



二指での高い物体把持剛性を実現する 柔軟な VR 指先モデル

高橋拓夢¹⁾, 松木倫太郎¹⁾, 藤田欣也²⁾

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

2) 東京農工大学大学院工学研究院先端情報科学部門 (〒184-8588 東京都小金井市中町 2-24-16)

概要: 手指を用いた VR 物体操作における物体の安定把持を目標に, 我々は複数の皮膚点をバネによって接続した指先で構成される VR 手モデルを開発してきた. しかし, 手と物体の多点接触の実現と引き換えに指腹面内での回転剛性が低下し, 二指で物体端部を把持すると VR 指先が物体とともに回転するという問題が生じた. そこで本研究では, 皮膚点の指腹面内での運動を拘束することでねじれ回転を抑制した結果, 物体把持剛性が増加し, 二指把持での物体の姿勢維持が可能になった.

キーワード: VR 指先モデル, VR 物体操作, 把持剛性, 剛体シミュレータ

1. はじめに

設計やアミューズメント, 医療や訓練など様々な分野で VR 技術の利用が進んでおり, それらの大半は, 現実空間における作業を VR 環境で再現するものである. また, 現実の作業の多くは, 手指を用いて物体を操作することによって実現される. したがって, VR 環境においても, 手指を使った物体操作が可能であることが望ましい.

手指を用いた VR 物体操作を実現する方法には, 簡便なものでは, 指先を近づけると物体が手に固定される手法がある[1]. しかし, 現実空間と異なり撃力や摩擦などの力学的な作用が働かないため, ユーザの違和感につながりやすい. すなわち, より直感的で操作性の高い VR 作業のためには, VR 環境でユーザの手指を代替する VR 手指と VR 物体の力学的なインタラクションが求められる.

VR 環境での手指と物体の力学的なインタラクションは, 剛体物理シミュレータ環境において, 剛体を用いて VR 指を表現することで実現可能である. しかし, 指先を剛体で表現すると, 例えば球を二指で把持した時に, 指と物体が一点で接触するため物体が回転するという問題が生じる.

この物体の回転は, 指が物体と多点接触することで防止が可能である. 指と物体の多点接触の実現方法の一つは, 変形する VR 指先である [2]. しかし, 把持だけでなく物体操作まで実現するためには, 変形と運動の 2 つのシミュレーションを同時に実現する必要があり, 技術的困難に加えて計算コストが増大する. そこで我々は, 複数の剛体(皮膚点)をバネで相互接続することによって指先の変形を擬似的に実現する VR 指先[3]を提案した. しかし, バネで接続された点群は多点接触を可能にする一方で, 指先の剛性を

を低下させ, 図 1 のように, 把持物体の姿勢を維持したまま押しつけるような高い把持剛性が求められる作業が困難になるという問題が生じた.

そこで本研究では, 手指での VR 物体操作における高い把持剛性の実現を目的に, [3]のモデルをもとに, 皮膚点の指腹面内での運動をスライダジョイントによって拘束する VR 指先モデルを提案する.

2. 先行研究

2.1 物体と多点接触する VR 手指

現実における安定した物体把持は, ヒトの指腹の皮膚などの軟部組織が変形して多点接触することで可能になっている.

物体との多点接触を実現する手法として, 図 2 の (a) のような, 剛体の周囲を変形物体で覆う構造の VR 指先モデルが提案されている [2]. この変形物体のシミュレーションには有限要素法が用いられるが, これは計算コストが大きいため, システムの更新レートを低下させる可能性が

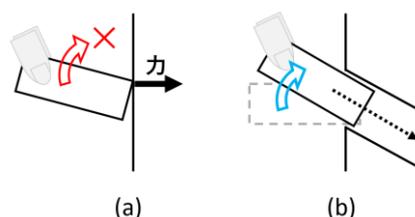


図 1: 高い/低い把持剛性が求められる作業. (a) 物体の姿勢を維持したまま押し付け (高剛性). (b) 物体を柔らかく回転させながら挿入 (低剛性).

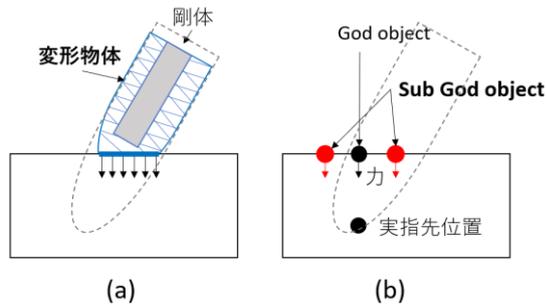


図 2: 実指が VR 物体に侵入したときの VR 指とそれが物体に加える力の様子. (a) 剛体の周囲に変形物体を配置した VR 指 [2]. (b) God-Finger 法 [5].

ある。それは、ユーザの違和感の原因となるため望ましくない。

また、VR 物体への実指の侵入位置に力点を設置する God-Object 法 [4] を拡張したモデルとして God-Finger 法 [5] も提案されている。これは God-Object の周囲に Sub-God-Object を生成し、それぞれを力点として多点で物体に力を加えるモデルである。しかし、この手法は VR 指が物理シミュレーション上に物体として存在していないため、物体と手の衝突時に撃力が発生しないなど、力学的に正確ではないという問題がある。

したがって、物体と多点接触し、力学的に正しくインタラクションする VR 指先が求められる。

2.2 バネで相互接続された皮膚点による VR 指先モデル

物体との多点接触と力学的に正しいインタラクションを実現するために、我々は図 3 のようにバネで相互接続された皮膚点で VR 指先を構成するモデルを提案してきた [3].

このモデルは、先の要求に加え、物体との柔らかい接触と大きな力での把持の両立も目指しており、これは実指と皮膚点を接続する VC に非線形なバネを用いることで実現していた。また、ヒトの指先の軟部組織は変形しやすく、皮膚そのものは伸縮しにくいという性質の疑似的な実現のために、VC のバネ係数と比較して、指腹形状復元バネのバネ係数を高くした。

この VR 指先モデルでは、図 6 に示すように、水平におかれた物体の端部を前後から二指把持して持ち上げるとき、勢の維持ができなかった。原因として、指腹面の法線を軸とした VR 指先の回転剛性が低いことが考えられる。

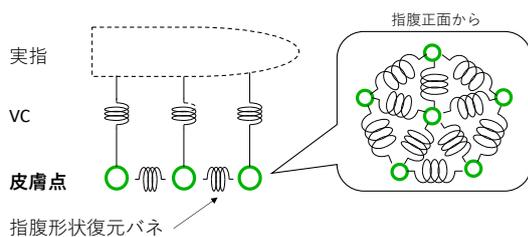


図 3: 2017 年に提案した VR 指先モデル [3].

このような VR 指先では、把持物体が外力や反力を受けるような作業が難しくなるため、様々な VR 作業の実現において問題となることが予想される。

以上より、この VR 指先モデルには回転剛性の強化が必要であった。

3. 指骨と皮膚点で構成される VR 指先モデル

ヒトの指先の皮膚は伸縮しにくいいため、指腹面の接線方向の剛性が高く、指腹面の法線を軸に大きく回転することは起こらない。一方で、以前我々が提案した VR 指先モデルでは、複数の皮膚点の並進運動を組み合わせることで、皮膚点で構成される指腹の回転が起きていた。この原因として、皮膚点の並進 VC のみで軟部組織の変形と指先の並進、回転のすべてを表現していることが考えられる。これに対し、指腹を定義することで、軟部組織の変形と指腹の並進と回転を分離し、それらを個別に制御することを考えた。これにより、指腹の回転を制御するバネを強くすることが可能となるため、回転剛性の強化の実現が期待される。

VR 指先の指腹を定義するために、指骨を導入した VR 指先モデルとして、図 4 のように皮膚点と他の物体と干渉しない指骨をスライダジョイントで接続したモデルを提案する。

このモデルにおいて、指骨に対する皮膚点の運動は、それらはジョイントで拘束されているため、軟部組織の変形のみを表現する。この変形は皮膚点と指骨を接続する軟部組織バネで制御される。

また、指腹面の法線を軸とした指腹の回転を制御する方法として、実指と指骨を姿勢 VC で接続することが考えられる。この姿勢 VC のバネ係数を大きな値にすることで、指腹の回転剛性の強化が期待される。

4. 評価実験

本研究で提案する VR 指先モデルに基づく VR 物体操作システムを図 5 のように実装した。そして、従来の図 3 のモデルと改良した図 4 のモデルを比較して、指先の回転剛性が強化されたことを検証するために、次のような実験を実施した。

4.1 実験システム

今回のシステムでは、ユーザの手指を計測した実手に VR 手を追従させた。手全体の位置と姿勢は左手首に装着した HTC VIVE tracker で計測し、指先位置と姿勢は Cobra

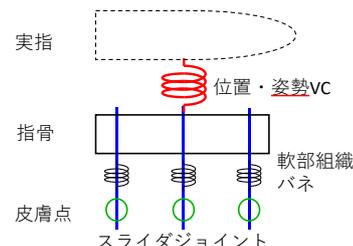


図 4: 今回提案する VR 指先モデル.

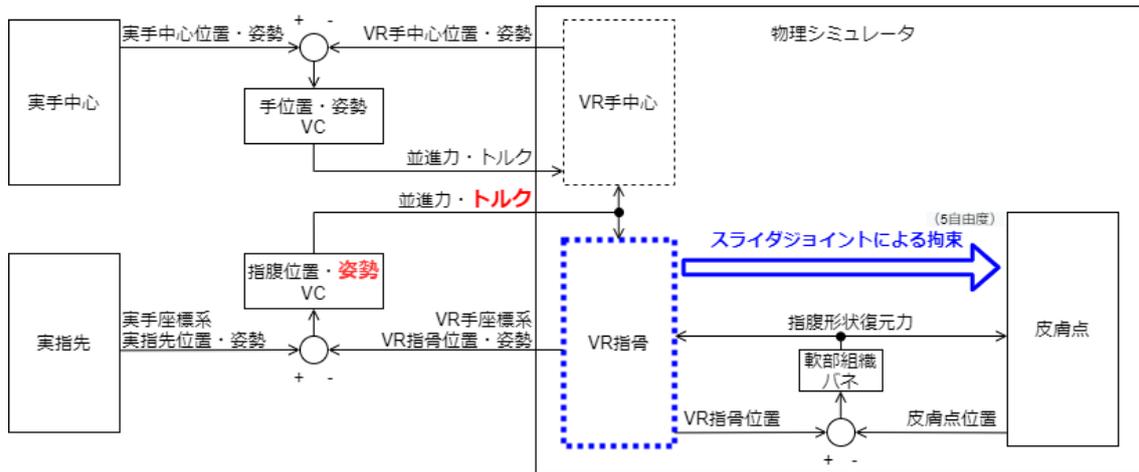


図 5: 本研究で実装した VR 物体操作システムのシステム図 (破線は干渉検出対象外を意味)。

gloves で計測した手の形状から算出した。

また、VR 環境は剛体物理シミュレータである Open Dynamics Engine で構成し、シミュレーション周期は 7 ms とし、VR 空間の重力加速度は現実と同様の 9.8 m/s^2 とした。さらに、VR 手と物体はヒトの手と同様のインタラクションを実現することが望ましいことから、VR 手の質量は現実のヒトの手の質量を参考に決定した。そこで、皮膚点の質量は 0.02 kg 、指骨の質量は 0.12 kg 、VR 手中心の質量は 0.9 kg とした。また、指骨の位置は 112.5 N/m^2 の非線形な並進バネ、姿勢は $6 \text{ N} \cdot \text{m/rad}$ のトルクバネで実指に追従させ、皮膚点は指骨に 9.375 N/m の並進バネで接続した。

4.2 実験方法

指先に対して把持物体からトルクが加わるような作業を、従来モデルと今回提案するモデルを用いて行う実験を実施した。

作業の内容は水平に置かれた棒状の直方体 (各辺 0.20 m , 0.05 m , 0.05 m) の端から 0.02 m の位置を拇指と中指で前後から挟むように把持し、手の姿勢を変化させずに垂直に上昇させることで物体を持ち上げることとした。このときの直方体の質量は 1 kg であり、重心は直方体の中心に位置している。

4.3 実験結果

従来モデルと今回提案するモデルの指先の回転剛性を

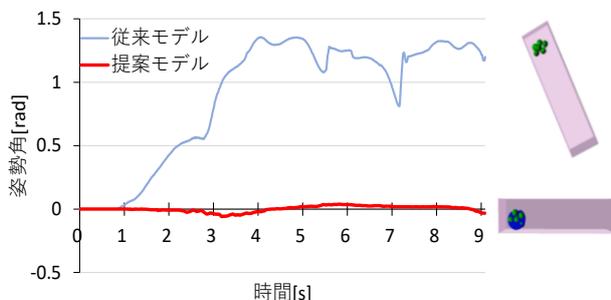


図 6: 従来モデル[3]と提案モデルによって水平な物体を把持して持ち上げたときの重力による鉛直方向の回転量。

比較するために、水平に置かれた直方体を二指把持して持ち上げたときの物体の鉛直方向への回転量を測定した。その結果とそのときの把持物体の様子を図 6 に示す。

図 6 右を見ると、今回の提案モデルを用いた場合、物体の姿勢をほぼ水平に維持できていた。図 6 のグラフを見ると、それぞれの VR 指先は同等のトルクを受けており、実験の結果から従来のモデルと比較して提案モデルにおける指先の回転剛性に向上が確認された。

5. 考察

実験結果から、従来モデルと比較して、今回提案する VR 指先モデルは指先の回転剛性の強化を実現できた。また、把持物体の形状と質量から、現実の指腹と同程度の回転剛性が実現できたと考えることができる。

その一方で、把持物体の質量を 10 kg に変更し、実験と同様の操作を行った場合、今回の提案モデルでも実験時の従来モデルと同様に物体の姿勢が維持できないと考えられる。現実では、手全体を用いることでこのような物体の姿勢の操作が可能である。VR 指先で構成された VR 手をヒトの手の代替とするためには、現在の把持剛性では不十分であり、より高い剛性の実現が望ましい。

指腹の回転剛性のさらなる強化の手法として、実指と指骨を接続する姿勢 VC のバネ係数をより大きな値にすることが考えられるが、現在の値は指骨のシミュレーションが不安定にならない範囲で最大のものであるため、指骨の安定性を向上することが求められる。そこで、指骨の質量を動的に大きくしたり、半径を大きくしたりすることで、より高い剛性が実現可能になることが期待される。

6. まとめ

VR 環境での把持物体の姿勢制御のため、実指と皮膚点の間に指骨となる物体を設定し、皮膚点と指骨間をスライダジョイントで接続することで指腹の変形と回転を分離する VR 指先モデルを提案した。提案した指先モデルは、バネで相互接続された皮膚点と実指を VC で接続したモデ

ルと比較し、把持物体の姿勢制御能力の向上を実現した。今後は、手の代替として VR 指先を用いるためにより高い把持剛性の実現を目指す。

参考文献

- [1] S Oprea, P Martinez-Gonzalez, A Garcia-Garcia, J Alejandro Castro-Vargas, S Orts-Escolano, and J Garcia-Rodriguez: A Visually Plausible Grasping System for Object Manipulation and Interaction in Virtual Reality Environments; Proc. Computers and Graphics, Vol. 83, pp.77-86, 2019.
- [2] M. Ciocarlie, A. Miller and P. Allen: Grasp Analysis Using Deformable Fingers; Proc. of the IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.4122-4128, 2005.
- [3] 高橋哲生, 近藤恵太, 藤本雄一郎, 藤田欣也: 指先での精密作業のための運動成分を分離した手・指モデル; 第 23 回日本バーチャルリアリティ大会論文集, No.22A-4,2018.
- [4] C. B. Zilles and J. K. Salisbury: A Constraint-based God-object Method for Haptic Display; Proc. IROS-95, Pittsburgh, Vol.3, pp.146-151, 1995.
- [5] A. Talvas, M. Marchal and A. Lécuyer: The God-Finger Method for Improving 3D Interaction with Virtual Objects through Simulation of Contact Area; Proc. IEEE Symposium on 3DUI, pp.111-114, 2013.