



# 掌フリー触覚提示システムに向けた 手首から指先への触覚リマッピングの基礎検討

Fundamental study on haptic attribution from wrist to fingertips for palm-free haptic feedback system

梅原路旦<sup>1)</sup>, 堀江新<sup>1), 2)</sup>, 神山友輔<sup>3)</sup>, 阪本真<sup>3)</sup>, 石川博規<sup>4)</sup>, 南澤孝太<sup>1)</sup>

Rodan Umehara, Arata Horie, Yusuke Kamiyama, Shin Skamoto, Hironori Ishikawa and Kouta Minamizawa

1) 慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科 (〒 223-8526 横浜市港北区日吉 4-1-1,  
umeharar.ab, a.horie, kouta@kmd.keio.ac.jp)

2) 株式会社 commissure (〒 153-8505 東京都目黒区駒場 4 丁目 6 番 1 号東京大学駒場キャンパス連携研究棟 507 室,  
a.horie@commissure.co.jp)

3) 株式会社スプラインデザインハブ (〒 154-0004 東京都世田谷区太子堂 1-15-6-203,  
yke, shin@spline-d.com)

4) 株式会社 NTT ドコモ (〒 100-6150 東京都千代田区永田町 2-11-1 山王パークタワー,  
ishikawahiron@nttdocomo.com)

**概要:** Mixed Reality (MR) 環境では現実空間がベースであるため、バーチャルとリアルオブジェクト両方とインタラクションが可能である。そのため、MR における触覚提示デバイス設計では、リアルオブジェクトとのハンドインタラクションを妨げないことが重要である。本稿では、手首皮膚せん断刺激と指先振動刺激を提示した際の手首から指先への触覚リマッピングの評価を行う。

**キーワード:** 触覚, 拡張・複合現実, 皮膚せん断, 振動

## 1. はじめに

Meta Quest3<sup>1)</sup> や Apple Vision Pro<sup>2)</sup> といった Mixed Reality (MR) のためのヘッドマウントディスプレイ (HMD) が普及している。MR 環境ではパススルー機能を用いて周囲の現実空間にバーチャルオブジェクトを取り込むことが可能である。

また、バーチャルオブジェクトとのハンドインタラクション時に触覚フィードバックを行うことでバーチャルオブジェクトの現実感が向上する。一般に、インタラクション時はビジョンベースのハンドトラッキングではなく、操作性に優れたコントローラトラッキングを行うことが多く、コントローラに内蔵される振動子での触覚フィードバックが用いられる。

しかし、現実空間に存在するリアルオブジェクトとの直接的なハンドインタラクションが可能な MR 環境における触覚フィードバックシステムは、リアルオブジェクトと直接ハンドインタラクションを行うことができるようウェアラブルかつ掌フリーである必要がある。Xu ら [1] は圧力と振動のフィードバックが可能な軽量でウェアラブルな指先触覚デバイスを提案し、物理エンジンとソフトウェアを統合することで、複数タイプの触覚フィードバックをシミュレー

ト可能にした。一方、指先の力触覚だけでなく手部や腕の力触覚も提示することに有効なウェアラブル触覚提示システムは自明ではない。

これまでに、我々は手部で感じる触覚情報を手首にリマッピングすることで掌フリーで触覚フィードバックを行うシステムを提案した [2][3]。このシステムには Horie ら [4] の過去の研究に基づき、回転の皮膚せん断刺激分布提示を可能にする手首装着型 4ch 回転アクチュエータが搭載されている。また、バーチャルオブジェクトとの接触部位と触覚提示部位の不一致による違和感を軽減することを期待し、親指と人差し指に小型で軽量ながら強い振動刺激を提示することができる LRA (Liner Resonant Actuator) が搭載されている。

しかし、接触部位と触覚提示部位の不一致による違和感の解消に有効な各提示部位への触覚刺激強度バランスは明らかになっていない。そこで、本稿ではバーチャルオブジェクトとのハンドインタラクションにおける複数タイプのタスクを行う際の触覚強度のバランスの評価を行う。

## 2. FEEL TECH Wear

本章では、我々が提案した掌フリーな触覚提示システムである FEEL TECH Wear[3] の説明を行う。

<sup>1</sup><https://www.meta.com/jp/quest/products/quest-3/>

<sup>2</sup><https://www.apple.com/jp/apple-vision-pro/>



図 1: FEEL TECH Wear

- a) デバイス装着図 b) インタラクション俯瞰図  
c) インタラクション主観図

## 2.1 ハードウェア

図 2 に示すように FEEL TECH Wear のハードウェアは主に 2 つの要素から構成されている。手部装着デバイスには両手にそれぞれ手首に 4ch の回転皮膚せん断素子と、親指と人差指にそれぞれ振動素子が搭載されている。回転素子は小型のシリアルサーボによって回転角が制御されており、表面は自己粘着性を持つゲル素材でできている。指輪型の振動素子には LRA が搭載されており、小型軽量ながら高い強度の振動を提示することが可能である。全てのアクチュエータは独立に制御可能であり、その動作の組み合わせによって複雑なインタラクションを実現する。後頭部ユニットにはシリアルサーボに TTL コマンドを送信するマイコンおよび合計 4 つの振動子を駆動するためのオーディオアンプが実装されている。

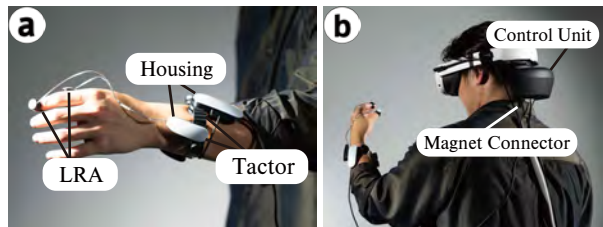


図 2: a) 手首への 4ch 回転皮膚せん断タクタと親指と人差し指の先への振動子から成る手部装着型触覚提示デバイスと b) 後頭部装着型制御ユニット。

## 2.2 ソフトウェア

FEEL TECH Wear のソフトウェアは、Unity ゲームエンジンを使用しており、バーチャルオブジェクトの視覚および触覚のレンダリングを行う。

### 2.2.1 回転の皮膚せん断刺激分布

バーチャルオブジェクトとのハンドインタラクション時に手首に生じる力  $\hat{F}$  を提示するため、我々の過去の研究に基づいた回転角変換手法を用いて回転の皮膚せん断刺激分布を設計した [5]。図 3 に示すように、Unity 内では手における 3 次元正規直交基底を容易に取得することができる。バーチャルオブジェクトとのハンドインタラクション時に手首に生じる力を取得し、式 (1) に示す行列式を解くことで直交分解を行う。ただし、 $\hat{p}, \hat{q}, \hat{r}$  はそれぞれ手における 3 次元正規直交基底であり、 $i, j, k$  は直交分解した際のそれぞれの基底の定数である。

$$\begin{pmatrix} \hat{p} & \hat{q} & \hat{r} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i \\ j \\ k \end{pmatrix} = \hat{F} \quad (1)$$

直交分解をして得られた定数  $i, j, k$  から、我々の過去の研究で提案した回転の制御則に基づき、図 4 に示すように Skin-Stretch デバイスのサーボモータを回転させる [2]。ただし、回転角変換係数を  $l[i^\circ/N]$  とし、このときの回転角はそれぞれ  $l|i|^\circ, l|j|^\circ, l|k|^\circ$  とする。



図 3: 手における 3 次元基底ベクトル。(緑) 掌から甲に向かうベクトル  $\hat{p}$  (赤) 指先から腕に向かうベクトル  $\hat{q}$  (青) 親指から掌に向かうベクトル  $\hat{r}$

### 2.2.2 指先振動刺激レンダリングシステム

FEEL TECH Wear ではバーチャルオブジェクトとのハンドインタラクション時に指先に生じる微細振動を提示する振動刺激をリアルタイムでレンダリングする。バーチャルオブジェクトとの衝突時における衝突力と摩擦時における微細振動を、事前に用意した振動波形をオーディオデータとして使用し、指先とオブジェクトとの相対速度に応じて変化させる。衝突力のレンダリングでは振動波形の振幅を、摩擦時の微細振動のレンダリングでは振動波形のストレッチを変化させる。

## 3. 刺激強度バランスの評価

本章では、バーチャルオブジェクトからの自然な触覚フィードバックに向けた、手首への回転皮膚せん断刺激と指先への振動刺激の強度バランスの評価を行う。図 5 のように、評価対象のタスクとして pull/poke/shake/stroke の 4 種類のハンドインタラクションを用意した。

### 3.1 実験参加者

実験参加者は学生 3 名 (平均年齢 21.7 歳, 20~23 歳, 男性 2 名, 女性 1 名) であった。

### 3.2 実験環境

実験環境を図 6 に示す。バーチャルオブジェクトとの接触を認識するため、ハンドトラッキングを行うことができる HMD として Meta Quest3<sup>3</sup> を使用する。触覚提示デバイスは図 2 で示した手首に装着している。また、サーボモータの回転による音の影響を低減するため、ヘッドホンを装着し、ホワイトノイズを聴きながら実験を行った。3D 環境の

<sup>3</sup><https://www.meta.com/jp/quest/products/quest-2/>

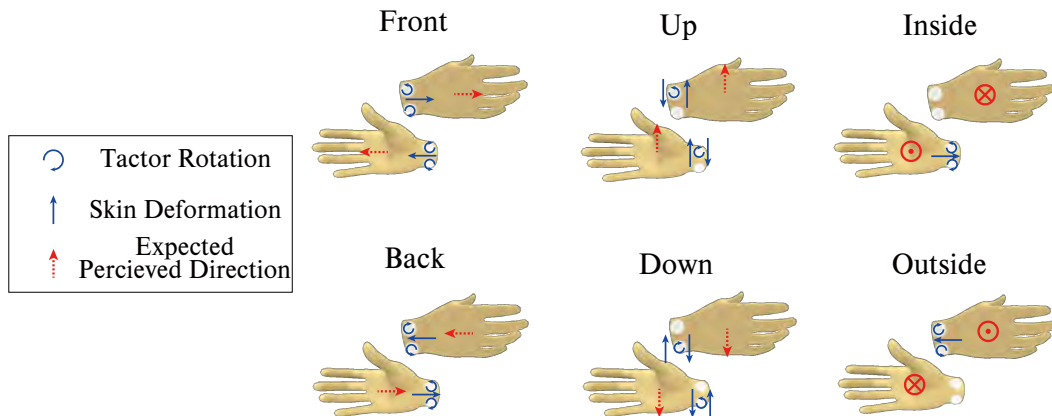


図 4: 直交分解後の各基底に対応する回転の制御則

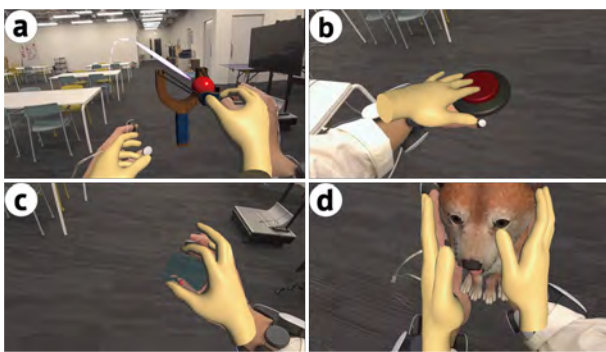


図 5: 評価対象のハンドインタラクション  
(a)pull (b)poke (c)shake (d)stroke

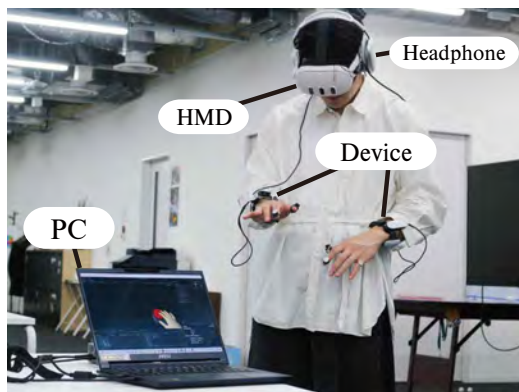


図 6: 実験環境

レンダリングには Unity<sup>4</sup>を用い、指先と物体の速度の取得には Velocity Estimator<sup>5</sup>を用いた。

### 3.3 提示刺激

実験時の衝突力と摩擦提示にはそれぞれ図 7 に示すような 5Hz と 50Hz の振動波形を用意した。実験時の振動波形のリアルタイムレンダリングは行わず、0.50N 以上の衝突力と指先とバーチャルオブジェクトとの相対速度が<sup>3</sup> 0.050m/s

以上の時の微細振動のみを振動刺激として提示する。また、回転の皮膚せん断刺激の強度として、回転角変換係数  $l$  の値 0.25, 0.50, 1.00 の 3 段階を、振動刺激の強度として振動オーディオデータのゲイン値 -10.0dB, +0.0dB, +10.0dB を用意した。

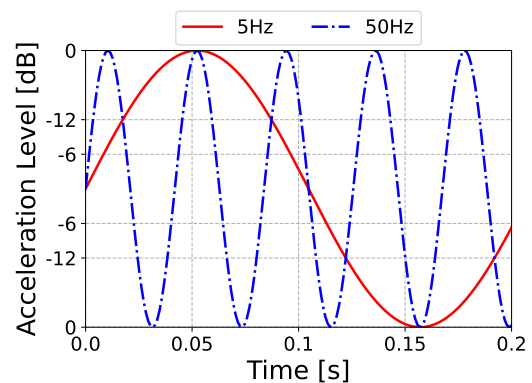


図 7: 衝突力と摩擦提示の振動波形  
赤)5Hz, 青)50Hz

### 3.4 実験手順

各評価タスクにおける実験手順は以下の通りである。

- (1) タスク実行に慣れるため、装置を装着し、図 5 で示したタスクを順に行う。ただし、各タスクの実行時間はオブジェクトとの接触開始から 10 秒間とし、全てのタスクにおける触覚フィードバックは行わないものとする。
- (2) 各刺激強度の組み合わせをランダムな順序で設定し、(1) で行なったタスクを行う。
- (3) (2) で行なったタスクを各刺激強度の組み合わせを変えて繰り返す。ただし、各刺激強度の組み合わせ (全 9 種) は 1 セットのみ用意するものとする。
- (4) すべてのタスクにおいて全刺激強度の組み合わせで体験した後、対話形式で 3 つの質問に回答する。用意した質問は、各タスクにおいて試行回数ごとに触覚刺激の違いを感じたか、それぞれのタスクに適した触覚

<sup>4</sup><https://unity.com/ja>

<sup>5</sup>[https://valvesoftware.github.io/steamvr\\_unity\\_plugin/api/Valve.VR.InteractionSystem.VelocityEstimator.html](https://valvesoftware.github.io/steamvr_unity_plugin/api/Valve.VR.InteractionSystem.VelocityEstimator.html)

強度バランスはあると感じたか、その他感じたことはあるかである。

### 3.5 結果

表 1: 実験参加者への質問の回答

	触覚刺激の違い	適切な強度バランス	その他コメント
参加者 A	やや違いがわかる	押すタスクでは指先振動。振るタスクでは手首側の刺激が強い方がよかった。	めり込み量で刺激が設計されているのがわかり、犬の形状が触覚情報からでもわかるような気がした。
参加者 B	ある	振るタスクは振った時の揺動感より指先の衝突感を示す振動を強くした方がよかった。引く振るタスクは手首の方が強い時の方がリアルだった。	犬を撫でた時の振動がふわふわ感に近かった
参加者 C	手首はわかるが指先はあまり変化ない	全てのタスクにいえるが、全ての指先にフィードバックがあるとよい。振るタスクは指先振動が強いとよい。	振るタスクでは、指先の振動の大きさに波がある方がよかった。引く振るタスクでは手首の刺激から提示される方向がわかった。

表 1 に実験参加者から得られた回答をまとめる。全ての参加者は少なくとも皮膚せん断刺激の強度を知覚できたと回答した。また、すべての参加者は stroke のタスクにおける適切な強度バランスについて語らなかった。参加者の中には提示した皮膚せん断刺激の強度だけでなく、刺激の変位から刺激をどのように設計したかを知覚した者がいた。

## 4. 考察

表 1 の刺激強度の違いに関する回答から、全ての参加者は少なくとも皮膚せん断刺激の強度を知覚できたと考える。また、参加者の中には手首に提示した回転の皮膚せん断刺激分布の変位から pull タスクにおける提示刺激の方向を知覚した者がいた。我々の過去の研究では単一タクトの回転量と知覚強度の間に一貫した傾向を観察し、回転タクトの制御測から方向性のある力覚を提示する能力を予備的に調査した [2]。しかし、回転タクトの制御測を組み合わせによって異なる軸間の連続的な力の方向変化を知覚することに有効であるかは自明ではない。pull タスクのようにユーザが提示されるべき連続的な力の方向変化を能動的に制御できる時、複数の制御ルールを組み合わせることで所望の機能を実現できることを示唆している。

また、表 1 の刺激強度バランスに関する回答から、各タスク実行時における適切な触覚強度バランスが存在することが示唆される。pull タスクのように他のタスクよりも強い力の提示が要求されるタスクにおいては、より提示可能な刺激強度が高い手首回転皮膚せん断刺激を強く設計することが好まれる。また、手全体にかかる力より指先の皮膚感覚を意識するタスクにおいては、指先振動刺激を強く設計することが好まれると期待する。

## 5. おわりに

本研究では複数部位への触覚提示刺激における触覚刺激強度バランスの制御による、バーチャルオブジェクトとの接触部位と触覚提示部位の不一致による違和感の解消を目指す。指先装着型の振動子と手首型の 4ch 回転素子を独立に制

御することが可能な触覚提示システムである FEEL TECH Wear を用いて、pull/poke/shake/stroke タスクにおける指先振動と手首回転皮膚せん断の刺激強度バランスの基礎的な評価を行った。強度の異なる回転の皮膚せん断刺激と振動刺激をそれぞれ 3 つずつ用意し、各組み合わせで 4 つのタスクを実行し提示された刺激強度に関するアンケートを行った。アンケートの結果、pull タスクのように他のタスクよりも強い力の提示が要求されるタスクにおいては、より提示可能な刺激強度が高い手首回転皮膚せん断刺激を強く設計することが好まれることが示唆された。また、ユーザが提示されるべき連続的な力の方向変化を能動的に制御できる時、複数の制御ルールを組み合わせることで軸間の連続的な力の方向変化の提示を実現できることを示唆している。手のひらを使わないデザインは、現実の物体とのインタラクションを可能にするため、本来提示されるべき部位と異なる部位に触覚提示をする手法が用いられる。複数部位に提示する触覚強度のバランスを設計することは、接触部位と触覚提示部位の不一致による違和感の解消し、XR コンテンツのためのシステムの高い可能性を示している。

### 謝辞

本研究は、株式会社 NTT ドコモ、JST ムーンショット研究開発プログラム (JPMJMS2013)、JST ACT-X (JPM-JAX21KG) の支援を受け、株式会社 commissure の技術提供を受けたものである。

### 参考文献

- [1] Yunxiu XU, Siyu Wang, and Shoichi Hasegawa. Preserving real-world finger dexterity using a lightweight fingertip haptic device for virtual dexterous manipulation, 2024.
- [2] Rodan Umehara, Arata Horie, and Kouta Minamizawa. Rotational Skin-stretch Distribution Creates Directional Force-like Sensation on the Wrist. In *Haptics: Science, Technology, and Applications*, EuroHaptics 2024. Springer International Publishing, 2024.
- [3] Rodan Umehara, Harunobu Taguchi, Arata Horie, Yusuke Kamiyama, Shin Sakamoto, Hironori Ishikawa, and Kouta Minamizawa. FEEL TECH Wear: Enhancing mixed reality experience with wrist to finger haptic attribution. In *ACM SIGGRAPH 2024 Emerging Technologies*, SIGGRAPH '24. ACM, 2024.
- [4] Arata Horie, Yunao Zheng, and Masahiko Inami. A wearable system integrating force myography and skin stretch feedback toward force skill learning. *Proceeding of IEEE World Haptics Conference 2023*, pp. 190–196, 2023.
- [5] 梅原路旦, 堀江新, 南澤孝太. 装着型 Skin-Stretch デバイスを用いた物体の重量感提示の基礎検討. 第 28 回日本バーチャルリアリティ学会大会, 2023.