



提示力に制約のあるポータブルな自走式触覚デバイス

Underactuated Portable Self-propelled Force Feedback Device

深沢彩花¹⁾, 谷口莉帆¹⁾, 佐藤巧¹⁾, 長谷川晶一¹⁾

Ayaka Fukasawa, Riho Taniguchi, Takumi Sato and Shoichi Hasegawa

1) 東京工業大学 工学院情報通信系 (〒 226-8503 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259 R2 棟 624 室 R2-20, korokoro@haselab.net)

概要: 力触覚インターフェースの目的は, 仮想環境に力覚フィードバックを提示することで, ユーザの身体がバーチャル物体に侵入することを防いだり, バーチャル物体を操作しやすくしたりすることである. しかしこのようなデバイスのワークスペースは, デバイス自体が固定されているためにデバイスの可動域に制限される. そこで本研究では, 力覚提示が可能な接地型でありながらワークスペースに制限がなく, 軽量でポータブルなデバイスを提案する. また, 提案デバイスの性能を評価するため, 仮想物体の形状に接触した際の手の軌跡と提示力を計測する.

キーワード: 触覚フィードバック, 接地型, ポータブル, VR

1. はじめに

仮想世界 (VR) において, 力触覚デバイスはバーチャル物体への侵入を防ぎ, バーチャル物体の操作性や現実感を高める. 現在の力覚フィードバックデバイスは外力を提示する場合, デバイス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, 大型で重いデバイスを利用するか, 装着型のデバイスにして内力だけの提示に限定する必要がある. そこで本研究では, インピーダンス型の自走式で可動域制限がなく, 継続的な外力提示するデバイスを提案する. 提案デバイスは, 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提示できる. このため, ワークスペースを制限することなくバーチャル物体との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する動作 (ドアの開閉, 物体の運搬など) や物体を持ち上げる動作に対する力覚を提示できる. また, 可動域が制限されないため, 迷路の探索や犬の散歩のような HMD をかぶった状態で利用者が実際に移動するアプリケーションにも利用できる.

2. 先行研究

力覚デバイスは皮膚感覚と運動感覚を提供する. 本研究では後者に焦点を当てる.

力覚デバイスは大きく二つに分類され, 装着型と接地型に分けられる.

装着型デバイスは, デバイス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, 手の外骨格に沿うデバイスを装着して把持操作の触覚フィードバックを実現している [1] [2]. 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, 接地型デバイスは, デバイスを介して地面に力を伝達するため, ユーザーの身体に外力を加えることができる. このデバイスは装置の一部を固定する設置型であることが多く, 可動域の制限が生じる. 例えば, PHANToM [4] や SPIDAR [7] は, 小型で高い精度の力フィードバックを実現し, 細かい動作も可能にしている. しかし, ワークスペースは制限される.

そのためワークスペースを拡張するためにいくつか既存のアプローチがされている. 1つはワークスペースと同じ大きさの触覚デバイスを用意することである [6]. しかし, 作業領域と同じ大きさのデバイスは巨大であり, 利用できるユーザーが限られる. 他にも, デバイスのリーチや関節数を追加する提案がされている. Gosselin らは, 6 自由度を持つ設置型デバイス Haption Virtuouse 6D を天井からつるし, 梁上をスライドすることで接地型デバイスを移動させている [3]. しかし装置自体が固定されているため, 無制限なワークスペースは実現されていない.

無限の可動域を提供する方法の 1 つは, 設置型デバイスを移動ロボットと統合する手法である. Nitzsche ら全方向移動ベースと Sensable Phantom Premium 1.0 デバイスを結合し, 任意の場所に移動できる力触覚インターフェイス「mobile haptic interface (MHI)」の実現可能性を示した [5]. しかし, この手法では, 設置型デバイスを移動ロボットに搭載して移動させるためいずれもデバイスが大型で危険が伴う.

これに対し, 提案する接地型デバイスでは, 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

つのモータを電流制御することでインピーダンス制御による軽量のデバイスを実現した。また、移動ベースによって走行するため、ワークスペースを制限せず継続した外力を提示できる。

3. システム概要

提案デバイス (図 1) は、インピーダンス型の自走式で可動域制限がないデバイスによって外力提示することを目的とする。

3つのバックドライバブルなモーターによって持ち手部分に3自由度の力を提示できる。

パイプの向きの力と左右の力が走行部で提示される。前後方向の力はタイヤの同方向の駆動、左右方向の力は逆方向の駆動によって提示する。また、yz 面内 (図 2) でのパイプに対して垂直な力は、機構を簡単にするためにトルクで提示する。このトルクには PhanToM [4] 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ている。

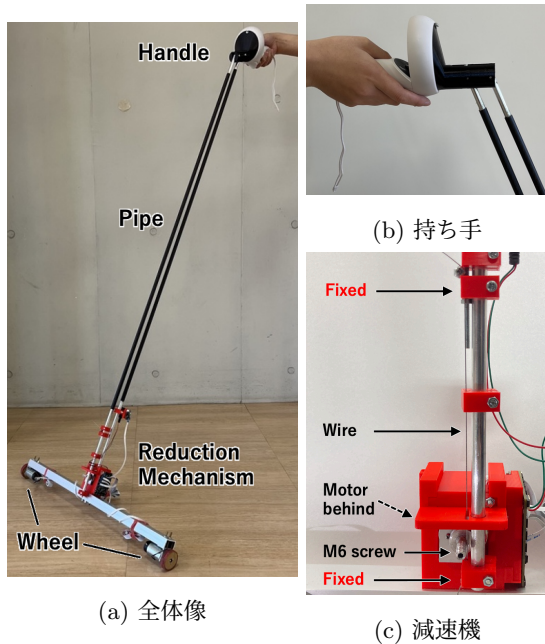


図 1. 提案デバイス

3.1 機構の静力学

本節では本デバイス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。

- タイヤにかかる摩擦力: f_1, f_2
- 奥のパイプを介して持ち手部分に加わるトルク: T
- 手にかかる力: F
- 手の後ろ側にかかる力: F_y'
- 設置面から持ち手のジョイントまでの長さ: l_1
- 持ち手のつなぎ目から手先までの長さ: l_2
- 持ち手を握る手の長さ: l_h
- タイヤ間の長さ: l_3

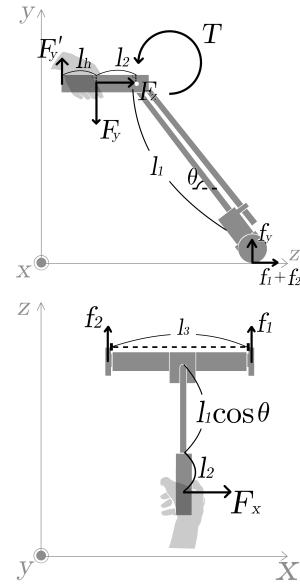


図 2. 提案デバイスの静力学的解析

- 持ち手の水平方向に対する角度: θ

角度は図の時計回りを正とする。水平方向の提示力について、前後方向の力 F_z は

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

y 軸回りのトルクの釣り合いを、図 2 の時計回りを正として、式 (4) 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。

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

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

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、提示力には含めずに考えている。 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、力覚ポイント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. 実験

様々な方向の力提示に対応できるのか調べるために、衝突に対する反力と物体の形状提示を評価した。衝突の反力について、方向の異なる3つの壁、机に衝突したときの反力を測定した。物体の形状提示について、壁と机にある0.3[m]四方の外枠と球（直径0.5[m]）の黒い線をなぞり、その時の手の軌道を測定した。

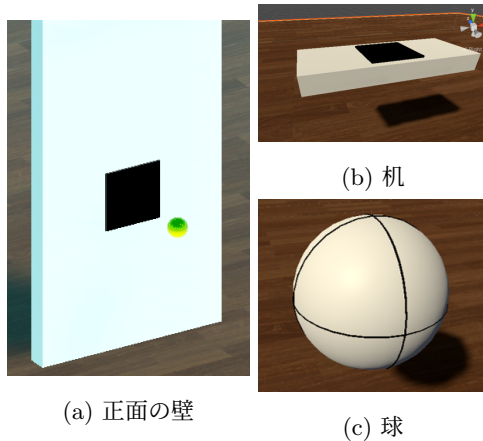


図3. 実験で使った仮想物体

5. 結果

まず、壁や机に衝突したときの衝突の反力と、仮想物体と手との距離の時系列データを図4に示す。

次に、平面をなぞったときの代表として、壁をなぞったときのyz平面の手の軌跡と手の座標の時系列データを図5に示す。

最後に、曲面をなぞった時の代表として、球の上側を前から後ろへなぞった時と、球の下側を後ろから前へなぞった時の手の軌跡を図6に示す。

5.1 考察

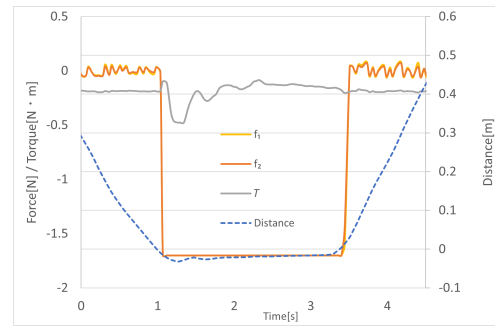
物体との衝突について、図4より衝突方向の座標に変化がなく、衝突の反力が提示できたことがわかる。ただし、左右方向は前後方向より侵入量が多いため、提示できる力が小さかったと考えられる。

次に、物体の形状提示について述べる。

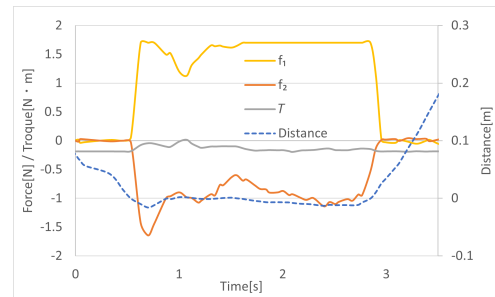
壁をなぞったとき、衝突方向のz座標に変化がなく物体への侵入量が小さく一定に保っていることが図5(b)よりわかる。この状態で図5(a)のように壁をなぞることができている。

一方で球をなぞったとき、図6(a)より、面の法線が図2の座標系でy軸とz軸が正方向の向き $\{(0,y,z)|y,z>0\}$ で、球の侵入量が増えている(図6(a)のz座標が0.3~0.6[m])。

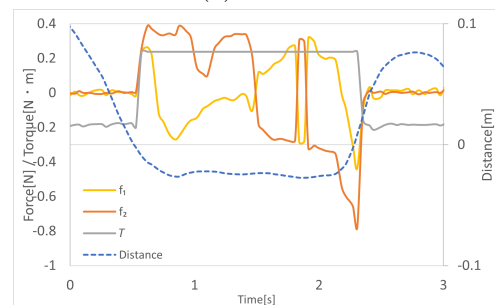
この原因は以下のように考える。走行部からはパイプの向きに力が伝わるため、yz平面でパイプと垂直な向きに力提示が必要な場合、反力の感覚が提示されにくい。加えて、持ち手のトルクは力の向きに依らない定数である。このため、侵入量が増えると考えられる。



(a) 正面の壁



(b) 右の壁



(c) 机

図4. 衝突時の手と仮想物体との距離と、モーターの提示力の時系列データ

また、上半球(図6(a))より下半球(図6(b))のほうが侵入量が多かった。これは持ち手の可動域には制限があり、下半球をなぞっていた際に持ち手の傾きがデバイスの上限に達してしまい、上下方向の力が提示できなくなっていたためだと考えられる。

6. 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。

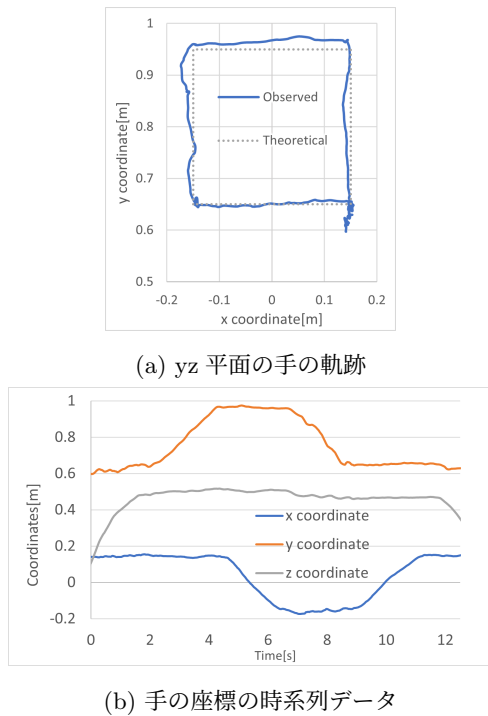


図 5. 正面の壁をなぞったときの手の軌跡と座標の時系列データ

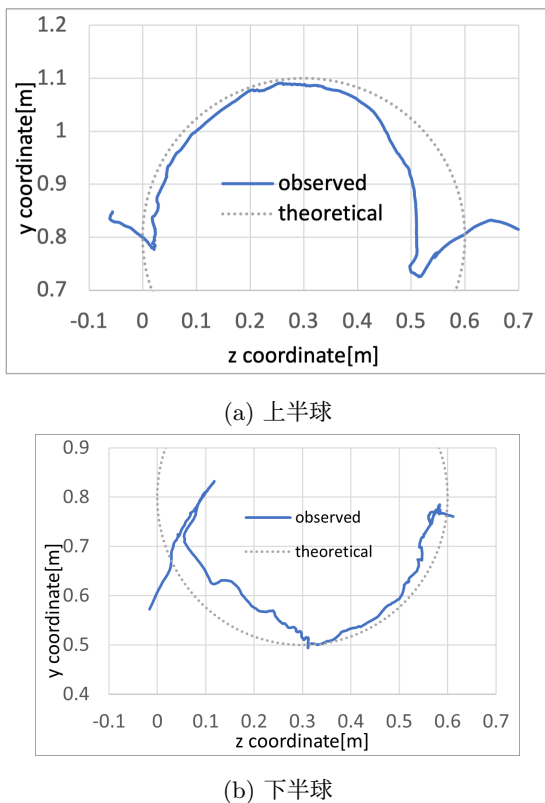


図 6. 球をなぞった時の手の軌跡

7. 結論

本論文では、可動範囲の制限なくユーザに外力を与えることができる接地型でインピーダンス型の機構を提案した。このデバイスの性能と機能性を調べるために形状提示実験を行い、その結果、仮想物体への侵入量を減少させることがわかった。また、斜めの面では、法線方向によって侵入量が増加した。

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] Marco Fontana, Salsedo Fabio, Simone Marcheschi, and Massimo Bergamasco. Haptic hand exoskeleton for precision grasp simulation. *Journal of Mechanisms and Robotics*, Vol. 5, No. 4, p. 041014, 2013.
- [3] Florian Gosselin, Claude Andriot, Florian Bergez, and Xavier Merlhiot. 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.
- [4] 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.
- [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] 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.
- [7] Makoto Sato. Spidar and virtual reality. In *Proceedings of the 5th Biannual World Automation Congress*, Vol. 13, pp. 17–23. IEEE, 2002.