



連成振動の抑制によるリンク構造を持つ 5 指 VR ハンドの操作性の改善

松木倫太郎¹⁾, 高橋拓夢¹⁾, 藤田欣也¹⁾

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: 現実の手と同様に直感的で追従性の高い指を使った VR 物体操作を目標に, 我々は, リンク構造を有し, 指先のみを VC で実手に追従させ, 各 VR 指関節にバネを設置して IK 法で関節角を決定する 5 指 VR ハンドを開発してきた. しかし, リンク構造に起因する連成振動の抑制が課題であった. 本研究では, 関節角速度に比較して指節の並進速度が安定であることに着目し, 各指節の末節部に並進ダンパを設置した結果, 指先への追従性を維持しつつ安定性を改善することができたので報告する.

キーワード: VR 手モデル, 剛体物理シミュレータ, 多関節構造

1. はじめに

訓練をはじめとする様々な分野で VR 技術の利用が進んでいる. その多くは, 現実空間での作業を VR 環境で再現するものであるため, 現実空間と同様に作業の対象物体を操作する機能が求められる.

VR 環境で物体を操作する方法には, ユーザが物体に近づくとき, 物体をユーザに固定する方法[1]がある. しかし, このような手法は, 摩擦や加減速などの力学的なインタラクションができないため, ユーザの違和感に繋がりがやすい.

ユーザと物体の力学的なインタラクションを可能とするためには, 現実の力学を再現する物理シミュレータと, ユーザの代わりに物体とインタラクションする代理物, この代理物をユーザに追従させる方法の 3 要素が必要である. 物理シミュレータには, PhysX や Havok などの剛体物理シミュレータが公開されている. また, 代理物をとユーザに追従させる方法は, バネによってユーザと代理物を接続する Virtual Coupling 法(以下, VC)[2]や, 接触した物体の最近接表面に代理物を移動させる God-Object 法[3]などが提案されている.

ユーザの代理物として最も単純な形状は, 点[4]である. しかし, 点は物体に回転トルクを与えることができないため, 作業対象物体の姿勢制御が困難という課題がある.

この問題は, 体積を持つ単純形状の VR 物体で代理物を表現することによって解決可能である[5]. ここで, 現実空間では, 指節と関節を持つ手指の各部を用いて操作を行う場合が多い. このような操作を VR 空間で実現するためには, 手全体の構造を持つ代理物(VR 手)が求められる.

手全体を再現する手法の 1 つに, 複数の God-Object を

動的に生成することで手を表現する手法[6]がある. しかしこの方法では, 複数の点によって, 物体を制御するため, 接触点間の距離よりも小さい物体の操作は困難である.

もうひとつの方法は, リンク構造を用いて VR 手を構成する手法 [7] である. 先行研究では, VC を用いて VR 手と実手の各指節を接続することで, VR 手を実手に追従させた. しかし, 多数の関節を持つリンク構造は自由度が高いため, 挙動が振動的になりやすい. そこで, 現実の手よりもリンクの質量を大きくすることで安定化を図っているが, 現実のヒトの手と物理特性が大きく異なることが課題であった.

すなわち, ヒトの手と同様の構造や特性を持ち, VR 物体と力学的に相互作用する VR 手が求められるが, これまで実現されていなかった. そこで, 我々は指先の制御が容易なリンク構造 VR 手モデルを提案したが, やはり安定性に課題があった. そこで本研究では, 従来モデル[8]に手座標系ダンパと角速度リミッタを追加することによって, 安定性を改善したリンク構造 VR 手モデルを提案する.

2. リンクで構成された VR 手モデルと問題

2.1 リンクで構成された VR 手モデル

ヒトは, 手指を用いて, 1)摩擦などの力学的な作用を利用し, 作業を行っている. さらに, 2)指節や関節の各部を使い分けることで, 多様な作業を実現している. 特に, 3)精密な作業の多くには, 指先の精密な動作が必要である.

したがって, 物体操作のための VR 手モデルには, VR 環境下で, 1)力学的に正しくインタラクションすること, 2)ヒトの手と同様の構成であること, 3)指先の精密な 3 次

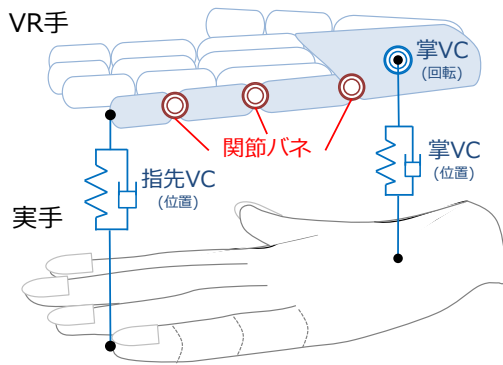


図 1: 指先の制御の容易なリンク VR 手モデル(従来モデル)

元位置制御ができることが求められる。

まず、VR 物体と力学的に正しいインタラクションを実現するために、実手とは異なる VR 物体と干渉する代理物である VR 手を定義し、VC で実手と VR 手を接続する。

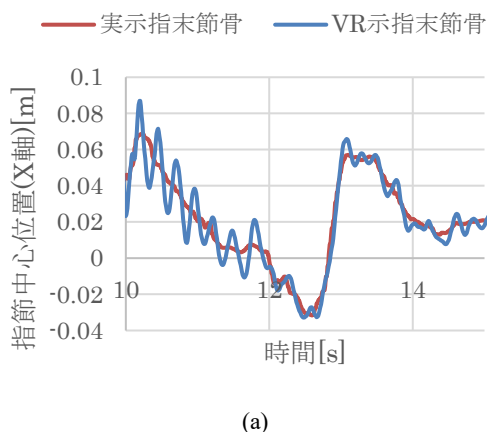
次に、VR 手をヒトの手と同様の構造にするために、指節と関節で構成された、リンク構造を持つ VR 手を設ける。

VR 指先の制御を高精度で行うために、図 1 のように、実手の指先に VR 手の指先を VC で追従させる。また、他の指節は自然な指の形状を目指し、力を抜いたときの関節角度を自然角とした関節バネを設置する。さらに、掌-指先間の Inverse Kinematics (以下、IK)を解くことで、指の形状を決定する。

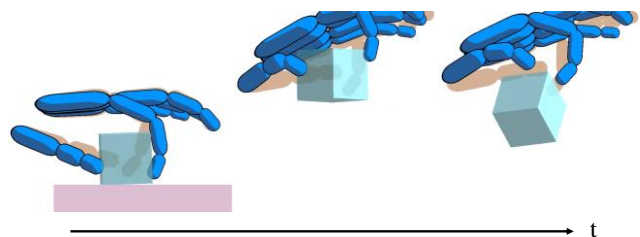
2.2 問題点

図 1 の手モデルは、リンク構造であることから、リンク間を振動が伝搬し連成振動が発生する。そのため、指の振動によって物体操作が困難になる問題が生じる。図 2 (a)に示指の関節バネ剛性が DIP 関節, PIP 関節, MP 関節の順に、 $0.005 \text{ N} \cdot \text{m/rad}$, $0.005 \text{ N} \cdot \text{m/rad}$, $0.01 \text{ N} \cdot \text{m/rad}$ のときの例を示す。

さらに、この手モデルは、バネが弱いため、図 2(b)のように僅かな外力で把持が破綻してしまう。しかし、バネを強くすると、シミュレーションが破綻しやすくなる。これ



(a)



(b)

図 2: VR 手モデルの問題点. (a) 指節の連成振動 (示指 DIP 関節バネ剛性: $0.005 \text{ N} \cdot \text{m/rad}$)
(b) 関節バネが弱いため、把持物体の回転により関節が運動し、把持が破綻 (青: VR 手, 肌色: 実手)

は、この VR 手モデルが軽い指節に連続バネが接続されている複雑な構造であるため、シミュレーションの誤差が発生しやすく、さらに、バネの強化によって、誤差が増大し、物理量が発散してしまうからである。

以上から、この VR 手モデルには、連成振動を抑制することと、シミュレーションの破綻を防止することが求められる。

3. 提案するリンク構造を持つ VR 手モデル

前章より、連成振動の抑制とシミュレーションの破綻の防止のために、我々は、図 1 の各関節位置に手座標系ダンパ、指節に角速度リミッタを設置する手法を提案する。

3.1 手座標系ダンパ

連成振動を抑制するために、急な指節の姿勢の変化を抑制することを考える。これに対して、各関節に設置する角速度ダンパを用いる場合、角速度は図 3 のようにノイズが多く含まれるため、VR 手の振動を助長する可能性がある。

そこで、角速度と比較して、ノイズの少ない並進速度をダンパに用いることを考える。そこで、指節の姿勢の制動を行うために、図 4 のように各指節の末節部へダンパを設置した。また、掌自体が動く速度がダンパに影響を与えないように、手座標系上での各関節位置の速度を用いた。

3.2 角速度リミッタ

シミュレーションの破綻を防止するために、シミュレーションに用いられる物理量に制限を掛けることを考える。特に、図 3 のように大きなノイズが多発しやすい角速度は、発散する可能性が高いため、角速度にリミッタを設置した。ここで、動力学計算外でリミッタを設置すると、物理挙動に破綻を発生させる可能性がある。そこで、動力学計算内で動作可能なリミッタを設置することで、物理的な破綻なく、発散を防ぐことが可能になる。

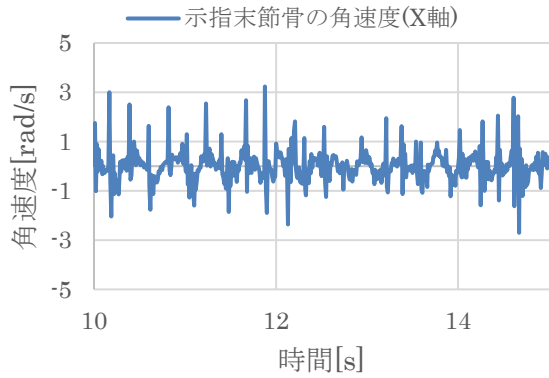


図 3: 実手静止時における角速度ダンパに用いられる角速度のノイズ

4. 検証実験

提案モデルの連成振動やシミュレーションの破綻防止効果を実験的に検証した。実験では、従来モデルと提案モデル2つのVR手モデルを用いて同一の物体把持動作を行い、挙動を比較した

4.1 実験システム

図 5 に実験システムの構成を示す。提案システムでは、ユーザの手指を LeapMotion によりトラッキングし、計測した実手に VR 手を追従させた。また、剛体物理シミュレーションは Unity に内蔵されている PhysX で構成し、シミュレーション周期を 0.01s とした。

本研究では、現実に近い VR 手によって物体操作を実現することが目的である。そこで、VR 手全体の長さを 115mm、質量を 0.6kg とし、指節の長さや質量は現実の手を参考に決定した。また、手座標系ダンパは連成振動を抑制するが、VR 手が動きにくくはならないように設定し、角速度リミッタも同様に、シミュレーションの破綻を防止するが、VR 指を動かす際に、大きな遅延が起らないような範囲に設定した。さらに物体操作を行いやすくするため、VR 手と物体間の摩擦係数を無限大とした。

4.2 実験方法

まず、従来モデルのバネの強さを、提案モデルにも適用

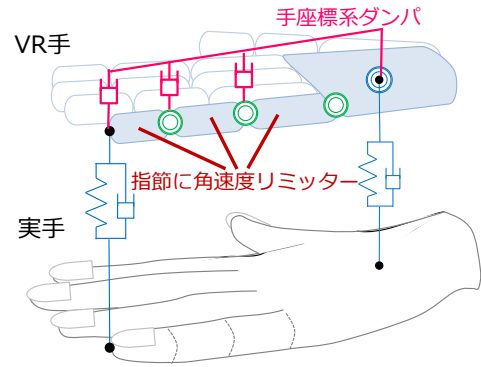


図 4: 手座標系ダンパおよび各速度リミッタを追加した改良 VR 手モデル

し、同じバネの強さにした上で、双方の VR 手を操作し、VR 指に連成振動が発生するかを確認する。

次に、提案モデルの関節バネ剛性を従来モデルの 10 倍の強さにした。具体的に、示指の DIP 関節、PIP 関節、MP 関節の順に、 $0.05 \text{ N} \cdot \text{m}/\text{rad}$ 、 $0.05 \text{ N} \cdot \text{m}/\text{rad}$ 、 $0.1 \text{ N} \cdot \text{m}/\text{rad}$ とした。この提案モデルと従来モデルの示指と母指によって、重さ 50g、大きさ 4cm 四方の立方体を二指把持し、持ち上げた際の VR 指の動きを見る。実手はすべての試行で同じ把持動作を行う。

4.3 実験結果

VR 手の連成振動について、従来モデルと提案モデルを比較すると、図 2(a)および図 6(a)に示される通り、提案した VR 手は振動がほぼ起こらず、実手に追従することが確認された。

また、物体の把持について、バネの弱い従来 VR 手と、バネを強くした提案 VR 手を比較すると、図 2(b)および図 6(b)に示される通り、後者のほうが指の変形が起りづらく、同じ実手の動きでも、物体を持ち上げることが可能であった。

5. 考察

実験結果より、連成振動の抑制とシミュレーションの破

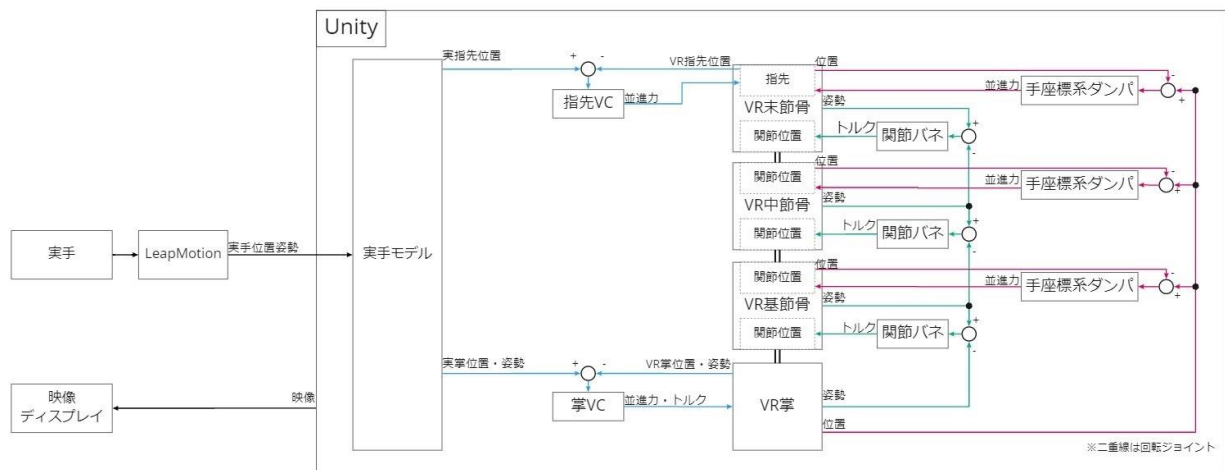


図 5: 実験 VR システム。

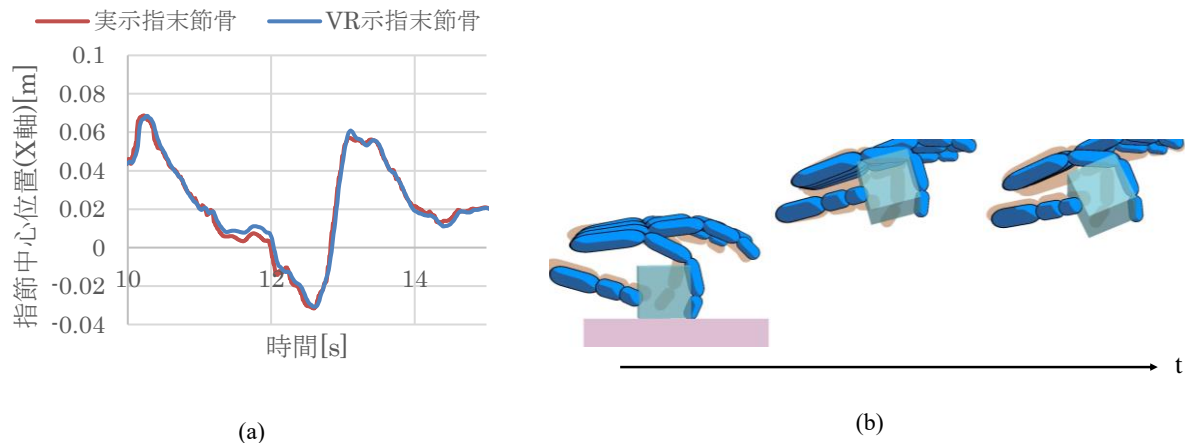


図 6: 改良した VR 手モデルの挙動. (a) 指節は振動せず, 追従 (示指 DIP 関節バネ剛性: $0.005\text{N} \cdot \text{m}/\text{rad}$)
 (b) バネを 10 倍に強化し, 物体把持が可能の様子 (青: VR 手, 肌色: 実手) (示指 DIP 関節バネ剛性: $0.05\text{N} \cdot \text{m}/\text{rad}$)

綻の防止を行った結果, 実手への追従性および物体操作時の操作性の向上が確認された.

しかし, 改善したモデルにおいて, 摩擦無限大にも関わらず, 把持が破綻することがあった. これは, VR 手は剛体であり, 物体と点で接触していることに起因していると考えられる. 点での物体との接触は, 並進を拘束するが, 回転を拘束することが出来ないため, 指が物体表面を転がることを許容してしまうためである.

一方で, 現実のヒトの指は, 物体が指表面を転がることは起こりにくい. これは, 指の軟組織が, 物体と面で接触し, 転がりを許容しないような回転を拘束するバネ構造を持っていることからであると考えられる.

そこで, VR 指が物体表面を転がることを抑止するために, 指の接触点と物体間が転がらないように, 指の姿勢維持バネを設置することが考えられる.

6. まとめ

物体操作のためのリンク構造と連続バネを持つ手モデルに手座標系ダンパや角速度リミッタを設置することにより, 連成振動の抑制とシミュレーションの破綻の防止を行った. 結果として, 物体操作時の操作性の向上や, 操作可能な対象の範囲を広げることが出来た. 今後は, 容易な物体操作を実現するために, VR 指が物体表面を転がることに対する改善を行う必要がある.

参考文献

[1] Sergiu Oprea, Pablo Martinez-Gonzalez, Alberto Garcia-Garcia, John Alejandro Castro-Vargas, Sergio Orts-Escolano, Jose Garcia-Rodriguez: A Visually Plausible

Grasping System for Object Manipulation and Interaction in Virtual Reality Environments, Computers & Graphics, vol. 83, pp. 77 – 86, 2019.

- [2] E. J. Colgate, M. C. Stanley, M. J. Brown; Issues in the Haptic Display of Tool Use, Proc. of the IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, Vol. 5, pp. 140-145, 1995.
- [3] C. B. Zilles, J. K. Salisbury: A Constraint-based God-object Method For Haptic Display; Proc. IROS-95, Pittsburgh, Vol.3, pp.146-151, 1995.
- [4] B. Hannaford, Jee-Hwan Ryu: Time-domain passivity control of haptic interfaces, IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 18, Issue, 1, pp. 1-10, 2002.
- [5] 荒川大樹, 小粥大敬, 藤本雄一郎, 藤田欣也: 非接地型力覚提示装置を用いた作業におけるトルク認知支援のための回転成分強調 VC の提案, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 22, No.1, 2017.
- [6] Markus Holl, Markus Oberweger, Clemens Arth, Vincent Lepetit: Efficient Physics-Based Implementation for Realistic Hand-Object Interaction in Virtual Reality, 2018 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR), 2018.
- [7] Christoph W. Borst, Arun P. Indugula: A Spring Model for Whole-Hand Virtual Grasping, Presence Vol. 15, Issue, 1, pp. 47-61, 2006.
- [8] 松木倫太郎, 藤田欣也: 直感的な物体操作のための 5 指 VR ハンド, 第 25 回バーチャルリアリティ学会大会, 2020.