



指先の力触覚を身体の他部位に提示するウェアラブル デバイスの開発(第 4 報): 左右の前腕および足首における検討

Development of a Wearable Haptics Device that Presents the Haptics Sensation of the Finger pad to the Other Body Parts (4th Report): Examination on Left and Right Forearms and Ankles

森山多覇¹⁾, 梶本裕之¹⁾

Taha MORIYAMA, and Hiroyuki KAJIMOTO

1) 電気通信大学 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, {moriyama, Kajimoto}@kaji-lab.jp)

概要: VR 空間内の物体に対する指先への触覚提示デバイスは、指の動きを妨げてしまう問題がある。そこで、本研究では本来指先で知覚する物理的な力触覚を、身体の他部位に転移するデバイスを提案する。本稿では、親指と人差し指の指先に加わる力の大きさと方向を、左右の前腕と足首の合計 4 か所に、5 節リンク機構を用いたデバイスで提示した。4 か所の中で VR 物体を操作する時に最も違和感なく、触覚を提示可能な部位について調べた。

キーワード: 触覚転移, 力覚, VR, 5 節リンク機構

1. はじめに

バーチャルリアリティ(VR)空間内の指への触覚提示要素として、振動や温度を提示する触覚ディスプレイや、力を提示する触覚ディスプレイ等、様々な物が考案されている。ここで、VR 空間内で作業を行うという観点に着目すると、「力の強さおよび方向」が特に重要な触覚要素であると考えられる。これは、物体を変形させる際や把持する際に必要な情報である。指に対して「力の強さおよび方向」を提示する力触覚ディスプレイは、グローブ形状の物から指先に装着する物まで、様々な物が発表されている[1][2]。しかしながら、これらの多くは各々の指の動きを妨げってしまうという問題が存在する。

これらの問題を解決するために、我々はこれまでに、指の力触覚を前腕に提示する 5 節リンク機構を用いた力触覚ディスプレイを開発した[3]。感覚義手の研究で、指の感覚を代行する部位として前腕が多く用いられることをヒントに、VR 物体を把持している手の前腕に対して、「力の強さおよび方向」を提示した。指の動きを妨げる事無く VR 空間内で作業を行う事が可能になり、体験のリアリズムも担保できる事が示唆された。

本稿では、親指と人差し指の指先に加わる力の大きさと方向を提示する部位として、VR 物体を把持している手の前腕のみならず、左右の前腕と足首のそれぞれ合計 4

か所に提示した。VR 物体と相互作用する部位(指)と、触覚を提示する部位が異なる場合で、提示部位による違和感の結果に差異があるか調べた。



図 1: デバイスの外観

2. 関連研究

本研究は、実際に VR 物体と相互作用する部位(指)と、触覚を提示する部位を分離している点に独自性がある。この触覚転移手法は感覚義手の研究では一般的な方法であり、指や手掌部を失った人の感覚を代行する技術として用いられる。感覚義手における代表的な触覚の転移部位は前腕や腕、肩である[4]。これは、義肢と連動して動く腕の固有受容器を義手内のアクチュエータで直接刺激する事で、あたかも指先で物体に触れている感覚を生起させられるからである。

この触覚転移手法を、VR 技術で応用する研究は複数行

わており、例えばリング状のデバイスを手首に装着する事で、手首に触覚提示を試みるデバイスや[5]、指の動きに合わせて腕の皮膚にせん断を加えるデバイスが存在する[6]。また HMD に直接吸引デバイスを組み込み、指の触覚を顔に提示する研究や[7]、空気圧駆動型デバイスを用いて手が受けた触覚を足裏へ提示する研究が行われている[8]。ただし感覚義手の研究も含め、力および力の方向に関する情報を提示するものではなく、また身体の部位毎に比較するものは無かった。

3. デバイス

図 1 に作成したデバイスの外観を示す。デバイスの重量は約 250g であり、3D プリントを用いて作成した。デバイスは腕を通すだけで脱着が可能であり、側面のベルトを調整する事で、様々なサイズに対応可能である。触覚提示する部位に粘着ゲルシート (Victrode F, 日本光電製) を張り付ける。この粘着ゲルシートに付属した突起部にデバイスを接続する事により、上下左右方向の触覚を提示する事が可能である。触覚提示可能部位は 2 か所である。

3.1 5 節リンク機構

本デバイスは 5 節リンク機構を用いている。通常の 5 節リンク機構とは異なり M 字型の構造をとるものであり、Tsetserukou らによって指先への力覚提示のリンク機構として提案され[9]、その後手掌部への力覚提示にも用いられているものである[10]。この先行研究を参考に、手首にも装着できる形のデバイスを作成した。

5 節リンク機構は 5 節のリンクが平面の閉ループを成しており、そのうちの 2 節を駆動する事で平面 2 自由度を実現する。本デバイスは回転型の 5 節リンク機構を採用しており、2 節の DC モータ (Maxon Motor) を同じ方向に駆動する事で皮膚に対して横ずれ感を、反対方向に駆動する事で皮膚に圧覚を提示可能である (図 2)。本デバイスで使用したリンクの長さおよびモータのスペックを表 1 に示す。

表 1: 使用したモータおよびデバイスのスペック

Motor	Maxon DCX12L EB SL
Gear Head	GPX 12HP 35:1
Link Length (l1, l2, l3, l4)[mm]	60, 35, 35, 35
Weight [g]	250
Torque (with gear) [Nm]	0.12

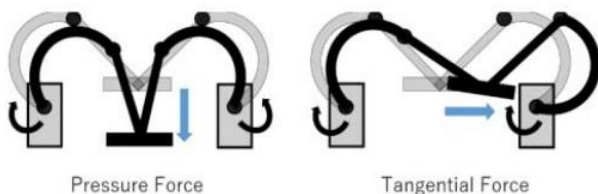


図 2: 5 節リンク機構を用いた圧覚と横ずれ感の提示方法

我々がこれまで試作してきたデバイスでは、RC サーボモータによって駆動されており正確な力の提示は行われていなかった[3]。本稿では正確な力提示を行うシステム

を構築し、DC モータを用いて力の向きと大きさを連続的に提示できるシステムを構築した。5 節リンク機構の運動学から、提示可能な力の大きさを求め、実機を用いて計測を行った。

3.2 提示される力の測定

リンク③は B と C の接点より 2 つの対象の力 (F_{23} と F_{43}) が加わっており、リンク④は C と D の接点に同様に 2 つの対象の力 (F_{34} , F_{54}) が加わっている (図 3)。この事から、末端に生じるせん断方向の力 F_t と鉛直方向の力 F_n は、下記の方程式で導ける。 τ はトルクで、 l はそれぞれのリンクの長さを表している。ここで、デバイスが出力する鉛直方向の最大値を求めると、約 6.6N となる。

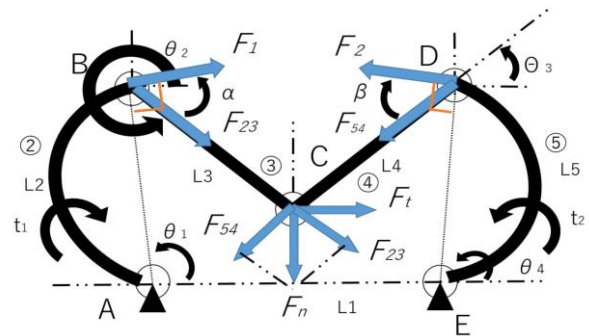


図 3: 5 節リンク機構に働く力

$$\begin{bmatrix} F_t \\ F_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\theta_1 - \theta_2) \cos(\theta_2) & -\sin(\theta_4 - \theta_3) \cos(\theta_3) \\ -\sin(\theta_1 - \theta_2) \sin(\theta_2) & \sin(\theta_4 - \theta_3) \sin(\theta_3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \\ \tau_4 \\ \tau_5 \end{bmatrix} \quad (1)$$

次に、デバイスが出力する水平方向と垂直方向の力の計測を行った。計測には、2 つの 3 軸力センサ (DSA-03A, テック技版) を用いた (図 4)。力センサの上にアクリル板が取り付けられており、X 軸方向 (水平方向) の力を測定できるように、力センサの円柱型検知部が穴に挿入されている。デバイスの皮膚への接触部を、アクリル板の上に乗せ、十分な錘をデバイス上に設置した。横ずれ感においては、2 節のモータを同時に駆動すると粘着ゲルシートが剥がれてしまうため、1 節のモータを駆動して計測を行い、圧覚では 2 節のモータを、逆方向に駆動した。それぞれの条件で pwm 比を 0% から 99% まで 1% 毎に駆動して記録した。それぞれ 5 秒間観測し、データを記録した。

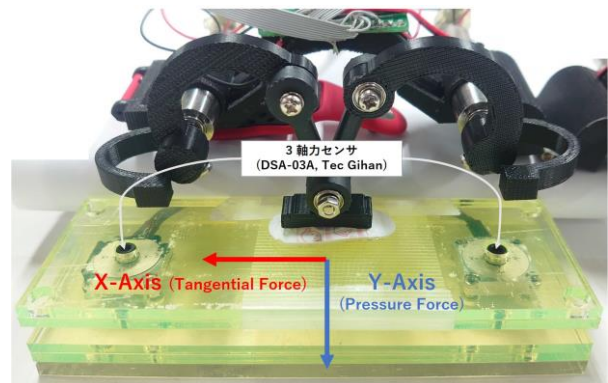


図 4: 実験システム



図 5：2 節のモータを異なる方向に回転させた時の出力
(圧覚提示)



図 6：1 節のモータを回転させた時の出力
(せん断提示)

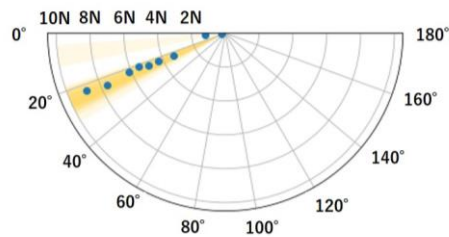


図 7：せん断方向に加わる力の大きさと向き

図 5 の垂直方向の力の測定の結果，デバイスの最大出力値は約 6.1N である事が分かり，方程式から導いた値とほぼ一致した（誤差±7%）．図 6 と図 7 から，せん断方向の最大出力値は 8.2N であり，皮膚に対して約 25 度の角度で力が提示されている事が分かる．また，圧覚もせん断方向の力も，電圧値の増加に合わせほぼ線形に変化している事が分かる．

4. 実験

4.1 実験条件

触覚提示部位は，左右の前腕と左右の足首の 4 部位である（図 8）．我々の前報の結果に基づき[3]，左右の前腕には人差し指に対応する部位として前腕の背側部に提示し，親指に対応する部位として前腕の腹側部に提示した．足首には，デバイスから提示される力の向きを前腕の条件と一致させ，人差し指に対応する部位は足首の背側部に提示し，親指に対応する部位は足首の腹側部に提示した．被験者ごとに触覚を提示する部位の順番をランダム化し実験を行った．

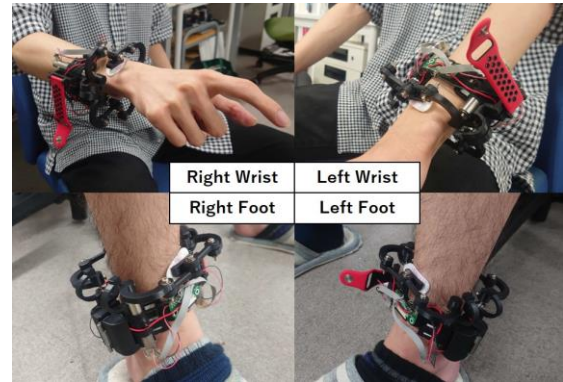


図 8：デバイスの触覚提示部位と装着図

VR 環境内の視覚映像には，被験者の親指と人差し指，机と四角の VR 物体が表示されている．被験者は右手で VR 物体を把持し，15cm 持ち上げ，元の場所に戻し離す，という作業を各部位において 5 回行ってもらった．それぞれの提示部位毎に，提示された触覚情報に対して違和感の無さを 1（違和感がある）から 7（違和感がない）の 7 段階のリッカートスケールで回答させた．全ての試行を終えた後，最も違和感があった部位と，最も違和感が無かった部位を回答してもらった．被験者は研究室内の右利きのメンバー 18 名（男性 17 名，女性 1 名，21~28 歳）であった．

4.2 実験環境

視覚提示は，HMD として WindowsMR (Lenovo) を使用した．Opti Track Trio を用いて，被験者の親指と人差し指をトラッキングし，Unity を用いて提示映像を描画した．Opti Track Trio によって取得した指の位置は，映像内の VR 指とデバイスの両方と連動している．試作したデバイスはマイクロコントローラ(ESP32)を通して PC に接続されている．VR 物体に触れた際の押し込み量（圧覚）は，5cm を最大の押し込み量としてモータの電圧値をリニアに変化させた．また，把持して持ち上げた際は，圧覚と同時に重力方向（せん断方向）に，4N の力を加えた．

被験者は実験環境に慣れるため，デバイスを装着する前に，物体を把持する練習を 5 回おこなった．実験中は HMD とヘッドホン装着させ，ホワイトノイズを聞かせる事でモータの駆動音をマスクした（図 9）．

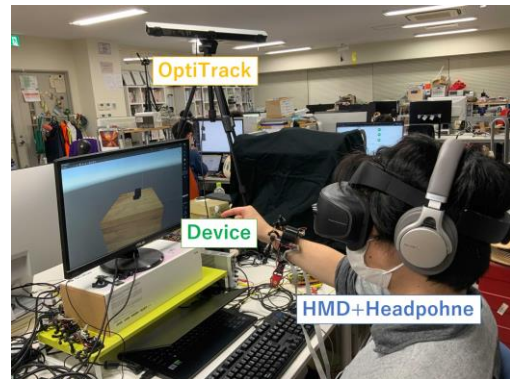


図 9：実験環境

4.3 実験結果

触覚提示部位毎に，触覚を提示した際の違和感に対する回答結果を箱ひげ図で表したグラフを図 10 に示す．また，

最も違和感を強く感じた部位と、違和感の無かった部位についての回答を表 2 に示す。

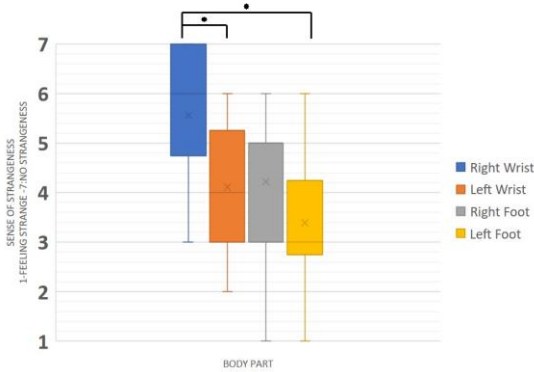


図 10：部位毎の違和感に対する回答

表 2：最も違和感を感じた部位と違和感の無い部位

Question	Body Part	Right Wrist	Left Wrist	Right Foot	Left Foot
Most Comfortable		89%	0%	0%	11%
Most Uncomfortable		6%	22%	17%	55%

図 10 の結果から、右前腕は左前腕と左足首と比較して優位に高い（ノンパラメトリック分析・フリードマン検定、 $p < 0.05$ ）。表 2 からは、左足首が最も違和感を感じたと回答した人の割合が 55% と最も高く、右前腕が最も違和感が無かったと回答した人の割合が 89% と最も高い。

4.4 考察

右手で VR 物体を把持して持ち上げる作業において、指先の触覚を提示する部位は、右前腕が左前腕および左足首と比較して最も違和感が無いという結果になった。また、右足首はどの部位と比較しても有意な差が無かった。理由として、まず、身体の空間的な配置の視点から考える事ができる。つまり、対象物と相互作用している部位と、触覚を提示している部位の身体的な対称性が結果に影響した可能性が考えられる。このため、右手で VR 物体に触れた際に、左前腕と左足首の両方に対して右前腕が優位に高いのは、空間的配置が反転して対称となり、この変化に対して違和感を強く感じたかと推測する。右足首が右前腕に対して優位な差が無かったのは、動的に姿勢を変化させていた右腕と、身体の空間的配置が右半身で一致していたためだと考える。

一方で、左前腕と左足首で比較した時、最も違和感を強く感じた人の割合は、半数以上が左前腕という結果になった。左足首と左前腕での比較では、多くの被験者が「足首は物理的に距離が遠く解釈はしやすいが、左前腕は把持動作を行っていない腕の部位であるために、違和感を強く感じる」というコメントをした。物理的に距離の遠い部位であれば、記号的な触覚として解釈が容易になるが、左前腕は把持動作における腕の触覚対側となり、この事が違和感の結果に影響を及ぼしたと推測する。反対に、右前腕への触覚提示が最も違和感が無いと答えた人の割合が約 90% であった。これは、指と前腕の空間的な物理的配置も近く、触力覚情報と操作に伴う運動の感覚が統合して解釈しやすい部位であるからだと推測する。

5. おわりに

本稿では、親指と人差し指の指先に加わる力の大きさと方向を、左右の前腕と足首の合計 4 ヶ所に、5 節リンク機構を用いたデバイスで提示した。4 ヶ所の内で VR 物体を操作する時に最も違和感無く触覚が提示可能な部位は、操作を行う腕の前腕である事が分かった。今後は利き手と非利き手での実験や、身体の姿勢によって変化するか調べる。

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] CybaerGloveSystems, <http://www.cyberglovesystems.com/sybergrasp/>.
- [2] S. B. Schorr and A. M. Okamura, "Fingertip tactile devices for virtual object manipulation and exploration," in Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, pp. 3115–3119.
- [3] T.Moriyama, A.Nishi, R.Sakuragi, T.Nakamura, and H.Kajimoto "Development of a Wearable Haptics Device that Presents Haptics Sensation of the Finger Pad to the Forearm", in Proceedings of Haptics Symposium 2018 .
- [4] D. Mochizuki, T. Nakamura, R. Kato, S. Morishita, and H. Yokoi, "Tactile sensory prosthetic hand," in Proceedings of the Mechanical Engineering Congress, Japan, 2012.
- [5] N. Obushi, S. Wakisaka, S. Kasahara, K. Seaborn, A. Hiyama, and M. Inami. 2019. MagniFinger: Fingertip Probe Microscope with Direct Micro Movements. In Proceedings of the 10th Augmented Human International Conference 2019 (AH2019), 32:1–32:7.
- [6] F.Chinello, C.Pacchierottl, J.Bimbo, N.Tsagarakis, D.Prattichizzo, "Design and Evaluation of a Wearable Skin Stretch Device for Haptic Guidance", IEEE Robotics and Automation Letters, Vol. 3, No.1, January 2018
- [7] T.Kameoka, Y.Kon, H.Kajimoto. 2018. Haptopus: Transferring Touch Sense of Hand to Face Using Suction Mechanism Embedded in Head-mounted Display. In Proceedings of SUI 2018
- [8] T. Okano, K. Hirota, T. Nojima, M. Kitazaki, and Y. Ikei, "Haptic feedback for foot sole using pneumatic pressure device," in Proceedings of ASIAGRAPH, 2016.
- [9] D. Tsetserukou, S. Hosokawa, and K. Terashima, "LinkTouch: A wearable haptic device with five-bar linkage mechanism for presentation of two-DOF force feedback at the fingerpad," in Proceedings of IEEE Haptic Symposium, pp.307-312, 2014
- [10] D.Trinitatova, D.Tsetserukou, "TouchVR: a Wearable Haptic Interface for VR Aimed at Delivering Multi-modal Stimuli at the User's Palm", in proceeding of SIGGRAPH Asia 2019 XR