



身体所有感に着目したリダイレクトハンドの知覚閾値の拡大可能性の検証

小川真輝¹⁾, 松本啓吾¹⁾, 鳴海拓志¹⁾

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

概要: VR 内の手の位置を現実とずらすリダイレクトハンド (RDH) の応用の幅を広げるには、その知覚閾値の拡大が必要である。本研究では、身体所有感の向上で RDH の知覚閾値が拡大するという仮説を立て、視体性感覚・視触覚同期の提示による影響を調査した。その結果、視触覚同期の事前提示で知覚閾値が拡大する可能性が確認された。他方、視覚の信頼度等が知覚閾値に影響を与える可能性も示唆され、更なる検証が求められる。

キーワード: リダイレクトハンド, 身体所有感, 知覚閾値, ラバーハンド錯覚

1. はじめに

バーチャルリアリティ (VR) 環境と同期した触覚提示を実現するために現実の静的なオブジェクトを利用する手法をパッシブハプティクスと言う。この中で、1つの物体で複数のバーチャル物体の触覚提示を行うといった柔軟な運用をするため、リダイレクトハンド (RDH) という手法が提案されている [1]。

RDH とは、人の空間知覚において視覚が優位に作用することを利用し、VR 内の手の位置をユーザが気付かない範囲で現実とずらして表示するものである。RDH の操作により、パッシブハプティクスへの応用を含め VR インタラクションの幅が広がることが期待される。また、リハビリ患者に対して VR で運動を大きく (あるいは小さく) 見せることで、リハビリの効果を高めるといった応用も期待される。

一方で、RDH は操作量が大きいほどユーザが気づきやすくなり、操作性や没入感が低下するという課題がある。[2] では、RDH を知覚できない範囲を具体的に示し、その範囲が限定的であることを指摘している。RDH を様々な用途に活用するために、RDH の知覚閾値を拡大することが求められている。RDH の閾値を拡大する方法として、抽象度の低い (リアルな) アバタを用いることで閾値が拡大できると報告されている [3]。バーチャルハンドに対する身体所有感が高まることで、現実の自分の手に対する注意が向きにくくなったことが、閾値拡大の要因として指摘されている。

そこで本研究では、身体所有感が RDH の閾値拡大に寄与しているという仮説のもと、身体所有感を生起する多感覚同期提示 (視覚体性感覚同期・視触覚同期) が RDH の閾値に与える影響を調査する予備的な検討を行った。視覚体性感覚同期については、体性感覚を通じて得る自己身体の運動情報と視覚を通じて得るアバタの運動情報が一致することで、アバタへの身体所有感が生じることが知られている。特に手に対して生じるものをバーチャルハンドイリュージョンという。VR におけるバーチャルハンドイリュージョ

ンは、手で把持するコントローラのトラッキングによって実現されることが多い。一方で、ユーザの手全体の動きをトラッキングして表示する方法もあり、[4] によれば、グローブ型のデバイスを用いたハンドトラッキングで、コントローラ使用時より高い身体所有感が生じた。これは手の位置に加え、指の姿勢まで含めた視覚的表示により、視覚体性感覚同期が強まったためと考えられる。しかし、RDH の知覚閾値に対し、視覚体性感覚同期 (特にコントローラ使用時とハンドトラッキング使用時の違い) が及ぼす影響については明らかではない。

また、視触覚同期については、ラバーハンドイリュージョン (RHI) が有名である [5]。これは、ラバーハンドと本物の手を同時に筆でなぞることにより、ラバーハンドへの身体所有感が生じるというものである。RHI では、ラバーハンドの存在する位置に自己位置感覚が移動する現象が知られていることから、RDH を適用するバーチャルハンドに視触覚同期を利用した身体所有感錯覚 (厳密には RHI と同一の系ではないが、以下ではこれについても RHI と呼ぶことにする) を引き起こすことで、知覚閾値が拡大することが予測される。一方、RHI の効果は手を動かすことによって減衰する (ただし完全に消える訳ではない) ことも報告されている [6]。この減衰が RDH 適用下でどのように生じるのか、そして知覚閾値にどのような影響を及ぼすのかは明らかでない。

2. 実験

2.1 実験参加者と実験環境

実験参加者は 6 名 (男性 5 名, 女性 1 名, 21-22 歳, 平均年齢 21.5 歳) であった。また、実験参加者は全員右利きであった。実験では Meta Quest2 とそのコントローラ、及びハンドトラッキングの機能を用いた。実験環境は unity(2019.4.33f1) で作成した。

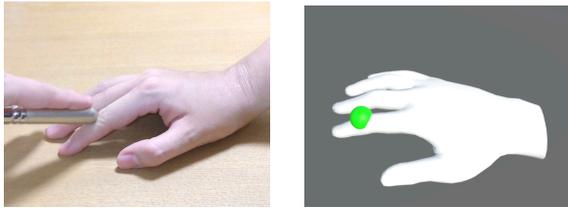


図 1: RHI 操作の様子 (左の写真が現実・右の写真が VR 内)

2.2 実験条件

視覚体性感覚同期の度合いの異なる条件として、コントローラを用いた条件とハンドトラッキングを用いた条件を比較した。視触覚同期の条件については、RHI を事前に生じさせる条件と、生じさせない条件とを比較した。具体的な RHI 操作としては、図 1 のように、実験参加者に右手を静置してもらい、筆の柄で人差し指の根本側から指先に向かってなぞる動作を 90 秒間繰り返した。同時に、VR 内でバーチャルハンドに球体が触れることで視触覚を同期させる。筆による刺激は実験者が行ったが、実験者の手のトラッキングにより VR 内で視覚的に同期した映像を提示している。これらの条件を比較するため、以下の 3 つの条件について参加者内比較を行なった。

- コントローラ条件
- ハンドトラッキング条件
- ハンドトラッキング+RHI 条件

RHI 操作を加える場合は、以下に説明する RDH の閾値を調べる一連の試行の前に一度だけ操作を加えた。また、3 つの条件の順序は参加者間で偏りのないよう調整した。

2.3 リダイレクションの手法

[2] の方法に倣い、基準点 (実験参加者の頭の真下に設定) からみた手の位置ベクトルの水平面内成分を回転させてリダイレクションを行なった。この回転角を操作角 α と呼ぶことにする。 $\alpha > 0$ で右方向、 $\alpha < 0$ で左方向にバーチャルハンドが移動する。この操作では、手の位置のみが移動し、姿勢については回転しない。

2.4 pseudo-2AFC

RDH の知覚閾値は、pseudo-2AFC 法で求めた。pseudo-2AFC 法では、リダイレクションの提示の後、実験参加者が知覚したリダイレクションの方向を二択で回答する。今回は水平面内の回転のみを調査の対象としたため、「左右どちらに手の運動がずれたか」を回答することとした。

pseudo-2AFC 法のタスクとして、実験参加者はまずバーチャル空間内で目の前の立方体に右手で触れるリーチングタスクを行う (図 2)。この時 RDH が適用されている。ただし実空間には対応する立方体は置かれておらず、触覚は提示されない。立方体に触れると、左右を回答するための矢印が出現し、実験参加者は左手 (リダイレクションの適用なし) で左右を選択して回答する。操作角 α は、-16 度から 16 度までを 4 度刻みで 9 通りの角度を用い、それぞれの角度について各条件で 8 試行ずつリーチングタスクと左右の

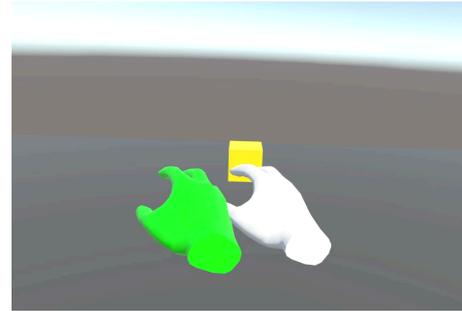


図 2: リーチングタスクの様子 (白い手がバーチャルハンド、緑の手が実際には表示されない現実の手)

回答を行なった。計 72 試行において、 α はランダムに提示された。

2.5 質問紙

身体所有感を測る質問紙として VEQ (virtual embodiment questionnaire) を、VR 環境での実在感を測る質問紙として IPQ (igroup presence questionnaire) を用いた。

2.6 実験手順

実験は以下の手順で行なった。

1. 実験内容に関する説明・同意を行う。
2. コントローラ使用・ハンドトラッキング使用それぞれの条件で実験タスクについての説明・練習を行う。
3. コントローラ条件・ハンドトラッキング条件・ハンドトラッキング+RHI 条件のそれぞれについて、pseudo-2AFC のタスクを 72 試行行う。各条件の試行終了後に質問紙 (VEQ・IPQ) に回答する。

2.7 実験の仮説

視覚体性感覚同期については、コントローラ条件とハンドトラッキング条件を比較する。ハンドトラッキングを用いた方が高い身体所有感が生起され、従って RDH の知覚閾値も大きくなると考えられる。視触覚同期については、ハンドトラッキング条件とハンドトラッキング+RHI 条件を比較する。RHI 操作を加えた方が高い身体所有感が生起され、従って RDH の知覚閾値も大きくなると考えられる。以上により、本実験の仮説は以下の通りである。

- 仮説 1: 身体所有感はコントローラ条件よりハンドトラッキング条件で強い
- 仮説 2: (仮説 1 に従い) 知覚閾値はコントローラ条件よりハンドトラッキング条件で大きい
- 仮説 3: 身体所有感はハンドトラッキング条件よりハンドトラッキング+RHI 条件で強い
- 仮説 4: (仮説 3 に従い) 知覚閾値はハンドトラッキング条件よりハンドトラッキング+RHI 条件で大きい

3. 実験結果

3.1 知覚閾値

各操作角 α に対して「右にずれている」と回答した割合をプロットしたものを感覚強度曲線としてフィッティングし

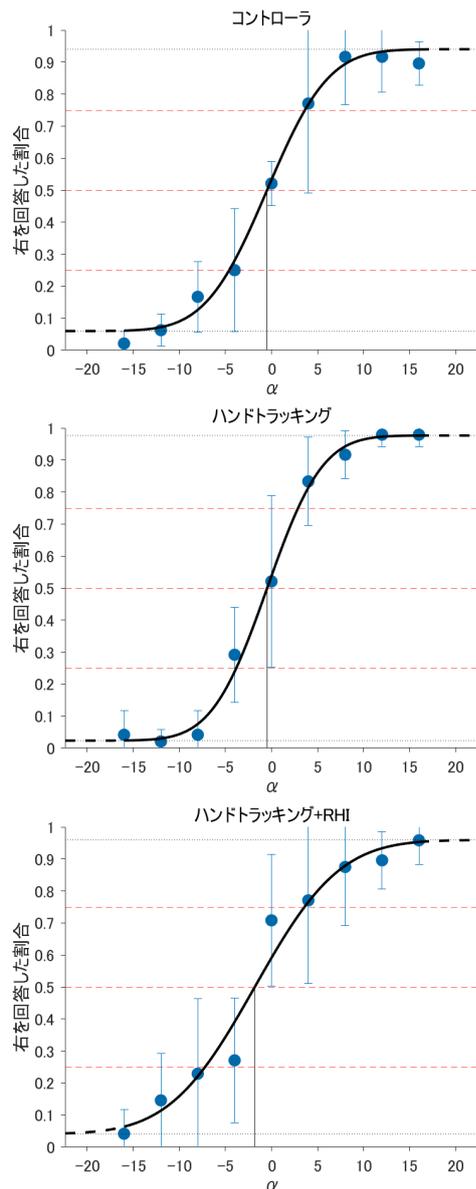


図 3: 各条件での閾値 (エラーバーは 95%信頼区間を表す)

表 1: 各条件での閾値 (c: コントローラ, h: ハンドトラッキング)

	c	h	h+RHI
25%	-4.59°	-3.82°	-7.21°
50%(PSE)	-0.48°	-0.47°	-1.81°
75%	3.63°	2.89°	3.58°
閾値範囲	8.22°	6.71°	10.80°

た。回答割合が 25%から 75%の間を知覚できない範囲としている。それぞれの条件について、参加者全体の結果を合わせたグラフが図 3 である。このグラフから算出した知覚閾値は表 1 のようになった。また、これとは別に参加者それぞれで各条件の知覚閾値を求めた結果、RDH を知覚できない範囲の平均は、コントローラ条件で 8.96° ($SD = 7.12$),

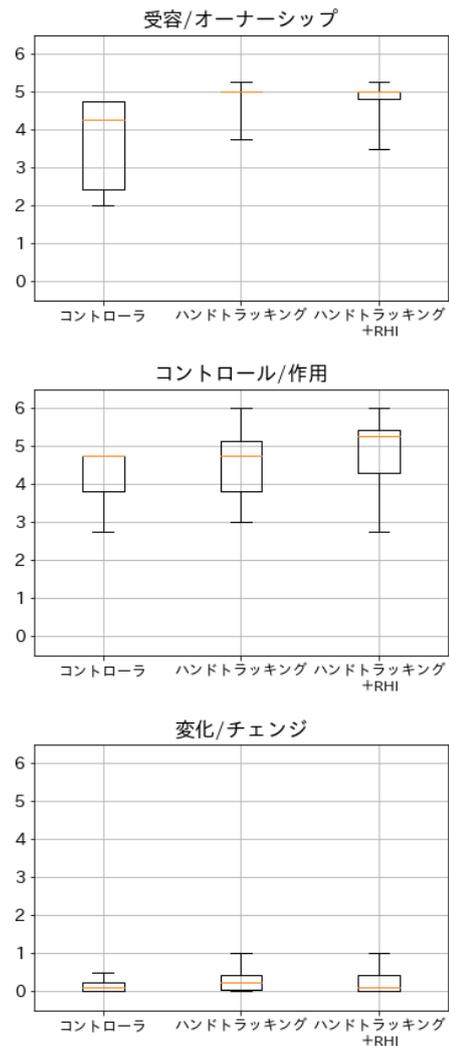


図 4: VEQ の結果

ハンドトラッキング条件で 6.64° ($SD = 5.17$), ハンドトラッキング+RHI 条件で 8.25° ($SD = 5.88$) となった。これらより、コントローラ条件よりハンドトラッキング条件で知覚閾値が小さい・ハンドトラッキング条件よりハンドトラッキング+RHI 条件で知覚閾値が大きい、という傾向が見られる。ただし、統計的な検定 (1 要因参加者内分散分析: 有意水準 $p < 0.05$) を行なった結果、条件間での有意差は確認されなかった。

3.2 質問紙

質問紙 VEQ については、図 4 のような結果になった。統計的な検定 (フリードマン検定及びウィルコクソンの符号順位検定: 有意水準 $p < 0.05$) の結果、VEQ の受容の指標で、コントローラ条件よりハンドトラッキング条件が有意に高い値を示した ($p = .031$)。その他では有意な差は確認されなかった。また、質問紙 IPQ の結果についても同様の検定を行なった結果、有意な差は確認されなかった。

4. 考察

実験の結果、身体所有感については一部の指標でハンドトラッキング条件がコントローラ条件より有意に高い値を

示した。これは仮説 1 を支持する結果であり、[4] による報告とも一致する。一方、仮説 3 を強く支持する結果は得られなかった。[6] によれば、RHI の効果は手の運動とともに減衰するため、今回のように一連のタスクの後で質問紙に回答する形式では、RHI 操作で身体所有感が生じていたとしても、質問紙ではそれを適切に測れなかった可能性がある。実際、実験終了後のインタビューにおいて「RHI 操作の直後は身体所有感が強かったが、徐々にその効果が薄れたと感じた」と回答した実験参加者もいた。RHI 操作後に繰り返す試行の回数を減らした実験などを行い、さらに検証する必要がある。

視覚体性感覚同期に関連した RDH の知覚閾値について、コントローラ条件よりハンドトラッキング条件で閾値が小さくなる傾向が見られた。これは、仮説 2 に反する結果である。原因としてはまず、今回の実験ではコントローラ条件とハンドトラッキング条件でトラッキングの手法が異なるため、トラッキング誤差の違いが影響を与えた可能性が考えられる。実際、「ハンドトラッキング条件で指が(誤差により)想定外の方向に動いた瞬間強い違和感を感じた」と回答した実験参加者もいた。さらに [4] によれば、身体所有感の大小に反して、ハンドトラッキングを用いた場合よりコントローラを用いた方が、時間効率を含めたタスクパフォーマンスが上がる事が知られている。今回の実験では、リーチングタスクにかかる時間を制限することはしなかったため、コントローラ条件では効率的にタスクが行われ、RDH 適用状態で運動する時間がハンドトラッキング条件より短くなり、その結果 RDH に気づきにくくなった可能性がある。また、普段からハンドトラッキングよりコントローラに慣れている実験参加者が多かったことも影響した可能性がある。一方、抽象度の低いアバタによる閾値拡大効果 [3] は、身体所有感ではなく、例えば視覚の信頼度向上など、他の要因が寄与していた可能性も指摘できる。これを踏まえて今後の実験では、視覚の信頼度などの条件も加えて RDH の知覚閾値に影響を与える因子を探る必要がある。

視触覚同期に関しては、RHI 操作を加えた方が知覚閾値が拡大される傾向にあった。これは仮説 4 を支持する結果である。先述の通り、RHI 操作による有意な身体所有感向上は認められなかったものの、それは運動による減衰のためである可能性があり、必ずしも仮説 4 に反するとは言えない。

5. おわりに

本研究では、RDH の閾値拡大手法を生み出すという目的のもと、身体所有感を生起する多感覚同期提示（視覚体性感覚同期・視触覚同期）が RDH の閾値に与える影響を調査した。実験では、pseudo-2AFC 法により RDH の知覚閾値

を計測し、コントローラを用いる条件とハンドトラッキングを用いる条件の比較、及び RHI 操作の有無による比較を行なった。6名の参加者内比較により、RDH の知覚閾値に有意な差は無かったものの、ハンドトラッキング条件よりコントローラ条件で閾値が大きく、RHI 操作を加えた方が加えない条件より閾値が大きいという傾向が確認された。今後は参加者数を増やして実験を行うことで今回確認された傾向についてさらに検証し、RDH の閾値拡大要因を特定するとともに、効率的な閾値拡大手法の提案を目指したい。

謝辞 本研究の一部は科研費 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)、および JST ムーンショット型研究開発事業 (JPMJMS2013) の助成を受けた。

参考文献

- [1] 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*, (San Jose California USA), pp. 1968–1979, ACM, May 2016.
- [2] A. Zenner and A. Krüger, “Estimating Detection Thresholds for Desktop-Scale Hand Redirection in Virtual Reality,” in *2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, pp. 47–55, Mar. 2019.
- [3] N. Ogawa, T. Narumi, and M. Hirose, “Effect of Avatar Appearance on Detection Thresholds for Remapped Hand Movements,” *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, vol. 27, pp. 3182–3197, July 2021.
- [4] L. Lin, A. Normoyle, A. Adkins, Y. Sun, A. Robb, Y. Ye, M. Di Luca, and S. Jörg, “The Effect of Hand Size and Interaction Modality on the Virtual Hand Illusion,” in *2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, pp. 510–518, Mar. 2019.
- [5] M. Botvinick and J. Cohen, “Rubber hands ‘feel’ touch that eyes see,” *Nature*, vol. 391, pp. 756–756, Feb. 1998.
- [6] M. P. M. Kammers, F. de Vignemont, L. Verhagen, and H. C. Dijkerman, “The rubber hand illusion in action,” *Neuropsychologia*, vol. 47, pp. 204–211, Jan. 2009.