



# 疑似触覚を用いたフィードバックとして 最適なバーチャルハンドの指関節変形角度の調査

林大智<sup>1)</sup>, 森本浩輔<sup>1)</sup>, 渡邊恵太<sup>2)</sup>

Daichi Hayashi, Kousuke Morimoto, and Keita Watanabe

- 1) 明治大学 先端数理科学研究科 (〒 164-8525 東京都中野区中野 4-21-1, cs232035@meiji.ac.jp)  
2) 明治大学 先端メディアサイエンス学科 (〒 164-8525 東京都中野区中野 4-21-1, keita\_w@meiji.ac.jp)

**概要:** VR 空間では物理的な制約がないため、ユーザのバーチャルボディやオブジェクトの形状を自由に表現できる。物理世界では人間の手の構造上、指の第一関節に曲げる限度があるが、VR 空間ではその限界を超えた曲げ表現が可能である。我々は、VR 空間内でのオブジェクト接触時に指の第一・第二関節を無制限に曲げるシステムを提案した。その実験においてユーザはオブジェクトを押し込んでいる際、オブジェクトとの接触感を錯覚した。また、この錯覚の起こりやすさは指関節変形の大きさと関係している可能性が示唆された。本実験では、その仮説の検証のため、上下法を用い最も疑似触覚を起こしやすい指関節の変形角度の大きさを導出した。

**キーワード:** 疑似触覚, 力覚・体性感覚, 感覚・知覚

## 1. はじめに

VR デバイスのコントロール手法の一つに、ハンドトラッキングがある。ハンドトラッキングはカメラでユーザの手をスキャンし、姿勢推定をすることで、ユーザの手を正確にバーチャル空間に投影する手法である。この手法を用いることで、ユーザの手指の動きを詳細にバーチャル空間に投影できる。また、コントローラーを保持する必要がないため、現実の操作をそのまま踏襲できる。一方、ハンドトラッキングはコントローラーを保持しないため、バイブレーションによる物理的なフィードバックを行うことが難しい。そのため、ユーザはオブジェクトとの接触状態や、UI へのインタラクションの知覚が難しくなり、ユーザの体験に悪影響を及ぼすことがある。

触覚デバイスを用いないインタラクション手法の一つに、Pseudo-Haptics(疑似触覚)[1]がある。この現象は、ユーザ自身の動作とそれに対応する視覚フィードバックの差異から触覚を錯覚させる現象である。疑似触覚の研究は、実験協力者に物理現象を連想する映像を見せながらオブジェクトに触れさせ、ユーザがその映像に即した知覚を錯覚するか否かを調べる。例えば、オブジェクトを画面上で変形したり [2][3], テクスチャを変更したり [4] することで、さまざまな種類の錯覚を引き起こす。一方、疑似触覚はオブジェクト(接触対象)の変形ではなく、バーチャルハンド(仮想身体)の変形によっても生起することが確認されている。森本ら [5] の研究では、オブジェクトへの接触時にバーチャルハンドの指先の形状を広げることによって、オブジェクトの剛性に対する錯覚が生じた。林ら [6] は、バーチャルハンドの指関節を変形し、疑似触覚を想起させた。この研究では、

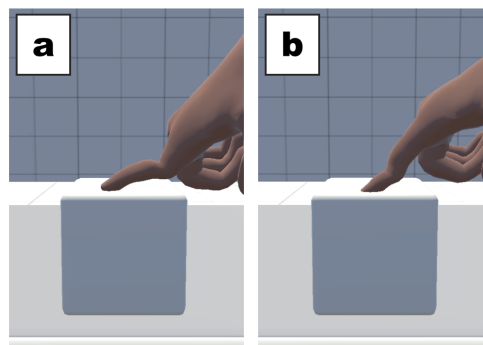


図 1: オブジェクトに押し込んだ時のバーチャルハンドの  
a. 第二関節の変形と, b. 第一関節の変形

VR 空間内でオブジェクトとの接触時に第一・第二関節を人間の手の限界を超えて曲げることで疑似触覚が想起されるかを調べた。ユーザスタディの結果、指関節が変形することでオブジェクトを押し込んでいるような錯覚を知覚するコメントが得られた。一方で、指関節の変形角度が大きくなるほど、疑似触覚が生じ辛くなるというコメントも得られた。この結果から、指関節の変形は、適当な角度であれば疑似触覚を引き起こすことが示唆された。一方、指関節の変形角度の違いが疑似触覚に与える影響は明らかでない。

そこで本稿では、指関節変形により想起される疑似触覚を最大化するため、疑似触覚を最も引き起こす指関節変形角度を探索する。

## 2. 提案システム

本章では、VR 空間上でバーチャルオブジェクトに接触した際に、バーチャルハンドの第一、及び第二関節を手甲

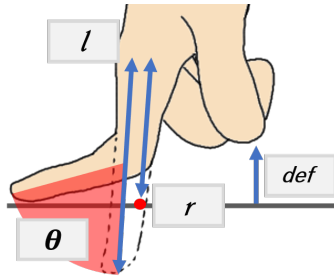


図 2: 指先変形のアルゴリズムに用いる各記号の図示

側に任意の角度変形するシステムを提案する。バーチャルハンドの関節が実空間と異なった動きをすることで、疑似触覚により接触感覚の錯覚をユーザが得られると仮定した。

### 2.1 システム設計

本システムは、ユーザの手の動きをトラッキングしたバーチャルハンドを VR 空間内に投影し、ユーザがバーチャルオブジェクトに触れた際、バーチャルハンドの関節を第一関節、または第二関節を押し込んだ分だけ変形する。本システムは、Meta Quest3[7]の精密なハンドトラッキング機能に依存している。バーチャルハンドは実世界の手首や指の動作をトラッキングし、その動作を VR 空間内で正確に描写する。バーチャルハンドはバーチャルオブジェクトに指を押しこむとオブジェクトにめり込まずに折れ曲がり、手の甲側へ指の骨格的な構造の制約を超えて変形する。本システムは、指の第一関節 (図 1:a)、第二関節 (図 1:b) のどちらを変形するかを選択でき、変形の角度は 0~90° の間で調整可能である。指が設定された最大変形角度に達すると、ユーザはバーチャルハンドをそれ以上オブジェクトに押し進められない。

### 2.2 関節変形角度の導出

指先変形は、指がオブジェクトに接触したときに、オブジェクト平面に沿うように行う (図 1)。指関節の変形角度は、指先がオブジェクトに接触した時に、どの程度浸徹したかを元に、以下の計算で求める (1)。

$$\theta = \text{Arcsin}(1 - \frac{r}{l}) + def \quad (1)$$

計算に用いる要素は以下の通りである (図 2)。

- $r$  = 指の付け根からオブジェクト平面までの距離
- $l$  = 指の付け根から指先までの距離
- $def$  = ハンドモデルに対する平面の傾き

## 3. 実験: 接触感を最大化する指関節変形角度の導出

本実験では、第二章で述べたシステムを用いて、最も強い接触感が得られる指関節変形角度を探る。

### 3.1 実験目的

実験目的は、2種類の指関節の変形位置 (第一関節、第二関節) における疑似触覚が最大化する変形角度の調査である。

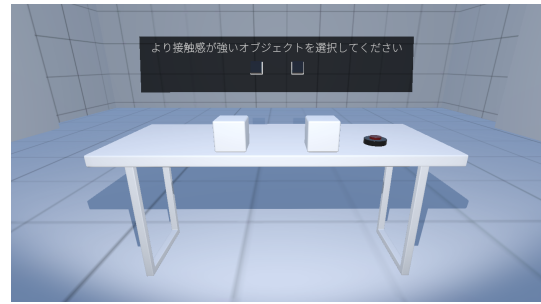


図 3: 実験空間 (バーチャルハンドは除く)

### 3.2 実験空間

本システムは、Meta Quest3 のハンドトラッキング機能を活用した。VR 空間の構成にはゲームエンジンである Unity を利用し、ハンドモデルとハンドトラッキングの動作には、Unity アセットストアで公開されている AutoHand[8] というアセットを利用した。実験に際して、実際のユーザの手の位置と VR 空間内のハンドモデルの位置が一致するように調整した。

ただし、ハンドトラッキングソフトの都合上、両手が手首まで HMD のカメラに映り込んでいないと正確なトラッキングができないため、実験参加者が長袖の T シャツを着用している場合、服の袖をまくり上げさせた。また、両手がしっかりと映り込むように左手は VR 空間内の机の上に乗せてもらうよう指示した。また、実験条件統制のため、左利きの実験参加者に対してもオブジェクトに右手で接触するように指示した。

更に、実験参加者には実験開始前に、動画でオブジェクトへの接触方法の例を見せ、できるだけ規定の方法で接触してもらうように指示した。実験空間は、机、触ると指関節が変形するキューブ二つ、選択のための空中 UI、実験進行のためのボタンから構成した (図 3)。

### 3.3 実験手続き

本実験では、上下法の手続きを取った。上下法は極限法の一つであり、感覚や認知のしきい値を測定するために使用される適応的手法である。この手法は、刺激の強度を段階的に増減させながら、被験者が感覚や反応を示すかどうかを観察し、そのしきい値を特定する。比較刺激は図 2 上における  $\theta = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$  の計 6 項目であり、指関節の第一関節、第二関節それぞれにおける最適角度を求めた。

実験開始時、2つのキューブには  $\theta$  (指関節の変形角度) が最小値である  $\theta = 0^\circ$  と  $15^\circ$ 、最大値である  $\theta = 60^\circ$  と  $75^\circ$  のいずれかが割り振られる。最初に最小値を割り振る試行を上昇系列、最大値を割り振る試行を下降系列とした。各順序は実験参加者間でカウンターバランスを取った。実験参加者が目の前の 2つのキューブに触ると、それぞれ指定された角度だけ指関節が変形する。実験参加者は、2つのキューブに自由に接触し、どちらのキューブの方がより強い接触感を感じるかを VR 空間前方のアンケートダイアログから

選択する。選択後、次の変形角度を実験参加者がより接触感が強いと選択した角度の方に  $15^\circ$  ずつ大きく、又は小さく再設定する (例:  $0^\circ$ ,  $15^\circ$  のときに  $15^\circ$  が選択されたとき、次の変形角度は  $15^\circ$ ,  $30^\circ$  になり、 $15^\circ$ ,  $30^\circ$  のときに  $15^\circ$  が選択されたならば、次の変形角度は  $0^\circ$ ,  $15^\circ$  になる)。但し、実験参加者が  $0^\circ$ 、又は  $75^\circ$  を選択した場合、これ以上の角度は選択できないため、再び同様の角度を指定する。その後、再設定後の2つの変形角度をそれぞれのキューブにランダムに割り振り、実験参加者に再び触れて、選択させる。という手順を計10回行った。この試行により、最後に実験参加者が選択した値を決定値とし、これを1試行とした。

この手順に従い、第二関節が変形する試行を計4試行行った。その後、同様の手順で第一関節が変形する試行を計4試行行った。

全ての試行が終了した後、指関節の第一関節、第二関節のどちらの方が接触感を強く感じたかについて口頭でアンケートを取った。

### 3.4 仮説

先行研究 [6] から、バーチャルハンドの指関節変形により想起する疑似触覚は、変形角度が大きいと想起され辛くなるというコメントがあった。一方、 $0^\circ$  や  $15^\circ$  などの変形角度が小さい範囲ではユーザが指関節変形を目視できず、疑似触覚が生じ辛くなると推測する。そのため、角度の大きさとその角度を選んだ実験参加者の数は  $75^\circ \sim 30^\circ$  の範囲で反比例の関係を取って  $30^\circ$  で最頻値となり、 $0^\circ$ ,  $15^\circ$  は殆ど選択されないと予想した。

### 3.5 実験参加者

実験参加者は20~26歳の学生10名(平均年齢22.4歳、左利き1名)である。すべての参加者は男性であり、正常な視力あるいは矯正視力を有していた。

## 4. 実験結果

実験の結果を図4に示す。(図4: 上)は第二関節変形の決定値を集計したものであり、(図4: 下)は第一関節変形によるものである。

### 4.1 第二関節における決定値の分布

第二関節の変形において、最頻値は  $0^\circ$  であり、変形が小さいほど決定値が多くなる傾向を示した。下降系列では決定値は変形角度が小さくなるほど多くなる傾向がある一方で、最大変形角度である  $75^\circ$  は  $15^\circ$  と並び  $0^\circ$  の次に多い決定値だった。上昇系列では、下降系列とは異なりグラフに相関関係は見られなかった。

### 4.2 第一関節における決定値の分布

第一関節の変形において、下降系列では、最頻値は  $30^\circ$  であり、 $30^\circ$  に近づくほど決定値が多くなる傾向がある一方で  $0^\circ$ ,  $75^\circ$  になると再び多くなった。一方で、上昇系列の最頻値は  $0^\circ$ ,  $15^\circ$  となり下降系列とは異なったが、グラフに他の値との相関関係は見られなかった。

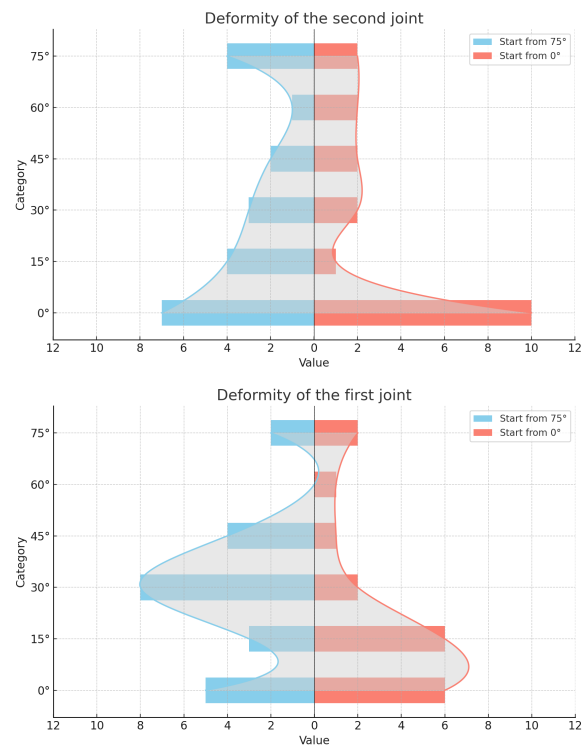


図4: 階段法を用いた統計により定まった決定値。

上: 第二関節変形実験 (左: 下降系列 右: 上昇系列)

下: 第一関節変形実験 (左: 下降系列 右: 上昇系列)

### 4.3 口頭アンケート結果

指関節の第一関節、第二関節のどちらの方が接触感を強く感じたかという質問に対し、10人中7人が第一関節、1人が第二関節、2人がどちらともいえないと回答した。第一関節では”指にオブジェクトに接触している圧力を感じた”という回答や”第二関節には感じなかった”という意見があった。第二関節やどちらともいえないと答えた実験参加者は”指関節変形による疑似触覚は感じなかった”という回答があった。

## 5. 考察

### 5.1 上昇系列と下降系列から生じる異なる2つの疑似触覚

図4より、第一関節と第二関節のいずれの場合においても、上昇系列と下降系列で決定値が大きく異なった。この実験結果は、上昇系列と下降系列が一致するという上下法の一般的な結果と異なる。この原因の一つとして、バーチャルハンドがオブジェクトの表面で接触する現象が、別の疑似触覚を生じさせた可能性がある。VR空間での様々な空中UI操作によって生じる疑似触覚について調べた先行研究では、オブジェクトへの貫通防止がユーザに物体との接触感を錯覚させることが明らかである [9]。

著者らは、貫通防止から生じる疑似触覚と指関節変形から生じる疑似触覚の混合が、上昇系列と下降系列の結果の差異に影響した可能性があると考えする。上昇系列では、指関節の変形角度が  $0^\circ$  と  $15^\circ$  から開始する。指関節の変形角度が小さいとき、指関節の変形による疑似触覚が実験参



加者に与える影響は小さい。一方で、上昇系列ではオブジェクトへの貫通防止による疑似触覚が生起し、実験参加者に接触感を与えた可能性がある。下降系列では、指関節の変形角度が  $60^\circ$  と  $75^\circ$  から開始する。この場合は、指関節の変形により生じる疑似触覚が、実験参加者が接触感を与えた可能性がある。これらの考察を踏まえ次節以降では、指関節の変形により疑似触覚が生じた可能性がある下降系列の分布に特に注目し考察する。

### 5.2 第一関節変形の最適角

図4：下より、第一関節変形の下降系列の決定値は  $30^\circ$  で最頻値を取り、再び減少した。5.1節での考察を踏まえると、下降系列では、 $30^\circ$  以上の角度において指関節変形による疑似触覚が貫通防止の疑似触覚よりも強く、実験参加者は指関節変形による疑似触覚に基づいて選択したと推測する。そのため、 $30^\circ$  が指関節変形による疑似触覚を最大化する角度の可能性がある。

### 5.3 第二関節変形の最適角

図4：上より、第二関節変形の下降系列の決定値は、 $0^\circ$  で最頻値を取る。また、 $0^\circ$  から  $60^\circ$  に掛けて、角度と決定値の数に反比例の関係が見られた。5.1節での考察を踏まえると、指関節の変形がない場合、実験参加者は貫通防止の疑似触覚のみを想起し  $0^\circ$  を選択すると考える。しかし、図4：上より、実験参加者は  $0^\circ$  以外の決定値も選択している。このことから、指関節の変形による疑似触覚は生じている可能性がある。そのため、第二関節の変形において、指関節の変形による疑似触覚を最大化する角度は、 $0\sim 15^\circ$  の間にある可能性がある。

### 5.4 第二関節と第一関節の結果の違い

口頭アンケートの結果では、第二関節は第一関節に比べて指関節による疑似触覚を想起し辛いという旨の意見を得た。このことから、第二関節の変形が第一関節の変形と比べ、疑似触覚が弱くなったと推測する。そのため、第二関節の変形では、複数の実験参加者が指関節による疑似触覚よりも貫通防止による疑似触覚の影響を強く受けた結果、仮説通りの結果が出なかったと推測する。

## 6. 展望

本実験の結果は、変形角度が小さい場合では貫通防止による疑似触覚が生じ、指関節変形による疑似触覚と干渉し十分に機能しない可能性を示唆する。しかし、貫通防止を用いないと、バーチャルハンドがオブジェクトを貫通する。このような実世界とは大きく異なった動作は、VR空間での没入感を損なう可能性がある。そのため、この手法は貫通が許される半透明のオブジェクトへの接触に用いることが適当な可能性がある。特に、ユーザが接触を知覚するのが難しい、半透明な空中UIへの適用が期待できる。今後は、指関節変形により生じる疑似触覚を用いたフィードバックを空中UIの操作に最適化するため、空中UIの様々な入力ケースを想定して利用環境を構築し、ユーザエクスペリエンスを調査する。

## 参考文献

- [1] Lécuyer, A., Coquillart, S., Kheddar, A., Richard, P. and Coiffet, P.: Pseudo-haptic feedback: Can isometric input devices simulate force feedback?, in *Proceedings IEEE Virtual Reality 2000 (Cat. No. 00CB37048)*, pp. 83–90IEEE (2000).
- [2] Ban, Y., Kajinami, T., Narumi, T., Tanikawa, T. and Hirose, M.: Modifying an identified curved surface shape using pseudo-haptic effect, in *2012 IEEE Haptics Symposium (HAPTICS)*, pp. 211–216IEEE (2012).
- [3] Kawabe, T.: Mid-air action contributes to pseudo-haptic stiffness effects, *IEEE Transactions on Haptics*, Vol. 13, No. 1, pp. 18–24 (2019).
- [4] Punpongsonon, P., Iwai, D. and Sato, K.: Softar: Visually manipulating haptic softness perception in spatial augmented reality, *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, Vol. 21, No. 11, pp. 1279–1288 (2015).
- [5] Morimoto, K., Hashiura, K. and Watanabe, K.: Effect of Virtual Hand's Fingertip Deformation on the Stiffness Perceived Using Pseudo-Haptics, in *Proceedings of the 29th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, pp. 1–10 (2023).
- [6] 林大智, 森本浩輔, 橋浦健太, 渡邊恵太: バーチャルハンドの指関節の変形による疑似触覚の検証, WISS2023 予稿集, pp. 1–3 (2023).
- [7] MetaQuest3: 複合現実を体験できる新しいVRヘッドセット, <https://www.meta.com/jp/quest/quest-3/> (2024-07-11 最終閲覧).
- [8] Earnest Robot: Auto Hand - VR Interaction, <https://assetstore.unity.com/packages/tools/game-toolkits/auto-hand-vr-interaction-165323> (2024-07-11 最終閲覧).
- [9] Kim, W. and Xiong, S.: Pseudo-haptic button for improving user experience of mid-air interaction in VR, *International Journal of Human-Computer Studies*, Vol. 168, p. 102907 (2022).