



3 自由度の力提示が可能で無制限の可動域を実現する ポータブルな自走式触覚フィードバック装置

Portable self-propelled haptic feedback device with underactuated and no-limited workspace

深沢彩花¹⁾、長谷川晶一¹⁾、谷口莉帆¹⁾、佐藤巧¹⁾

1) 東京工業大学 工学院情報通信系 (〒 226-8501 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259、korokoro@haselab.net)

概要: VR で利用される力触覚装置において外力提示をする場合、装置の一部を固定する設置型であることが多く可動域が制限される。可動域を拡大するために自走する移動ロボットと設置型装置を統合する手法が提案されているが、アドミタンス型のため大型で危険が伴う。また、力覚提示装置の位置計測は装置にセンサをつけて行うことが多いため、HMD の視点から見た位置と実際の装置の位置の位置合わせが必要となる。そこで本研究では、可動域の制限なく、軽量で安全に外力を提示することが可能で、かつ普及型 HMD VR に適応しやすい力覚提示装置を提案する。

キーワード: 外力提示、インピーダンス型、可動域、HMDVR

1. はじめに

仮想世界 (VR) において力触覚装置はバーチャル物体への侵入を防ぎ、操作性や現実感を高める。現在の力触覚装置では外力を提示する場合、装置を固定して利用することが多く可動域を制限される。一方で可動域を拡大するためには、大型で重い装置を利用するか装着型の装置にして内力だけの提示に限定する必要がある。また、力覚提示装置の位置計測は装置にセンサをつけて行うことが多いため、HMD の視点から見た位置と実際の装置の位置合わせが必要となり、開発の手間が増える。

そこで本研究では、可動域の制限なく、軽量で安全に外力を提示することが可能で、かつ普及型 HMD VR に適応しやすい力覚提示装置を提案する。

提案装置は HMD VR 環境を利用するユーザーの移動を妨げることなく外力を力覚提示することができるので、バーチャル物体への侵入を防いだり、操作性を高めたりするのに役立つ接触力を提示することができ、バーチャル物体とのインタラクションに汎用的に利用できる。例えば、壁や物などの表現や、物を押したり引いたり持ち上げたりする動作 (物体の運搬など) に対する力覚を提示できる。また、可動域制限がないため、迷路の探索のような HMD をかぶった状態で移動する用途に適している。

2. 関連研究

力覚装置は大きく二つに分類され、装着型と接地型に分けられる。装着型装置は、装置を装着した体の一部分に力を伝達し、体の形を制限して力覚を提示できる。例えば、手の外骨格に沿う装置を装着して把持操作の力覚提示を実現している [1]。装着型の問題点は、装着部位と提示部位の間の内力を提示することしかできず、提示部位の運動を相対的にしか拘束することができない。そのため、例えば歩行

により体全体を移動する運動を拘束するような体全体に対する外力を提示することができない。

一方、接地型装置は、装置を介して地面に力を伝達する。そのため、ユーザーの身体に外力を加えることができるが、装置のどこかを固定する設置型が多く、装着型のような非接地型にはない可動域の制限が生じる [2]。そのため、可動域の拡張手法が研究されている。

2.1 力覚装置の可動域

可動域を拡張する方法として可動域と同じ大きさの力覚装置を用意する手法 [3] や装置のリーチや関節数を追加する手法 [4] が提案されている。しかしいずれも装置が巨大になり、利用できるユーザーが限られる。また、装置自体が固定されているため、無制限な可動域は実現されない。

無限の可動域を提供する方法として、設置型装置を移動ロボットに乗せ、任意の場所に移動できる力覚提示装置「mobile haptic interface (MHI)」が提案されている [5]。しかしこの手法では、装置がアドミタンス型となり装置が大型で危険が伴う。

これに対し提案する接地型装置では、移動ベースとして簡易な 2 輪のタイヤを採用し、持ち手と合わせて 3 つのモーターを電流制御することでインピーダンス型による軽量で安全な装置を実現した。

2.2 力覚提示装置の位置計測

力覚提示装置の位置計測は装置自体の計測によって行われることが多く、モーターの回転をエンコーダでカウントして手の位置を追跡している [2]。しかしこの手法では、位置計測の仕組みを開発し、HMD の視点から見た位置と実際の装置の位置合わせをする必要がある。近年は HMD と併用できるコントローラを持つ製品が発売されているため、普及型 HMD VR のトラッキング機能と力覚提示装置を統合し、より簡単に位置計測を行っている装置が提案されて

いる [6]。

3. システム概要

本研究の目的は、可動域の制限なく、軽量の設計で安全に外力の提示ができ、かつ普及型 HMD VR に適応しやすい力覚装置を実現することである。この目的を実現するための要求は以下の通りである。

- 可動域を制限せず、十分な硬さを持つバーチャル物体を外力提示できる
- 軽量で安全な設計であるインピーダンス型
- VR コントローラを力覚提示装置に統合することで、アプリを開発しやすくする
- 持ち手が軽く通常の VR コントローラの操作が可能

以上の要求を満たす機構の設計とシステムの制御を行った。

3.1 装置の設計

提案装置では接地部分に走行部を利用することで、可動域を制限せず継続した外力が提示できる。ただし、軽量で安全なインピーダンス型の設計にすることがあり、提示力は 3 自由度に限定した。また、装置を軽量化するためにコントローラから走行部の接続は細く軽いパイプを採用した。一方で軽量化により使用中持ち上がってタイヤが浮いてしまうと外力が提示できなくなるため、モーターは走行部にまとめて重心を下げ、持ち手部分は軽く感じられる設計とした。可動域は前後左右方向については制限がなく、上下方向についてはパイプの長さに制限される。

提示力について、パイプの向きの力はタイヤの同方向の駆動、左右の力は逆方向の駆動によって提示する。上下方向の力は機構を簡単にするために持ち手のトルクで代用する。このトルクには PhanToM[2] の減速機構を参考にしたワイヤによる減速付き直動変換機構を利用した。

持ち手の位置計測には VR コントローラを利用する。この場合、Unity の更新周期で位置計測されるため更新周期が遅くなってしまうが、硬いバーチャル物体を表現するためには高い更新周期で計算することが望まれる。そこで本システムでは、VR コントローラの位置計測と物理・力覚に対してマルチレートにすることで制御ループを高速化させた。しかし、更新周期の差が生じることでコントローラの位置入力が入るまで物理シミュレーション上で手の位置が変化しない状態となってしまう。そこで VR コントローラのトラッキングよりも高い更新周期で計測できるモーターのエンコーダを利用して補完した。

3.2 機構の静力学

本節では提案装置の手に加わる力とモータの駆動力の関係を示す。静力学的な力のつり合いを図 2 に示す。まず、表 1 に数式に使用する記号の表記を示す。

水平方向の提示力について、前後方向の力 F_z は

$$F_z = f_1 + f_2 \quad (1)$$

表 1: 記号の表記

記号	意味
f_1, f_2	タイヤにかかる摩擦力
T	奥のパイプを介して持ち手部分に加わるトルク
F	手にかかる力
F_y'	手の後ろ側にかかる力
l_1	接地面から持ち手のジョイントまでの長さ
l_2	持ち手のジョイントから手先までの長さ
l_h	持ち手を握る手の長さ
l_3	タイヤ間の長さ
θ	パイプの水平方向に対する角度

y 軸回りのトルクの釣り合いを、図 2 の反時計回りを正として、式 (2) に示す。

$$(f_1 - f_2) \frac{l_3}{2} - F_x(l_1 \cos \theta + l_2) = 0 \quad (2)$$

よって左右方向の力 F_x は

$$F_x = \frac{(f_1 - f_2)l_3}{2(l_1 \cos \theta + l_2)} \quad (3)$$

また、垂直方向において、トルク T によって持ち手に F_y と F_y' が提示される。このとき、垂直方向の力を感じる点を F_y とする。垂直方向の力のつり合いを式 (4)、x 軸回りのトルクのつり合い図 2 の反時計回りを正として、式 (5) に示す。

$$F_y = f_y + F_y' \quad (4)$$

$$-F_y l_2 - F_y' (l_h + l_2) + T = 0 \quad (5)$$

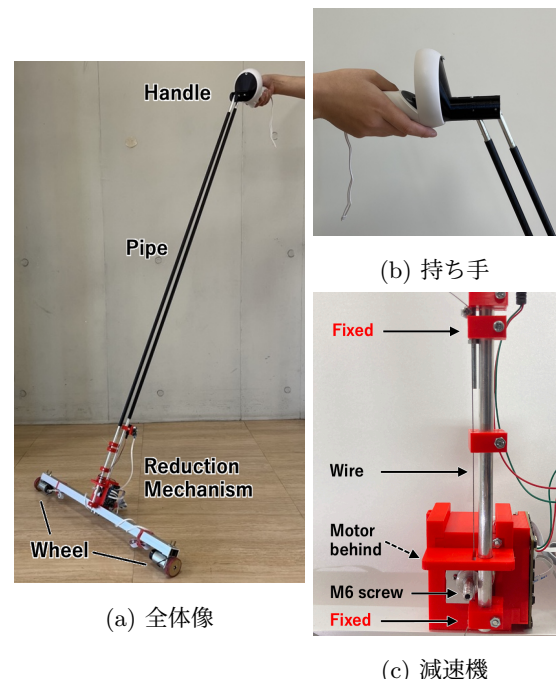


図 1: 提案装置の機構

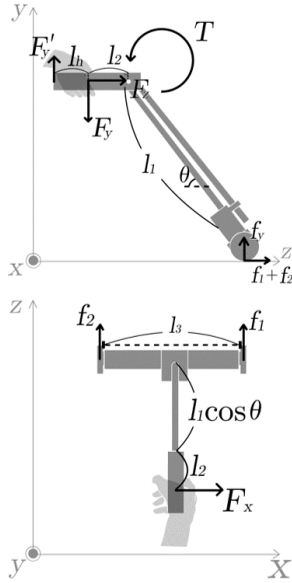


図 2: 提案装置の静学的解析

以上より、 F_y は

$$F_y = \frac{l_h + l_2}{l_h} f_y + \frac{T}{l_h} \quad (6)$$

F_y' は手を水平に保つために発生する力であり、提示力には含めていない。 F_y' の点にも力が加わるが、 F_y と F_y' によるモーメントは F_y の方が手よりも前方に加わった場合に生じるモーメントと近い。このため、力覚ポインタを手より前方に配置することで F_y' が存在しても自然に生じるトルクの一部と感じさせられていると考えている。

4. 評価

Unity の更新周期での物体の形状提示実験の評価 [7] に加え Z 幅を測定し、それぞれマルチレートと比較する。

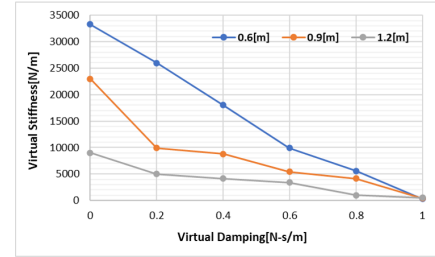
4.1 Z 幅測定

Z 幅 [8] とは力覚提示装置の性能の尺度で、装置が発振しない範囲のバーチャルカップリングのばね係数とダンパの範囲を測定することで、バーチャル物体の表現できる硬さの範囲が確認できる。従って本実験では提案装置が提示できる力の方向 (パイプ方向、左右方向、上下方向) に対して Z 幅を測定し、表現できるバーチャル物体の硬さの限界を確認した。また、持ち手の高さによって提示力の範囲が変わるため、0.6[m], 0.9[m], 1.2[m] の 3 つの高さに対して行い、それぞれ Unity の更新周期とマルチレートにおいて測定した。

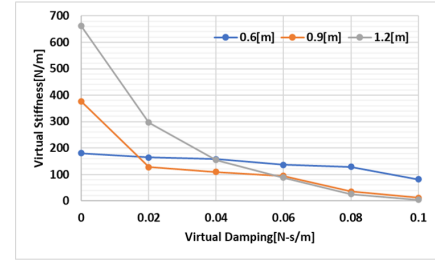
Z 幅の測定結果をを図 3、図 4 に示す。提示可能な 3 方向においてマルチレートだとパイプ方向 (図 3a) は左右方向 (図 3b) の 100 倍の硬さを表現できている。従って、接触する方向によって提示可能なバーチャル物体の硬さが大きく異なる装置だといえる。また、Unity の更新周期とマルチレートを比較すると、マルチレートの方がばね係数の範囲が大きく、より硬いバーチャル物体を表現できた。

4.2 物体の形状提示

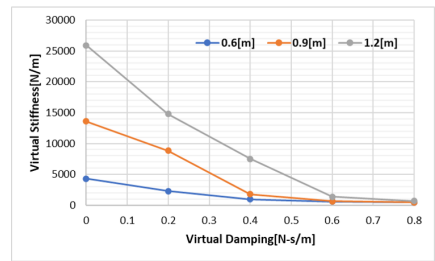
様々な方向の力提示に対応できるのか調べるためバーチャル物体をなぞったときの手の軌道を測定し、その時の侵入



(a) パイプ方向



(b) 左右方向



(c) 上下方向

図 3: 3 方向に対するマルチレートでの Z 幅

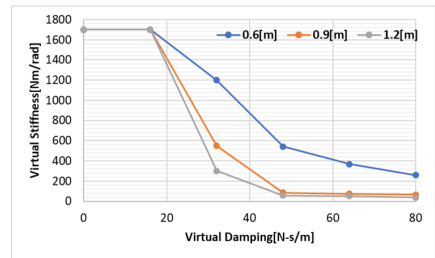
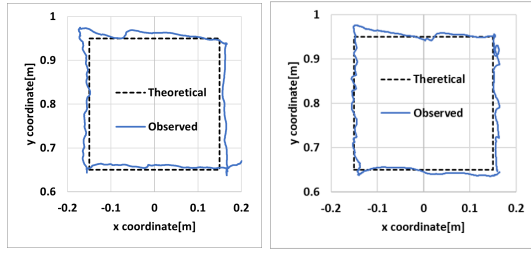


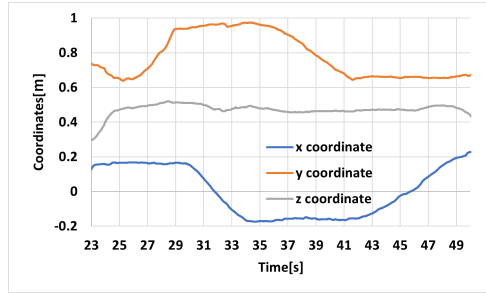
図 4: Unity の更新周期でのパイプ方向の Z 幅

量からバーチャル物体の硬さが十分に示せるのか評価した。壁をなぞったときの手の軌跡を図 5、そのときの手の座標の時系列データを図 6 に示す。

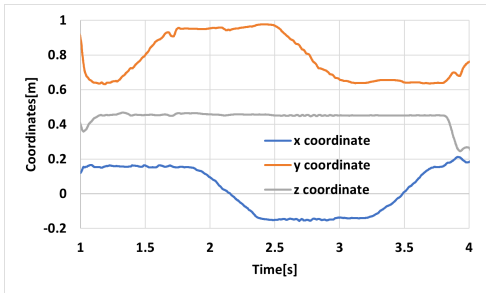
図 6 のように衝突方向 (z 方向) の座標変化が小さいため (図 5)、物体の形状提示ができていると考える。また、マルチレートと Unity の更新周期を比較するとマルチレートの方がより侵入量を抑えられていることが確認できる。一方でマルチレートでは上下方向に動かす際に振動している。これは上下方向に持ち手を動かすと走行部が移動し、その動きがタイヤのエンコーダによりカウントされ水平方向の移動と解釈されてしまうことで壁への侵入量の変化が生じるためだと考えられる。これは持ち手に加速度センサを入れて補完することで解決できると考える。



(a) Unity の更新周期 (b) マルチレート
図 5: 正面の壁をなぞったときの手の軌跡



(a) Unity の更新周期



(b) マルチレート

図 6: 壁をなぞった時の手の位置の時系列データ

5. 制限

提案機構の持ち手はピッチ軸周りにしか回転しないため、ユーザーが持ち手の向きを自由に回転させることができない。そのため VR 環境での自由な操作を実現するためには、ヨー軸とロール軸周りの回転軸を追加する必要がある。提案機構では、ヨー軸周りの走行部の向きが受動的に決定されるため、持ち手の移動に応じて機構とユーザーの位置関係を維持することが困難である。この問題を解決するためには、パイプと駆動部の向きを独立に制御するために駆動部の中心にヨー軸周りの従動回転を設ける必要がある。また非ホロノミック制御が必要となる。

6. 結論

本研究では、可動域の制限がなく、軽量な設計で安全に外力を提示することが可能で、かつ普及型 HMD VR に適応しやすい力覚装置を提案した。この装置の性能評価を行った結果、接触する方向によって Z 幅が大きく異なること、3 自由度の力提示によりバーチャル物体への侵入量が減らせることがわかった。また、VR コントローラによる位置計測を利用したため、Unity の更新周期よりも制御ループを速くするためにマルチレートを適用した。その結果、マルチ

レートは Unity の更新周期よりも硬いバーチャル物体を表現可能だった。一方で走行部のエンコーダによる位置計測の補完だと上下方向に動かすと位置の誤差が生じて振動する問題があり、これを解決するために持ち手の加速度センサで補完することが望まれる。

参考文献

- [1] Inrak Choi, Elliot W Hawkes, David L Christensen, Christopher J Ploch, and Sean Follmer. Wolverine: A wearable haptic interface for grasping in virtual reality. In *2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 986–993. IEEE, 2016.
- [2] Thomas H Massie, J Kenneth Salisbury, et al. The phantom haptic interface: A device for probing virtual objects. In *Proceedings of the ASME winter annual meeting, symposium on haptic interfaces for virtual environment and teleoperator systems*, Vol. 55, pp. 295–300. Chicago, IL, 1994.
- [3] J Perret and L Dominjon. The inca 6d: a commercial stringed haptic system suitable for industrial applications. In *Joint Virtual Reality Conference, Springer Tracts in Advanced Robotics*, 2009.
- [4] Florian Gosselin, Claude Andriot, Florian Bergez, and Xavier Merhiot. Widening 6-dof haptic devices workspace with an additional degree of freedom. In *Second Joint EuroHaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems (WHC'07)*, pp. 452–457. IEEE, 2007.
- [5] Norbert Nitzsche, Uwe D Hanebeck, and Günther Schmidt. Mobile haptic interaction with extended real or virtual environments. In *Proceedings 10th IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication. ROMAN 2001 (Cat. No. 01TH8591)*, pp. 313–318. IEEE, 2001.
- [6] Inrak Choi, Eyal Ofek, Hrvoje Benko, Mike Sinclair, and Christian Holz. Claw: A multifunctional hand-held haptic controller for grasping, touching, and triggering in virtual reality. In *Proceedings of the 2018 CHI conference on human factors in computing systems*, pp. 1–13, 2018.
- [7] Ayaka Fukasawa, Riho Taniguchi, Takumi Sato, and Shoichi Hasegawa. Portable self-propelled force feedback device. In *2023 IEEE World Haptics Conference (WHC)*, pp. 382–388, 2023.
- [8] J Edward Colgate and J Michael Brown. Factors affecting the z-width of a haptic display. In *Proceedings of the 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3205–3210. IEEE, 1994.