



半拘束型力触覚提示デバイスのための 手指操作範囲拡張インタフェースの提案

吉田大葵¹⁾, 田川和義¹⁾²⁾

Taiki YOSHIDA, and Kazuyoshi TAGAWA

1) 富山県立大学大学院 工学研究科 (〒 939-0398 富山県射水市黒河 5180, {yoshida, tagawa}@tagawalab.org)

2) 立命館大学 総合科学技術研究機構 (〒 567-8570 大阪府茨木市岩倉町 2-150, 19v00170@gst.ritsumei.ac.jp)

概要: 著者らは、実指をわずかに動かせる程度に半拘束し、運動意図を光学式センサで取得することで VR 手指の多様かつリアルタイムな操作と多方向・多箇所への力触覚提示の両立を可能とした提示デバイスを実現できると考えている。そのためには、実手指の操作範囲を拡張しつつ自然な固有感覚の受容を促すインタフェースの確立が必要である。本稿では、本デバイスのための手指操作範囲拡張インタフェースを提案し、システム構築を行い、本手法での動作評価を行なった。

キーワード: VR, アバタ, 手指動作速度入力, 半拘束

1. はじめに

近年, VR(Virtual Reality) 技術は, 医療・ゲーム・観光など様々な分野で活用され, 社会に浸透しつつある。VR の現実感を高めるには, 視覚・聴覚提示に加えて手指部への力触覚提示が重要であり, 現在に至るまで様々な力触覚提示デバイスが提案されている。既存の力触覚提示デバイスの多くは, 現実部位と仮想部位を 1 対 1 マッピングし, 自身の身体動作をそのまま仮想身体に反映することで, 直感的なアバタ操作を可能とするモーションキャプチャ技術が用いられる。しかしながら, 人間の手指部は屈伸や内外転運動など多様かつ複雑な動作が可能であるため, これらの動作を網羅的に取得するためには機構が複雑化しやすく, デバイスの肥大化や提示箇所が限定的になるなどの問題が生じる。すなわち, アバタ手指操作の多様さとデバイスの複雑や力触覚提示の多様さはトレードオフの関係となる。

モーションキャプチャ技術に対し, Motion-Less VR[1] や Selfriquette[2], 半拘束型デバイス [3] のような現実身体の動作を最小限に抑えつつアバタの多様な操作を可能とする力入力式システムが考案されている。これらのシステムの特徴として, 現実身体が定位置付近に常にとどまることがあげられる。そのため, 現実身体の動作に対する追従難易度が低減し, 力触覚提示デバイスが抱えるトレードオフを解消できる可能性がある。一方で, 力入力からユーザの運動意図を効率的に抽出するためには, 身体の不要な動きが引き起こすノイズを除去する必要があるため, ユーザの身体を機械的に固定し, 身体動作を完全に抑制することが理想的である。よって, 現状のシステムはユーザへの負荷が大きいことや視覚情報の変調により生じられる擬似触覚による触覚表現が用いられているため, 安定的な力触覚の提示が難しいという課題がある。対して, 半拘束型デバイス

は身体を完全には固定せず, 多少の動作を許容するように身体を拘束する。具体的には, 身体が固定点から移動した場合に固定点に戻るような反力を提示することで, 半拘束状態を作り出している [4]。

このことから, 著者らは半拘束状態下の手指動作を光学式センサにて計測し, アバタに反映することで, 固定や力入力によるユーザへの負担を低減しつつ, 擬似触覚に加え機械的な力触覚提示の組み込みも可能としたデバイス, すなわちアバタ手指の多様かつリアルタイムな操作と多方向・多箇所への力触覚提示の両立を可能とした提示デバイスを実現できると考えている。しかしながら, 半拘束状態での手指動作をアバタに反映するためには, 現実手指動作を大幅に拡大してアバタに反映する必要がある。そのため, ユーザが予想する手指の動作と実際に視覚提示されるアバタ手指の動作との乖離が大きくなり, 操作性の担保が困難となる可能性がある。

一方で, 手の速度が低速度であれば正確な操作を重視し, 高速度であれば迅速な操作を重視するように, 手の速度は操作の精度を変更する要素であることが示されている [5]。Li らは手の速度に応じてスケールを動的に調整するリマッピング手法を提案し, 1 対 1 マッピング手法や一定スケール手法に比べてタスクの効率や精度が向上した [6] ことから, 手に対する速度を入力としたリマッピング手法を半拘束状態下の手指動作に適応することで, 操作性の担保が可能となると考える。そこで, 本稿では半拘束状態下におけるアバタ手指の操作性の担保を目的とした手指動作の速度を入力とする手指操作範囲拡張インタフェースを提案する。

2. 提案手法

本研究では、半拘束状態においてモーションキャプチャ技術のような座標による 1 対 1 マッピングではなく、図 1 に示すように、指の動作速度によりアバタ指の移動量を変化させる手法を提案する。具体的な挙動としては、トラックパッドのように手指速度を抑えることで操作対象はわずかにしか移動せず、一方、手指速度を速くすることで操作対象は大きく移動する。本手法と定位置に常に戻るように拘束する半拘束手法を組み合わせることで、定位置付近に留まりつつ操作性の担保が可能になると考えられる。本章では、アバタ指の制御手法について述べる。

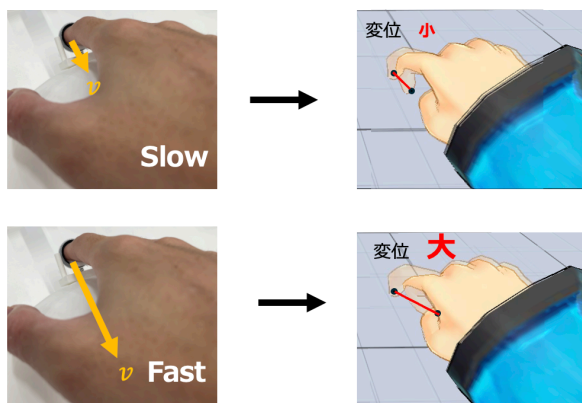


図 1: 提案手法の概要

2.1 アバタ指の制御アルゴリズム

アバタ手指を制御するにあたり、図 2 に示すようなモデルを定義した。座標軸は自然姿勢における指先位置を原点として指の屈曲方向を正方向と定める。また、本稿では基礎検討として 1 軸成分のみを扱い、本章では正方向（屈曲方向）における制御手法を示す。

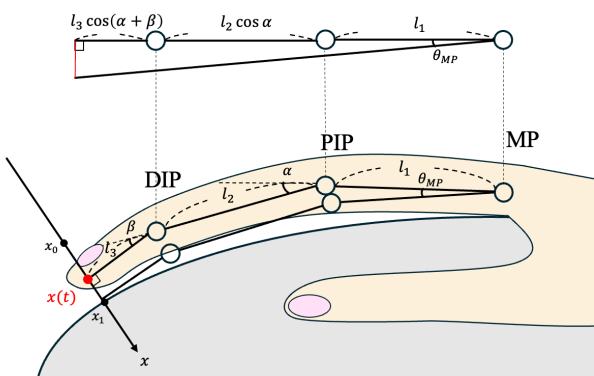


図 2: 現実手指の角度推定モデル

2.2 現実手指の速度取得

図 2 において、自然姿勢における指先座標、A 地点における座標をそれぞれ x_0 , x_1 とし、自然姿勢における指先位置でのセンサ値を s_0 , A 地点における指先位置でのセンサ値を s_1 とする。また、時刻 t における指先位置の座標を $x(t)$ とする。この時、 $s \in [s_0, s_1]$ を、 $x(t) \in [x_0, x_1]$ の座

標空間に対応するように線形変換を行い、現実手指の速度 $\dot{x}(t)[\text{m/s}]$ を式 (1) により算出する。ただし、現実手指は常に定位置に戻る状態下であるため、指が基準位置に対して正方向に存在している ($x(t) > 0$) 場合は、手指速度の正の成分のみを反映し、負の成分は無視するような制約を加えることで、ユーザが意図しない指動作（定位置に強制的に戻される動作）を除外する。

$$\dot{x}(t) = \begin{cases} \frac{x(t) - x(t - \Delta t)}{\Delta t} & (x(t) > x(t - \Delta t)) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (1)$$

2.3 現実手指の関節角度の推定

$x(t)$ は (2) 式により算出する。ここで、 $g(\dot{x}(t))$ は速度 $\dot{x}(t)$ に応じて動的に変化するゲイン値であり、これにより指の速度に応じてアバタ指の動作を制御する。ゲイン値は (3) 式に示すように、手指速度に対して、線形および非線形的に動的変化する式をそれぞれ定義する。 k は定数であり、値が大きくなると指動作の速度に対するアバタ指の移動量が大きくなる。 a は非線形関数の収束値を調整するための定数である。

$$x(t) = x(t - \Delta t) + g(\dot{x}(t))(x(t) - x(t - \Delta t)) \quad (2)$$

$$g(\dot{x}(t)) = \begin{cases} k\dot{x}(t) \\ \frac{a}{1 + e^{-k\dot{x}(t)}} - \frac{a}{2} \end{cases} \quad (3)$$

関節角度の推定では、現実手指の動作許容範囲が小さいため、PIP, DIP 関節角度はキャリブレーション時から変化しないと仮定し、MP 関節角度のみを推定する。図 2 に示すように、MP-PIP 関節間、PIP-DIP 関節間、DIP-指先までの長さをそれぞれ $l_1[\text{m}]$, $l_2[\text{m}]$, $l_3[\text{m}]$ 、手の自然姿勢時の PIP, DIP 関節角度をそれぞれ $\alpha[\text{rad}]$, $\beta[\text{rad}]$ とすると、現実手指の MP 関節角度 $\theta_{mp}^r(t)$ は (4) 式にて推定を行う。

$$\theta_{mp}^r(t) = \arctan \left(\frac{x(t)}{l_1 + l_2 \cos \alpha + l_3 \cos(\alpha + \beta)} \right) \quad (4)$$

2.4 アバタ指への反映

(4) 式にて算出した $\theta_{mp}^r(t)$ を Humanoid の Muscle システム（以後 HM システム）へ適応させることで、アバタ指の操作を可能とする。HM システムは、アバタ指の各関節角度を $[-1, 1]$ で操作するシステムであり、 -1 で屈曲状態、 1 で伸展状態となる。また、PIP 関節角度は、MP 関節角度に対し S 字の相関関係があること [7]、DIP 関節角度は PIP 関節角度と線形的な関係があること [8] から、アバタ指の MP, PIP, DIP 関節角度 $\theta_{mp}^v(t)$, $\theta_{pip}^v(t)$, $\theta_{dip}^v(t)$ は、(5) 式にて決定する。ただし、 θ_{mpMax}^r は $x(t) = x_1$ における値である。

$$\theta_{mp}^v(t) = -\frac{\theta_{mp}^r(t)}{\theta_{mpMax}^r}$$

$$\theta_{pip}^v(t) = \frac{2}{1 + e^{-5\theta_{mp}^v(t)}} - 1, \quad \theta_{dip}^v(t) = \frac{2}{3}\theta_{pip}^v(t) \quad (5)$$

3. 実装

3.1 デバイスの概要

本稿では、基礎検討として右手示指に限定したシステムを構築した。デバイスの概要を図3に示す。本システムは、ユーザの右手手指を半拘束するための半球体（直径0.2[m]）および手指動作の速度を取得するためのレーザ変位計（CD1-100N, オプテックス・エフエー株式会社製）で構成される。半拘束状態は半球体に設置されているバネ（最大押下時0.01[m]）を用いることで、手指が定位置に常に戻される環境を作り出す。また、バネには指先を拘束するためのマジックテープと、指腹面に指への負荷低減のための緩衝材を設置している。レーザ変位計は指先から0.1[m]の位置に配置し、爪部分にレーザが照射されるように3Dプリントにてレーザ変位計の固定台を作成した。取得したセンサデータは、絶縁信号変換器（MCR-C-UI-DCI, Phoenix Contact 社製）にて出力電圧を0~5Vに変換し、マイコン（Arduino UNO）に100Hzでアナログ信号として読み取られる。マイコンで取得したデータはシリアル通信にてPCに送信され、アバタの動きに変換される。VR環境はUnity（2022.3.18f1）で作成し、ユーザへはHMD（Head Mounted Display, Meta Quest3, Meta 社製）にて視覚提示を行う。

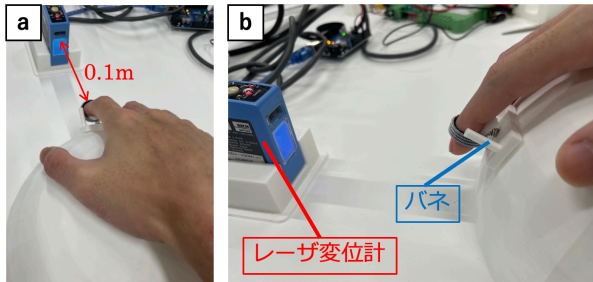


図3: a: 使用例, b: デバイスの概要

3.2 動作評価

実際に構築したシステムの現実手指動作に対するアバタ指の挙動を確認することを目的として、著者が実際に構築したシステムでアバタを操作し、簡単なポインティングタスクを行なった。評価で用いたパラメータを表1に示す。操作挙動に関しては、2章で述べた通りの挙動であった。ポインティングタスクでは、生成されたポイントに約1秒間触れ続ける試行を計6回行い、これを(3)式に示した線形ゲイン/非線形ゲインおよび、それぞれに $k = 0.5, 1.0, 1.5$ を適応した計6つの制御条件で行なった。ポイントが生成される位置は、全ての制御条件において共通とした。動作評価を行うにあたり、富山県立大学「人を対象とする研究」倫理審査委員会における審査・承認を受けた。図4にそれぞれ

の制御条件でポイントを6つ触れるのに要した時間の結果を示す。縦軸はタスク完了時間[s]を表す。

表1: 主観評価で用いたパラメータ

パラメータ	値
x_0	0.0
x_1	0.01
a	4.0
l_1	0.047
l_2	0.027
l_3	0.035
α	0.349
β	0.175
k	0.5, 1.0, 1.5

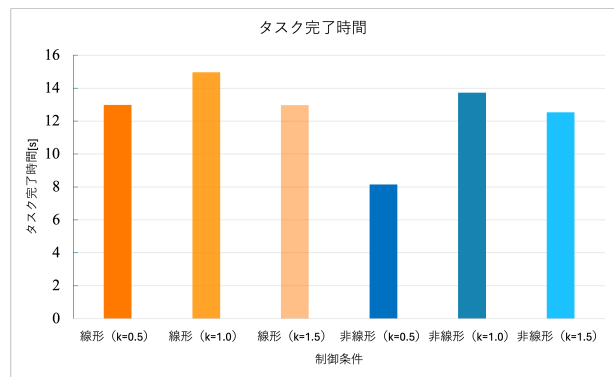


図4: 操作条件に対するタスク完了時間

3.3 結果

線形ゲイン/非線形ゲインでの平均タスク完了時間は、それぞれ13.63[s]/11.48[s]であった。また、非線形ゲインを適応した場合には $k = 0.5$ が最も速くタスクを完了できた。このことから、本手法で用いるべき適切なゲインは非線形かつ $k = 0.5$ が候補としてあげられる。

4. おわりに

本稿では、半拘束型力触覚提示デバイスにおけるアバタ手指制御の操作性を担保することを目的として、半拘束状態下における手指の座標ではなく動作速度に応じてアバタ指の移動量を動的に変化させるアバタ手指操作手法を提案した。動作評価では、右手示指の伸展・屈曲運動に限定したシステムを構築し、ポインティングタスクにて評価を行なった。結果として、提案手法によるアバタ操作は一定の操作性を担保できる可能性が示唆された。また、線形ゲイン/非線形ゲイン、ゲインの増加率を決定する定数 k がタスク完了時間に影響を及ぼすことが示され、特に非線形ゲインを利用することで、線形ゲインに比べて直感的な操作が可能

となることも示唆された。ただし、本稿では著者による主観評価にとどまっているため、半拘束型力触覚デバイスの実現に対する本手法の有効性は明らかではない。そのため、今後は実験参加者を募り、操作性や自己投射性に関する評価を行うことで本手法の有効性を検証していく。

参考文献

- [1] 望月典樹：Motion-Less VR の研究：五指・多自由度運動の実現に向けた基礎開発，第 29 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集，1E1-06, 2024.
- [2] T. Hashimoto and Y. Hirao：Selfrionette: A fingertip force-input controller for continuous full-body avatar manipulation and diverse haptic interactions, UIST'24: Proceedings for the 37th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, No.137, pp.1-14, 2024.
- [3] 清水比路，真柄智輝，脇田航：半姿勢・半拘束型フルダイブの研究，第 28 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集，2A1-12, 2023.
- [4] 日野樹，脇田航：手の半拘束状態における物体表面形状の知覚評価，電気学会知覚情報研究会「複合現実型実応用および一般」，PI-23-023, 2023.
- [5] S. Frees and G. D. Kessler：Precise and rapid interaction through scaled manipulation in immersive virtual environments, IEEE Proceedings. VR 2005. Virtual Reality, 2005., pp.99-106. IEEE, 2005.
- [6] Y. Li, C. Wang, G. Yu, Y. He, S. Zollmann and S. H. Zhang：Natural hand remapping: velocity adaptive hand manipulation for VR, Communications in Information and Systems, Vol.23, No.4, pp.393-422, 2023.
- [7] 市川亮：物体の把握・操作時における指関節の動きのモデル化，和歌山大学学士学位論文，2002.
- [8] G. ElKoura and K. singh：Handrix: animating the human hand, ACM SIGGRAPH/EG Symposium on Computer Animation, pp.110-119, SCA, 2003.