



# 指先の触覚を前腕に提示するウェアラブルデバイスの開発

森山 多覇<sup>1)</sup>, 西 綾花<sup>1)</sup>, 中村 拓人<sup>1)2)</sup>, 梶本 裕之<sup>1)</sup>

1) 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)

2) 日本学術振興会特別研究員

**概要:** VR 空間内にある物体に対する触覚提示手法は多数提案されている. 特に指先に触覚提示を行うデバイスは, グローブ状の物から直接指先に装着する物など様々である. しかしながらこれらの手法では, 着脱の手間や指の動きを妨げてしまうなどの問題点がある. そこで, 本研究では, 指先で知覚する物理的な触覚を, 力の向きも含めて 5 節リンク機構を用いたデバイスにより, 手首や前腕に提示する事で, これらの問題を解決する触覚提示手法を考えた.

**キーワード:** ウェアラブルデバイス, 触覚ディスプレイ, バーチャルリアリティ

## 1. はじめに

近年バーチャルリアリティ(VR)は低価格な頭部搭載ディスプレイ等が入手可能になったことから広く普及しつつある. 特に VR 環境中での触覚情報の提示を試みる研究は数多く存在する. こうした触覚提示研究の主なターゲットは指である. これは我々が主に指を用いて作業を行っており, また我々の指は他の体の部位と比較するとその受容器の数の多さから, 物体に触れた時の質感や形状, 重さといった重要な情報に非常に敏感であるためである[1].

作業のための触覚提示という観点では, 特に重要な触覚提示要素は「力の強さおよび方向」であると考えられる. これらは物体を把持する際や変形させる際, すなわち作業の際に必要な情報である. 一方で, 人は指をグローブで覆ったとしても生活は可能であることを考えると, 振動感覚や温度感覚といった対象物の識別に関する情報の重要度は相対的にはやや低いと考えられる.

指に対して力の強さおよび方向の情報を提示するデバイスは数多く提案されている. しかしながら, これらの多くは脱着の手間がかかることや, デバイスのサイズによって指の動きを妨げてしまうという問題が存在する.

本研究ではこれらの問題を解消するために, VR 空間中の物体に指先で触れた際の力の大きさと向きに関する情報を, 身体他の部位(手首・前腕)に提示するデバイスを設計, 試作した. また, 人差し指で物体に触れた時の圧覚と横ずれの感覚を提示する事により, 最も違和感無く触覚提示ができる腕の最適な部位の検討を行った.

## 2. 関連研究

VR 空間中での触覚情報を手や指先に直接提示する研究は数多く存在する. ここでは手掌部に装着可能で, かつ振

動のみならず力の感覚を提示可能な触覚提示デバイスについて概観する.

第一のタイプの装着可能な触覚提示デバイスは, 手首や手の甲を起点として指先に力を提示するものである[2]. これらは指先とは異なる場所に基点があるため, 指を曲げるための実際の力を提示する事ができる. しかし, 脱着の手間や, デバイスが大きくなってしまおうという課題を持つ.

第二のタイプの装着可能な触覚提示デバイスは, 指先に装着し, 皮膚変形を生じさせるものである. この場合, 指先に対して, 指を曲げるような実際の力を生じさせることは出来ないが, 皮膚変形は力を知覚するための重要な手がかりであるため, 擬似的な力提示デバイスとして利用可能である. 指先に装着する事で, 圧覚を提示するデバイス[3], 皮膚のせん断力や皮膚変形を用いて物体の形状や位置の認識を可能とするデバイス[4], 把持時に重要な情報の一つである重みを, 指先の皮膚の感覚のみによって判別できるデバイス[5], 指腹上で 3 自由度に動く小型のデバイス[6]などが提案されている. しかしながら, 特に指先に力の方向も含めた情報を提示する(すなわち多自由度力提示)場合, 装置の重みはユーザに大きな負担となる. さらにデバイス同士の物理的な干渉の問題も避けられない.

こうした問題に対する現実的な解決策の一つは, 指先ではなく体の他の部位に指先の触覚情報を提示することである. これは感覚義手の研究では一般的な方法であり, 腕や肩に振動子を配置する試みは数多く存在する. すなわち福祉機器で知られた手法を VR 技術として見直すものであるといえる. 例えば, 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[7]が行われており, これにより, 手にデバイスを装着する事無く触覚が提示できる可能性が示唆されている. ただし感覚義手の研究も含め,

力の方向に関する情報を提示するものではなかった。

本研究では、VR空間中で物体に触れた時に、ウェアラブルデバイスを用いて指先に知覚する触覚を、手首ないし前腕にフィードバックさせる事を提案する。直接指や手に装置を装着する事無く体の他部位に提示する事によって、指の動きを妨げる事無く自由に動かすことが可能となり、装置の着脱も容易となる。従来の同様の試みとは異なり、力の方向も提示可能とすることによって把持などの作業にも利用できることを目指す。

### 3. デバイス設計

#### 3.1 作成したデバイス

本稿では、予備的な検討として、人差し指一本を対象とし、指に加わる触覚情報を手首ないし前腕に提示する事を試みた。

図1に作成したデバイスの外観を示す。マジックテープに手を通すだけで脱着が可能なウェアラブルデバイスにする事で、デバイスの利便性を向上させた。触覚提示する部位（手首ないし前腕）の皮膚に粘着ゲルシート（Vitrode 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ことが可能である。デバイスの重さは約100gであり、3Dプリンターを用いて作成した。



図1：作成したデバイスと装着時の様子

#### 3.2 5節リンク機構

本デバイスでは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[8]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たものである。この先行研究を参考に、手首や前腕にも装着できる形のデバイスを作成した。5節のうち2節を駆動する事で平面2自由度の制御を実現した。触覚提示部位は上下左右に動く事が可能である。上下の動きでは触覚提示部位に圧覚を、左右の動きでは触覚提示部位に横ずれ感を提示する事ができる。駆動する2節はサーボモータ（Umemoto LLC Tower Pro SG90 デジタル・マイクロサーボ）を使用した。なお、この機構が提示できる下方向の最大発揮力は34Nであり、横方向の最大発揮力は18Nであった（表1）。

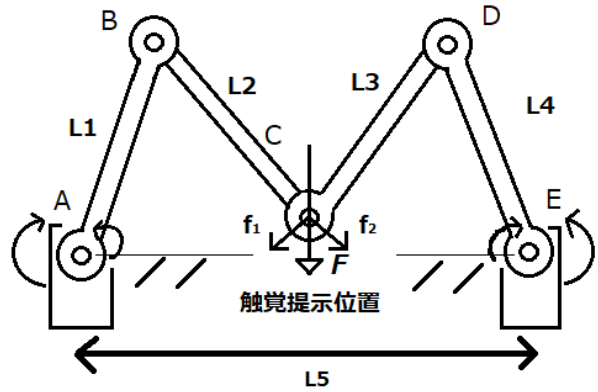


図2：5節リンク機構

表1：デバイスの仕様

サーボモータ	Tower Pro SG90
リンクの長さ $L_1, L_2, L_3, L_4$ [mm]	50
リンクの長さ $L_5$ [mm]	180
デバイスの重み [g]	100
下方向への力 $F$ [N]	34
左右方向への力 $f_1, f_2$ [N]	18

### 4. 実験

#### 4.1 実験の概要

VR空間中のバーチャルな物体（本実験では机）に人差し指で触れ、動かした時、最も違和感無く圧覚と横ずれ感の触覚提示ができる部位を調べるために、デバイスを装着した状態で触覚を提示し実験を行った。

#### 4.2 実験条件

触覚を提示する部位は人差し指を突き出した時、人差し指から一直線になる部位を選んだ。手首と前腕の2か所、それぞれ上下を合わせた合計4か所で実験を行った（図3）。手首と前腕の触覚提示距離  $D$  は120mmである。視覚提示は、ヘッドマウントディスプレイ（HMD）としてOculus Riftを使用した。また、LeapMotionを用いて被験者の指をトラッキングし、Unityを用いて提示映像を描画した。

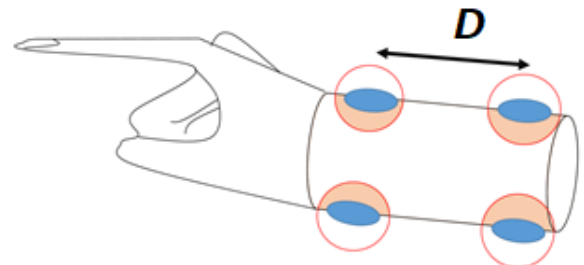


図3：指先の触覚を提示する部位

指の運動と触覚提示手法は以下の3条件を用意した。

1. 圧覚
2. 映像と同じ向きへの横ずれ
3. 映像と逆の向きへの横ずれ

条件1の圧覚提示では、地面に対して垂直方面に約40cm、4秒かけて往復するマーカーにあわせて10往復手を動かしてもらい、VR空間中の机に触れると同時に皮膚を圧迫する方向に力を加えた。条件2と条件3の横ずれ感の提示では、地面に対して水平方向に約10cm、2秒かけて往復するマーカーにあわせて7往復手を動かしてもらった。この時の皮膚への提示は、条件2では映像と同じ向き、すなわちマーカーが右に動く時に皮膚も右方向に牽引するもの、条件3では映像と逆向きであった。

実験条件は、提示位置4条件×提示する触覚3条件の計12条件であった。まず被験者ごとにランダムで4箇所の触覚提示部位を決め、条件1の圧覚での実験を行った。次に、ランダムで条件2と条件3のどちらかの条件を決め、4箇所をランダムに決めて実験を行った。各試行において、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（違和感が無い）の7段階リッカートスケールで回答させた。

被験者は研究室のメンバー7名（男性3名、女性4名、21~24歳）であった。

#### 4.3 実験環境

VR空間中の視覚映像には机と赤いマーカーが表示されており、被験者は自身の指先をそのマーカーに追従させる。マーカーの動きとデバイスの動きは連動している。LeapMotionによって取得した指の位置はユーザにマーカーを追従させるためにだけ用いており、トラッキングした指とデバイスは連動していない。このマーカーの動きに慣れ正確な追従を行うため、被験者はそれぞれ2種類の触覚提示に対してデバイスを装着する前に30秒の練習を行った。実験中はHMDとヘッドホンを装着させ、ホワイトノイズを聞かせることでモータの駆動音をマスクした。



図4：実験時の様子

### 5. 実験結果

#### 5.1 圧覚提示の結果

圧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5に示す。この結果から圧覚を提示する際に、違和感の少ない提示部位は上手首および前腕下である事が分かる。

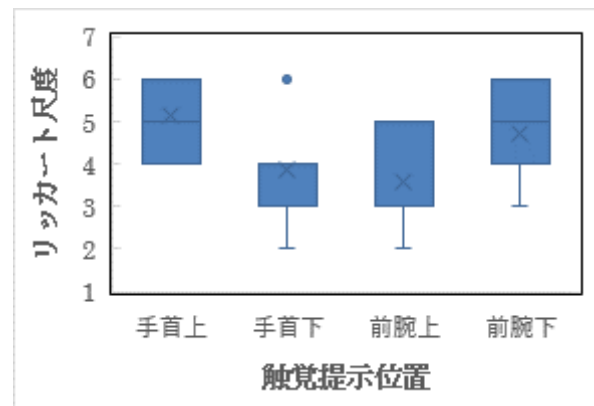


図5：圧覚提示時の違和感

#### 5.2 横ずれ感提示の結果

7名の被験者に映像と同じ向きへの横ずれ感を提示した場合、および反対の向きに横ずれ感を提示した場合の違和感に対する回答結果をまとめたものを図6と図7に示す。

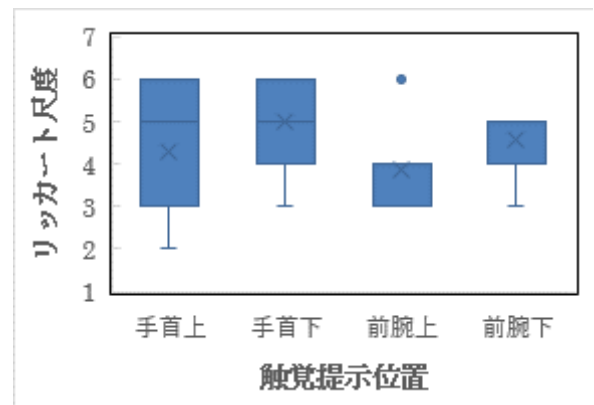


図6：映像と同じ向きに触覚提示した時の違和感

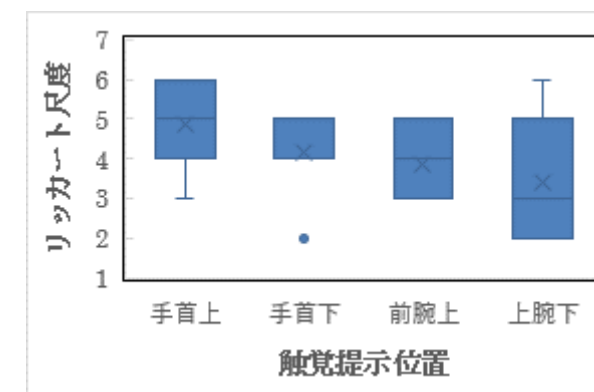


図7：映像と反対の向きに触覚提示した時の違和感

この結果から、上手首と下手首、前腕上と前腕下で比較すると、違和感の無さに大きな差が見られない事が分かる。また、手首と前腕で比較する場合、手首での横ずれ感を提

示した方が違和感は少なくなる事が分かった。また提示する横ずれ感の向きは、どちらの方向であっても結果はほぼ同じである事が分かった。

## 6. 考察

VR空間において人差し指の指先で物体に触れる時、圧感を提示する際は、上手首が最も違和感が無いという結果になった。これは、指が物体にかかる力の向きとデバイスから提示される力の向きが同じであることが重要であったと考えられる。実際に被験者からは、「下手首だと、自分の意図に反した力が加わっている様に感じる」というコメントを得た。また、人差し指から最も近い直線上の部位であることから、実際の人差し指で物体を触った時の感覚と鮮明に比較できてしまうため、下手首の方が前腕下に比べ違和感が大きかったのではないかと考えられる。また、腕下の評価が高いのは、距離が長くなったため、人差し指の実際の触覚とは切り離し、記号的な提示として捉えているからではないかと考える。

次に横ずれ感提示の場合では、映像と同じ向きに横ずれ感を提示した場合と、反対の向きの場合では評価の差はほとんどなく、どちらに關しても手首に触覚提示した場合が最も違和感が少なく評価される事がわかった。条件2と条件3の条件の違いが分からないとコメントした被験者が7名中5名にのぼった。これは横ずれに関してはその方向はリアリズムにあまり寄与しないという、柴原らの発見した現象と類似した結果である[9]。また、上手首も下手首も違和感に対する評価の差はほとんどないという結果になった。

以上の結果を合わせると、人差し指の圧感と横ずれ感を提示する部位は、上手首が最も適切であると言える。すなわち、人差し指一本に対する圧感と横ずれ感の2種類の触覚情報を1つの部位に提示できるデバイス構成が実現できる事を示唆している。

## 7. おわりに

本研究では、VR空間内で物体に触れた際に、本来指先に生じる触覚情報を、手首や前腕といった体の他の部位に提示することを提案し、特に人差し指に加わる水平、垂直方向の力を提示するデバイスを作成した。提示部位および提示の方向に関する検討の結果、人差し指の場合、上手首が圧感と横ずれ感を最も違和感なく提示できる事が分かった。今後VR空間において物体を把持するデバイスを設計する際、人差し指に關してはこの実験結果を用いてデバイスを設計していく。さらに、親指の触覚提示最適位置を同様に検討する事で、親指、人差し指の両方の触覚情報を手首や前腕に提示するアプローチを見出ししていく。また、

このデバイスは現段階では2自由度しかないため、実験で行った圧感（上下方向）と横ずれ感（左右方向）を2次元でしか提示する事ができなかった。将来的に3自由度にする事でVR空間の物体を押す、掴むといった様々な感覚を作り出す事を試みる。

謝辞 本研究はJST-ACCEL身体性メディアプロジェクト（JPMJAC1404）の一環として行われた。またリンク機構に關してDr.Dzmitry Tsetserukouの助言を得た。

## 参考文献

- [1] 大山 正, 今井 省吾, 和気 典二 (1994). 新編 感覚・知覚ハンドブック, 誠信書房
- [2] CyberGloveSystems, <http://www.cyberglovesystems.com/cybergasp/>
- [3] Massimiliano Gabardi, Massimiliano Solazzi, Daniele Leonardis, and Antonio Frisoli. "A New Wearable Fingertip Haptic Interface for the Rendering of Virtual Shapes and Surface Features," In Proceedings of Haptic Symposium 2016.
- [4] 南澤 考太, 家室 証, 川上 直樹, 舘 暉. "指先装着型触力覚ディスプレイを用いた空中におけるVR物体の位置と大きさの提示," 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.13, No.4, pp.415-420, 2008
- [5] 南澤 考太, 深町 聡一郎, 梶本 裕之, 川上 直樹, 舘 暉. "物体把持時の指変形に着目した重さ感覚提示手法の提案," 日本バーチャルリアリティ学会第11回大会論文集, 2006
- [6] Daniele Leonardis, Massimiliano Solazzi, Ilaria Bortone, and Antonio Frisoli. "A Wearable Fingertip Haptic Device," In Proceedings of IEEE World Haptics Conference (WHC) 2015
- [7] 岡野 哲大, 日岐 桂吾, 広田 光一, 野嶋 琢也, 北崎 充晃, 池井 寧. "空気圧駆動型デバイスを用いた足裏への触覚提示による物体の位置認識" 第21回日本バーチャルリアリティ学会大会 2016.
- [8] Dzmitry Tsetserukou, Shotaro Hosokawa, Kazuhiko and 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 2014
- [9] 柴原 舞, 佐藤 克成, ヤエム ヴィボル, 梶本 裕之. "指腹部の皮膚変形の方向が及ぼすなぞり感への影響," 第17回システムインテグレーション部門講演会, 2016