



身体感覚と視覚情報にずれが生じる低遅延没入環境における ターゲットの加速度がユーザへ与える影響

Effects of Video Latency and Target Acceleration on Human Perception Against Physical Sensation
in Immersive Environments With Low Visual Feedback Delay

栃岡 陽麻里¹⁾, 早川 智彦¹⁾, 石川 正俊¹⁾

Himari TOCHIOKA, Tomohiko HAYAKAWA, and Masatoshi ISHIKAWA

1) 東京大学 情報基盤センター データ科学研究部門 (〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1, tochioka@ishikawa-vision.org)

概要: 100 ms 以下の低遅延没入環境であっても、映像遅延がタスクパフォーマンスを低下させると示した先行研究に加え、本研究では 1000 fps でユーザの手を任意の映像遅延を伴って投影する実験装置を用い、遅延環境下においてターゲットの加速度がユーザに与える影響を調査した。指定した加速度に応じ移動するターゲットをユーザがタップするまでの所要時間を計測し、ターゲットの加速度が大きいとタスクパフォーマンスが低下することを明らかにした。

キーワード: 映像遅延, 感覚統合, VR 心理学, マルチモーダル

1. はじめに

今日, COVID-19 の世界的大流行により, 人が直接触れる部分に当たる身近なヒューマンインターフェイス (HCI: Human Computer Interaction) の高度な実用化が社会的孤立を防ぐため緊要とされている [1]. 特に, 接触制限が設けられた生活空間で, ビデオ通話などに仮想現実 (VR: virtual reality) 技術を導入し, 限られたコミュニケーション情報に仮想現実感を与えるといった社会的接触を維持する技術の需要が拡大している [2]. そのような背景に伴い VR に没入するために用いられるヘッドマウントディスプレイ (HMD: head mounted display) のほか, Glass タイプやタッチスクリーン等, 三次元空間での身体動作を入力としたインタラクションを可能にする拡張現実 (AR: augmented reality) に応用可能なデバイス開発が急激に進んでいるが, 一方で入力する動作から画面上に出力されるまでに遅延が介在することが問題視されている. これは身体の入力動作がディスプレイ上でバーチャルに反映されるまでの入出力の間, コンピュータのシステム内部で生じる情報処理・情報通信に伴う事象であり, それらの過程で生じる遅延は完全に取り除くことは不可能である [3].

上記のような VR 映像提示デバイスに顕在化した遅延の影響は, ユーザに身体感覚と視覚情報のずれによる時間的不整合を起因とする感覚不統合を生じさせ, 仮想現実感を低下させることで VR 環境への没入感を減少させるだけでなく [4], ユーザの身体に胃のむかつき, 吐き気, 頭痛, 目まいや不快感などの影響を与える, VR 酔い (simulator sickness) を引き起こさせる [5]. これらの感覚不統合による影響を改善するために, ユーザが VR 上で知覚可能な遅延時間の閾値などを計測及び, 検証する研究が増加している.

2. 関連研究及び本研究の目的

VR デバイスの普及に伴い, タッチディスプレイ上の動くターゲットを自らの手で追従するインタラクションゲームなどが数多く登場している. Ng らの研究によると, 最小 1 ms に設定可能なタッチスクリーンに対してトラッキングタスクを用いた場合, 人は 10 ms 以下のわずかな遅延にも影響する [6]. このようなユーザの手がターゲットと同じスクリーン上に同期表示される VR デバイスを用い, 100 ms 以下の低遅延領域における映像遅延を調査する研究が行われている [8]. 一方で, 100 ms 以下の低遅延領域の遅延環境下において, 人の手を直接入力とした操作がユーザへ与える影響は調査されてこなかった.

そこで筆者らは, 没入環境においてユーザが身体入力で反映された手と, 実際に目視するスクリーン上に表示された仮想の手による, 身体感覚と視覚情報にずれが生じる 100 ms 以下の低遅延領域において, ステアリングのタスクパフォーマンスを調査した [10],[11]. しかし, この計測手法は映像遅延とステアリングタスクの特性に起因する影響のみ考慮されており, 実験で使用されたタスク内のターゲットは静止している状態であり, 実用の場面を想定すると, ターゲットが移動している状態に対応する知見を得ることが望ましいと考えられる. これまでは上述したようにタスクの複雑性・難易度において二次元空間での基礎的なアプローチであったが, 本論文では, フレームレートの値を 1000 fps に固定し, 身体感覚と視覚情報にずれが生じる低遅延没入環境において, 等加速度落下と反発を繰り返すターゲットをタップするタスクを設計することで, 二次元タスクにおけるターゲットの加速度に対する依存性を調査した.

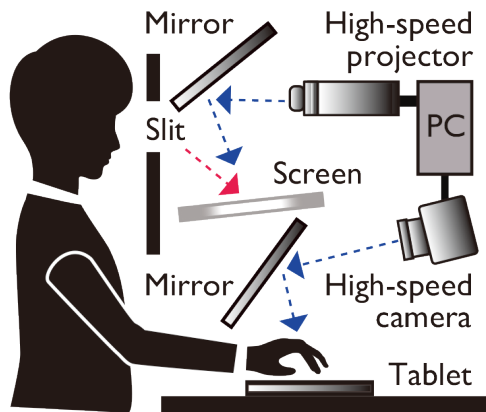


図 1: 使用した提案装置の模式図

3. 実験方法

3.1 被験者

被験者は健康な 20 代の男女 14 名（男性 7 名，女性 7 名，うち全員が右利きであり，全員が正常な視力を持つ健常者．メガネやコンタクトによる視力矯正を含む）であった．本実験は東京大学の実験倫理審査委員会（審査番号：UT-IST-RE-170712-1）に承認されたものであり，あらかじめ各被験者には実験の手法や実験全体の工程について簡潔に説明を行い，書面にて実験参加の同意を得た．

3.2 実験装置

本研究では，先行研究で調査されていなかった遅延とターゲットの加速度の関係を調査するため，システムの最小遅延時間の平均が 4.3 ms，標準偏差が 0.38 ms である図 1 に示した同一の実験装置を用いた [11]．本装置は手の動きを 1 ms ごとに撮像可能な高速カメラ（MIKROTRON 社 Eosens 4CXP）で撮像し，その映像がミラーを介して，カメラ同様に 1 ms ごとに投影可能な高速プロジェクタ（東京エレクトロデバイス社 DynaFlash）によって表示される．被験者は実際の自分の手を直視できない代わりに，スクリーン上に遅延を伴い投影される VR の手を図 3 のように覗き穴越しに見ることにより，机上に配置したタブレットを図 4 のように操作することで実験タスクを行った．インタラクティブな操作を可能とする VR 映像提示デバイスとしては，このシステムの最小遅延は現実的に十分小さいものである．また，コンピュータで待機時間を設けることで，本システムは約 4.3 ms 以上の任意の大きさの遅延を付与することが可能であるため，感覚統合における時間的不整合（視覚情報と身体の入力動作情報のずれ）を生じさせることができる．

3.3 実験課題：自由落下タスク

本実験ではフレームレートの値を 1000 fps に固定し，低遅延没入環境におけるターゲットの加速度がユーザに与える影響を調査した．被験者の手元に配置したタブレット（12.9 インチ iPad Pro，縦 2,048 px，横 2,732 px，264 ppi）を用い，図 2 のようにタブレットに表示された，任意の加速度で落下する円形ターゲット（半径 50 px，画面上の実寸 19mm）を指でタップするという自由落下の実験を行った．

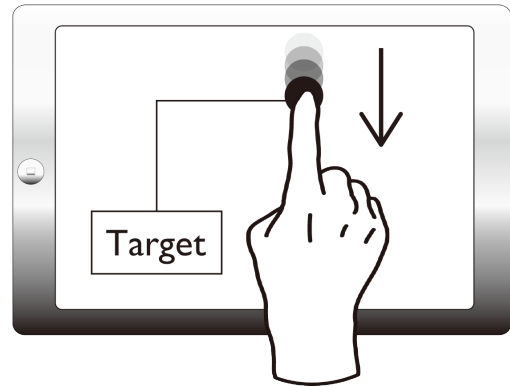


図 2: 使用したタスクの模式図

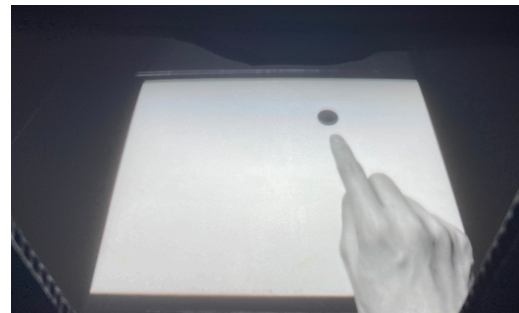


図 3: 被験者が覗き穴から見た図（VR の手）

本実験はターゲットが 2.45, 9.8 m/s^2 のいずれかの加速度で落下するタスクであり，ターゲットの出現する初期位置の y 座標は同一値に設定し，x 座標をランダムに設定した．また，タブレットのタップすることができないデバイス上の可動領域も考慮し，x 座標においては左右合わせてそれぞれ ± 200 px 余白ができるようにスペースを設定し，ミスタップ動作による誤った計測を防ぐために，タスク開始時は一本の指で右方向にスワイプする動作を採用した．

反発係数を 1.0 として，比較するターゲットの加速度ごとに 1 タスクずつの合計 2 タスク（2.45, 9.8 m/s^2 ）を設けた．設定した 9.8 m/s^2 は地球の重力加速度を参考にし，2.45 m/s^2 はその重力加速度の 4 分の 1 に値することから，基礎的な運動として先行研究と比較することを想定し決定した．

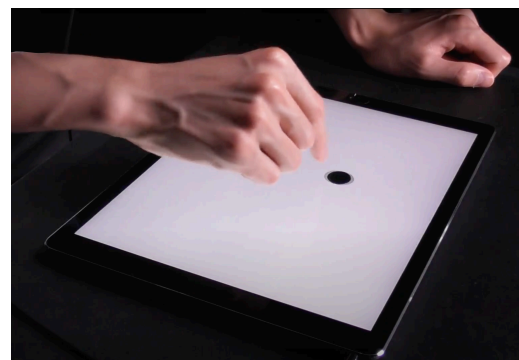


図 4: 反映される被験者手元（実際の手）

表示される遅延の組み合わせパターンは6段階(4.3, 24.3, 44.3, 64.3, 84.3, 104.3 ms)の遅延があり、各遅延モードの順番はランダムに出現する設定とした。それぞれの遅延を20回行うため $6 \times 20 = 120$ 試行の実験を行い、異なる加速度を2タスク計測するため、全体の合計で $2 \times 120 = 240$ 回試行した。

実験開始前、被験者は50秒程度の実験手順を説明する動画を見せられた。そして次に記す4点を実験監督者から指示された。

1. 画面の中のターゲット(黒丸)を右手の人差し指でタップして消すこと。
2. 正確にできるだけ早く出現したターゲットをタップすること。
3. 失敗した場合はもう一度タップすること。
4. 体性感覚ではなくスクリーンに投影される視覚情報をもとにタップすること。

さらに実験環境に慣れるために、被験者は実験開始前に3分間、4.3 msの遅延の下で実際にタスクの練習を行なった。実験中、被験者はノイズキャンセリングを適用したヘッドフォンを装着し外部の音から遮断され、各タスク60試行ごとに3分間の休憩を取った。全体の実験時間は60~70分程度であり、タスクパフォーマンスの個人差によりばらつきが見られた。

3.4 実験評価：タスクの所要時間によるパフォーマンス

本実験では、自由落下タスクを行う被験者のパフォーマンスを評価するために、各タスクにかかった時間を計測し、その所要時間の数値をタスクパフォーマンスとして評価した。

4. 実験結果

フレームレートの値を1000 fpsに固定した低遅延没入環境下で計測した、遅延時間に対する、ターゲットの加速度による各被験者のタスクパフォーマンスの関係を順に図5,6に示す。なお、パフォーマンスは各被験者が1つのタスクにかかった所要時間で評価している。図5に、本実験で調査した遅延時間とターゲットの加速度が 2.45 m/s^2 であるパフォーマンスの値を示す。そして図6に、ターゲットの加速度が 9.8 m/s^2 であるパフォーマンスの値を示す。

図5,6より、ターゲットの加速度の大きさに対するパフォーマンスを被験者ごとに比較した結果、各被験者のタスクパフォーマンスには個人差があることが確認できた。

図7に、本実験で調査した遅延時間とターゲットの加速度による各被験者の各タスク $2.45, 9.8 \text{ m/s}^2$ ごとの所要時間のパフォーマンスの平均値を示す。図7より、4.3 msと24.3 msの領域間はパフォーマンスの変化量が比較的緩やかであり、44.3 ms以降は変化量の傾きが増加する傾向にある。VR上の映像遅延が内在する空間において、ターゲットの遅延がタスクパフォーマンスに影響を及ぼす閾値は24.3~44.3 msであると考えられる。

この結果より、 2.45 m/s^2 (青線)と比べ、加速度が大きく上昇している 9.8 m/s^2 (赤線)では、44.3 ms以降にターゲットの加速度がタスクパフォーマンス(タスク所要時間)に影響を及ぼすことが判明した。また、44.3 msまでタスクパフォーマンスの平均遅延が最大で2.29 ms以内であり差異がわずかであった。一方で44.3~105 msにおいて、加速度の大きさに伴い遅延量が大きくなるほど、ユーザのタスクパフォーマンスの平均遅延が最大で6.64 ms以内であり、大きく低下していくことが確認された。一方で、図7より全ての遅延時間の実験条件において、加速度が大きい場合には特に分散が大きくなる傾向があるため、今後平均値のみによって議論を可能とするべく、被験者数を増やすことや実験手法の見直しが必要と考えられる。

5. 結論

本研究では、低遅延没入環境においてユーザの仮想の手が反映されるまでの映像遅延時間とターゲットの加速度がユーザのタスクパフォーマンスに与える影響について、フレームレートの値を最大1000 fpsに固定し、ターゲットの加速度を $2.45, 9.8 \text{ m/s}^2$ という異なる2タスクに設定することで検証した。その結果、ターゲットの加速度が大きい場合、映像遅延が生じる際のユーザタスクパフォーマンスの低下が大きい傾向があることがわかった。また、被験者間のタスクパフォーマンスに個人差があり、それらは遅延時間とターゲットの加速度の組み合わせの順番、及び日常生活空間におけるタッチディスプレイデバイスの使用頻度による順応などが関連していると推測される。

本成果により、VR上の身体を入力動作としたターゲットをトラッキングするインタラクシオンゲームや、非接触型コミュニケーションに仮想現実感を付与するマルチモーダルなど、次世代のVR映像提示デバイスの基盤開発に寄与できることが期待される。今後は本成果に基づき、さらに被験者を増やすことにより分散を小さくすることや、異なる加速度・遅延条件の組み合わせを細分化設定し実験を進めることで、VR映像提示デバイスにおけるユーザのタスクパフォーマンスに関して、遅延時間とターゲットの加速度がユーザに与える影響の範囲を明らかにし、VR映像提示デバイスにおける閾値の妥当性を多角的に検証する。

参考文献

- [1] Brandon Hang, Sara Loucks, Pooja Patel, Kimberly Wiseman, and Javier Gonzalez-Sanchez. "Exploring Affect Recognition in a Virtual Reality Environment," In ACM International Conference on Interactive Media Experiences (IMX '21). Association for Computing Machinery, pp. 326—328, 2021.
- [2] Alexander Toet, Hans Stokking, Tessa Klunder, Zeph M.C. van Berlo, Bram Smeets, and Omar Niamut. "Augmented Reality-Based Remote Family Visits in Nursing Homes," In ACM International Conference

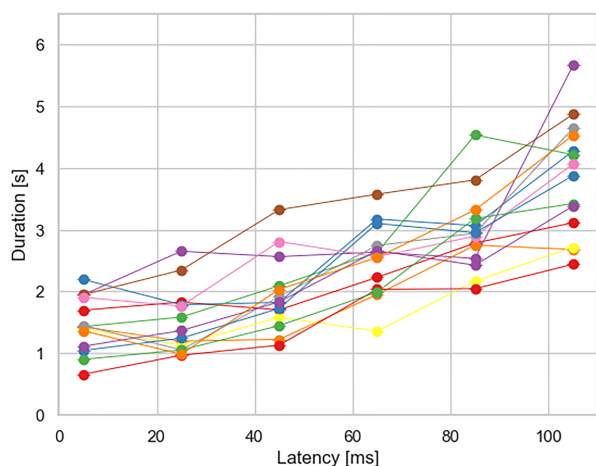


図 5: 各被験者の遅延時間と 2.45m/s^2 加速度タスクの関係

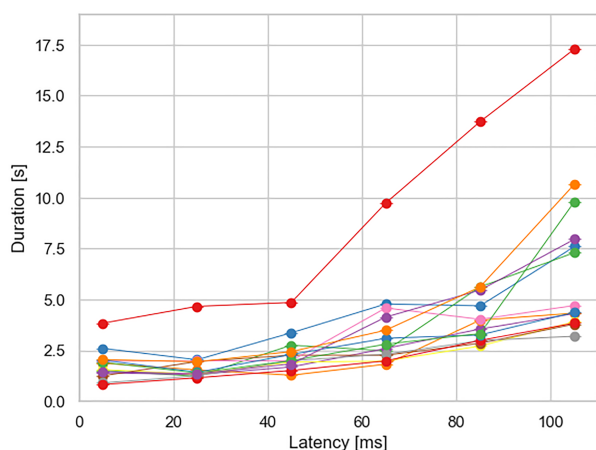


図 6: 各被験者の遅延時間と 9.8m/s^2 加速度タスクの関係

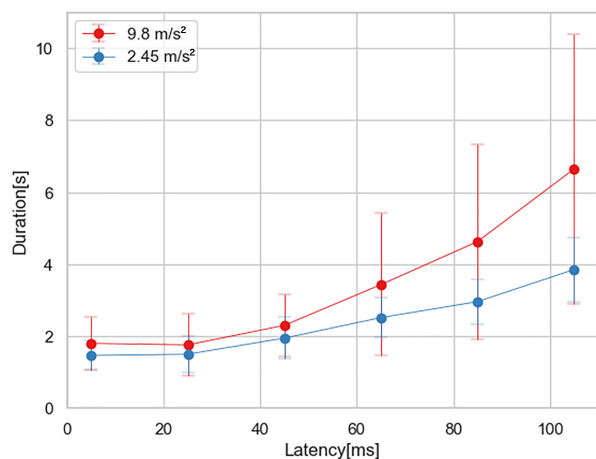


図 7: 各タスクの遅延時間とパフォーマンスの平均値, エラーバーは標準誤差

- on Interactive Media Experiences (IMX '21). Association for Computing Machinery, pp. 258–263, 2021.
- [3] Papadakis, Giorgos, Katerina Mania, and Eftichios Koutroulis. “A system to measure, control and minimize end-to-end head tracking latency in immersive simulations,” Proceedings of the 10th International Conference on Virtual Reality Continuum and Its Applications in Industry, ACM, 2011.
 - [4] Robert S. Allison, Laurence R. Harris, and Michael Jenkin. “Tolerance of temporal delay in virtual environments,” In the Virtual Reality 2001 Conference, pp. 247–254, 2001.
 - [5] Moss, Jason Austin, Jon Salley, James Coats, Julie Bold, Krysten Muth, Eric.. “The effects of display delay on simulator sickness,” Displays 32.4, pp. 159–168, 2011.
 - [6] Albert Ng, Julian Lepinski, Daniel Wigdor, Steven Sanders, and Paul Dietz. “Designing for low-latency direct-touch input,” Proceedings of the 25th annual ACM symposium on User interface software and technology, ACM, 2012.
 - [7] Friston, Sebastian, Per Karlström, and Anthony Steed. “The effects of low latency on pointing and steering tasks,” IEEE transactions on visualization and computer graphics 22.5, pp. 1605–1615, 2016.
 - [8] 門脇拓也, 丸山三智佳, 早川智彦, 松澤直熙, 岩崎健一郎, 石川正俊. “身体感覚と視覚情報にずれが生じる没入環境における低遅延な映像のユーザーへの影響,” 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 24 巻, 1 号, pp. 23–30, 2019.
 - [9] 柄岡陽麻里, 早川智彦, 門脇拓也, 池田遼, 石川正俊. “身体感覚と視覚情報にずれが生じる低遅延没入環境におけるフレームレートが人へ与える影響,” 第 24 回日本バーチャルリアリティ学会大会／講演論文集, 4C-5. 2019.
 - [10] Himari Tochioka, Haruka Ikeda, Tomohiko Hayakawa, and Masatoshi Ishikawa. “Effects of Latency in Visual Feedback on Human Performance of Path-Steering Tasks,” The 25th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology. VRST, 2019.
 - [11] S. Friston, P. Karlström and A. Steed, “The Effects of Low Latency on Pointing and Steering Tasks,” in IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, vol. 22, no. 5, pp. 1605-1615, 1 May 2016, doi: 10. 1109/TVCG. 2446467. 2015.
 - [12] MacKenzie, I. Scott, and Colin Ware. “Lag as a determinant of human performance in interactive systems,” Proceedings of the INTERACT'93 and CHI'93 conference on Human factors in computing systems. ACM, 1993.