



反拘束型掌力触覚提示デバイスの基礎的検討 -示指の多様な動きへの対応化

吉田大葵¹⁾, 田川和義¹⁾²⁾

Taiki YOSHIDA¹⁾ and Kazuyoshi TAGAWA¹⁾²⁾

- 1) 富山県立大学 情報工学部 情報システム工学科 (〒939-0398 富山県射水市黒川 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.ritsume.ac.jp)

概要: 本研究では, 1) 手指の複雑かつ多様な動作を許容しつつも, 2) 手指を含む掌全体への力触覚提示をも可能とする新たな力触覚提示デバイスの実現を目指し, 1), 2) を両立させる方法として, 現実世界の手指の微小な動きから運動意図を光学式センサにより取得し, VR 空間内の手が大きく動く視覚情報を与えることで, 自分の手が大きく動くような運動知覚へと変容させる方法を検討する. これにより, 現実世界の手指が定位置にとどまるため, アクチュエータを提示位置に装着せずとも力触覚提示が可能となり, 装着による手指操作の阻害問題が解消されると見込まれる. 本稿では, 右手示指の MP 関節部分を半拘束 (固定) し, 指全体の可動領域を大きく制限した状態での運動知覚の変容に関する実験を行い, 操作性の観点で評価した.

キーワード: 運動知覚, 半拘束, VR, 指動作, 力触覚

1. はじめに

近年, HMD (Head Mounted Display) の高性能化・低価格化により, VR (Virtual Reality) 技術が社会に浸透しつつある. HMD は, 外界の情報を遮断し, 主に視覚情報・聴覚情報を提示することでユーザに現実感や没入感を体験させている. これに加え, バーチャル物体に触れた際に発生する反力をユーザの手指に提示することで, 現実での操作環境と近い状況を作り出し, さらに高い現実感を得ることが可能となる.

これを実現するために現在までに様々な力触覚デバイスが提案されており, 例えば, ピンアレイ方式のデバイスがあげられる[1]. ピンアレイ方式のデバイスは, 刺激密度が高いことから, 高解像度での力触覚提示が期待できる. しかし, ピンアレイ方式では, 指の動きを許容したデバイスとするためには, 力触覚提示箇所直接ピンアレイや筐体を設置する必要があり, 重量感により指の動作が阻害されることや装着箇所にわずかながら反力が提示され, 何も触れていないという状態を作り出すことができないといった問題がある. 上記の問題を解消するには, ピンアレイ型デバイスを手掌や指に設置せずに, 指の動作に追従させ, 提示を行う手法が考えられる. しかし, 指はにぎる・つまむ・ひねるといった複雑な動作を可能とする部位であることから, 上記の手法の実現は困難である.

そこで, リアル手指の動作をあらかじめ制限した状態で

の運動意図をバーチャル指に反映できれば, リアル指はほとんど定位置にとどまるため, リアル指の動きを追従する必要がなくなり, バーチャル空間上での指の多様な操作と高解像度での力触覚提示の両立が可能になる. リアル世界の身体動作を制限した状態でユーザの運動意図を取得する先行研究として, 中村らの「Motion-Less VR」[2]や脇田らの「半姿勢・半拘束型デバイス」[3]があげられる. これらは, ユーザが動こうとするときに発生する力を入力としてバーチャル身体の操作を可能としている. しかし, 本来であれば, 身体動作時には反力がリアル身体に提示されることはないが, 力を入力とする以上, バーチャル身体を動かす際に反力がリアル身体に提示される現象が発生する. つまり, リアル世界と VR 世界での操作環境の不一致により, 現実感の阻害を引き起こす可能性がある.

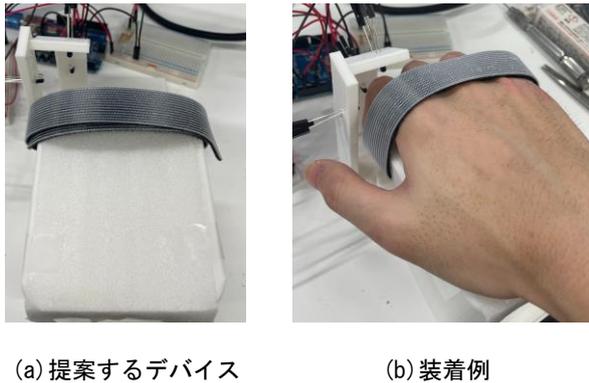
そこで, 本研究では光学式センサにより, わずかな動作からの運動意図を取得する手法を提案する. 光学式センサを用いることにより, 動作時に不自然な反力が提示されることなくバーチャル手指を操作することが可能となり, 力入力での問題が解消される.

本稿では, 右手の示指のみに限定し, MP 関節部分を固定して可動領域を制限した状態でのリアル指のわずかな動作からフォトリフレクタにより運動意図を取得し, バーチャル指に反映させた際の運動知覚の変容を操作性の観点から評価する.

2. 提案手法

2.1 デバイス構成

本稿で用いたデバイスおよび、フォトフレクタの設置位置を図1に示す。本デバイスには、図1の(c), (d)の位置に指の伸展・屈曲・外転・内転運動を検知するためのフォトフレクタが設置されている((d)のフォトフレクタはMP-PIP関節間の左側に設置されている)。本手法では、指の可動領域を制限する状態を作り出すために、マジックテープを用いて、MP関節部分を固定する。この状態での指のわずかな動きを、上記のフォトフレクタにより測定し、その変化量から関節角度の変化量を推定する。



(a) 提案するデバイス

(b) 装着例

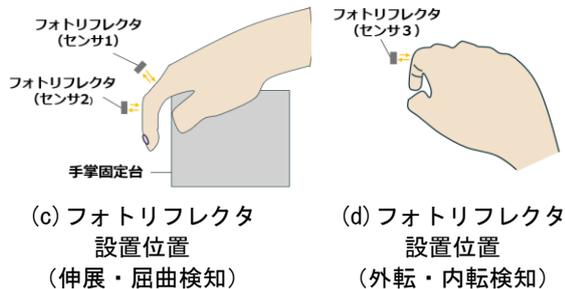
(c) フォトリフレクタ
設置位置
(伸展・屈曲検知)(d) フォトリフレクタ
設置位置
(外転・内転検知)

図1: デバイスの概要

2.2 Muscle 値における指の制御

本稿では、アバターの指の制御に muscle 値と呼ばれる値を用いる。Unity 上では、Humanoid 型アバターの各関節の曲げ角度および指の開き角度を $[-1,1]$ の値で制御でき、この値が muscle 値である。例えば、指のMP, PIP, DIP関節に対応する muscle 値が全て -1 の場合、指は曲げ切っている状態となり、 1 の場合、指は伸ばし切っている状態となる。本稿では、取得したセンサ値を muscle 値に線形変換してアバターの指を制御する。

2.3 アバターの指の操作

以後、MP-PIP関節間の上部、PIP-DIP関節間の上部、MP-PIP関節間の左側に設置されているフォトフレクタを順にセンサ1、センサ2、センサ3と呼ぶ。最初に、運動が制限されたリアル指の動きによって取得できるセンサ値

の最大値、最小値をキャリブレーションにより取得する。次に、センサ値は指との距離が離れるほど大きくなるため、センサ値が最大値のとき、muscle 値が -1 、センサ値が最小値の時、muscle 値が 1 となるように立式する。リアル指の動きは微小であり、関節の可動域が小さいことから、センサ値の変化量とリアル指の関節角度の変化量には線形性があると仮定し、関係式は(1)とした。

$$y_m = \frac{2}{x_{min} - x_{max}} x_{sensor} + \frac{x_{max} + x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \quad (1)$$

ただし、 x_{max} はセンサ値の最大値、 x_{min} はセンサ値の最小値、 x_{sensor} はセンサの入力値、 y_m は muscle 値である。

アバターの右手示指のMP関節の曲げ具合は、センサ1から取得した値 x_1 からMP関節に対応する muscle 値を決定する。 $(x_{sensor} = x_1)$ 。アバターの指の開き具合は、センサ3の値 x_3 から muscle 値を決定する $(x_{sensor} = x_3)$ 。PIP関節は構造上、MP関節の曲げ具合に影響されるため、センサ2の値 x_2 からセンサ1の値を減算した値を用いた $(x_{sensor} = x_2 - x_1)$ 。DIP関節は、今回はPIP関節の曲げ具合に比例して曲がると仮定し、PIP関節と同様にセンサ2の値からセンサ1の値を減算した値を用いた $(x_{sensor} = x_2 - x_1)$ 。

3. 実験

3.1 実験概要

アバターの指を操作し、VR空間上に現れた円を一筆書きで時間内にできるだけ正確に描かせるタスクを行い、本システムの運動知覚の変容を操作性の観点から評価する。

3.2 システム概要

各フォトフレクタからのセンサ値(0~1023)をマイコン(Arduino UNO)で取得し、センサ値はPCへ送信し、Unityへと送信される。Unityでは、取得値からアバターの指を動かす処理を行い、HMDを介して、ユーザに視覚情報を提示する。Unityは2022.3.18f1、HMDはMeta Quest3、アバターは「Unity-Chan! Model」を使用した。

3.3 実験手順

実験参加者は20代の男性1名であり、利き手は右手であった。実験参加者はHMDを装着し、デバイスに右手を置き、マジックテープで指のMP関節部分を固定する。VR空間での実験が開始されると、最初にキャリブレーションのため、5秒間指をわずかに上下左右に動かしてもらい、10秒程度操作に慣れるための時間が与えられる。その後、図2のように、アバターの右手下の位置に設置された平面上に半径 r の円が生成され、10秒以内に生成された真円に沿ってアバターの示指を動かしてもらい。アバターの指先が平面に触れた際は、触れた部分に軌跡点(黒色の球オブジェクト)が生成され、指の軌道が分かるようにした。

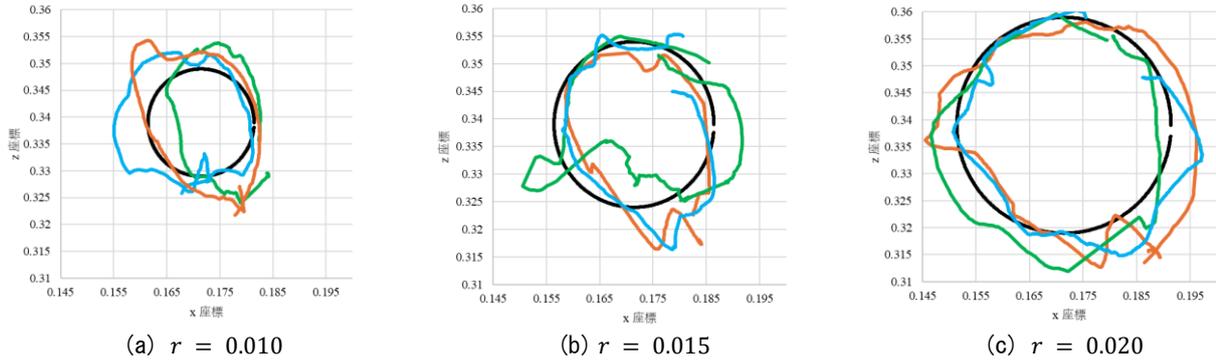
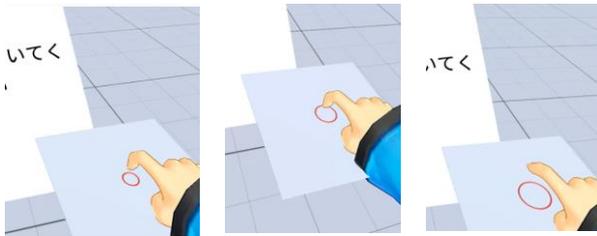


図 3: 各真円の半径に対する円の軌跡
(橙: 1回目, 緑: 2回目, 青: 3回目)

これを、真円の半径 3 パターン (0.010, 0.015, 0.020) に対し、各 3 セットずつ計 9 回行った。実験は、 $r = 0.010$ を 3 回、 $r = 0.015$ を 3 回、 $r = 0.020$ を 3 回の順で行われた。

軌跡が途切れている箇所があり、特に $x \geq 0.175$ の範囲で多く発生している。



(a) $r = 0.010$ (b) $r = 0.015$ (c) $r = 0.020$

図 2: 真円が生成される様子

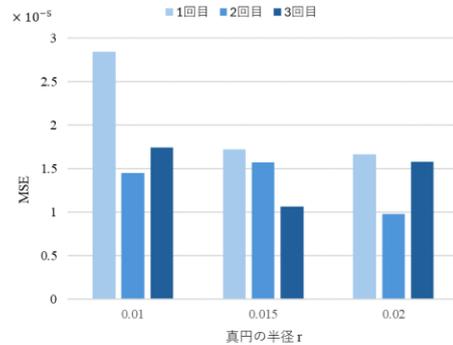


図 4: 真円の半径と試行回数に対する MSE

3.4 評価方法

実験参加者が描いた円が真円からどれだけずれているかを評価するために、MSE (2 乗平均誤差) を算出した。

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (r_k - r)^2 \quad (2)$$

ただし、 n は生成された軌跡点の個数、 r_k は k 番目の軌跡点と真円の中心からの距離、 r は真円の半径である。

4. 実験結果

各真円における円の軌跡を図 3 に示す。図 3 は Unity のワールド座標の x 座標を横軸、 z 座標を縦軸として真円と軌跡点をプロットした図である。図 3 から、 $r = 0.010$ のときは、全体的に不安定な軌跡であり、特に $0.155 \leq x \leq 0.165$ と $z \leq 0.330$ の範囲に存在する軌跡点で、真円とのずれが目立っている。 $r = 0.015$ では、 $r = 0.010$ に比べ、真円に追従して描けている箇所が多く存在した。 $r = 0.020$ では、すべての施行において、真円の形に近い円を描けていることが見て取れる。一方で、いずれの真円の半径に対して、

真円の各半径と試行回数に対する MSE の算出結果を図 4 に示す。図 4 から r の値がいずれにおいても、1 回目の試行での MSE が一番大きく、 $r = 0.015$ のときは、試行を重ねるごとに、真円との誤差が小さくなるという結果が得られた。また、各真円の半径での MSE の平均値を算出したところ、順に 2.01×10^{-5} 、 1.45×10^{-5} 、 1.41×10^{-5} となり、真円の半径が大きくなるにつれて誤差が小さくなった。

5. 考察

実験結果から、真円の半径が大きいとき、真円と形が近くなることや、MSE の平均値で比較した際に、誤差が小さくなることが確認された。このことから、リアル指の MP、PIP、DIP 関節及び、指の開き具合の大まかな運動動作の取得・アバター指への反映は本手法で可能であることが示唆される。

一方で、真円の半径が小さいと、真円に沿った軌跡が少なくなり、誤差も大きくなった。小さな円を描く際には、PIP 関節角度や PIP 関節角度をわずかに変化させるような調整が必要になるが、実験結果から、「指の関節角度をわずかに調整する」という細かな運動に対しては、リアル指

の運動意図のアバター指への反映は、現状ではできていないと考える。原因として、本手法では、PIP 関節、DIP 関節は線形的に伸展・屈曲すると仮定して制御している点があげられる。特に DIP 関節はセンサによる測定は行わず、PIP 関節の曲げ角度に比例して曲がると仮定し、補間計算を行っている。また、本手法では、光の反射量から指との距離を推定して、各関節角度や開き具合を決定しているが、距離に応じて光量に変化するということを考慮していない。これにより、本来取得すべき値と異なる値が取得され、例えば、わずかに指を移動させる運動意図に対し、アバターの指は大きく動くといったような、実際の運動意図と異なる挙動が起こったために、軌跡の途切れが発生したと考えられる。よって、本手法で指の運動意図の取得精度を上げるには、各関節を曲げたときのセンサと指との距離の変化量に関する定式化や、光の特性を考慮したセンサ値の補正が必要となると考える。

6. おわりに

本稿では、リアル指の可動領域を制限した状態での運動意図を光学式センサにより取得し、アバターに反映した際の運動知覚の変容を操作性の観点から評価した。結果として、大まかな伸展・屈曲・外転・内転動作を反映させることはできたが、細かな動作の取得・反映は現状の手法では難しいことが明らかとなった。精度向上のためには、各関節を曲げたときのセンサと指との距離の変化量に関する定式化や、光の特性を考慮したセンサ値の補正が必要となると考え、今後はこれらを考慮したシステム設計を行い、指の多様な運動意図の取得と力触覚提示を両立した力触覚デバイスを開発していく。

参考文献

- [1] 谷口登昇, 櫻井翔, 野嶋琢也, 広田広一: ペンアレイ触力覚ディスプレイを用いた細かな皮膚変形による接線方向への圧覚提示, 第 23 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 32A-1, 2018.
- [2] 望月典樹, 中村壮亮: リアル身体での運動を伴わない身体没入型 VR インタフェース「Motion-Les VR」の提案と基礎検討, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, TVRSJ Vol.26 No.1 pp.76-85, 2021.
- [3] 清水比路, 真柄智輝, 脇田航: 半姿勢・半拘束型フルタイプ, 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.