



手のヒッチハイク：VRにおける視線を用いた 複数バーチャルハンドの切り替え

伴玲吾¹⁾, 松本啓吾¹⁾, 鳴海拓志^{1,2)}

1) 東京大学大学院情報理工学系研究科

(〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1, {reigo, matsumoto, narumi}@cyber.t.u-tokyo.ac.jp)

2)JST さきがけ

概要: VRにおいて手を使った遠隔物体の直接操作は課題とされてきた。既存手法は腕を伸ばすことで遠隔物体を操作することを試みているが、遠くなるほど腕の角度差に対して鋭敏に反応するため操作精度が落ちる。本研究では、空間内に複数配置されたバーチャルハンドを視線で切り替える「手のヒッチハイク」を提案し、この問題の解決を図る。実験の結果、ヒッチハイクでは遠方の物体とのインタラクションにおいても、既存手法より容易かつ効率的に操作が可能であることが示唆された。

キーワード: ハンドインタラクション, アイトラッキング, ダイレクトハンド操作, 3DUI

1. はじめに

バーチャルリアリティ(VR)や拡張現実(AR)では、ユーザが手を伸ばしてバーチャル物体を直接掴み、現実世界と同じように手で操作することができる「ダイレクトハンド操作」が、容易に学習可能かつ自然なインタラクションとして広く用いられている。例えば Meta Quest シリーズでは、カメラベースのハンドトラッキングシステムが採用されており、2023年2月にはシステム操作にレイキャスティングではなくダイレクトタッチの使用を可能にするアップデートが行われた¹⁾ほか、複数のゲーム^{2,3)}がダイレクトハンド操作をサポートしている。

しかし、ダイレクトハンド操作にはいくつかの制限があることが以前から指摘されている。1つ目の問題は、物理的な手の可動範囲がユーザの身体の周囲の狭い空間に限定されている点である。したがって、近くの物体しか掴むことができず、物体の移動範囲も制限される。この問題は、一般的には対象物を掴める位置までユーザがバーチャル空間内を移動することで解決されているが、移動により不要な身体的・認知的負荷が発生することに加え、多数の物体とインタラクションする際には移動が煩雑となる。

このような課題に対し、手を用いて遠隔物体を操作する手法が提案されてきた。例えば、Poupyrev et al. [1] は Gogo interaction technique を提案している。この手法では、ユーザの腕の長さを非線形に伸ばすことで、遠隔物体のダイレクトハンド操作が可能となる。しかし、腕が長くなると少しの腕の角度の操作がバーチャルハンドに鋭敏に反映されるため、遠くの対象になればなるほど選択の精度が低下するという問題がある。HOMER (Hand-centered Object

Manipulation Extending Ray-casting) [2] はこの問題を解決しようと試みた手法であるが、遠隔物体への操作精度が依然として低いことや、物体を手前から奥へ移動する操作が困難であるなどの限界がある。Mine et al. [3] が提案した Scaled world grab では、ユーザが物体を掴むたびにバーチャル環境が自動的にユーザの頭を中心として縮小されることで遠隔物体を手の届く範囲に収め、手を離すと元のスケールに戻るといった仕組みが用いられている。しかしこの手法は環境のスケールを変更するため、ARには適用が困難である。視線と指のピンチジェスチャを組み合わせた手法である Gaze + Pinch [4] は、操作精度が高く移動にかかる負荷が軽減されているという点では有望であるが、ダイレクトハンド操作ではないため、道具を用いた操作には不向きであったり、スカルプト造形など視線を向ける対象がない操作に適用することが難しい。

VR/ARのダイレクトハンド操作の2つ目の問題として、インタラクション領域が制限されていないことが挙げられる。遠隔物体を操作する際には、ユーザはしばしば手を大きく動かす必要があり、その結果現実空間の物体に手がぶつかってしまうといった問題が発生する [5]。また、手を大きく動かす必要があることは、長時間のインタラクションにおける疲労感 (Gorilla arm problem [6]) を引き起こす。

本研究ではこれらの問題を解決するために、視線とダイレクトハンド操作を組み合わせた新たな操作手法「手のヒッチハイク」を提案する。

2. 提案手法

提案手法である手のヒッチハイクは、空間内にバーチャルハンドを複数配置し、その中からユーザが視線を用いて任意のハンドに自由に憑依し乗り換えられるというものである。空間内には「ハンドエリア」が存在し、各ハンドエリアに1つずつバーチャルハンドが配置されている。バー

¹⁾<https://about.fb.com/news/2023/02/meta-quest-direct-touch-use-your-fingers-in-vr>

²⁾<https://store.steampowered.com/app/804530/Cubism>

³⁾<https://www.holonautic.com/hand-physics-lab>



図 1: 「手のヒッチハイク」でのドラッグアンドドロップの様子

チャルハンドはユーザが注視することでアクティブになり、その後はユーザの実際の手と同期した形で、そのハンドエリアの位置・姿勢に応じてずれて動く。

実際の手が動く領域（オリジナルハンドエリア）は、ユーザが快適に操作可能な位置・大きさに設定しておく。他のハンドエリアは、ユーザにとって自然な向きになるよう、常にユーザの方向を向いた状態とする。操作のフローは次のようになる。

1. バーチャルハンドを注視することで、そのハンドをアクティブにすることができる。
2. アクティブなバーチャルハンドは、ハンドエリアの位置・姿勢に応じて座標変換された動きをする。
3. アクティブなハンド A で物体を掴み、掴んだ状態のまま別のハンド B を注視すると、ハンド B がアクティブになると同時に、掴んでいた物体も A から B の位置へ一緒に移動する（ドラッグアンドドロップ; 図 1）ため、ハンドエリア間を跨いだ移動を行うことができる。

あるハンドエリアがオリジナルハンドエリアと同じ大きさの場合には、手の動きは並進・回転のずれがある以外はまったく同じものとなる。一方、ハンドエリアがオリジナルハンドエリアよりも大きい場合、手の動きに並進ゲインをかけ実際の手の動きよりバーチャルハンドが大きく動くようにすることで、大きな物体の操作や粗大操作を小さい動きで行うことができる。逆にハンドエリアが小さい場合には、手の動きを縮小することで細かい動きが可能になる。

また手のヒッチハイクでは、レイキャスティング [7] など一般的な遠隔ポインティング手法では操作が困難な道具、流体、クレイなどの媒体を含む、既存のハンドトラッキングを用いたインタラクションをすべて特別な変更なしに用いることができる。さらに、どんなに遠くの物体でも手をオリジナルハンドエリア内に保ったまま操作が可能であるため、大きな移動を伴う操作でも手を快適な位置に留めることができ、ダイレクトハンド操作における手の疲労の問題の解決にも寄与する手法である。

VR で一般的に用いられている HOMER [2] やレイキャスティングは、空間全域をまんべんなく操作することができる一方、遠くの物体の操作精度が落ちてしまう。これに対し手のヒッチハイクは、空間全体の操作をあえて重視せず、

いくつかの領域内での離散的なインタラクションにフォーカスすることで、ハンドエリア内であれば高速で正確な操作を常に行うことができる手法である。

なお、ハンドエリアの配置は、ユーザではなくアプリケーション開発者が事前に行うことを想定している。バーチャル空間の中で、特にインタラクションが起こりやすい領域に事前にハンドエリアを配置しておくことで、ユーザはどこからでも快適にダイレクトハンド操作を行うことができるようになる。

3. アプリケーション

本手法は以下のような場面への応用が期待される。

AR での日常的な操作. AR 物体を直接手で掴み現実空間の好きな位置に配置したり、照明や空調などの IoT デバイスを操作することができる。

XR のウィンドウシステム (図 2 上). それぞれのウィンドウ/アプリケーションに 1 つずつ手を配置することで、2D のデスクトップ環境のように、手を快適な位置に保つ

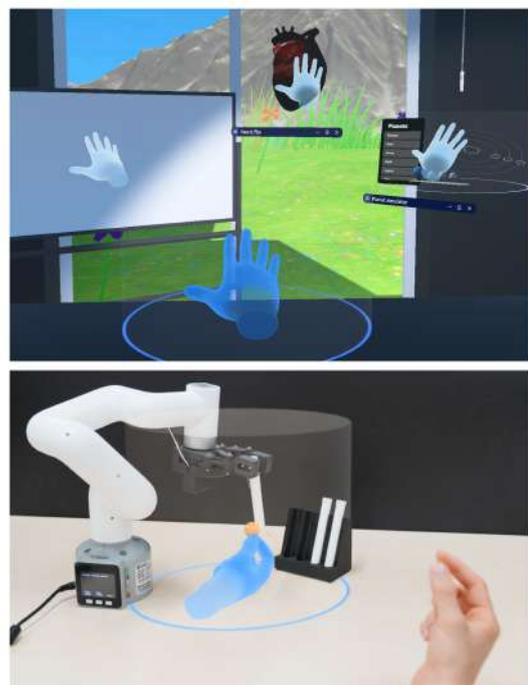


図 2: 「手のヒッチハイク」の応用例

たまま様々な位置にあるアプリケーションの操作が可能になる。

VRでの大きな物体の操作. 巨大な手に乗り換えることで、ビルや地面といった大きな物体を直接手で掴んで操作することができる。主観視点を保ったまま遠くの物体を正確に操作できるので、建築や都市計画などの設計タスクにおいて有用である。

VRでの精密な操作. 小さい手に乗り換えることで、小さな物体を正確に操作することができる。

ロボットアームの操作 (図 2 下). これは手のヒッチハイクを物理世界へ拡張することを意図したものであり、義手や 3 本目以上の腕の操作、またカメラ操作など産業用途でも活用できる可能性がある。

4. 実験

VRにおける既存のハンド操作手法である HOMER と手のヒッチハイクの操作性を比較する実験を行った。空間内の複数の領域に存在する物体に対して、手のヒッチハイクと HOMER のタスク遂行時間を比較することを目的とし、作業仮説「手のヒッチハイクでは HOMER より遠隔物体の操作におけるタスク遂行時間が短い」を立て実験を行った。

4.1 実験概要

参加者は、VR 空間で次々に表示されるミニカーを手で掴み、別の場所に表示される駐車場に適切な位置・姿勢で配置するというタスクを繰り返し行った (図 3)。ミニカー、駐車場が表示される位置は、VR 空間に合計 7 つある机の上のどこかである。ヒッチハイクの場合、各机に 1 つずつバーチャルハンドが配置される。まずヒッチハイクまたは HOMER のどちらかを使って操作を計 42 回繰り返したのち、休憩し、今度はもう片方を使ってまた操作を 42 回繰り返すという流れで実験を行った。操作手法の提示順はカウンターバランスをとった。実験参加者は 26 名 (男性 17 名・女性 9 名、平均 23.6 ± 2.6 歳) で、うち 4 名が左利きであった。左利きの参加者であっても右手を用いて実験を行った。



図 3: VR 内でのタスクの様子

4.2 実験条件

操作対象の極座標的な位置 (ユーザからの距離・上から見たときのユーザ正面からの水平角度) に関して様々な条件で実験できるよう机を配置した。距離は 0m, 1m, 2m の 3 つ、また 0m 以外に関しては水平角度を右方向に 45° , 0° , 左方向に 45° の 3 つの位置、合計 7 つの位置に机を配

置した。ミニカー、駐車場ともに、7 つの机の中からランダムに選ばれ提示されるが、実験全体を通してすべての組み合わせ ($7 \times 6 = 42$ 通り) が提示されるようになっている。ミニカーと駐車場の机の中での位置・姿勢はランダムに提示される。

4.3 評価指標

各試行は、ユーザの手元にあるボタンを押すことで開始することができる。評価指標として、参加者がボタンを押してから最初にミニカーを掴むまでの「到達時間」、ミニカーを掴んでから正しい位置・姿勢で駐車場に配置するまでの「配置時間」の 2 つを測定した。

4.4 実験環境

参加者は HTC VIVE Pro Eye⁴を装着し、また右手に Manus 社製 Prime X Haptic VR⁵を装着した。

ヒッチハイクに関しては、視線の過度な反応 (Midas touch problem) を避けるため 0.5s の遅延を設けた。非アクティブな手を注視すると、その近くに残り時間を示す円形のローディングスピナーが表示され、それが一周するまで、すなわち 0.5s 間注視し続けることで手を切り替えることができる。対象群となる HOMER については、詳細なアルゴリズムは [8] を参考にし、Velocity scaling のないオリジナルのものを実装し使用した。バーチャルハンドからレイが伸びており、それをミニカーに向けた上で手を握るジェスチャをすることで、手がミニカーの位置に移動しミニカーを掴んで動かすことができる。

4.5 結果

タスク遂行時間の結果を図 4 に示す。ヒッチハイク・HOMER の各群に対しシャピロウィルクの正規性検定を行った結果、到達時間・配置時間のいずれに関しても両手法において正規性が認められなかった ($p < 0.05$)。そこで、到達時間・配置時間について、ヒッチハイク・HOMER の間で Wilcoxon の符号順位検定を行った。合計で 2 つの検定を行うので、Bonferroni の方法に従い $\alpha = 0.05/2 = 0.025$ での評価となる。結果として、配置時間についてはヒッチハイクが HOMER に比べ有意に遂行時間が短い ($p < 0.025$) ことが示された (表 1)。一方、到達時間については、両手法の間に有意な差は見られなかった。

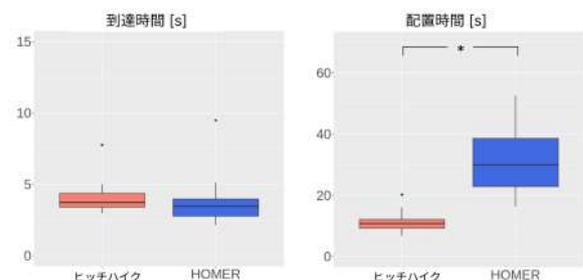


図 4: 手法ごとのタスクの所要時間

⁴<https://www.vive.com/jp/product/vive-pro-eye/overview/>

⁵<https://www.manus-meta.com/haptic-gloves>

表 1: 操作手法間でのタスク遂行時間の Wilcoxon の符号順位検定の結果

	到達時間	配置時間
p	0.321	< 0.001
効果量 r	0.288	0.768

4.6 考察

タスク遂行時間について、ヒッチハイクの配置時間が HOMER より有意に短かったことから、仮説が示され、ヒッチハイクでは HOMER と比べて遠隔物体を容易かつ効率的に操作可能であることが示唆された。これは、HOMER では対象が遠くになるにしたがって腕の小さな運動が拡大され正確な操作が困難となるのに対し、ヒッチハイクでは運動が拡大されないことで手元に近い精度で操作が可能であるという、両者の特徴が現れた結果だと考えられる。一方、到達時間には 2 つの手法間で有意な差が認められず、またどちらの手法においても配置時間と比べて非常に短い時間となった (図 4)。今回選んだタスク全体の遂行時間は、到達時間よりも配置時間の影響が大きかったといえる。

また実験後の自由回答インタビューにおいて、参加者のうち一人は「(HOMER では) どの位置で車を持つのかを意識する必要があった。掴むときの手の姿勢が固定されてしまうので、回転がしにくかった」と回答していた。現実世界において物体を回転する際には、掴む前に手と物体の相対的な位置関係を把握できるが、HOMER では手を握るまで物体の近くに手が表示されないため、掴んでみるまで正確な位置関係がわからない。ヒッチハイクでは実際に掴む前から手が物体の付近に表示されるので、それが配置時間に影響を及ぼしたと考えられる。

5. おわりに

本研究では、VR のダイレクトハンド操作における遠隔物体の操作精度・疲労感の問題を解決するため、視線を用いて複数のバーチャルハンドを乗り換えて操作する「手のヒッチハイク」という新手法を提案した。結果、手のヒッチハイクでは既存手法である HOMER と比べ、容易かつ効率的に操作が可能であることが示唆された。今後、位置や回転のオフセットとタスクパフォーマンスの関係、またスイッチングを頻繁に行う際の手の運動学習・身体化感覚を詳細に調査するなどして、手のヒッチハイクの適用可能な範囲を明らかにするとともに、義手やロボットアームの操作を通して現実世界へと手法を拡張していくことが望まれる。

謝辞 本研究は科研費 基盤研究 (B)(19H04149, 22H03628)、研究活動スタート支援 (22K17929) の助成を受けた。

参考文献

[1] I. Poupyrev, M. Billinghurst, S. Weghorst, and T. Ichikawa, “The go-go interaction technique: Non-

linear mapping for direct manipulation in vr,” in *Proceedings of the 9th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '96, (New York, NY, USA), p. 79–80, Association for Computing Machinery, 1996.

- [2] D. A. Bowman and L. F. Hodges, “An evaluation of techniques for grabbing and manipulating remote objects in immersive virtual environments,” in *Proceedings of the 1997 Symposium on Interactive 3D Graphics*, I3D '97, (New York, NY, USA), p. 35–ff., Association for Computing Machinery, 1997.
- [3] M. R. Mine, F. P. Brooks, and C. H. Sequin, “Moving objects in space: Exploiting proprioception in virtual-environment interaction,” in *Proceedings of the 24th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, SIGGRAPH '97, (USA), p. 19–26, ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., 1997.
- [4] K. Pfeuffer, B. Mayer, D. Mardanbegi, and H. Gellersen, “Gaze + pinch interaction in virtual reality,” in *Proceedings of the 5th Symposium on Spatial User Interaction*, SUI '17, (New York, NY, USA), p. 99–108, Association for Computing Machinery, 2017.
- [5] S. Faltaous, J. Neuwirth, U. Gruenefeld, and S. Schneegass, “Savr: Increasing safety in virtual reality environments via electrical muscle stimulation,” in *Proceedings of the 19th International Conference on Mobile and Ubiquitous Multimedia*, MUM '20, (New York, NY, USA), p. 254–258, Association for Computing Machinery, 2020.
- [6] J. D. Hincapié-Ramos, X. Guo, P. Moghadasian, and P. Irani, “Consumed endurance: A metric to quantify arm fatigue of mid-air interactions,” in *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '14, (New York, NY, USA), p. 1063–1072, Association for Computing Machinery, 2014.
- [7] K. Hinckley, R. Pausch, J. C. Goble, and N. F. Kasell, “A survey of design issues in spatial input,” in *Proceedings of the 7th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '94, (New York, NY, USA), p. 213–222, Association for Computing Machinery, 1994.
- [8] C. Wilkes and D. A. Bowman, “Advantages of velocity-based scaling for distant 3d manipulation,” in *Proceedings of the 2008 ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, VRST '08, (New York, NY, USA), p. 23–29, Association for Computing Machinery, 2008.