



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

高橋哲生¹⁾, 近藤恵太¹⁾, 藤本雄一郎²⁾, 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: 指先での精密作業が可能な VR 手の実現には, 1) 各指の 3 自由度の運動が可能かつ相互に拘束された VR 手, 2) 運動自由度ごとに異なる剛性が設定可能であること, 3) 指先での多点接触などが必要となる. そこで本研究では, 1) 手指運動の原点 (手指中心) を設け, これと各指先をジョイントで接続した VR 手を定義し, 2) 同一形状の実手モデルを定義して運動成分ごとに VC を適用し, 3) 指先をバネで連結した複数の剛体で表現する方法を提案する.

キーワード: VR 手モデル, 力覚レンダリング, 非接地型擬似力覚提示装置, 剛体物理シミュレータ

1. はじめに

組み立て作業のシミュレーションいわゆるバーチャルアセンブリ (VA) は, VR 技術との組み合わせによって自然なインタラクションが可能になり, より効果的な作業やその効率改善が可能になる[1]. また, ハプティックフィードバックは視覚や聴覚を介したフィードバックと比べて, ユーザにより強い没入感を与えることが報告されている[2]. さらに, 現実空間での組み立て作業の中でも, 特に手指を用いた精密な作業においては, 指先の細かな制御や, 作業時に作用する反力の知覚が求められる. したがって, 指先の細かな制御や作業反力の提示を実現することによって, VR 環境における指を用いた精密な作業が可能になるものと期待される.

ここで, ハプティックフィードバックのための力覚提示装置は, 接地型と非接地型に大別される. 接地型力覚提示装置は, 環境とユーザの間に力を発生させてユーザの動きを物理的に拘束することが可能であるが, 装置が大型化しやすく, VA においては動作可能領域の制約が課題となる. 対して, 非接地型提示装置は限定的な感覚受容器を刺激するのみであり, 物理的な反力によってユーザの動きを拘束することはできないが, 広い作業空間やユーザの動作自由度の高さが利点となる. そこで本研究では, 非接地型の力覚提示装置を利用した指先での精密作業の効果的な実現方法について検討する.

ユーザが作業対象物体に加える力, すなわちユーザが知覚する物体からの反力を計算する力覚レンダリング[3]法も, プロキシ法[4]や God-Object 法[5], バーチャルカップ

リング法 (以下 VC 法) [6]などが提案されてきた. しかし, これらのユーザとユーザを代理する VR 物体 (プロキシ) の位置差に基づく方法を非接地型力覚提示装置と組み合わせると, 実空間におけるユーザの動きが拘束されないため, 計算される力が過大になるという問題が生じる. そのため, 通常の VC 法では, シミュレーション安定化のためにバネ係数を低く設定する必要が生じる. ところで, 手と把持物体の相対的な回転によって発生する指先の位置差は, 上肢全体の運動によって発生する位置差と比べて非常に小さい. そのため, 小さな VC 係数と相まって, 指と物体の間に作用するトルクが非常に小さくなり, 把持物体の姿勢維持が困難になるという問題が生じる[7].

また, 通常の VC 法ではバネ係数が一定であるため, ヒトが作業の目的や種類に応じて行う, 関節を柔らかくあるいは固くするといった関節剛性の制御はできない. そこで, ヒトのように, 手関節の回転など特定の運動自由度のみの剛性を随意的に制御可能にするためには, 手指の運動の各成分を分離して, それぞれの成分に対して異なる VC 係数を設定[7]し, さらに, その値をユーザが随意的に制御できるようにする必要がある.

ところで, ヒトの手指は骨格構造を持つため, 指先は骨格を介して相互に拘束し合っている. この相互拘束は, 物体を把持して操作する際の, 指先ひいては手や把持物体の安定性に貢献している. しかし, VR 環境では点を用いてユーザを代替するもの[4,5,6,8]が多く, これらの方法を用いて指先を代替した場合, 実際のユーザの手 (以下実手) にある相互拘束がないため, プロキシ同士が相対的に自由に運動して把持が不安定になりやすい. したがって, 把持を安定化するためには, VR 環境上での手 (以下 VR 手) にも実手が持つ相互拘束を実現する必要がある.

Tetsuo TAKAHASHI, Keita KONDO, Yuichiro FUJIMOTO, and Kinya FUJITA

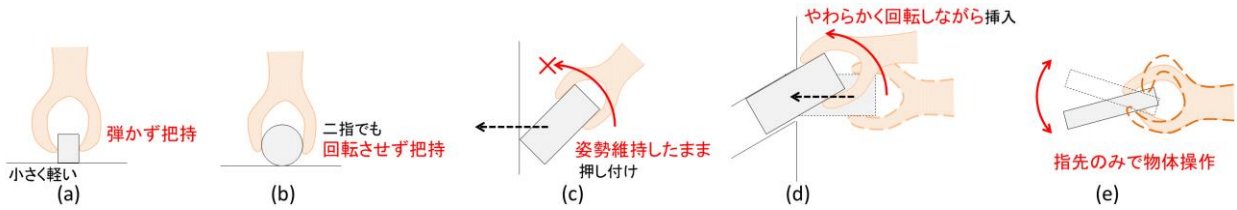


図 1: 実世界での精密作業に必要な動作や機能. (a)小さく軽い物体を弾かず把持. (b)球体などを二指で回転させずに把持. (c)姿勢を維持したまま押し付け. (d)把持物体を柔らかく回転させながら挿入. (e)指先のみでの物体操作.

さらに、ヒトの指腹は皮膚などの軟部組織を有するため、物体把持時には指腹が変形して接触面積が増加することで、把持の安定化に寄与している。この実現も望まれる。

そこで本研究では、非接地型力覚提示装置を用いた指先での VR 精密作業の実現のための VR 手・指モデルを検討したので報告する。

2. 実空間での指先を用いた精密作業

現実環境において、ヒトは手指の精密な動作や物理特性を制御することによって、物体の精密な操作をおこなっている。

図 1(a)のように小さく軽い物体を把持しようとしたときに、指先が剛体だと物体を弾き飛ばす可能性がある。しかし、実際のヒトの指腹は皮膚などの軟部組織に起因する非線形な弾性特性を有しており、接触時の剛性は低い。そのため、軽い物体でも弾き飛ばすことなく把持することが可能である。

加えて、図 1(b)のように、二指で球体の把持を試みた際、指先が変形しないと、指ごとの接触点が 1 点の計 2 点で物体を支えることになり、その 2 点を軸に物体が回転する可能性がある。しかし実際のヒトの指腹では、軟部組織が圧迫により変形可能であり、接触時には接触位置周辺の局所形状に沿って指腹が変形し、面で接触する。そのため、球体でも回転させずに把持することが可能である。

これらによって、どのような物体でも安定して把持が可能である。

また図 1(c)のように、把持物体を壁に押し付ける場合に、手首の関節剛性が低いと、操作力と壁からの反力で把持物体に発生したトルクにより、手首が曲がることで、把持物体の姿勢が変化する。しかしヒトの手首は、筋収縮により手首の剛性を高くすることで、曲がりにくくすることが可能である。そのため、把持物体にトルクが加わっても、そ

の姿勢を維持したまま押し付けを行うことが可能である。

他方、図 1(d)のような、把持物体を傾いた穴に挿入する場面で、手首の関節剛性が高いと、穴側面からの反力によりトルクが発生しても、把持物体の姿勢が変化しにくいいため、ユーザが意識して手首の角度を穴に合わせる必要がある。しかし実際のヒトの手首では、筋肉の弛緩によりその関節剛性を低くし、押し付けた面に沿うように手首と把持物体が回転する。そのため、穴の角度に合うように、把持物体を回転させながら挿入することができる。

さらに、図 1(e)のように手を動かさず指先のみで物体を操作する場合、各指先が独立に運動できれば指先は自由に動くことが可能である。実際の手では、手と複数の指先が骨格により繋がりがながらも、複数の関節によって指先が自由に運動可能である。そのため、手を動かさずに指先のみで物体を操作することが可能である。

これらの物理特性や動作制御によって、ヒトは意図に沿った指先での物体の精密操作を行っている。以上より、VR 環境において指先での精密作業を実現するためには、同様の特性を VR 環境においても実現することが求められる。

3. VR 環境に求められる機能

前章で整理したヒトの特性や機能を、VR 環境で実現するために必要な機能を整理する。まず、実指先の柔らかな接触を VR 環境で実現するためには、図 2(a)のように、VR 指先の剛性を、ヒトの指腹の剛性と同様に、接触時は低く、強く握ると高くなる必要がある。また、二指で把持した際に物体が回転しないためには、図 2(b)のように、VR 指先が把持物体と多点接触するように設定する。これにはヒトの指腹と同様に接触位置の局所形状に沿って変形する必要がある。

物体の姿勢を維持したまま押し付けを行うためには、図 2(c)のように、VR 手の回転運動のみを高剛性にする必要

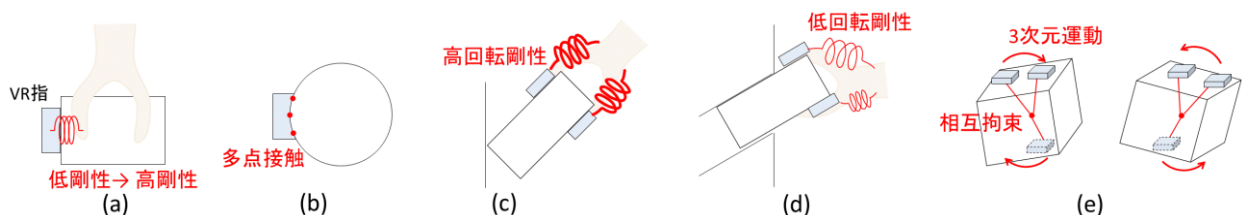


図 2: VR 手・指に求められる機能. (a)VR 指の剛性が接触時は低いこと. (b)VR 指と物体が多点接触すること. (c)手の回転剛性のみを高くできること. (d)手の回転剛性のみを低くできること. (e)VR 指先が相互拘束しながら 3 次元運動できること.

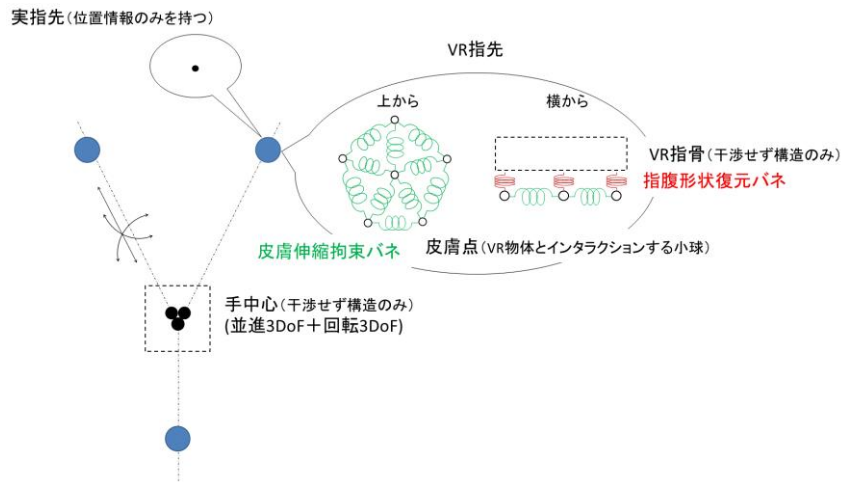


図 3: 提案する手モデル. 手の並進と回転の 6 自由度と, 各指先が 3 自由度を持つ. VR 手と実手の両者に適用. ただし指先は VR 指先のみ構造を持つ.

がある. 一方で, 物体を回転させながら穴に挿入するためには図 2(d)のように, 低剛性にできる必要もある.

手を動かさず指先のみで物体を操作するためには, 図 2(e)のように, 現実の手同様に, VR 指先を相互に拘束しながら 3 次元運動を可能にする必要がある.

4. 提案する VR 手・指モデル

前章で述べた 5 つの機能を実現するための, VR 手・指モデルを考える.

まず, 手の回転剛性のみを自由に制御するためには, 必然的に, 手や指の運動が自由度ごとに分離可能であることが前提になる. ここで, 剛性を VC によって実現することを前提とすると, それぞれの運動自由度, すなわち実手と VR 手の位置差や姿勢差を分離して算出する必要が生じる. つまり, 実手と VR 手の自由度が完全に一致している必要がある. また, 指先同士が相互に拘束しながら手に対して 3 次元運動するためには, 指先がリンクを介して接続されている必要がある. すなわち,

- 1) 指先同士がリンクによって相互接続された VR 手と, VR 手と同一構造を持つ実手モデルを定義する必要がある.

また, 手の関節剛性を随的に自由に制御するためには,

- 2) 運動自由度ごとに異なる VC 係数が適用可能であることと, 随意的に手の回転剛性のみを制御する仕組みが求められる.

さらに, 物体と柔らかく接触し, かつ, 2 指でも安定に把持するためには,

- 3) 接触時は低剛性で, 強く把持すると高剛性になる非線形剛性を有し, 物体との多点接触が可能な変形する VR 指先が必要になる.

4.1 指先が相互拘束しつつ 3 自由度運動する手モデル

手中心に拘束された指先の 3 自由度運動を実現するために, 図 3 のように, スライダージェイントとボールジョイントを組み合わせた Y 字型の手モデルを提案する. ただ

し, 手中心は拘束のための構造のみで, VR 物体とは干渉しないものとする. 2 つのジョイントの組み合わせにより, 指先プロキシの自由な姿勢回転の抑制と 3 次元運動の両立が実現される. また, 3 つの自由度に対して VC を設定することで, ユーザの動作への追従が可能になる.

さらに, この VR 手と同一の実手モデルを定義し, 両者を VC によって接続することで, 位置差や姿勢差を誤差なく算出することが可能になる.

4.2 運動成分の分離と剛性の動的制御

図 4 に示すように, VR 手と実手モデルから算出された手の位置差と姿勢差および指先の位置差に対して別々の VC 係数を設定することで, 運動自由度ごとに異なる剛性の設定を可能にする. 特に, 手の回転剛性の制御が干渉を伴う物体操作に重要であることから, 手の回転に対する VC 係数を随意的に制御する機構を実装する.

4.3 変形接触する VR 指腹モデル

変形する VR 指先は, 図 3 の吹き出し中に示すように, 6 つの小球 (皮膚点) で指腹表面を表現し, さらに, 隣接する皮膚点同士を強いバネ (皮膚伸縮拘束バネ) で結ぶことで, 指腹の伸縮しにくさを実現する. この伸縮拘束バネによって, 皮膚点が指腹としての形状をある程度維持しつつ変形するため, 図 2(b) のような多点接触が可能になる. また, VR 指先の位置の基準となる VR 指における指骨 (VR 指骨) を定義し, 伸縮に応じて強くなる非線形なバネ (指腹形状復元バネ) で皮膚点と接続する. これにより, 図 2(a) のように物体との接触時は柔らかく, 強く把持すると固くなる特性が実現される. さらに, VR 指骨を VC を介して VR 指先と接続することで, VR 指先はユーザの動作に追従して VR 物体と接触する. ただし, VR 指骨は物体とは干渉しないものとする.

5. まとめ

VR 環境内で精密作業を実現するための VR 手・指モデルを提案した. 現実環境の精密作業を考えたときに, 必要

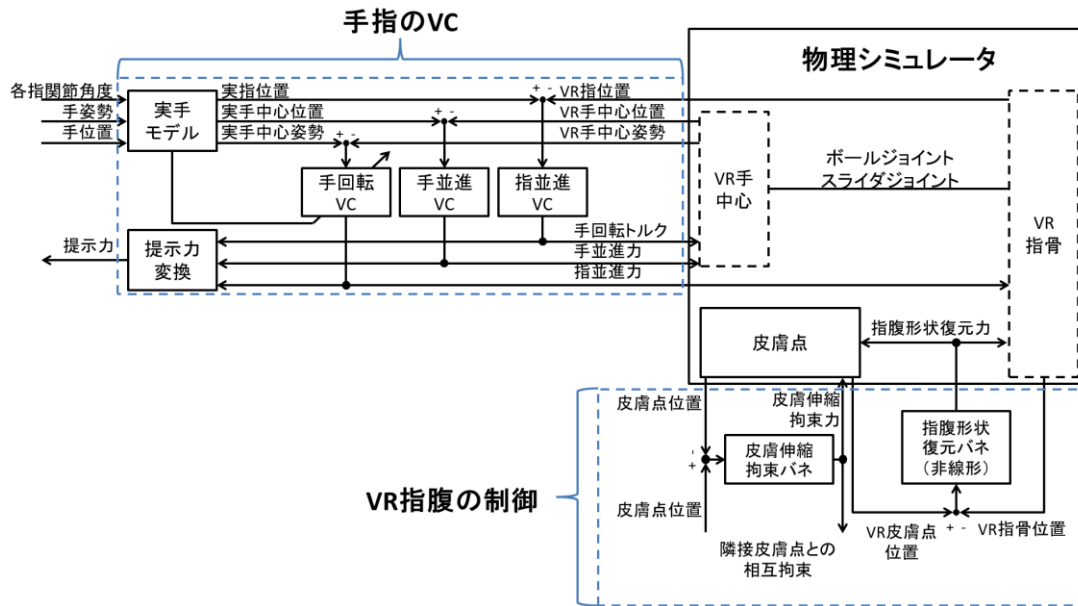


図 4: 提案する VR システム. 手の並進と回転の 6 自由度と, 各指先が 3 自由度を持つ. VR 手と実手の両者に適用. ただし指先は VR 指先のみ構造を持つ.

となる動作や機能について, VR 手に要求される機能をまとめた. その実現のために, VR 手と同一の実手モデルを定義し, VR 手は各指を相互に拘束した. さらに運動ごとに剛性を設定し, 特に回転についてはユーザが随意的に剛性を設定可能とし, VR 指先では複数の剛体とバネで一つの VR 指先を形成した. 今後は提案した VR 手・指モデルについて, その効果や実際の改善点について検証していく必要がある.

謝辞 本研究の一部は日本学術振興会科学研究費補助金によるものである. ここに記して感謝する.

参考文献

- [1] P. Xia: Haptics for Product Design and Manufacturing Simulation; IEEE Transactions on Haptics, Vol.9, No.3, (2016)
- [2] M. Sagardia and T. Hulin: Multimodal Evaluation of the Differences between Real and Virtual Assemblies; IEEE Transactions on Haptics, (2017)
- [3] K. Salisbulu, D. Brock, T. Massie, N. Swarup and C. Zilles: Haptic Rendering: Programming Touch Interaction with Virtual Objects; I3D '95 Proceedings of the 1995 symposium on Interactive 3D graphics, pp.123-130, (1995)
- [4] R. S. Avila and L. M. Sobierajski: A haptic interaction for volume visualization; Proc. Visualization 1996, pp.197-204, (1996)
- [5] 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)
- [6] 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)
- [7] 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)
- [8] Y. Adachi, T. Kumano, K. Ogino: Intermediate Representation for Stiff Virtual Objects; Proc. IEEE Virtual Reality Annual Intl. Symposium, Research Triangle Park, N. Carolina, pp.203-210, (1995)