



ワームホール：VRにおける非連続的空間の接続を用いた パッシブハプティクス

Using Disconnected Hands for Passive Haptics

伴玲吾¹⁾, 松本啓吾¹⁾, 鳴海拓志¹⁾, 葛岡英明¹⁾

1) 東京大学 (〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1, {reigo, matsumoto, narumi, kuzuoka}@cyber.t.u-tokyo.ac.jp)

概要: バーチャルリアリティにおける低コストな触覚提示手法として、バーチャル物体と同じ位置に代替となる実物体を置くパッシブハプティクスがある。パッシブハプティクスを用いるには実物体とバーチャル物体が同じ位置にある必要があるが、バーチャル物体の提示位置に常に実物体があるとは限らない。本研究では、実物体とバーチャル物体の位置が大きくずれている場合においても身体化感覚を維持できる「ワームホール」という手法を提案し、その有効性を示す。

キーワード: パッシブハプティクス, リダイレクション

1. はじめに

バーチャルリアリティ(VR)における触力覚提示は体験のプレゼンスを向上することが知られており [1], バーチャル物体に触れた感覚を提示する触力覚ディスプレイが盛んに研究されてきた。中でも、静的な実物体（現実世界の空間にある物体）を活用してバーチャル物体の触覚を提示する手法であるパッシブハプティクス [1] は、触力覚の再現が容易である点、安価で電源が不要である点、特殊な触力覚提示デバイスを必要としないため一般家庭でもすぐに使える点から、その有効性が期待されている。

パッシブハプティクスによって触覚を提示する場合、実物体とバーチャル物体の位置・姿勢・形状が揃っている必要がある [2]。しかし、実物体が存在する場所は環境によって異なる上、同じ形状の物体が都合よく存在する保証もない。そこで提案されているのが、手のリダイレクション (Hand Redirection) と呼ばれる手法である。これは、VR 内で現実の手とはずれた場所にバーチャルハンドを表示することで、実物体とは異なる位置 [3]・形状 [4] の物体においても、視覚と触覚の辻褄を合わせることができる手法である。深部感覚や触覚よりも視覚が優先されるという視触覚間相互作用の性質により、現実とは異なる位置・形状のバーチャル物体に触れているかのような体験が可能となる。

しかし、バーチャル物体と実物体の位置が大幅にずれている場合には、リダイレクションで手の位置や腕の角度に関する深部感覚と視覚の不一致が大きくなることが違和感を生むことが知られており [3], 未だ任意の位置の物体に触れた感覚を提示することはできない。そこで本研究では、従来のリダイレクションとは異なり、手がある位置から別の位置へ非連続的にワープするワームホールという新手法を提案する (図 1)。この手法を用いて、VR 空間と実空間の間で物体の位置が大幅にずれている (位置操作量が大い) 場合にも、視覚・触覚・深部感覚の間に生じる違和感を軽減

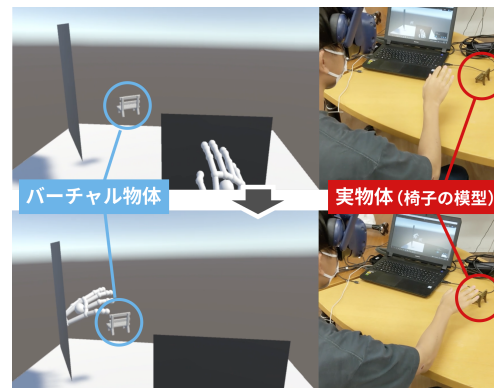


図 1: ワームホールを使って腕を移動させている様子。

できるかどうかを検証する。

2. 関連研究

2.1 パッシブハプティクス

Insko et al.[1] は、パッシブハプティクスを「バーチャル物体の代替として静的な実物体で触覚を提示する方法」と定義した。アクチュエータを用いた触覚提示デバイスによりユーザーに力覚を与えることで触覚を提示する方法であるアクティブハプティクス [5] と比較して、安価かつ簡便でありながら、力覚まで含め正確な触覚提示を行うことができるという利点がある。

Lohse et al.[2] は、自然なパッシブハプティクスを実現するために必要な 2 つの条件を提唱した。(1) Co-location: バーチャル物体と実物体の位置・姿勢が十分近いこと、(2) Similarity: バーチャル物体と実物体の形状が十分近いことである。一般家庭をはじめとする実際の環境では、実物体の位置が環境によって異なるため、パッシブハプティクスによる触覚提示を行うには、VR アプリケーションにこれらの条件を満たすような工夫を施す必要があり、そのための手法が複数提案されている [6, 2, 7]。しかし、複雑な装置が

必要であったり、対応可能なバーチャル環境が限られたりするため、未だ完全な解決には至っていない。

2.2 手のリダイレクション

前節で述べた問題を解決する手法の一つとして、手のリダイレクションが提案されている [8, 9, 3]。バーチャルハンドを実際の手とはずれた位置に表示し、手が実物体に触れているときそれに合わせてバーチャルハンドもバーチャル物体に触れているように見せることで、視触覚の辻褄を合わせることができる。

しかし、リダイレクションには適用可能な範囲 (Maximum applicable range) に限界があることが知られている。Chengら [3] は、リダイレクションによる位置操作が 40° を超えるとユーザの主観的な許容度が大きく低下することを報告している。この許容度の低下は、主に腕の深部感覚から感じる手があるはずの位置が、実際に手が見えている位置と大きく異なることによって生じると考えられる。

そこで本研究では、手の動きの連続性を保ったままバーチャルハンドと実際の手的位置をずらすリダイレクションとは異なり、非連続な動きによって手の位置をずらすことで、より大きな位置操作量においても違和感を低く維持したままパッシブハプティクスを実現できる手法を提案する。

3. 提案手法：ワームホール

本手法では、バーチャル環境にワームホールと呼ぶ仕掛けを作る (図 1)。ワームホールは in 側・out 側の 2 つで 1 セットとなっており、in 側のワームホールに腕を入れた際、異なる位置にある out 側のワームホールから腕が出てくることで、視覚的にはまるで腕がワープして出てきたかのような印象を与える、というものである。これを使うことで、現実世界とバーチャル空間で腕がずれていることに納得感を生むことができると考えた。位置だけでなく物体の姿勢がずれている場合にも容易に適用可能である。ワームホールはパッシブハプティクスへの利用を主に考案したが、触覚提示を目的としないシチュエーションへの応用も考えられる。例えば、椅子に座った状態での VR 体験 (Seated VR) など、遠くの物体に触れたり、ワームホールを通して手前に持ってくるなどのインタラクションに用いることができる。他にも、複数のワームホールを用いてリターゲットング [9] を行うことも考えられる。

3.1 実装

ゲームエンジン (Unity 2021.1.21f1¹) 上でワームホールの挙動を次のように実装した。まずバーチャルハンドは、(A) 実際の手とまったく同じ動きをするもの・(B) ワームホールの位置に応じてずれたものの 2 つが常に存在する。そしてバーチャルハンド A はある領域 A' 内でしか、バーチャルハンド B はある領域 B' 内でしかレンダリングされないように設定する。A は A' から部分的に出た場合、A' 内の部分だけがクリッピングされて表示される。B も同様。そして領域 A' を in 側ワームホールの手前に、領域 B' を out 側ワ

ームホールの奥に、それぞれワームホールと隣接して配置することで、ワームホールに手を入れると A の見えている領域が減少すると同時に B の見えている領域が増加し、ワープしているかのように表示される。

4. 実験

ワームホールの特性を評価するため、既存手法 (リダイレクション) との比較実験を行った。

4.1 実験概要

参加者は、自分の前に置かれたボタンを押すというタスクを行う。現実世界に置かれたボタンと同じボタンが VR 空間内にも表示されており (それぞれ実物体・バーチャル物体と呼ぶ)、実物体のボタンを押すとそれに対応するバーチャル物体のボタンが光り、押した感覚が得られる (図 2 左)。実物体の位置は変えないまま、バーチャル物体の位置を様々な方向・量にずらし、それにワームホールまたはリダイレクションを用いて触れ、タスクを行ってもらった。実験参加者は 24 名 (男性 13 名・女性 11 名、平均 22 ± 1.7 歳) であった。24 名中 1 名が左利きであった。

4.2 実験条件

位置操作軸 (3 条件; r 軸, h 軸, v 軸) $\times$ 位置操作量 (2 条件; 大, 小) $\times$ 位置操作手法 (2 条件; ワームホール, リダイレクション) の計 12 条件を用いた参加者内配置で実験が行われた。

リダイレクションの先行研究である [3] を参考にし、タスク開始時のユーザの視点を中心として極座標的にバーチャル物体をずらした。r 軸がユーザから正面に離れる方向、v (vertical) 軸が上方向、h (horizontal) 軸がユーザの利き手側の方向 (右利きであれば右方向) の位置操作を表す。各位置操作軸に大小の位置操作量を設定した。まず v 軸・h 軸に関しては、[3] を参考に小は 20° 、大は 45° に設定した。r 軸に関しては小は 20 cm、大は 100 cm とした。

1 つの条件に関し 1 人あたり 5 試行を行い、5 試行の間に 5 つのボタンが 1 回ずつ押されるようにした。

ある位置操作軸に関し、位置操作量 (2 条件) $\times$ 位置操作手法 (2 条件) $\times$ 試行回数 (5 回) の計 20 回タスクを繰り返して行ってもらい、その後 5 分休憩する、というサイクルを位置操作軸 (3 条件) の数だけ繰り返した。各軸の中で操作量や操作手法はランダムな順番で提示される。位置操作軸の提示順は 24 人の参加者間でカウンターバランスを取った。

評価指標として、各試行においてボタンに手を伸ばした元の位置に手を戻すまでの時間 (以降タスクパフォーマンスと称する)、また各試行の直後に提示した体験の許容度に関するアンケート ([3] より、5 段階、「許容できない」/「許容できる」) を用いた。

4.3 実験環境

参加者は HTC VIVE Pro² を装着し、また利き手に Manus 社製 Prime X Haptic VR³ を装着した。

¹<https://unity.com/ja>

²<https://www.vive.com/jp/product/vive-pro-full-kit/>

³<https://www.manus-meta.com/haptic-gloves>

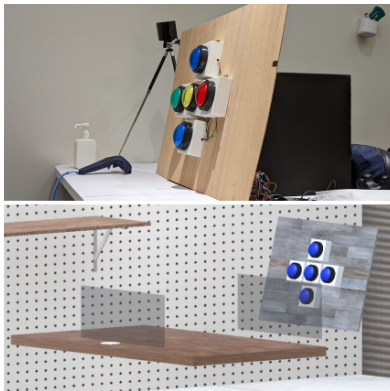


図 2: (左上) 実験に用いた実環境. (左下) 実験に用いたバーチャル環境. r 軸・操作量大・ワームホール条件のものを代表として示した. (中) タスクの所要時間. 代表として r 軸のものを示した. (右) 体験の許容度. 代表として r 軸のものを示した.

対照群となるリダイレクションの実装には, Zenner et al. の Hand Redirection Toolkit[10] のうち, “Zenner and Krüger (Target-Based Approach)”⁴を採用した. リダイレクションの始点は手の初期位置である机上の白い円に, 終点は各試行においてターゲットとなっているボタンが設定されるようにした.

このアルゴリズムは手の位置を平行移動させることしかできず, 手の姿勢に関する操作が行われなため, 例えば v 軸や h 軸の大きな位置操作では, ボタンに対する手の角度が不自然になるおそれがある. そこで, リダイレクション開始時にワールド座標においてボタンの角度差と同じ角度だけバーチャルハンドの姿勢を操作する処理を追加した.

4.4 結果

各評価指標について, 1 人 1 条件あたり 5 試行行ったのでその平均をとった上で, すべてのデータに関してシャピロウィルクの正規性検定を行った結果, いずれの評価指標においても正規性が認められなかった ($p \leq 0.05$). そこで, 整列ランク変換 (Aligned Rank Transform) を用いたうえで二要因分散分析を行った. 位置操作手法 (ワームホールまたはリダイレクション)・位置操作量 (大小)・その交互作用について, 位置操作軸ごとに有意水準 $\alpha = 0.05$ での分散分析を行った.

そのうち主効果もしくは交互作用に有意な差が認められたものに関しては, 下位検定としてウィルコクソンの符号順位検定を行った. 下位検定は, 操作手法を固定した操作量間での比較 (2 ペア), 操作量を固定した操作手法間での比較 (2 ペア) の合計 4 ペアについて行った. 4 つのペアで検定を行うので, Bonferroni の方法に従い, 有意水準 $\alpha = 0.0125$ での評価となる.

4.4.1 タスクパフォーマンス

各条件でのタスクの遂行時間を図 2 中央に示す. 分散分析の結果, すべての軸の 2 つの主効果 (位置操作手法・位置操作量) と交互作用について有意差が認められた (表 1).

下位検定の結果を表 2 に示す. 結果として, いずれの軸

表 1: タスク遂行時間の各軸での分散分析の結果. 有意差が認められた項目を太字で示した.

		操作手法	操作量	交互作用
r 軸	p	< 0.001	< 0.001	< 0.001
	η_p^2	0.819	0.875	0.785
h 軸	p	0.003	< 0.001	< 0.001
	η_p^2	0.322	0.568	0.475
v 軸	p	< 0.001	< 0.001	< 0.001
	η_p^2	0.812	0.885	0.648

においても, 操作量大でのワームホールとリダイレクションの間, またリダイレクションでの操作量大と操作量小の間に有意差がみられた. v 軸においては, それに加えワームホールにおける操作量大小の間, 操作量小でのワームホールとリダイレクションの間にも有意な差が見られたが, 先に述べた条件間より効果量 r は小さかった.

表 2: タスク遂行時間の各軸での符号順位検定の結果. 有意差が認められた項目を太字で示した. ワはワームホール, リはリダイレクションを示す.

		操作手法間		操作量間	
		大	小	ワ	リ
r 軸	p	< 0.001	0.16	0.406	< 0.001
	r	0.764	0.203	0.12	0.764
h 軸	p	< 0.001	0.509	0.406	< 0.001
	r	0.596	0.095	0.12	0.615
v 軸	p	< 0.001	0.007	< 0.001	< 0.001
	r	0.764	0.393	0.503	0.764

4.4.2 体験の許容度

各条件における体験の許容度のスコアを図 2 右側に示す. 分散分析の結果, すべての軸において少なくとも 1 つの主効果 (位置操作手法・位置操作量) と交互作用について有意差が認められた. 下位検定の結果, すべての軸においてリダイレクションにおける操作量大小の間, 操作量が大きい際のワームホールとリダイレクションの間に有意な差が認められた. また v 軸においては, ワームホールにおける操作量大小の間にも有意な差が認められた (表 3–表 4).

⁴<https://github.com/AndreZenner/hand-redirection-toolkit/wiki/Body-Warping#zenner-and-krüger-target-based-approach>

表 3: 体験の許容度の各軸での分散分析の結果.

		操作手法	操作量	交互作用
r 軸	p	< 0.001	< 0.001	< 0.001
	η_p^2	0.409	0.795	0.771
h 軸	p	0.019	< 0.001	< 0.001
	η_p^2	0.216	0.606	0.547
v 軸	p	0.111	< 0.001	< 0.001
	η_p^2	0.106	0.794	0.497

表 4: 体験の許容度の各軸での符号順位検定の結果.

		操作手法間		操作量間	
		大	小	ワ	リ
r	p	< 0.0001	0.0617	0.261	< 0.0001
	r	0.655	0.27	0.162	0.746
h	p	0.000501	0.241	0.106	< 0.0001
	r	0.502	0.169	0.233	0.727
v	p	0.0029	0.316	0.000145	< 0.0001
	r	0.43	0.145	0.548	0.746

5. 考察

まず体験の許容度について、表 4 より、位置操作量が大きいときすべての位置操作軸においてリダイレクションに比べワームホールの許容度が有意に高かった。また表 2 より、位置操作量が大きいときワームホールのタスクの遂行時間がリダイレクションに比べ有意に短かった。これらの結果を総合すると、ワームホールはリダイレクションと比較して、より広範囲の位置操作にも自然さを保ったまま適用可能であるということが示唆される。

一方、v 軸においてのみ、ワームホールにおいてもリダイレクションと同様操作量が小さいほうが有意にタスクパフォーマンス・体験の許容度ともに向上していた。Cheng et al.[3] の実験では体験の許容度は位置操作の方向によらないと結論づけられていたが、ワームホールでは向きにより適用可能な範囲が異なる可能性が示唆された。

6. おわりに

本研究では、パッシブハプティクスにおいて手がある位置から別の位置へ非連続的にワープするワームホールという新手法を提案した。結果、ワームホールではリダイレクションと比較して、より広範囲の位置操作にも自然さを保ったまま適用可能であるということが明らかになった。今後、物体の位置だけでなく姿勢についての操作、また複数のワームホールを用いたリターゲティングの検討などを通し、ワームホールのより詳細な性質を明らかにしていく。

謝辞 本研究は科研費 基盤研究 (B)(22H03628)、挑戦的研究 (萌芽)(20K21801)、研究活動スタート支援 (21K21307) の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] B. E. Insko, *Passive haptics significantly enhances virtual environments*. The University of North Carolina at Chapel Hill, 2001.

- [2] A. L. Lohse, C. K. Kjær, E. Hamulic, I. G. A. Lima, T. H. Jensen, L. E. Bruni, and N. C. Nilsson, “Leveraging change blindness for haptic remapping in virtual environments,” in *2019 IEEE 5th Workshop on Everyday Virtual Reality (WEVR)*, pp. 1–5, 2019.
- [3] L.-P. Cheng, E. Ofek, C. Holz, H. Benko, and A. D. Wilson, “Sparse haptic proxy: Touch feedback in virtual environments using a general passive prop,” in *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI ’17, (New York, NY, USA), pp. 3718–3728, Association for Computing Machinery, 2017.
- [4] Y. Ban, T. Narumi, T. Tanikawa, and M. Hirose, “Magic pot: Interactive metamorphosis of the perceived shape,” in *ACM SIGGRAPH 2012 Posters*, SIGGRAPH ’12, (New York, NY, USA), Association for Computing Machinery, 2012.
- [5] T. H. Massie, J. K. 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.
- [6] A. L. Simeone, E. Velloso, and H. Gellersen, “Substitutional reality: Using the physical environment to design virtual reality experiences,” in *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI ’15, (New York, NY, USA), pp. 3307–3316, Association for Computing Machinery, 2015.
- [7] W. McNeely, “Robotic graphics: a new approach to force feedback for virtual reality,” in *Proceedings of IEEE Virtual Reality Annual International Symposium*, pp. 336–341, Sep. 1993.
- [8] L. Kohli, “Redirected touching: Warping space to remap passive haptics,” in *2010 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI)*, pp. 129–130, 2010.
- [9] M. Azmandian, M. Hancock, H. Benko, E. Ofek, and A. D. Wilson, “Haptic retargeting: Dynamic repurposing of passive haptics for enhanced virtual reality experiences,” in *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI ’16, (New York, NY, USA), pp. 1968–1979, Association for Computing Machinery, 2016.
- [10] A. Zenner, H. M. Kriegler, and A. Krüger, “Hart - the virtual reality hand redirection toolkit,” in *Extended Abstracts of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA ’21, (New York, NY, USA), Association for Computing Machinery, 2021.