

招待論文 LoopBot: ルームスケール VR における固定物の連続的な触覚提示

池田 徹志* 藤田 和之* 小川 郡平* 高嶋 和毅† 北村 喜文*

概要. ルームスケール VR では、壁や手すりなど固定物の触覚フィードバックを連続的に提示することは、ユーザの歩行範囲の広さや必要とされる力の大きさの点で困難であった。本研究では、ユーザに追従する単一のロボットを用いて、歩行中に固定物の触覚フィードバックを連続的に提示する手法 LoopBot を提案する。この手法では、ロボットに搭載した環状の触覚プロップがスクロールしてロボットの移動を相殺することで、プロップの固定感を提示する。我々は、LoopBot のコンセプトを実証するため、手すりを握りながら歩く体験のプロトタイプを実装した。予備ユーザテスト ($N = 10$) では、スクロールしない場合に比べて、体験の現実感と手すりの固定感が有意に高いことが確認された。

1 はじめに

実際の歩行によるバーチャル環境の探索が可能なルームスケール VR 体験では、バーチャルオブジェクトと整合した触覚提示により体験の没入度やリアリティを向上させることができる [1, 4]。しかしながら、環境に固定された固定物（壁や机、手すりなど）からの連続的な触覚フィードバックを提示することは、必要な力の大きさや提示範囲の広さを考慮すると実現が難しい。

この課題に対し、ユーザの動きに基づいて適応的に触覚プロップを配置する遭遇型触覚デバイスが研究されてきた。特に、自走式ロボットを用いたデバイスでは安定した反力を伴う触覚フィードバックが提示可能であり、過去の研究では壁 [2, 11] や机 [8, 10]、ドア [3] の触覚提示が再現されている。しかし、広範囲にわたる連続的な触覚フィードバックを提示するには複数のロボットを動的に配置する複雑なシステムが必要となり、配置の遅延や衝突のリスクといった問題が生じる。

この問題を解決する一つのアプローチとして、環状の触覚プロップをスクロールさせる方法が挙げられる。このアイデアに基づいて、これまでに回転機構を用いて接触面の摩擦を再現することで、連続的に広がる面の触覚提示を実現するデバイス [7, 6, 9, 5] が考案されてきた。これらの研究では指先への触覚提示しか考慮されていないが、我々はこのアイデアをルームスケール VR に適用することで広範囲にわたる固定物からの触覚提示を再現することができると考えた。

そこで我々は、ユーザに追従する単一の自走式ロボットにスクロール可能な環状触覚プロップを搭載することで固定物からの連続的な触覚提示を実現する

手法である、LoopBot を提案する。LoopBot では、ユーザの歩行に合わせて触覚提示デバイス自体を移動させるとともに、そのデバイスの移動を打ち消す方向にユーザの触れる触覚プロップをスクロールさせる。これにより、デバイス自体はユーザに追従するにもかかわらず、ユーザが接触しているプロップはその場に静止しているかのように振る舞い、固定物に触れているかのように感じさせることができる。

本研究では、LoopBot のコンセプトを実証するために、図 1 に示すような、手すりを持ちながらの歩行における触覚フィードバックを再現するプロトタイプを設計・実装した。このプロトタイプを用いた VR 歩行アプリケーションをユーザ ($N = 10$) に体験してもらい、スクロール機構を用いることで体験のリアルさや手すりの固定感を向上させられることが分かった。

2 LoopBot

2.1 コンセプト

LoopBot では、自走式ロボットを用いて触覚プロップをユーザの歩行に追従させるとともに、環状プロップをロボットの動きを打ち消すようにスクロールさせることで、ロボットはユーザに追従して動いているにもかかわらずユーザが触れるプロップは静止しているかのように振る舞うことが可能となる。

2.2 プロトタイプ

LoopBot の概念実証プロトタイプとして、ユーザが手すりを伝って歩行する体験を再現する触覚提示システムを実装した。

図 2 にプロトタイプデバイスの概観を示す。本触覚提示デバイスは、スクロール機構付きの環状プロップ、プロップを支えるアルミフレーム、およびそれらを運搬する全方位ロボット (Vstone 社, Mecanum Rover Ver. 3.0) で構成されている。アルミフレームにはプロップの位置と角度を計測するための 2 つ

Copyright is held by the author(s). This paper is nonrefereed and non-archival.

* 東北大学 電気通信研究所

† 芝浦工業大学

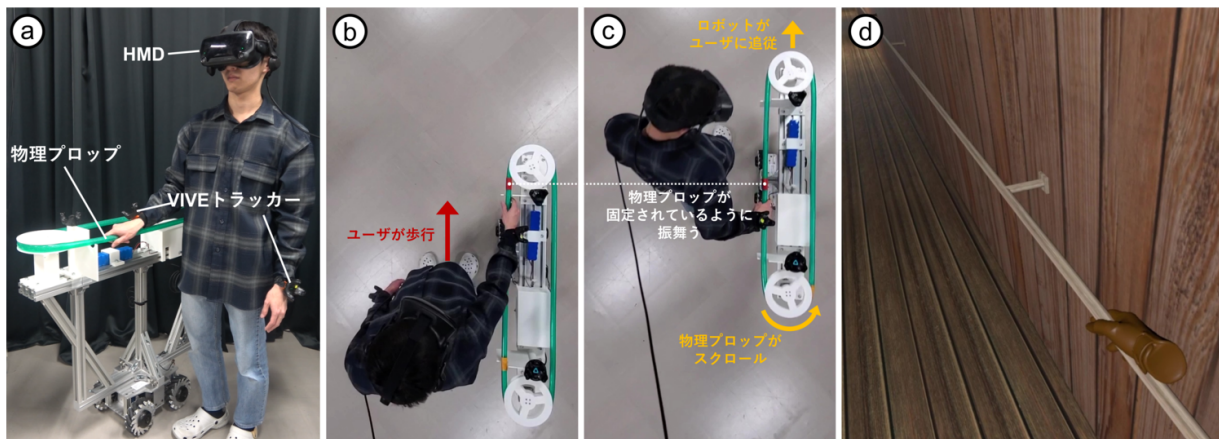


図 1. (a) プロトタイプシステムにおけるデバイスの概観. (b) ユーザーがプロップに触れながら前方に移動するとき, (c) ロボットがユーザーに追従するとともにプロップがその動きを相殺するようにスクロールすることでプロップはその場に固定されているように振る舞う. (d) これにより手すりを伝って歩行するときの触覚フィードバックを再現する.

の VIVE トラッカーを取り付けている. デバイスの端の一方には従動軸, 他方にはモータを内包している駆動軸の 2 つのプリーが搭載されており, これらによって環状プロップをスクロールする. さらに, 2 つのプリーの間には保護パネルが設置されており, ユーザーの手が回転するプリーに巻き込まれるのを防ぐ.

ソフトウェアは, 主に自走式ロボットの位置制御とそれに伴うプロップのスクロール制御の 2 つのコンポーネントからなる. 自走式ロボットの位置は, バーチャル環境内の手すり位置に整合し, かつユーザーの位置に追従するように PID 制御される. プロップのスクロールは, 駆動軸のステッピングモータを, ロボットの速度を基に算出される回転速度でロボットの移動とは逆方向にプロップが回転するよう制御する. ロボット, モータへの命令はいずれも Bluetooth 通信を用い, 10Hz の頻度で送信される. ソフトウェアの実装には Unity (Ver : 2022.3.4) を用いた.

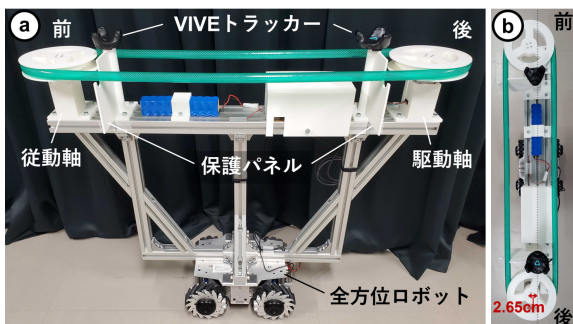


図 2. プロトタイプデバイスの (a) 概観と (b) 俯瞰図

3 ユーザテスト

LoopBot を用いた手すりの触覚提示のユーザー体験を調査するための簡易的なユーザーテストを実施した. 本テストでは, 実装したプロトタイプデバイスを用いた手すりを掴みながらの VR 歩行体験を, プロップのスクロールがある条件とない条件で 1 回ずつ体験してもらった. 各体験後, 参加者には体験のリアルさと手すりの固定感について 7 段階のリッカート尺度で評価をしてもらった.

体験のリアルさのスコアについてウィルコクソンの符号順位検定を実施したところ, スクロール有りの条件のスコアがスクロール無しの条件のスコアより有意に高かった ($p = 0.021$). 同様に, プロップの固定感についてもスクロール有りの条件のスコアがスクロール無しの条件に比べて有意に高かった ($p = 0.030$). これらの結果は, スクロール機構により再現されるオブジェクト位置の保存が, ユーザ体験の質の向上につながる可能性を示している.

4 おわりに

本研究では, 環状プロップを搭載するユーザー追従型のロボットを用いることでルームスケール VR において固定物の連続的な触覚提示を実現する手法, LoopBot を提案した. このコンセプト実証プロトタイプとして, 手すりの連続的な触覚フィードバックを提示するシステムを設計・実装した. ユーザテストにより, 本システムが手すりを伝う歩行体験のリアリティや手すりの固定感を向上させることを示した. 今後は, LoopBot を様々な VR 環境へ適用するための機構やアルゴリズムを検討する.

謝辞

本研究はJSPS 科研費 JP19KK0258 と 20K21799 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] F. Ahmed, J. D. Cohen, K. S. Binder, and C. L. Fennema. Influence of tactile feedback and presence on egocentric distance perception in virtual environments. In *2010 IEEE Virtual Reality Conference (VR)*, pp. 195–202, March 2010.
- [2] Z. He, F. Zhu, and K. Perlin. PhyShare: Sharing Physical Interaction in Virtual Reality. In *Adjunct Proceedings of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '17 Adjunct*, p. 17–19, New York, NY, USA, 2017. Association for Computing Machinery.
- [3] Y. Hoshikawa, K. Fujita, K. Takashima, M. Fjeld, and Y. Kitamura. Redirected-Doors+: Door-Opening Redirection with Dynamic Haptics in Room-Scale VR. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 30(5):2276–2286, Mar. 2024.
- [4] B. E. Insko. *Passive Haptics Significantly Enhances Virtual Environments*. PhD thesis, The University of North Carolina at Chapel Hill, 2001. AAI3007820.
- [5] J.-Y. Lo, D.-Y. Huang, C.-K. Sun, C.-E. Hou, and B.-Y. Chen. RollingStone: Using Single Slip Taxel for Enhancing Active Finger Exploration with a Virtual Reality Controller. In *Proceedings of the 31st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '18*, p. 839–851, New York, NY, USA, 2018. Association for Computing Machinery.
- [6] R. Meguro, P. Ratsamee, T. Mashita, Y. Urainishi, and H. Takemura. FrictionHaptics : Encountered-Type Haptic Device for Tangential Friction Emulation. In *2019 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality Adjunct (ISMAR-Adjunct)*, pp. 382–383, 2019.
- [7] V. Mercado, M. Marchal, and A. Lécuyer. EN-TROPiA: Towards Infinite Surface Haptic Displays in Virtual Reality Using Encountered-Type Rotating Props. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 27(3):2237–2243, 2021.
- [8] R. Suzuki, H. Hedayati, C. Zheng, J. L. Bohn, D. Szafir, E. Y.-L. Do, M. D. Gross, and D. Leithinger. RoomShift: Room-Scale Dynamic Haptics for VR with Furniture-Moving Swarm Robots. In *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '20*, p. 1–11, New York, NY, USA, 2020. Association for Computing Machinery.
- [9] E. Whitmire, H. Benko, C. Holz, E. Ofek, and M. Sinclair. Haptic Revolver: Touch, Shear, Texture, and Shape Rendering on a Reconfigurable Virtual Reality Controller. In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '18*, p. 1–12, New York, NY, USA, 2018. Association for Computing Machinery.
- [10] A. Yamaguchi, S. Yokoi, K. Matsumoto, and T. Narumi. TableMorph: Haptic Experience with Movable Tables and Redirection. In *SIGGRAPH Asia 2023 Emerging Technologies, SA '23*, p. 1–2, New York, NY, USA, 2023. Association for Computing Machinery.
- [11] Y. Yixian, K. Takashima, A. Tang, T. Tanno, K. Fujita, and Y. Kitamura. ZoomWalls: Dynamic Walls That Simulate Haptic Infrastructure for Room-Scale VR World. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '20*, p. 223–235, New York, NY, USA, 2020. Association for Computing Machinery.

未来ビジョン

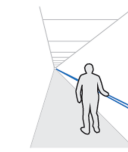
本研究では、プロトタイプとしてユーザが直線の手すりを伝って歩行する体験を再現したが、今後は様々なVR環境に対応できるようにアップデートを進めることを考えている。

例えば、経路に応じてロボットの向きを動的に変えたり、視触覚的なダイレクションを利用したりすることで、曲線路の再現ができる可能性がある。

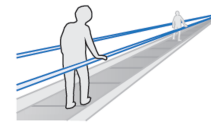
また、チューブではなくサーフェス状のプロップを用いることで、LoopBotは無数の長さを持つ壁や机などの触覚提示にも適用することが可能となる。これにより、広い面でのドロ잉を物理的に支持するシナリオなどが再現可能となるだろう。現在、ゴムチューブの代わりにベルトコンベアをプロップとして取り付けることで、壁の触覚提示が可能なデバイスの実装を進めている。

さらに、LoopBotでは、プロップのスクロー

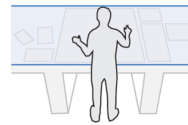
ル速度の制御則を変更することで、地面に固定されたオブジェクトだけでなく、動くオブジェクトの相対速度を表現できる。例えば、動いている歩道に乗っているときの手すりの相対速度の変化を表現するのに使えるだろう。



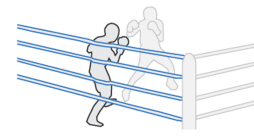
接地オブジェクトとの接触を伴った歩行



異なる速度で動くオブジェクトとのインタラクション



巨大な物理面でのインタラクション



物理空間の境界の触覚的な提示