



疑似触覚により VR 物体サイズの表現範囲を拡張する 受動力覚型ハンドコントローラの検討

河野玄¹⁾, 藤田欣也¹⁾

Gen KONO, and Kinya FUJITA

1) 東京農工大学大学院工学府 (〒184-8588 東京都小金井市中町 2-24-16)

概要: 本研究では、手指を用いた VR 物体操作を実現する小型軽量のコントローラを目標に、実物体を用いた受動力覚と Pseudo-Haptics の併用による、VR 物体サイズの改変可能性を実験的に検討した。その結果、1-10cm の VR 物体の把持を違和感なく表現するには、3 種類のサイズの実物体が必要との知見が得られた。そこで、手指に対して伸展トルクを印加するデバイスを装着したところ、単一実物体が表現可能な VR 物体の範囲が拡大する可能性が示唆されたので報告する。

キーワード: 疑似触覚, 受動力覚, コントローラ

1. はじめに

近年、医療やエンターテインメント等の様々な分野で VR 技術が導入されている。このとき、現実空間における作業を VR 環境で再現することが多く、現実と同様の直感的な操作の実現が求められる。さらに医療や工業のような場においては、指先による精密な物体操作が必要になる場面がある。したがって、VR 環境においても指先を用いた物体操作も直感的に行えることが望ましい。

このような指先による直感的な VR 物体操作を支援する手段の一つとしてコントローラを開発することが考えられる。Choi らは、操作対象や動作の種類に応じた反力を提示することで二指把持動作による物体操作を支援するコントローラを開発した[1]。また Lee らはこのコントローラを参考に、使用する機器を削減しつつせん断動作を検出する機器を組み込むことで指先による繊細な物体操作が可能なコントローラを開発した[2]。これらの研究から我々は、対話性の高い直感的な入力、臨場感の高い力触覚提示、そして頑健でユーザが扱いやすいハードウェア構造の 3 つがコントローラに要求されていると分析した。そしてこの 3 要求を同時に満たすため、図 1 のように多様な VR 物体を違和感なく操作できる単一のコン

トローラを構想した。

コントローラの開発にあたり、要求を満たせる力触覚提示手法を検討する必要がある。VR での力触覚提示手法はアクチュエータを用いてデバイス自身が力触覚刺激を生成する能動的力触覚提示と、実物体に対するユーザの動作により力触覚刺激が生成される受動的力触覚提示に大別される[3]。能動的力触覚提示は多様な刺激をリアルタイムで生成できるが、複雑な機械が必要となるため頑健で扱いやすい構造の実現には不向きである。一方、提示に実物体を使用する受動的力触覚提示(以下、受動力覚)は機械的に単純で、現実的な物理特性も再現しやすい。そのため頑健で扱いやすいハードウェアと臨場感の高い力触覚提示両方の実現に向いている。

しかし受動力覚には、提示に用いる実物体の特性によって提示できる力触覚刺激が固定される、という問題がある。この問題の単純な解決法としては、実物体の種類を増やすことが考えられる。ただしこの方法では複数の実物体をコントローラに組み込む必要があるため、ハードウェア構造が複雑化し、頑強さを損なう可能性がある。

この問題に対し、近年では力触覚とそれ以外の感覚(視覚など)の相互作用を利用することで、力触覚提示デバイス無しに疑似的な力触覚刺激をユーザに与える Pseudo-haptics(以下、疑似触覚)[4]が注目されている。Yuki らはこの現象を利用し、映像上の手指と物体を変形させることで実物体把持時に認知するサイズを約 35~40% 改変させることに成功した [5]。

我々はこの疑似触覚が、目標とする図 1 のようなコントローラの力触覚提示の実現に大きく貢献すると考えた。したがって本研究ではサイズの提示に着目したうえで、受動力覚と疑似触覚の併用によりどれほど少ない実物体

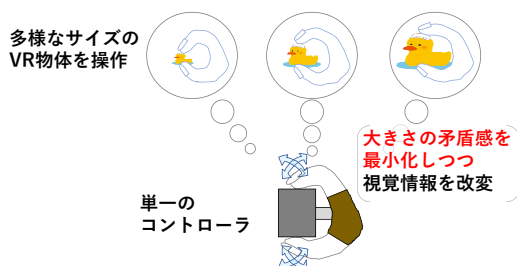


図 1: 受動力覚型ハンドコントローラのコセプト

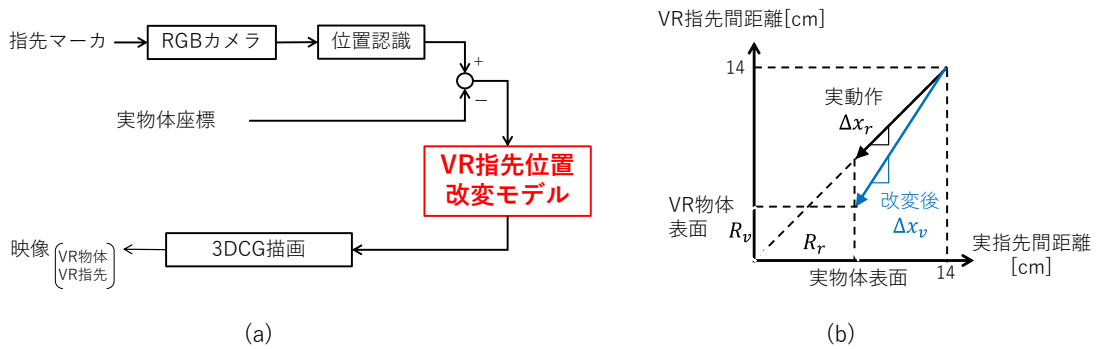


図 2: 実験用疑似触覚提示システム. (a) システム構成. (b) VR 指先位置変更モデル (VR 物体の方が実物体より小さい場合の例)

で広い範囲の VR 物体のサイズを表現できるかを実験から調査した. さらに, 疑似触覚に加え, 手指に対して伸展トルクを印加する手法を導入することで, ある実物体が提示可能な VR 物体サイズの範囲を拡大できる可能性が示唆されたため, 報告する.

2. 疑似力覚の導入

2.1 単一コントローラの実現に際しての課題

図 1 のように, 単一の実物体で多様な VR 物体を表現できることが理想であるが, 実際は実物体と VR 物体の形状やサイズが異なる場合, 視覚情報と力触覚情報の相違によりユーザに違和感をもたらされるという問題が生じる.

2.2 疑似触覚

この問題に対し, Xavier ら[6]は, 単一の実物体に対して形状やサイズが異なる様々な VR 物体を視覚的に提示し, 把持した際に両者の違いが認知されない範囲を調査した. Bergström らも同様の実験を実施し, 視覚情報の操作によって変更可能なサイズの範囲が, 実物体のサイズに応じて 10~50%程度変化することを示した[7].

本研究ではこれらの研究を参考にしつつ, より実用面に重きをおき, サイズの違いは認知しつつも違和感を許容可能な VR 物体サイズの範囲の調査を行うことにした. 疑似触覚提示については先行研究を参考に, 図 2 (a)のシ

ステムを製作した. システムではマーカトラッキングで実世界の手指の動作を取得して, 図 2 (b)のように両世界の手指と物体の間の距離の比に応じて式(1)のように VR 指先の移動量を増減させた.

$$\Delta x_v = \frac{14-R_v}{14-R_r} \Delta x_r \quad (1)$$

これにより, VR 物体を把持する際の手指の運動を視覚的に再現した.

3. 疑似触覚の効果検証実験

我々は疑似触覚の導入により, ある実物体における VR 物体とのサイズ差が許容される範囲が拡張されたかを被験者実験から検証した.

3.1 実験方法

実験環境を図 3 に示す. 被験者からの距離が VR 物体と実物体で等しくなるように, 発砲スチロール製の実物体を映像ディスプレイの隣に配置し, 実験時には目隠し板で遮蔽した. ディスプレイには VR 物体と VR 指先のみを表示した. 実験では被験者に VR 空間のみを観察しながら実物体を把持させ, 視覚情報に基づく VR 物体のサイズと力触覚情報に基づく実物体のサイズの相違の有無や違和感の程度を表 1 の選択肢を用いて主観評価させた.

この実験では 1cm から 10cm までの計 10 種類の VR 物体に対し, 1,2,4,6,8,10cm の計 6 種類の実物体を用意した. VR 物体と実物体の組み合わせはそれぞれ 3 回ずつランダ

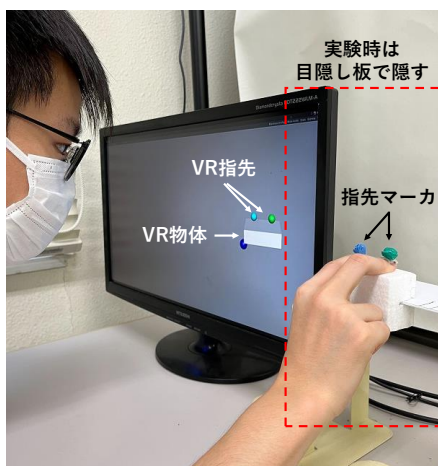


図 3: 実験環境

表 1: 大小比較/許容評価時の選択肢

大小評価	
1	ディスプレイ上の物体のほうが大きい
2	大きさの違いが分からない
3	触れた物体のほうが大きい
許容評価	
1	違いは分かるが気にならない
2	まだ許容できる
3	どちらともいえない
4	どちらかというところ許容できない
5	絶対許容できない

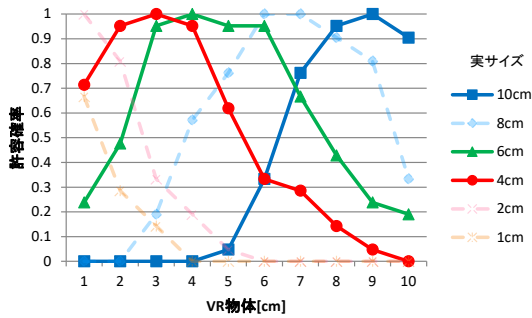


図 4: VR 物体に対する実物体が許容される確率 (手指伸展デバイス無).

ムに提示した. 被験者は, 運動や視覚に障害を有しない男性大学生 7 人とした.

3.2 実験結果

大小比較の回答が「大きさの違いが分からない」の場合と許容評価の回答が 1 または 2 である場合を許容可能と定義し, 全被験者の回答からそれぞれの実物体と VR 物体の組み合わせに対して許容可能と回答される確率を導出した. 実物体ごとにその確率を直線で補完した折れ線グラフを図 4 に示す. グラフから, 各実物体より小さい VR 物体において許容可能と回答される確率が最大になることが読み取れる. したがって, 力触覚情報に基づくサイズは実際のサイズより小さく知覚される傾向があることが推測できる.

また図 4 より, 1cm から 10cm の VR 物体を 70%以上の確率でサイズの差を許容させるためには, 4,6,10cm の組み合わせのように最低 3 つの実物体が必要になることが分かる.

4. 手指伸展デバイスの導入

4.1 疑似触覚のみによるサイズ変更の課題

疑似触覚の効果検証実験により, 疑似触覚を使用する場合 3 つの実物体で 1cm から 10cm の VR 物体のサイズをユーザに許容される範囲で表現できることが確認された. しかしコントローラの構造を単純化するためには, 単一の実物体でこの範囲の VR 物体を表現することが求められる. したがって表現に必要な実物体数をさらに削減す

るために, 疑似触覚に加えて新たな手法を導入する.

4.2 手指伸展トルクの印加

手指の各関節は, 弛緩状態では伸筋と屈筋が受動的に発生する張力が均衡する角度をとる. この状態から, 図 5 (a)のように能動的に手指を屈曲させる場合を考える. ここで, 図 5 (b)のようにデバイスを用いて手指伸展方向にトルクを印加すると, ユーザが意図したよりも手指が伸展した角度で伸展と屈曲のトルクが平衡する. すなわち, 手指に伸展トルクを印加することによって, 図 5 (b)の姿勢をとらせつつ, 図 5 (a)の姿勢を取っているとユーザに錯覚させることが可能になるものと期待される.

そこで本研究では, 図 5 (c)の手指伸展トルク生成デバイスを製作した. デバイスは厚さ 0.5mm の塩化ビニール板を 2 枚重ねにし, 把持時の手形状に合わせて切り抜いて製作した. また図 5 (d)のように拇指以外の PIP 関節から DIP 関節までは板を 1 枚にすることで, 屈曲の障害が違和感につながりやすい示指から小指に対して印加されるトルクが小さくなるようにした.

5. 手指伸展デバイスの効果検証実験

5.1 実験方法

伸展トルクの印加による, ある実物体が提示可能な VR 物体の範囲の拡張について, 疑似触覚の効果検証実験と同様のタスクにより検証した.

手指伸展デバイスを被験者の手に取り付け, 実物体は縦幅が 4,6,10cm のものに限定して実験を行った. 被験者は, 疑似触覚の効果検証実験に参加した 7 人である.

5.2 実験結果と考察

疑似触覚の効果検証実験と同様に, VR 物体と実物体のサイズの違いを許容可能と被験者が回答した確率を, 実物体と VR 物体ごとに示したものが図 6 である.

図 6 を見ると, 10cm の実物体ではデバイスの使用による大きな変化は認められない. 他方, 4cm と 6cm の実物体では, 許容される範囲が全体的に左に遷移した様子を読み取れる. ここから, 手指伸展デバイスによって, 実物体 4cm と 6cm では実際のサイズよりも小さい物体を把持していると錯覚させることの可能性が確認された. 一方で, 単一の実物体で多様な VR 物体を表現することを

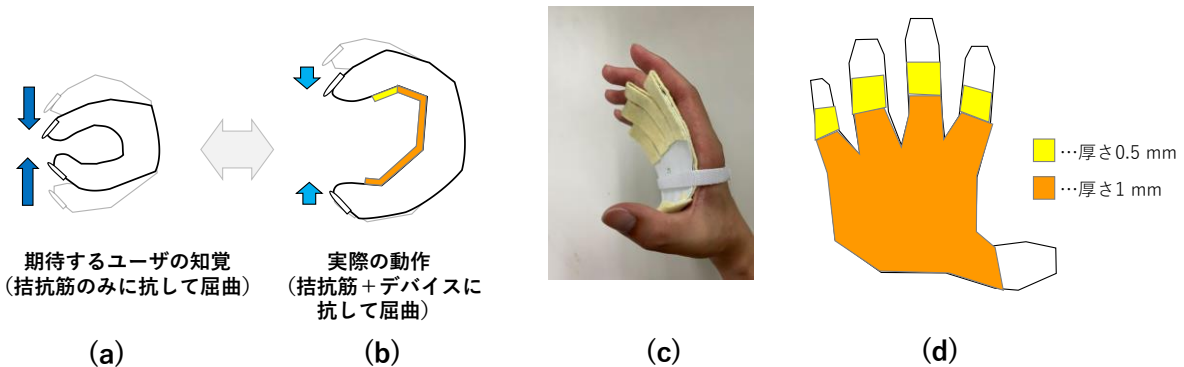
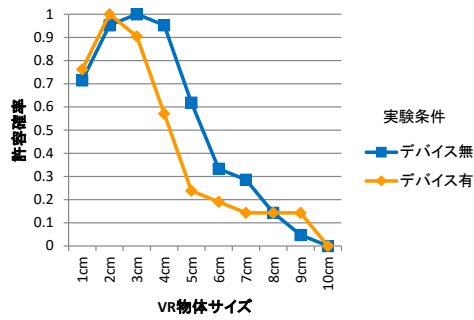
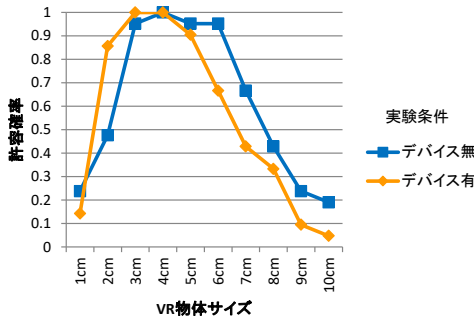


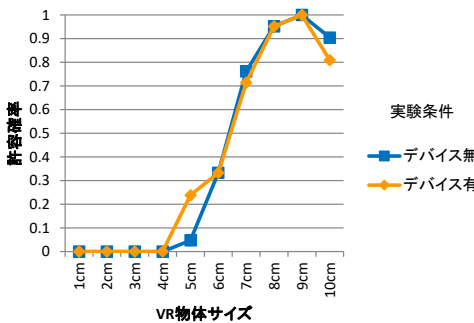
図 5: 手指伸展デバイス. (a) デバイス装着時の実際の動作. (b) ユーザが知覚すると期待する動作. (c) 実装. (d) 構造.



(a)



(b)



(c)

図 6: VR 物体に対する実物体が許容される確率 (手指伸展デバイス有).

(a) 実物体 4cm. (b) 実物体 6cm. (c) 実物体 10cm.

考えると、許容可能な範囲が広がること、すなわち許容可能なサイズの上限はデバイスの有無によって変化せず、下限のみが低下することが望ましい。しかし、今回の実験では、許容範囲の下限とともに上限も低下する傾向が見られた。

本研究では、提示する VR 物体が小さくなるにつれて伸展トルクが増加する弾性特性をデバイスに持たせることで、許容範囲の遷移量を VR 物体のサイズと連動させる (VR 物体が小さくなるほど左方遷移量が大きくなる) ことが可能だと考えたが、意図した弾性特性を持たせることはできなかった。今後は、より望ましい弾性特性が得られるように、デバイスの構造や材料を再検討する必要がある。

6. まとめ

VR 物体を把持して操作する場面を想定し、受動力覚と疑似触覚の併用によって単一の実物体で表現可能な VR 物体のサイズの範囲を検討した。その結果、実物体 3 個で 1~10cm の VR 物体を表現可能であることが確認された。さらに手指に対して伸展トルクを印加するデバイスを併用することで、ある実物体でより小さい VR 物体の表現が可能になる可能性が示唆された。今後は単一の実物体による力触覚提示の実現に向けて、伸展トルクの印加方法や疑似触覚の提示方法を見直す必要がある。

参考文献

- [1] Inrak Choi, Eyal Ofek, Hrvoje Benko, Mike Sinclair, and Christian Holz: CLAW: A Multifunctional Handheld Haptic Controller for Grasping, Touching, and Triggering in Virtual Reality, Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '18), Paper 654, pp.1–13, 2018.
- [2] Jaeyeon Lee, Mike Sinclair, Mar Gonzalez-Franco, Eyal Ofek, and Christian Holz: TORC: A Virtual Reality Controller for In-Hand High-Dexterity Finger Interaction. Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '19), Paper 71, pp.1–13, 2019.
- [3] Andre Zenner and Antonio Kruger: Shifty: A Weight-Shifting Dynamic Passive Haptic Proxy to Enhance Object Perception in Virtual Reality, IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol.23, No.4, pp.1285–1294, 2017.
- [4] 鳴海 拓志: Pseudo-haptics 応用インタフェースの展望, システム/制御/情報, 61 巻, 11 号, pp.463-468, 2017.
- [5] Yuki Ban, Takuji Narui, Tomohiro Tanikawa and Michitaka Hirose: Modifying perceived size of a handled object through hand image deformation. Presence: Teleoperators and Virtual Environments, Vol.22, No.3, pp.255-270, 2013.
- [6] Xavier.de.Tinguy, Claudio Pacchierotti, Mathieu Emily, Mathilde Chevalier, Aurélie Guignardat, Morgan Guillaudeux, Chloé Six, Anatole Lécuyer and Maud Marchal: How Different Tangible and Virtual Objects Can Be While Still Feeling the Same?, 2019 IEEE World Haptics Conference (WHC), pp.580-585, 2019.
- [7] Joanna Bergström, Aske Mottelson, and Jarrod Knibbe. Resized Grasping in VR: Estimating Thresholds for Object Discrimination. In Proceedings of the 32nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST '19), pp.1175–1183, 2019.