



振動刺激を用いた指から頬への触覚リマッピングシステムの開発

小西真結¹⁾, 中村文彦¹⁾, 木村朝子¹⁾, 柴田史久¹⁾

1) 立命館大学大学院 情報理工学研究科 (〒 567-8570 大阪府茨木市岩倉町 2-150)

概要: Virtual Reality (VR) においては、手で VR 物体に接触した際に手以外の身体部位へ触覚刺激を提示する触覚リマッピングを用いても、体験が向上することが報告されている。本研究では、VR 空間における指への接触を Head-Mounted Display を装着したユーザの頬へ触覚リマッピングするシステムを開発した。具体的には、両頬に 5×5 のグリッド状に振動モータを配置した頬部振動刺激デバイスを作成し、手の座標系における指の相対位置に基づいて振動刺激の提示位置を決定するシステムを構築した。

キーワード: 触覚リマッピング, 顔面触覚, 振動刺激

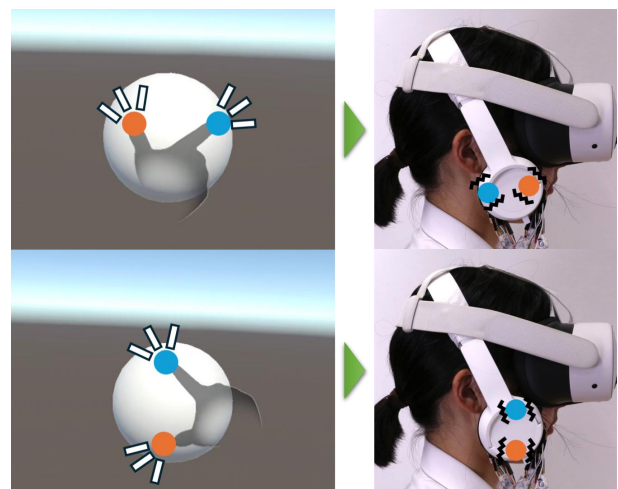
1. はじめに

Virtual Reality (VR) では、視覚に加えて触覚を含む多感覚フィードバックの提示によって、タスクパフォーマンスの向上や、没入感・アバタへの身体化感覚の向上を実現できると知られている。こうした効果は、バーチャルの指がバーチャル物体に接触した瞬間に、その指の位置と視覚的・空間的に一致した部位への触覚を提示するときに自然に得られる。しかし、実身体上の一一致する身体部位へ触覚を提示するには、Head-Mounted Display (HMD) に加え、触覚グローブやハプティックシートが必要となる。グローブは装着の手間を、シートは設置場所への拘束による空間的な制約を課し、VR 体験の自由度を損なう。

一方で、触覚を視覚的に一致した位置に提示せずとも、没入感や身体所有感が生起し得ることが報告されている。指先の触覚を前腕 [1]・首 [2]・顔面 [3] などへ提示 (リマッピング) する試みがその例である。とりわけ、HMD を装着する顔面への触覚提示を通して、上述の効果が得られるならば、触覚提示機能を HMD に統合することで、HMD の装着のみで多感覚フィードバックを実現可能となり、付加的なデバイスの装着の手間と空間的な制約を同時に緩和できる。

また、リマッピング先を実際の接触位置に一致させない場合でも、指の相対的な空間的關係を提示先で維持することは身体化感覚の生起に有効だと考えられる。指から首への触覚リマッピングに関する先行研究では、首の座標系における指の位置に応じて触覚提示位置を変化させた方が身体所有感の生起に有効だったと報告されている [2]。しかし、手掌を上・下に向けた 2 条件のみを対象としており、手がより自由に動く状況で、どのように提示位置を決定するのが効果的かは明らかになっていない。さらに、頭部と手は独立に運動するため、頭部から見た指の空間的位置は姿勢に応じて変化する。

そこで、本研究では、手における指の相対位置に基づいて、指から顔面への触覚リマッピングを実施するシステムを開発する (図 1)。触覚刺激の提示先としては、顔面の中



バーチャル環境 実環境
図 1: 手の座標系における指の位置に基づく指から頬への触覚リマッピング。

でも面積が広く、機械的刺激への感度が高い頬を用いる。本研究では、両頬に 5×5 のグリッド上に振動モータを配置した触覚提示デバイスを開発し、手の座標系における指の位置に基づいて提示位置を決定する触覚リマッピングシステムを構築した。

2. 指-頬触覚リマッピングシステム

我々は、HMD ユーザの指から頬への触覚リマッピングを行うシステムを開発した (図 2)。我々のシステムは、HMD ユーザの両頬に振動刺激を提示する頬部振動刺激デバイス (図 3) と、手の座標系における指の位置を基に振動刺激提示位置を決定する VR アプリケーションから構成される。VR アプリケーションは Unity (Version 2022.3.62f3) を用いて開発した。HMD は Meta Quest 3S を使用し、ユーザの手のトラッキングには HMD のハンドトラッキング機能を使用した。

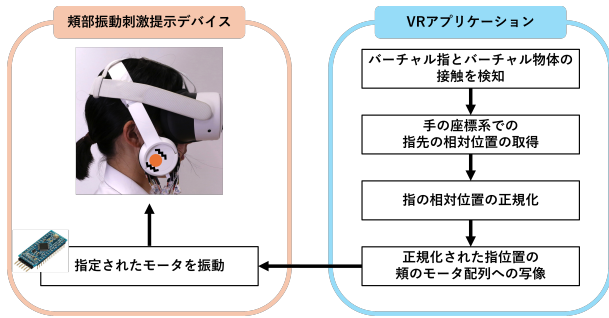


図 2: システム構成

2.1 頬部への触覚提示デバイス

本デバイスは、マイクロコンピュータ (Arduino Pro Mini)、4 個の PWM ドライバ (Adafruit PCA9685 16-Channel Servo Driver)、2 個の振動刺激モジュール、及びブラケットで構成される。ブラケットはヘッドホン (OHM HP-H125N-W) を基に 3D プリンタで作成した固定具を組み合わせて構成した。ヘッドホンのヘッドバンドのスライダ部には振動刺激モジュールを頬まで届かせるための固定具を取り付けた。各イヤパッドの先端には振動刺激モジュールを配置した。振動刺激モジュールは、指の空間的な位置情報を提示するため、振動モータ (Vibronics VW0525AB001D) を片頬あたり縦 5 点 × 横 5 点の計 25 点 (両頬で計 50 点) の格子状に配置したものである。各モータの中心間距離は 8.5mm とした。また、頬は曲面であり、形状に個人差があることから、皮膚表面に接する部分は柔軟性のある TPU を用いて 3D プリンタで造形した。

マイクロコンピュータには、4 個の PWM ドライバが I2C バスを介して接続されており、各ドライバには固有のアドレスを割り当てた。1 個の PWM ドライバは 16 チャンネルの出力を持つため、全 50 個の振動モータを個別に駆動するために、計 4 個の PWM ドライバを用いた。また、各 PWM ドライバには 3V AC アダプタによって電源が供給された。各振動モータは PWM ドライバの各 PWM 出力ピンに接続し、モータごとに振動の強さを制御できるようにした。これは、頬は機械的刺激に敏感であり、また、その感度には個人差があるため、振動強度をユーザ毎に調整できるようにすることを狙ったものである。マイクロコンピュータは USB ケーブルによって VR アプリケーションが動作するコンピュータに接続された。マイクロコンピュータはコンピュータからシリアル通信を通して受信した命令に従い、指定された振動モータを指定の強度で振動させた。

2.1.1 提示位置識別精度評価

本デバイスの提示性能を確認するため、頬部に対する振動刺激の位置識別精度を評価する実験を行った。本研究は指から頬へのリマッピングを対象としており、複数の指からの振動フィードバックを頬に同時提示する状況が想定される。そこで本実験では、1 点提示時と 2 点同時提示時のそれぞれについて刺激位置の識別精度を評価した。実験参加者は 10 名 (男性 8 名、女性 2 名、平均年齢 22.4 歳) だった。参加者はデバイスを装着し、左右いずれかの頬の 5×5 格

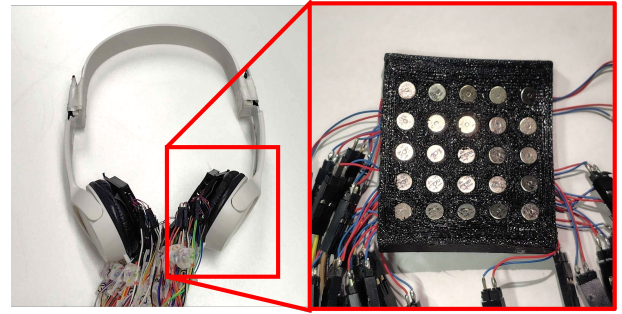


図 3: 頬部振動刺激提示デバイス。(左) デバイス全体。(右) 振動刺激モジュール

子上にランダムに提示された振動刺激について、その位置を回答した。1 点提示時の平均正答率は右頬 8.0%、左頬 4.3% であった。提示位置の近傍 8 点、例えば 5×5 の振動提示を左上から右に 1 番、2 番と番号をつけていった時に 1 番を提示した際の 2 番、6 番、7 番も正解とみなした場合の正答率は右頬 42.3%、左頬 39.6% であった。このことから、5×5 での厳密な位置特定は困難であるものの、おおよその刺激位置 (近傍領域) は識別できていることが示唆された。

2 点同時提示時には、2 点とも一致した正答率は右頬 0.5%、左頬 0.6%、1 点のみ一致した割合は右頬 17.0%、左頬 16.3% であった。近傍 8 点を正解とみなした場合、2 点とも正解となった割合は右頬 18.3%、左頬 20.3%、2 点のうち少なくとも 1 点が正解となった割合は右頬 74.3%、左頬 79.5% であった。このことから、2 点同時提示では各刺激位置を正確に特定することは難しいものの、2 点の相対的な位置関係はおおまかに識別できることが示唆された。

2.2 バーチャルの指から頬への触覚リマッピング

本システムでは、VR 空間内で仮想物体との接触が検知された指先の 3 次元位置を、手の座標系で表現したうえで頬表面の位置にマッピングし、対応する振動モータを駆動する。

手掌中心を原点とする手の座標系での指先の相対位置 $D = (d_x, d_y, d_z)$ は次式で与えられる。

$$D = \mathbf{p}_{finger} - \mathbf{p}_{hand} \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{p}_{hand} = (x_p, y_p, z_p)$ は VR 空間における手掌の中心座標、 $\mathbf{p}_{finger} = (x_f, y_f, z_f)$ は仮想物体との接触が検知された指先の座標とする。また、 d_x は手の左右方向 (母指-小指方向)、 d_y は手の上下方向、 d_z は手掌の法線方向 (奥行き) を表す。頬表面は 2 次元であるため、本システムでは手掌平面への射影に相当する (d_x, d_y) を用いて写像する。

ユーザの手の大きさや指の開き具合に依存せず頬のモータ配列を活用するため、時刻 t に応じて動的に更新される正規化を導入する。時刻 t において手掌中心から最も離れた指先までの左右・上下方向の距離をそれぞれ $W_x(t)$ 、 $W_y(t)$ とし、これらを基準に相対変位を $[0, 1]$ に正規化する。正規化された変位 $\hat{d}_x, \hat{d}_y$ は次式で表される。

$$\hat{d}_x = \frac{d_x + W_x(t)}{2W_x(t)}, \quad \hat{d}_y = \frac{d_y + W_y(t)}{2W_y(t)} \quad (2)$$

頬に配置した 5×5 の振動モータ配列を、行（上下方向） $i \in \{1, \dots, 5\}$ 、列（左右方向） $j \in \{1, \dots, 5\}$ で表す。行インデックス i は上段から下段へ、列インデックス j は鼻側（内側）から耳側（外側）へ向かって増加するものとする。本システムでは右手の接触を右頬へ、左手の接触を左頬へ提示する。

右頬では、手掌中心から見て右側（ $d_x > 0$ ）が耳側、左側（ $d_x < 0$ ）が鼻側に対応する。したがって $\hat{d}_x$ が大きいほど列 j が大きくなるよう、最近傍への丸め関数 $\text{round}(\cdot)$ を用いて写像する。

$$j_{\text{right}} = \text{clip}\left(\text{round}(4\hat{d}_x + 1)\right) \quad (3)$$

左頬では左右の対応が反転するため、 $\hat{d}_x$ を反転させて写像する。

$$j_{\text{left}} = \text{clip}\left(\text{round}(4(1 - \hat{d}_x) + 1)\right) \quad (4)$$

上下方向は、手の上方向（ $d_y > 0$ ）を頬の上段（ $i = 1$ ）、下方向（ $d_y < 0$ ）を下段（ $i = 5$ ）に対応させる。手の座標系の上下方向と行インデックスの増加方向が逆であるため、 $\hat{d}_y$ を反転させて写像する。

$$i = \text{clip}\left(\text{round}(4(1 - \hat{d}_y) + 1)\right) \quad (5)$$

ここで $\text{clip}(\cdot) = \min(5, \max(1, \cdot))$ は、想定外の手の動きによりインデックスが定義域 $\{1, \dots, 5\}$ を超えることを防ぐクリッピング処理である。

以上により、ユーザの指がバーチャル空間内でバーチャル物体に接触した際に、手の座標系における指の位置に基づいて頬表面上の対応するモータの位置を計算し、振動刺激を提示するシステムを実現した。

3. まとめ

本研究では、HMD ユーザの指から頬への触覚リマッピングを行うシステムを開発した。本システムでは、両頬に 5×5 のグリッド状に振動モータを配置した頬部振動刺激デバイスを構築するとともに、手の座標系における指の相対位置に基づいて振動刺激の提示位置を決定する VR アプリケーションを実装した。

構築したデバイスの提示性能を確認するため、頬部に対する振動刺激の位置識別精度を評価した。その結果、1点提示時には 5×5 の格子上で厳密に刺激位置を特定することは困難であるものの、近傍領域であればおよその位置を識別できることが示唆された。また、2点同時提示時には各刺激位置を正確に特定することは難しい一方で、2点の相対的な位置関係はおおまかに識別できることが示唆された。これらの結果は、本デバイスが指の絶対的な位置ではなく、指同士の相対的な空間的關係を頬上で伝達し得ることを示している。

今後は、振動刺激デバイスの改良に加え、指から頬への触覚リマッピングが身体所有感や没入感、タスクパフォーマンスに与える効果を検証する予定である。

謝辞 本研究は、JSPS 科研費（24K20823）の助成を受けて行われた。

参考文献

- [1] Taha Moriyama and Hiroyuki Kajimoto. Wearable haptic device presenting sensations of fingertips to the forearm. *IEEE Transactions on Haptics*, Vol. 15, No. 1, pp. 91–96, 2022.
- [2] Ziyang Zhang, Fumihiko Nakamura, Asako Kimura, and Fumihisa Shibata. The Effect of Finger-to-Neck Haptic Remapping Considering Spatial Location of Fingers on Sense of Body Ownership. In *ICAT-EGVE 2024 - International Conference on Artificial Reality and Telexistence and Eurographics Symposium on Virtual Environments - Posters and Demos*. The Eurographics Association, 2024.
- [3] Takayuki Kameoka, Taku Hachisu, and Hiroyuki Kajimoto. Virtual hand illusion induced by suction pressure stimulation to the face. In *Haptics: Understanding Touch; Technology and Systems; Applications and Interaction*, pp. 120–132, Cham, 2025. Springer Nature Switzerland.