



移動ロボットを用いた動的な触覚刺激がハプティックリターゲティングの知覚閾値へ及ぼす影響

Effects of Dynamic Haptic Stimuli Using a Mobile Robot on the Detection Threshold of Haptic Retargeting

横井総太郎¹⁾, 松本啓吾¹⁾, 鳴海拓志¹⁾, 葛岡英明¹⁾

Sotaro YOKOI, Keigo MATSUMOTO, Takuji NARUMI, Hideaki KUZUOKA

{yokoi,matsumoto,narumi,kuzuoka}@cyber.t.u-tokyo.ac.jp

1) 東京大学 情報理工学系研究科 (〒 113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1)

概要: 実際の手とバーチャルハンドの位置・姿勢をずらして視覚提示することで実物体に触れる感覚をバーチャル物体に実環境からずらして対応づける手法としてハプティックリターゲティング (HR) が研究されてきた。先行研究では静止物体に触れる状況の検討がほとんどであるのに対し、本研究では台車型ロボットを用いて動的物体に触れる際の HR の効果を調査した。その結果、動的物体の活用は接触物体のサイズ知覚の閾値を拡大させる傾向が示された。

キーワード: ハプティックリターゲティング, 移動ロボット, マルチモーダル

1. はじめに

パッシブハプティクスとは、バーチャルリアリティ (VR) において実物体を触覚フィードバックとして用いることにより、高い精度の力覚や触覚フィードバックを提供する手法である。本手法において、多感覚が統合される際、視覚が形状や空間の知覚において触覚よりも優位に統合される人間の性質を利用し、バーチャルハンドと現実の手の位置・姿勢をずらすことで、現実の物体とバーチャル物体の整合性を保ちながら触覚提示の範囲を広げるハプティックリターゲティング (HR) が提案されている [1]。

HR は、触覚提示の位置や姿勢の制限を緩和することが期待されるだけでなく、リハビリテーションにおいて知覚される運動の大小を変化させることにより、効果を高めることが報告されている [3]。一方で、HR には知覚閾値 (DT) と呼ばれる、ユーザが HR による操作に気づく限界の操作量が存在し、HR の適用範囲を拡大するために DT を拡大することが研究なされてきた。

他方、HR に関する先行研究では、触覚フィードバックの対象として静的物体を採用してきた。しかし、実世界では人間やロボットのような動的な物体とのインタラクションが頻繁に発生する。このような状況に対して手の動きの DT を調査した研究はまだない。そこで我々は、移動ロボットを用いて触覚フィードバックを提供し、DT を調査するために台車型ロボットを採用した。

2. 実験

本研究では、動的物体を触覚フィードバックに用いることが HR の DT に及ぼす影響を調べるため、ユーザスタディ

を行った。実験は、動的条件 (台車型ロボットが動く) と静的条件 (台車型ロボットが動かない) の 2 水準を持つ、1 要因参加者内計画によって行われた。実験参加者は、動的条件・静的条件において、バーチャル空間上に表示されているテーブルに触れた後、バーチャル空間の物体の大小・物体の移動量・手の位置に関するアンケートに回答した。

2.1 作業仮説

本実験の作業仮説は以下の 2 つである。

- (H1) 動的条件と静的条件では物体のサイズ変化の DT が変化する
- (H2) 動的条件と静的条件では手の動きの DT が変化する。

物体が動いている場合、その大きさや速度を触覚の手がかりだけで識別することは難しい。従って、物体が動くとき触覚から推定される物体の位置の精度が低下するため、HR による視覚操作の影響が大きくなると考え、(H1),(H2) の仮説を設定した。

2.2 ハプティックリターゲティングの手法

本研究は動的物体に触れるシナリオとして、ユーザが動的物体に対して正対し左右方向に触れる状況を想定した。そのため、HR の手法として、ユーザの手の動きを拡大・縮小する倍率を適用する、Esmacili らの手法を採用した [2]。これを達成するために、以下のように座標変換を適用した。

$$\mathbf{P}_{\text{after}} = s \cdot \mathbf{P}_{\text{before}} \quad (1)$$

$\mathbf{P}_{\text{after, before}}$ は手の変換後・変換前の座標であり、 s は適用したゲインである。また、HR を適用した後に、テーブルの



図 1: 利用したオムニホイール型ロボットに、触覚提示部として木板を取り付けた様子の写真。

大きさが視覚と触覚で矛盾しないようにするために、テーブルのサイズに以下のような変換を与えた。

$$L_{after} = s \cdot L_{before} \quad (2)$$

$L_{after, before}$ はテーブルの変換後・変換前の一辺の長さであり、 s は HR と共通のゲインである。例えば、HR のゲインを 1.2 倍に設定した際には物体のサイズが 1.2 倍になり、視触覚の整合性が保たれる。

2.3 実験システム

物体を移動させるロボットはアルミ合金製のボディに直径 100 mm の全方向転動輪（オムニホイール）が搭載されており、任意の方向に移動・回転できた。マイクロコントローラとして Arduino Duemilanove を採用し、積載能力は 15kg、最大速度は 0.6 m/s であり、約 20 分間連続稼働することができた。また、台車型ロボットを遠隔操作するために、無線通信が可能である「Wio Terminal」が接続された。本システムの触覚フィードバック部として形状知覚が容易であるため、図 1 に示す通り一辺が 90 cm の木板をアルミフレームとボルトを用いて台車型ロボットに取り付けた。本研究では、VR 環境を提示するためのヘッドマウントディスプレイ（HMD）として HTC Vive Pro を使用した。ハンドトラッキングには HTC VIVE Tracker 3.0 を用いた。また、バーチャル環境内で提示されるアンケートの回答には VIVE コントローラ（以下、コントローラと表記する）を使用した。実験に使用する VR 環境の構築には Unity2021.3.11f を用いて作成した。バーチャル環境のレンダリング、システム管理、ロボットの制御、およびデータ取得は、Intel® Core™ i7-13650HX CPU を搭載し、Windows 11 Home を実行する PC で行った。この PC には 32 GB のメモリと NVIDIA GeForce RTX 4080 が搭載されている。

2.4 実験参加者

解析の対象となった実験参加者は 18 名（男性 10 名、女性 8 名）、平均年齢は 29.0 歳（ $SD = 11.0$ ）であった。実際の実験参加者は 22 名であったが、実験システムの不具合により 4 名のデータは解析に使用しなかった。参加者は実験に関する事前知識を持たなかった。解析の対象となった参加者のうち 2 名は左利きで、残り 16 名は右利きであった。実験終了後、参加者には 2,000 円の Amazon ギフト券を謝礼として支払った。募集時には、視覚や運動機能に障害が



図 2: それぞれのゲインを適用した際に、VR 空間でユーザが見る物体の写真。左がゲインが 0.2、中央がゲイン 1.0、右がゲイン 1.8

ないこと、および、転倒の危険性があるため妊娠中または妊娠の可能性がないことを確認した。

2.5 実験条件

台車型ロボットの速度、木板のサイズ、および、HR のゲインとして 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8 の 9 種類のゲインを用いた。物体とユーザの両方に同じ座標変換を適用する必要があったため、これら 3 つのゲインは各試行においてすべて同一に設定した。実験参加者は、図 2 のような VR 内のテーブルを HMD を通して視覚提示された。

2.6 実験手順

実験は以下の手順に従って実施された：

- 実験参加者は実験に関する説明を受け、同意書を用いて実験参加に同意する。
- 参加者は性別や年齢などに関する事前アンケートに回答する。
- 参加者は HMD、ハンドトラッカー、アンケート回答用のコントローラを装着した。HMD が正しく装着されていることを確認した後、参加者の前にテーブル型ロボットを配置した。
- 参加者は前述のタスクを実行し、DT を測定した。各要因について 90 回の試行が行われ、参加者は 30 回ごとに休憩を取るよう指示された。参加者は希望する際にいつでも休憩を取ることができた。
- タスク完了後、参加者は HMD などの装置を外し、デスクトップ PC を使用して事後アンケートに回答した。

参加者は、バーチャル物体に触れるタスクを実行することを伝えられ、バーチャル物体が存在する場所には常にテーブルが装着された台車型ロボットが物理的に存在し、物理的な接触が可能であると説明された。参加者は右手の手のひらを使い、手を左右に動かすように指示された。物体の大きさが常に同じであることが事前に知られると視覚的な手がかりに基づいて大きさを判断する可能性があるため、参加者に対する事前説明の際に、異なるサイズの 3 つのテーブルが示された合成画像を見せた。また、バーチャル物体のサイズが物理物体のサイズと異なる場合がある可能性も伝えられた。参加者は足元に表示されたバーチャルの円の中に立ってテーブルに触れるよう指示された。また、参加者は任意のタイミングで休憩を取ることが許可された。タスクの説明後、参加者は HMD を装着し、手の位置を正確

にトラッキングするために手取り付けたトラックのキャリブレーションを行った。さらに、台車型ロボットのモータ音を遮断するためにノイズキャンセリングヘッドホンを装着した。動的条件では、物理的な物体が参加者の頭の位置を基準に、左右に9秒間で20 cm/sの速度で移動した。移動の方向が結果に影響を及ぼすことを避けるため、テーブルが左から右に移動する試行と右から左に移動する試行を交互に実施した。移動距離の90 cmは、参加者が無理なくテーブルに触れることができる距離として設定した。動的条件と静的条件で参加者がテーブルに触れている時間を揃えるため、静的条件では参加者に9秒間テーブルに触れるよう指示した。両条件において、参加者はバーチャル空間内でリダイレクションの知覚について以下の質問に回答した

- 最近の体験で、触ったテーブルよりも大きく見えましたが？小さく見えましたが？(大きい・小さい)
- 最近の体験で、テーブルの動きは速く感じましたか？遅く感じましたか？(速い・遅い)
- 最近の体験で、手の位置は実際とずれていましたか？(一致していた・一致していなかった)

参加者は、コントローラを使って各質問に回答した。実験後のアンケートでは、VR酔いを調査するためにシミュレータ酔いに関するアンケート Simulator Sickness Questionnaire (SSQ)、バーチャル空間に対する実在感を測定するため Igroup Presence Questionnaire (IPQ)、バーチャル空間における身体所有感を測定するため Virtual Embodiment Questionnaire (VEQ) を使用した。これらのアンケートは、動的条件と静的条件でそれぞれ2回ずつ実施した。

- テーブルの大きさについて感じたことを述べてください。
- テーブルの速さについて感じたことを述べてください。
- 手の位置について感じたことを述べてください。
- その他、感じたことがあれば教えてください。

手順全体の所要時間は参加者によって異なったが、概ね90分程度であった。本実験は、東京大学大学院情報理工学系研究科の研究倫理審査委員会の審査番号 UT-IST-RE-231030-7 によって承認された手順に従って実施された。

2.7 評価手法

この実験では、先行研究 [4] に倣い、擬似二肢強制選択法 (pseudo-2AFC 法) を用いて DT を測定した。pseudo-2AFC 法は、リダイレクションゲインを変化させて刺激を繰り返し提示し、参加者に知覚した操作の大小を示すように求める手法である。物体のサイズは操作量に対してプロットされ、心理測定曲線が得られる。例えば、物体のサイズに関しては、「物体が大きくなった」または「物体が小さくなった」と回答するように求められた。物体のサイズが実際のサイズと一致する場合、「大きい」と「小さい」の回答数が等しくなると予想される。しかし、操作量が増加するにつれて、刺激を正しく知覚する可能性が高くなる。こ

で、フィッティング曲線はシグモイド曲線とし、25%と75%の地点を DT として設定する。オブジェクトの並進ゲインとオブジェクトのサイズゲインについては、「大きい」または「小さい」で回答してもらい、HR については「一致している」または「一致していない」で回答してもらった。オブジェクトサイズゲイン、手の動きのゲイン、およびオブジェクトの並進量の DT を評価指標として設定した。

3. 結果

このセクションでは、2AFC 法、質問票の結果について述べる。

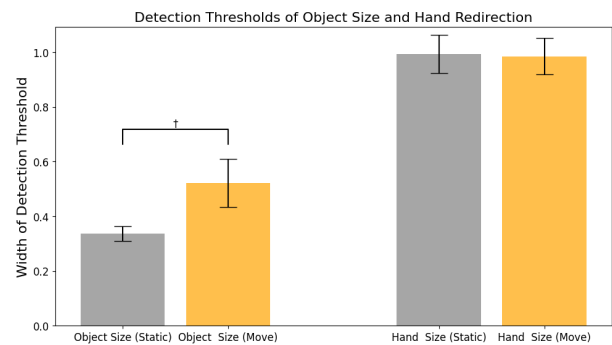


図 3: 動的条件と静的条件の比較を示す棒グラフ。左はオブジェクトサイズの知覚閾値、右は手の動きの知覚閾値を示す。

3.1 オブジェクトサイズの知覚閾値

全参加者の DT 幅 (75%に対応する閾値と25%に対応する閾値の差)の平均は、動的条件で0.521 ($SD = 0.385$)であり、静的条件で0.337 ($SD = 0.120$)であった。図3の左側にオブジェクトサイズのDTの範囲を示す。

動的条件と静的条件の間でシャピロウィルク検定を行った結果、正規性が確認されなかったため、有意水準を $\alpha = 0.05$ としてウィルコクソンの符号順位検定を行った結果、わずかに有意な差が見られた ($p = 0.0539$, $\text{cohen's } r = 0.32$)。この効果量は中程度から大であった。

3.2 手の動きの知覚閾値

手の動きに関して、フィッティングを行いDTを求めた。12人の参加者は、今回の実験で使用したゲインの最大/最小を超える閾値を示した。手の動きのDTの平均範囲は、動的条件で0.985 ($SD = 0.294$)、静的条件で0.993 ($SD = 0.308$)であった。

動的条件と静的条件の間でシャピロウィルク検定を行った結果、正規性が確認されなかったため、有意水準を $\alpha = 0.05$ としてウィルコクソンの符号順位検定を行った結果、有意差は確認されなかった ($p = 0.5791$, $r = 0.09$)。この効果量は小であった。

3.3 オブジェクト速度の知覚閾値

動的条件について、全参加者のDTの平均および標準偏差を以下に示す。下側DTは0.817 ($SD = 0.495$)、PSE

は 1.24 ($SD = 0.420$), 上側 DT は 1.68 ($SD = 0.392$), 閾値幅の平均は 0.865 ($SD = 0.306$) であった。

3.4 実験後インタビューの抜粋

以下に、質問ごとに分けて参加者の回答を抜粋する。

3.4.1 テーブルの大きさについて感じたことを述べてください。

- 物理的な物体が変化しているとは思わなかった (P16).
- 物理的な物体は 2 種類くらいあると思った (P18).
- バーチャルのテーブルが大きい時の方が小さい時よりも違和感がなかった (P15).

3.4.2 テーブルの速さについて感じたことを述べてください。

- 物体が大きいと速く感じた (P9).
- 速さについてはよくわからなかった (P6).

3.4.3 手の位置について感じたことを述べてください。

- リダイレクションのゲインが小さいと手に違和感を感じた (P1).

3.5 質問票の結果

IPQ と VEQ の結果に対して、動的条件と静的条件の間で有意水準 $\alpha = 0.05$ としてウィルコクソンの符号順位検定をしたところ、すべての項目で有意差は見られなかった。

SSQ によって計算された実験前の平均の Total Severity スコアは 3.12 ($SD = 4.11$) であり、実験後は 14.8 ($SD = 17.1$) であった。実験前後で、平均の Total Severity スコアは上昇した。

4. 考察

私たちは動いている物体を触覚フィードバックに用いると、触覚フィードバックが静止している場合に比べて、机のサイズに関する DT が変化するという仮説 (**H1**) と、手の動きの DT が変化するという仮説 (**H2**) を仮定した。

H1 に関して、本結果からサイズに関するゲインの DT が拡大することが示唆された。この事実は、H1 が支持される可能性を示唆している。また、上側 DT よりも下側 DT が拡大されていることが結果から示された。インタビュー結果によれば、物体が小さい場合により違和感を感じたユーザーが 12 名おり、大きい場合にはあまり違和感を感じなかったことが報告されている。よって、違和感がより大きい場合に、動くロボットを触覚提示に用いるとより DT を拡大させることができることが言える可能性がある。

H2 に関して、手の動きの DT は動作条件と静止条件で拡大がないことが示唆された。この事実は **H2** が支持されないことを示している。この結果の要因の一つに、DT に天井効果・フロア効果が見られたことがあげられる。本実験において 12 名のユーザーの DT が今回設定したゲインの範囲を超えた値になっており、その結果動作条件と静止条件の違いが小さくなっていることが原因と考えられる。

さらに、今回のロボットの移動速度が 0.2 m/s の条件下において、速度の DT が 0.82 と 1.68 であったことが明らか

になった。また、10 人のユーザーが物体の速度についてはわからなかったと述べており、触覚提示を行う物体が動いている場合に知覚速度を操作することが可能であることを示唆している。

5. むすび

VR における触覚提示においては、人やロボットなど動的な物体とのインタラクションが想定されるが、物体が移動している場合の DT はこれまでの HR 研究ではほとんど考慮されていなかった。本研究では、動的な物体を触覚フィードバックとして使用する際の手の動き、物体のサイズ、および物体の速度をゲインを用いて操作した際の効果を調査した。本研究の結果から、物体のサイズのゲイン操作に関して、動的条件と静的条件の間で平均 DT に有意な傾向が見られた。一方で、HR のゲインに関しては、有意な差は見られなかった。また、物体の速度に関しては、下限 DT は 0.82, 上限 DT は 1.68 であることがわかった。今後は、物体の速度が物体のサイズ知覚や HR に関する知覚に与える影響を調査したいと考えている。

謝辞 本研究の一部は、JSPS 科研費 (22K17929), JSPS 科研費若手研究 (22K17929) の助成を受けた。

参考文献

- [1] Mahdi Azmandian, Mark Hancock, Hrvoje Benko, Eyal Ofek, and Andrew 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, page 1968–1979, New York, NY, USA, 2016. Association for Computing Machinery.
- [2] Shaghayegh Esmaili, Brett Benda, and Eric D. Ragan. Detection of scaled hand interactions in virtual reality: The effects of motion direction and task complexity. In *2020 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*. IEEE, March 2020.
- [3] Judith Hartfill, Jenny Gabel, Lucie Kruse, Susanne Schmidt, Kevin Riebandt, Simone Kühn, and Frank Steinicke. Analysis of detection thresholds for hand redirection during mid-air interactions in virtual reality. In *Proceedings of the 27th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, VRST '21, New York, NY, USA, 2021. Association for Computing Machinery.
- [4] Andre Zenner and Antonio Kruger. Estimating detection thresholds for desktop-scale hand redirection in virtual reality. In *2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*. IEEE, March 2019.