 1 と同様に、被験者は親指と人差し指で磁石を把持し、振動の有無を回答した。このとき、計測はコイルに対する奥行き距離のみに対して行った。

実験中、視覚と聴覚を遮断するために被験者は目を閉じイヤーマフを装着していた。

### 3.4 実験結果

実験 1 の結果を Fig. 6 に、実験 2 の結果を Fig. 7、実験 3 の結果を Fig. 8 に示す。Fig. 6、Fig. 7 は Fig. 4 のように左にコイルを置いた場合の各計測点での計測結果を示している。Fig. 6 のセル内の数字は各点の加速度振幅を示しており、単位は重力加速度である。Fig. 7 のセル内の数字は各点において振動刺激を行った際に振動を感じたと回答した人数（最大 6 人）を示している。Fig. 8 は被験者 5 人が振動を知覚した最大距離の平均値を Fig. 3 の条件ごとに示している。

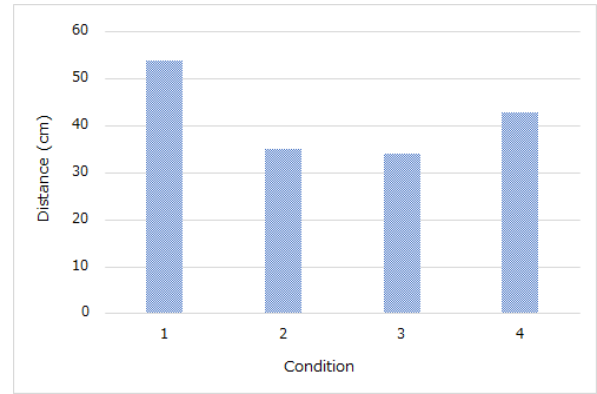


Fig. 8 Results of Experiment 3.

## 4. 考察

実験結果より、本システムが振動刺激を提示可能な距離についての考察を行う。Fig. 6 より、磁石の状態を組み合わせることで 5cm 離れた場所には 0.8G、20cm 離れた場所には 0.25G、30cm 離れた場所には 0.15G の振幅で磁石を振動可能である。スタイラスを把持した状態での閾値計測によると 10Hz 程度の振幅では知覚の閾値は 0.36G である [17]。我々の装置は現時点では 4Hz 程度の駆動にとどまっているが、矩形波駆動のため知覚しやすい状態であり、今後周波数を上げればさらに知覚しやすくなると予想される。(改行)

状態 1、4 は全体的に振幅が大きく、磁石の位置がコイルから離れるにつれて小さくなっていく傾向が見られるが、状態 2、3 では磁石の振幅はコイルの中心付近では 0.1G を下回っている。これは状態 1、4 では磁石はコイルが生成すると思われる磁場に対して直交する形で配置されており、状態 2、3 では磁場に対して平行に配置されているためであると考えられる。コイルの磁場と磁石の磁場が直交するとき、この 2 つが平行になるように回転方向の力が発生する（コンパスの針に地磁気の向きに一致する向きの回転力が加わることと同様）。これに対して、コイルの磁場と磁石の磁場が平行な場合、コイルの磁場に空間勾配が無ければ力を生じることがない。今回コイルが磁石に比べて大きく、磁場が広い範囲で平行であるため、力をほとんど発生しなかったと考えられる。

Fig. 7 の主観報告から、最適な磁石の状態を組み合わせることで 30cm の距離はほぼすべての被験者が振動を知覚可能であり、35 cm の距離でも半数以上が知覚可能であった。また、少数の人は 45cm の距離でも知覚可能であった。ここで先ほどの磁石の状態による振動の特性について考えてみる。状態 1、4 ではコイルの中心軸から離れるにつれて振動の知覚人数は減っている。しかし、状態 2、3 では 15cm 以上離れた領域において、コイルの中心部分よりもむしろ周辺部分の方が知覚人数が多い。これは周辺部分になるにつれてコイルの磁場と磁石の磁場が平行ではなくなるためであると考えられる。

振動の強さが磁石の姿勢によって大きく変化することから、複数個の磁石を複数個のコイルで個別操作できる可能性がある。少なくとも 2 個の直交する向きに配置された磁石に関しては、片方の磁石に平行な磁場は必ずもう片方の磁石と直交するから、環境に 3 個以上のコイルを配置して合成磁場を作成することで、個々の磁石を独立に振動させることが可能となると考えられる。ただし 3 個の直交する向きに配置された磁石に関しては、2 つの磁石に平行な磁場というものには存在し

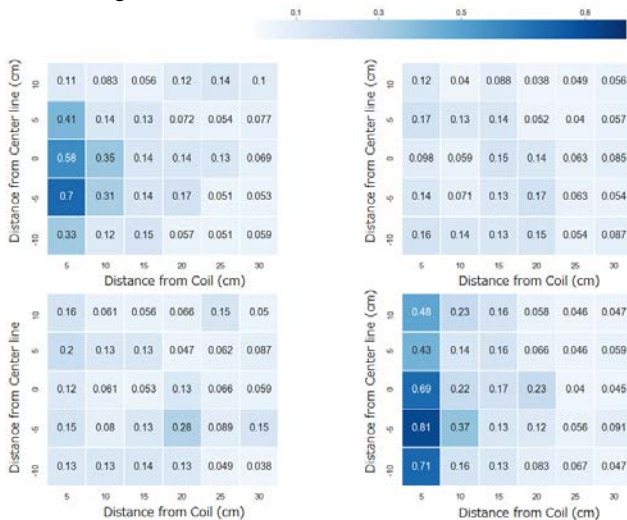


Fig. 6 Results of Experiment 1 (upper left: condition 1, upper right: condition 2, lower left: condition 3, lower right: condition 4).

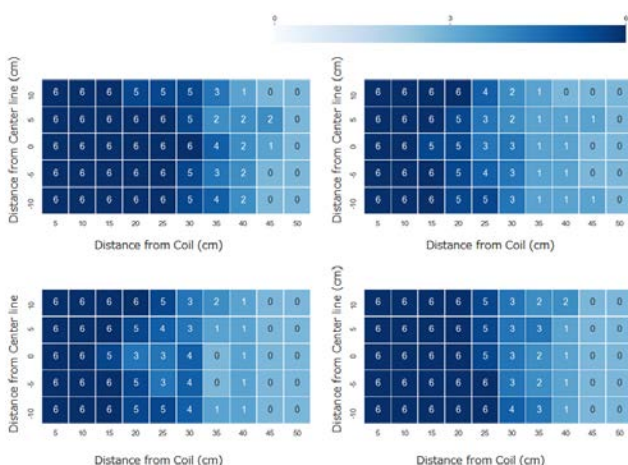


Fig. 7 Results of Experiment 2 (upper left: condition 1; upper right: condition 2; lower left: condition 3; lower right: condition 4).



ないので、一つの磁石だけを振動させることはできない。このことから、本方式で独立に振動を提示できる磁石の個数は2つであると考えられる。

Fig. 8の振動提示可能距離の測定結果から、システムへの入力電圧を調節することで最大50cm以上離れた場所に振動提示可能であることが判明した。これにより、今後入力電圧を大きくすることにより、より広範囲に振動提示が可能となると考えられる。

## 5. 結論

身体に装着した磁石による触覚ディスプレイにはオクルージョンに強いこと、電源を身体に搭載する必要がなく、さらに磁場によるトラッキングが可能であるという多くの有用性があるが、提示可能な距離が短いこと、複数の磁石を個別に駆動できないという問題点が存在した。本論文では一般に入手が用意な回路構成で50cm以上の知覚可能な振動を生起できることを示すとともに、2つまでであれば磁石を独立に駆動できる可能性を考察した。

今後は磁場のセンシングと組み合わせ、また駆動用のコイルを複数個用意することによって、例えばデスクトップ環境で手を空中に動かした際の触覚提示を安定に提示するシステムを開発していく。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 JP18H04110 の助成を受けたものである。

## 参考文献

- [1] Y. Kohno *et al.*, "Evaluation of two-handed multi-finger haptic device spidar-8," *Icat 2001*, vol. 2, no. June, p. 1, 2001.
- [2] M. Hirose *et al.*, "HapticGEAR: The development of a wearable force display system for immersive projection displays," *Proc. - Virtual Real. Annu. Int. Symp.*, pp. 123–129, 2001, doi: 10.1109/vr.2001.913778.
- [3] A. Jarillo-Silva, O. A. Domínguez-Ramírez, V. Parra-Vega, and J. P. Ordaz-Oliver, "PHANToM OMNI haptic device: Kinematic and manipulability," *CERMA 2009 - Electron. Robot. Automat. Mech. Conf.*, pp. 193–198, 2009, doi: 10.1109/CERMA.2009.55.
- [4] C. Pacchierotti, S. Sinclair, M. Solazzi, A. Frisoli, V. Hayward, and D. Prattichizzo, "Wearable haptic systems for the fingertip and the hand: Taxonomy, review, and perspectives," *IEEE Trans. Haptics*, vol. 10, no. 4, pp. 580–600, 2017, doi: 10.1109/TOH.2017.2689006.
- [5] S. Gupta, D. Morris, S. N. Patel, and D. Tan, "AirWave: Non-contact haptic feedback using air vortex rings," *UbiComp 2013 - Proc. 2013 ACM Int. Jt. Conf. Pervasive Ubiquitous Comput.*, pp. 419–428, 2013, doi: 10.1145/2493432.2493463.
- [6] T. Carter, S. A. Seah, B. Long, B. Drinkwater, and S. Subramanian, "UltraHaptics: Multi-point mid-air haptic feedback for touch surfaces," *UIST 2013 - Proc. 26th Annu. ACM Symp. User Interface Softw. Technol.*, pp. 505–514, 2013, doi: 10.1145/2501988.2502018.
- [7] T. Hoshi, M. Takahashi, T. Iwamoto, and H. Shinoda, "Noncontact tactile display based on radiation pressure of airborne ultrasound," *IEEE Trans. Haptics*, vol. 3, no. 3, pp. 155–165, 2010, doi: 10.1109/TOH.2010.4.
- [8] H. Lee *et al.*, "Mid-air tactile stimulation using laser-induced thermoelastic effects: The first study for indirect radiation," *IEEE World Haptics Conf. WHC 2015*, pp. 374–380, 2015, doi: 10.1109/WHC.2015.7177741.
- [9] Y. Ochiai, K. Kumagai, T. Hoshi, S. Hasegawa, and Y. Hayasaki, "Cross-field aerial haptics: Rendering haptic feedback in air with light and acoustic fields," *Conf. Hum. Factors Comput. Syst. - Proc.*, pp. 3238–3247, 2016, doi: 10.1145/2858036.2858489.
- [10] M. Weiss, C. Wacharamanotham, S. Voelker, and J. Borchers, "FingerFlux," p. 615, 2011, doi: 10.1145/2047196.2047277.
- [11] M. Weiss, F. Schwarz, S. Jakubowski, and J. Borchers, "Madgets: Actuating widgets on interactive tabletops," *UIST 2010 - 23rd ACM Symp. User Interface Softw. Technol.*, pp. 293–302, 2010, doi: 10.1145/1866029.1866075.
- [12] J. Lee, R. Post, and H. Ishii, "ZeroN: Mid-air tangible interaction enabled by computer controlled magnetic levitation," *UIST'11 - Proc. 24th Annu. ACM Symp. User Interface Softw. Technol.*, pp. 327–336, 2011, doi: 10.1145/2047196.2047239.
- [13] P. Berkelman, B. Tix, and H. Abdul-Ghani, "Electromagnetic position sensing and force feedback for a magnetic stylus with an interactive display," *IEEE Magn. Lett.*, vol. 10, no. 1, p. 1, 2019, doi: 10.1109/LMAG.2018.2886339.
- [14] J. Mcintosh, P. Strohmeier, J. Knibbe, S. Boring, and K. Hornbæk, "Magnetips: Combining fingertip tracking and haptic feedback for around-device interaction," *Conf. Hum. Factors Comput. Syst. - Proc.*, no. Chi, pp. 1–12, 2019, doi: 10.1145/3290605.3300638.
- [15] H. Ketabdar, M. Roshandel, and K. A. Yüksel, "Towards using embedded magnetic field sensor for around mobile device 3D interaction," *ACM Int. Conf. Proceeding Ser.*, pp. 153–156, 2010, doi: 10.1145/1851600.1851626.
- [16] N. Landin, J. M. Romano, W. McMahan, and K. J. Kuchenbecker, "Dimensional reduction of high-frequency accelerations for haptic rendering," in *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 2010, vol. 6192 LNCS, no. PART 2, pp. 79–86, doi: 10.1007/978-3-642-14075-4\_12.
- [17] A. Israr, S. Choi, and H. Z. Tan, "Detection threshold and mechanical impedance of the hand in a pen-hold posture," *IEEE Int. Conf. Intell. Robot. Syst.*, pp. 472–477, 2006, doi: 10.1109/IROS.2006.282353.