



薄型直動アクチュエータを用いた 異部位触覚提示デバイスの検討

Investigation of a device for presenting tactile sensation at different body sites using a thin linear actuator

秋葉優馬¹⁾, 中山翔太²⁾, 溝口泉²⁾, 梶本裕之²⁾

Yuma AKIBA, Shota NAKAYAMA, Izumi MIZOGUCHI and Hiroyuki KAJIMOTO

- 1) 電気通信大学 情報理工学域 (〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1, yuma.akiba@kaji-lab.jp)
- 2) 電気通信大学 情報理工学研究科 (〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1, {nakayama, mizoguchi, kajimoto}@kaji-lab.jp)

概要: VR 体験における触覚を簡便に表現する手法として、本来指先で感じる触覚を手首に提示する異部位触覚提示が多数提案されている。しかしながらこれらの多くは、持続的な圧迫から振動までの広帯域な触覚をコンパクトに実現することが難しいという問題がある。そこで本稿では、小型かつ圧覚と振動の両方を提示可能な薄型直動アクチュエータを用いた腕時計型デバイスを提案し、VR 体験における有効性を検証する。

キーワード: ウェアラブルデバイス, 小型アクチュエータ, 電磁石, 異部位触覚提示

1. はじめに

VR 空間において物を触る感覚(触覚)を利用者に伝えることは、VR 体験の没入感を高めるうえで重要である。一方で、従来のグローブ型や把持型の装置を用いて物をつまむ感覚を利用者の手に伝える場合、手の周囲に複雑な機構を必要とすることや、指先が自由に扱えないという課題がある[1, 2]。本課題を解決する手法として、本来指先に感じる触覚を異部位に触覚提示を行う、異部位触覚提示が提案されている[3, 4]。本手法は手に装置を取り付けずに感覚情報を提示することが可能である。

異部位触覚提示手法の中で、手指の動作・感覚を妨げず、コンパクトに実装することが容易なリストバンド型デバイスによる手首への異部位触覚提示が多数提案されている[5-7]。代表的な手法の多くは、振動、圧覚、横ずれ感などの複数の触覚刺激を一つのデバイスで提示するものである。Pezent ら[5]は、手首に直動型振動子による振動とひもの圧迫による圧覚を提示できるデバイスを提案している。Young ら[6]は、空気圧によって膨らんだり縮んだりする素子を用いて、振動と圧覚を提示できるデバイスを提案している。Zhu ら[7]は、圧覚、皮膚変形による横ずれ感、振動を含む幅広い触覚刺激を表現できる布ベースのコンパクトで表現力の高い前腕スリーブ型のデバイスを提案している。しかしながら、これらの手法は、個々の指に対する刺激を提示するのではなく、全ての指の触覚を手首に

伝えるものである。従って、例えば人差し指だけが物に触れているというような指ごとの情報を提示することができないという問題がある。

個々の指に対し触覚を提示する手法として、Moriyama ら[8]は、圧覚と横ずれ感を前腕に提示するデバイスを提案している。Berkovic ら[9]は、圧覚と横ずれ感と振動を前腕に提示するデバイスを提案している。しかしながら、これらの手法は把持感覚の表現に重要であると考えられる圧迫の提示をコンパクトに実現することが困難である。

我々は、振動から圧迫までの広帯域な触覚をコンパクトに実現することが可能な薄型直動アクチュエータを用いた、個々の指に対する異部位触覚提示を行うリストバンド型デバイスを提案する。本稿では、プロトタイプの作成及び周波数特性の計測を行い、VR 体験における有効性を心理評価実験により検証する。

2. 装置

薄型直動アクチュエータは、Manabe ら[10]の素子を用いた。この素子は、図 1 のように反発しあう永久磁石を接着することで漏れ磁束を側面に集中させており、磁束と電流を直交させることで強いローレンツ力を生成可能である。

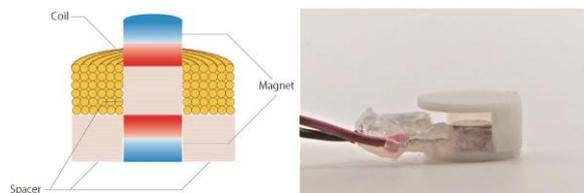


図 1 触覚提示素子

コイルはエナメル銅線（導体外径 0.1mm，仕上外径 0.12mm）を用いて 100 回巻きで作成した。永久磁石は直径 5mm の厚さ 1mm のものを二つ用いた。本素子を用いて作成したリストバンド型デバイスを図 2 に示す。

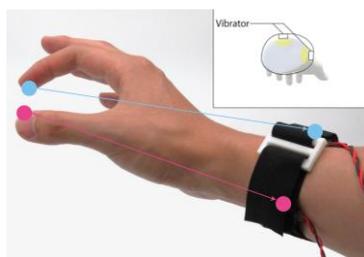


図 2 デバイスの外観

3. 実験

3.1 周波数特性の測定

本手法が幅広い周波数帯域で振動提示可能かを検証するために周波数特性を測定した。

3.1.1 実験環境

測定環境を図 3 に示す。Processing により各周波数の正弦波を生成し、オーディオ用アンプを介しコイルに印加することでデバイスを駆動させた。アンプはステレオパワーアンプ（North Flat Japan 社製，FX-AUDIO-FX202A/FX-36A PRO）を使用した。デバイスには 1W の電力が生じるようにアンプのボリュームを調節した。調節方法としては、オシロスコープのプロブをコイルの端子につなぎピーク電圧値を測定し、コイルと直列につないだ抵抗（金属皮膜抵抗 1W 0.1Ω）の両端につなぎ、ピーク電流値を測定した。測定した電圧値と電流値を乗算し電力値とした。

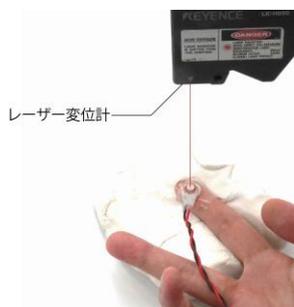


図 3 測定の様子

図 3 のように磁石の変位を、レーザ変位計（KEYENCE 社製，LK-H050）を用いて計測した。この変位データを用いて、加速度を算出した。サンプリング周波数は 200kHz

であり、移動平均は 4 回に設定した。計測の際は、皮膚に張り付ける用途のかつら用テープ（3M 製 1522）で右手人差し指の指腹にデバイスを設置し、指は机上の紙粘土に置いて固定した。測定は 10Hz から 200Hz までの周波数を 10Hz 刻みで行った。

3.1.2 結果

測定の結果を図 4 に示す。

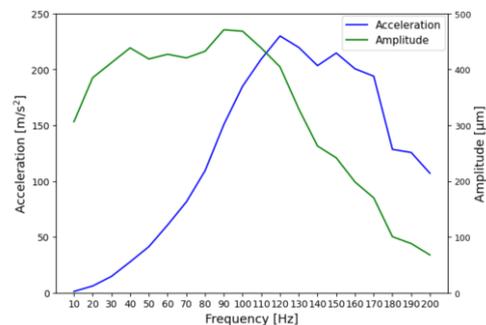


図 4 周波数特性の測定結果

図 4 より、振幅は 20Hz～120Hz まで 0.4mm 程度の大きさである。また、加速度の共振周波数は約 120Hz である。

3.2 VR 空間内における物体把持の有効性の検証

本手法が従来手法に比べて、より物体把持において有効であるか検証するため、デバイスを装着した状態で実験を行った。被験者は研究室のメンバー 10 名（男性 9 名，女性 1 名，21 歳～25 歳）である。

3.2.1 実験条件

予備実験において、表 1 にある 4 パターンの触覚提示部位を検討した。なお、Carcedo ら[11]の研究を参考に、手首の骨から 35mm 離れた位置に触覚提示を行った。

表 1 触覚提示部位のパターン

| パターン | 親指に対応 | 人差し指に対応 |
|------|-------|---------|
| 1 | 手首腹側 | 手首背側 |
| 2 | 手首腹側 | 人差し指の先 |
| 3 | 親指の先 | 手首背側 |
| 4 | 親指の先 | 人差し指の先 |

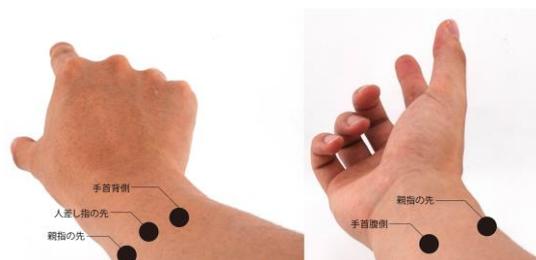


図 5 触覚提示部位

予備実験の結果、パターン 3 が触覚提示部位として最も違和感が少なかったため、パターン 3 を実験の触覚提示部

位とした。

実験条件を表 2 に示す。提案素子である薄型直動アクチュエータを用いるパターンとの比較対象として、円盤型ブラシレス振動モーターLBV10B-009 を用いた。それぞれ提示タイミングや周波数を変更した計 5 条件を提示条件とした。

提案素子を用いた振動提示は、Hブリッジ回路を用いた PWM 制御により行った。物体把持時及び物体を離れた時は、Hブリッジ回路による電流方向切り替えによって電源電圧の 2 倍の振幅で PWM 正弦波を印加した。一方物体把持時は、電流方向の切り替えは行わず、手首を圧迫する振幅の範囲内で PWM 正弦波を印加した。これにより直流成分による圧覚と振動を混合させ、圧覚提示が可能であると考えられる。なお 0Hz の圧覚提示は知覚しづらいため今回は条件に加えなかった。

試行条件の順序は被験者毎にランダムとした。また、試行中はヘッドホンよりホワイトノイズを再生することで聴覚を統制した。

表 2 実験条件

| パターン | 振動子 | 物体接触時 | 物体把持時 | 物体を離れた時 |
|------|-------------|-------|-------|---------|
| A | ブラシレス振動モーター | 振動 | 振動 | 振動 |
| B | ブラシレス振動モーター | 振動 | 振動無し | 振動 |
| C | 提案素子 | 120Hz | 5Hz | 120Hz |
| D | 提案素子 | 120Hz | 20Hz | 120Hz |
| E | 提案素子 | 120Hz | 800Hz | 120Hz |



図 6 実験の際の触覚提示部位

視覚提示装置は、HMD (Meta Quest 2) を用いた。また、ハンドトラッキングは HMD に内蔵されている機能を使用した。VR 空間中の視覚映像には、机と把持対象、自分の手を表示した。



図 7 実験の様子

3.2.2 手順

最初に、実験タスクの練習として、被験者はデバイス未装着状態で白いボックスを持ち上げ、降ろす動作を 10 回行わせた。練習後デバイスを装着させ、各実験条件について同様の動作を 10 回反復させた後に、Igroup Presence Questionnaire (IPQ) [12]の一部を用いて、臨場感について 7 段階リッカート尺度のアンケートを実施した。IPQ は VR における参加者の臨場感を評価するための信頼性が高く、広く利用されている質問項目である。

3.2.3 結果

設問への回答結果は図 8 のようになった。なお自己所有感に関する質問項目である Spatial presence、現実感に関する質問項目である Realness のそれぞれに属する複数の回答の平均値をその被験者の代表値としているため、数値は必ずしも整数とならない。

この実験結果に対して、Spatial presence、Realness のそれぞれに対して Friedman 検定を行った結果、Realness においてのみ主効果が見られた。そこで Realness の各組合せに対して Bonferroni 法による多重比較を実施した。その結果、円盤型ブラシレス振動モーターを把持中も振動させるパターン A と本振動子を用いて接触時と物体を離れた時に 120Hz の振動、物体を把持中に 20Hz の振動を提示させるパターン D において有意差が見られた ($p < 0.05$)。

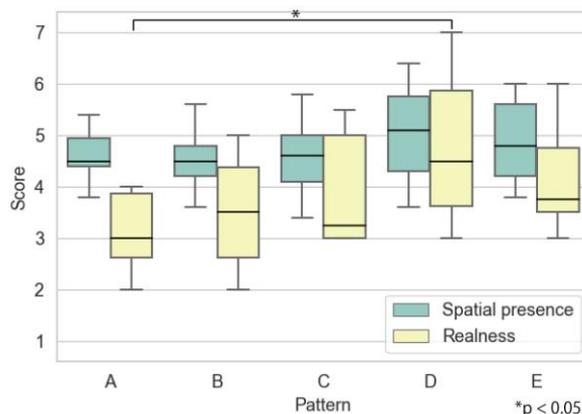


図 8 実験結果

4. 考察

4.1 周波数特性の測定

低周波数帯域においても振幅が大きいという結果から、幅広い周波数帯域で刺激を与えることができるアクチュエータであることが再確認された。これは反発しあう磁石による漏れ磁束がコイルに対して直交するような構造により、強いローレンツ力を生み出すことができているということが考えられる。

4.2 VR 空間内における物体把持の有効性の検証

本実験の結果から、パターン D のみ Realness の中央値が 4 以上であり、パターン A との間に有意差も確認された。そのため、把持中に 20Hz の振動+小さな圧覚(直流成分があるため)のパターンでリアリティが増強することが

考えられる。複数の被験者から、把持中に 20Hz の振動+小さな圧覚のパターン、800Hz の振動+小さな圧覚のパターンで圧覚を感じたというコメントが挙げられた。これらの結果を総じて考えると、仮説通り把持中に圧覚があった方が VR 体験のリアリティが増強すると考えられる。

しかしながら、把持中に振動しない円盤型ブラシレス振動モーターを用いたパターン B と有意差が見られなかったことを考えると、圧覚の提示能力が弱かった可能性が考えられる。その原因は大きく分けて 2 つ考えられる。一つ目は、小さな永久磁石を用いたため出力自体が弱いということである。二つ目は、デバイスの構造上、押し付ける力を出しにくい構造になってしまっているということである。

5. おわりに

本稿では、小型かつ振動と圧覚の両方を提示可能なデバイスを提案し、VR 体験における有効性を検証した。実験の結果、把持中に同じ振動を提示し続ける手法よりも把持中は 20Hz の振動+小さな圧覚を提示する手法の方がより VR 空間上の把持におけるリアリティが増強することが示唆された。今回は圧覚が明瞭に生起していたという結果にはならなかったと考えられるが、この広帯域で小型な振動子による手法は圧覚を生起させるには十分な可能性を持っていると考えられる。

今後の展望として、圧覚を明瞭に生起させる手法の検討を行う。具体的には、薄型直動アクチュエータの形状見直しによる、より安定したローレンツ力生成や、皮膚との接点におけるデバイス構造見直しによる知覚強度の向上を図る。

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] Hinchet, R., Vechev, V., Shea, H., Hilliges, O., "DextrES: Wearable Haptic Feedback for Grasping in VR via a Thin Form-Factor Electrostatic Brake", *Proceedings of the 31st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, New York, NY, USA, Oct. 2018, pp. 901–912.
- [2] Vechev, V., Zarate, J., Lindlbauer, D., Hinchet, R., Shea, H., Hilliges, O., "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 (VR)*, Osaka, Japan, Mar. 2019, pp. 312–320.
- [3] Kameoka, T., Kajimoto, H., "Tactile Transfer of Finger Information through Suction Tactile Sensation in HMDs", *2021 IEEE World Haptics Conference (WHC)*, Jul. 2021, pp. 949–954.
- [4] Moriyama, T., Kajimoto, H., "HARVEST: High-Density Tactile Vest that Represents Fingers to Back", *ACM SIGGRAPH 2020 Emerging Technologies*, New York, NY, USA, Aug. 2020, pp. 1–2.
- [5] Pezent, E., Israr, A., Samad, M., Robinson, S., Agarwal, P., Benko, H., Colonnese, N., "Tasbi: Multisensory Squeeze and Vibrotactile Wrist Haptics for Augmented and Virtual Reality", *2019 IEEE World Haptics Conference (WHC)*, Jul. 2019, pp. 1–6.
- [6] Young, E. M., Memar, A. H., Agarwal, P., Colonnese, N., "Bellowband: A Pneumatic Wristband for Delivering Local Pressure and Vibration", *2019 IEEE World Haptics Conference (WHC)*, Jul. 2019, pp. 55–60.
- [7] Zhu, M., Memar, A. H., Gupta, A., Samad, M., Agarwal, P., Visell, Y., Keller, S. J., Colonnese, N., "PneuSleeve: In-fabric Multimodal Actuation and Sensing in a Soft, Compact, and Expressive Haptic Sleeve", *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, New York, NY, USA, Apr. 2020, pp. 1–12.
- [8] Moriyama, T., Nakamura, T., Kajimoto, H., "Wearable Haptic Device that Presents the Haptics Sensation Corresponding to Three Fingers on the Forearm", *Adjunct Proceedings of the 31st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, New York, NY, USA, Oct. 2018, pp. 152–153.
- [9] Berkovic, A., Laganier, C., Chappell, D., Nanayakkara, T., Kormushev, P., Bello, F., Rojas, N., "A Multi-modal Haptic Armband for Finger-Level Sensory Feedback from a Prosthetic Hand", *Haptics: Science, Technology, Applications: 13th International Conference on Human Haptic Sensing and Touch Enabled Computer Applications, EuroHaptics 2022, Hamburg, Germany, May 22–25, 2022, Proceedings*, Berlin, Heidelberg, May 2022, pp. 138–146.
- [10] Manabe, M., Ushiyama, K., Takahashi, A., Kajimoto, H., "Energy Efficient Wearable Vibrotactile Transducer Utilizing The Leakage Magnetic Flux of Repelling Magnets", *2023 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces Abstracts and Workshops (VRW)*, Mar. 2023, pp. 599–600.
- [11] Carcedo, M. G., Chua, S. H., Perrault, S., Wozniak, P., Joshi, R., Obaid, M., Fjeld, M., Zhao, S., "HaptiColor: Interpolating Color Information as Haptic Feedback to Assist the Colorblind", *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, New York, NY, USA, May 2016, pp. 3572–3583.
- [12] Schubert, T., Friedmann, F., Regenbrecht, H., "The Experience of Presence: Factor Analytic Insights", *Presence: Teleoper. Virtual Environ.*, vol. 10, no. 3, pp. 266–281, Jun. 2001.