



# 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

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

栃岡 陽麻里<sup>1)</sup>, 早川 智彦<sup>1)</sup>, 門脇 拓也<sup>1)</sup>, 池田 遼<sup>1)</sup>, 石川 正俊<sup>1)</sup>

Himari TOCHIOKA, Tomohiko HAYAKAWA, Takuya KADOWAKI,  
Haruka IKEDA, and Masatoshi ISHIKAWA

1) 東京大学 情報理工学系研究科 (〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1, himari\_tochioka@k2.t.u-tokyo.ac.jp)

**概要:** 自ら動作させた手が映像として投影される没入環境において, 最大 1000 fps の投影をすることで, 100 ms 以下の遅延がパフォーマンスに与える影響を検証した. 結果, 高フレームレート条件下で, 遅延に伴うパフォーマンスの低下傾向が緩やかになることが判明した. 今後は試行回数を増やし条件を細分化することで, 映像提示デバイスにおける人のパフォーマンス性能に関して, フレームレートが与える影響の標準化を目指す.

**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, 仮想現実 (VR: virtual reality) に関するデバイスの需要拡大を背景として, VR へ視覚的・聴覚的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, Grass タイプやタッチスクリーン等, 三次元空間での身体の動きを入力としたインタラク션을可能にする拡張現実 (AR: augmented reality) に応用可能なデバイスが開発されている.

このようにデバイス開発が多角的に進む一方で, インタラク션을可能とする VR 映像提示デバイスにおいて, 入力動作から画面上に出力されるまでに遅延が発生していることが問題点として挙げられる. これはデバイス使用者の身体の動きによって入力した動作が, ディスプレイ上でバーチャルに投影された手に出力として反映されるまでの間, コンピュータの情報処理や通信に伴いシステム内部で生じるものであり, 完全に取り除くことはできない [1].

上記のようなインタラクティブな映像提示デバイスにおける, 顕在化した遅延の影響は, デバイス使用者の視覚と感覚のずれによる時間的不整合性を生じさせ, パフォーマンスの低下だけでなく, 人体に悪影響を及ぼすことが知られている. 例えば, 遅延による身体感覚と視覚情報のずれにより感覚不一致をデバイス使用者が知覚することで, 感覚統合における没入感が低下することや [2], VR 及び AR デバイスにおいて遅延が介在することが要因となり, 胃のむかつき, 吐き気, 頭痛, 目まいや不快感などを引き起こす VR 酔い (simulator sickness) と呼ばれる症状が挙げられる [3]. これらの感覚のずれによる影響を計測及び改善す

るために, 次世代の VR・AR デバイス開発の基盤として, 人が知覚可能な遅延時間の閾値などを検証した研究が増加している.

## 2. 関連研究及び本研究の目的

最小 1 ms に設定可能なタッチスクリーンに対してドラッグタスクを用いた Ng らの研究によると, 人は 10 ms 以下のわずかな遅延をも知覚する [4]. 入力する指とターゲットがスクリーン上に同期して表示されるタッチスクリーンで構成された実験におけるデバイス環境下では, 100 ms 以下の低遅延領域における映像遅延に関する調査が近年行われている. しかし, VR 上で人の手を直接入力として用いたタスクにおいて, 100 ms 以下の低遅延領域の遅延が人へ与える影響を評価した研究はわずかであった.

門脇らは, VR を想定した没入感覚が高い環境において, デバイス使用者が身体動作で入力したバーチャルに投影された手に対する身体感覚と, 実際に目視するスクリーン上の視覚情報に遅延が現れる現象を 100 ms 以下の低遅延領域において, 遅延がデバイス使用者のパフォーマンスへ与える影響を調査した [6]. しかし, この計測手法は映像遅延の影響のみ考慮されており, 実験で使用されたシステム内部の設定により遅延量が大きくなるほど, フレームレートの低下が生じる (遅延が付与されると連動し, フレームレートに負荷がかかる) 周期的な遅延生成を行っていた. そのため, フレームレートに着目した遅延が人に与える影響については十分に解明されていないといえる.

本論文では, フレームレートの値を 1000 fps に設定し,

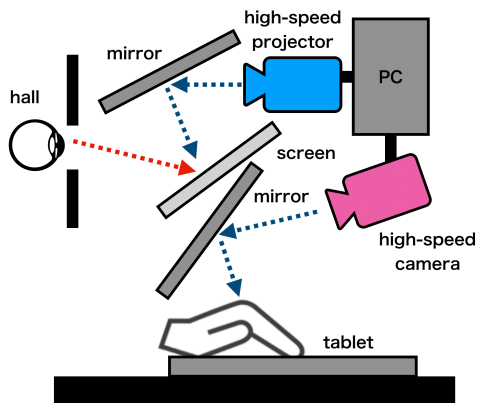


図 1: 使用した提案装置の模式図。

異なる大きさのフレームレートを介した遅延について調査した門脇らの実験結果と比較し、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、フレームレートが人へ与える作用を検証する。

### 3. 実験方法

#### 3.1 被験者

被験者は健康な男女 8 名（男性 4 名、女性 4 名、平均年齢  $25 \pm 4.1$  歳。うち 2 人の利き手が左、全員が正常な視力を持つ健康者。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、門脇らの結果と比較するため、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 [6]。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（東京エレクトロニクス社 DynaFlash）によって表示される。デバイス使用者は、自らの手を直接目視確認できない代わりに、スクリーン上に遅延を伴い投影される自らの手の映像を、図 2 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操作することで、実験タスクを行った。

VR 上でインタラクションを可能とする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と考えられる。また、コンピュータで待機する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与えることが可能であるため、デバイス使用者の視覚情報と、動作を入力する身体情報にずれ（感覚統合における時間的不整合）を生じさせる。

#### 3.3 実験課題：ポインティングタスク

本研究では、フレームレートの値を 1000 fps で設定し、没入環境における遅延がスループットに与える影響を調査した。一方、門脇らはフレームレートを低下させた値で同

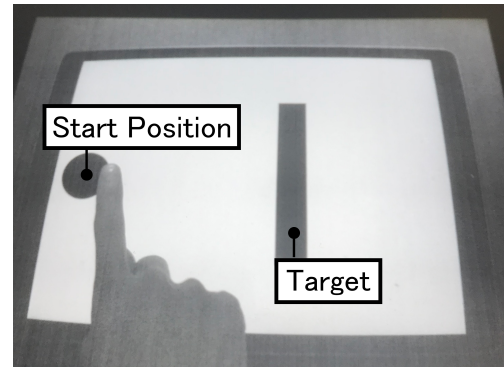


図 2: 被験者が覗き穴から見た図。

条件の実験をしたことから、結果比較をするため本実験においてフレームレート以外の実験条件をこれと統一する。

本研究では、被験者の手元のタブレット（12.9 インチ iPad Pro）を用いて、タブレット画面の利き手と逆側に固定された丸状の開始ターゲットをタップしてから、利き手側に表示される四角形状の目標ターゲットをタップするポインティングタスクの実験を行った。また両ターゲットはタブレットの短い辺の垂直二等分線上に存在する。ターゲット間の距離は 200, 300 pixel の 2 通り、目標ターゲットの幅は 960, 1440, 2160 pixel の 3 通りであった。これは MacKenzie の実験条件を参照した [7]。

表示される組み合わせパターンは 6 通りであり、実験の 1 試行においてシステムの遅延は固定し、18 回のタスクを行った。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 5 回行うため 30 試行の実験を行い、全体の合計で  $18 \times 30 = 540$  回のタスクを試行した。また、実験環境に慣れるために、被験者は実験開始前に 2~3 分程度、4.3 ms の遅延の下で実際にタスクの練習を行った。全体の実験時間は 40 分程度であり、10 試行ごとに休憩を 3 分程度設けた。被験者は身体感覚ではなく、スクリーン上の視覚情報を元に正確にできるだけ早く、出現したターゲットを一本の指でタップするように指示され、実験中イヤーマフの装着により音を遮断された。

#### 3.4 実験評価：フィッツの法則によるパフォーマンス

本実験では、ポインティング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、ユーザインタフェースの応用研究において用いられることの多い、以下によって定式化されるフィッツの法則を適用する。

$$MT = a + bID, \quad (1)$$

$$ID = \log_2 \left( 1 + \frac{D}{W} \right). \quad (2)$$

式 (1), (2) における  $MT$  (movement time) および  $ID$  (index of difficulty) は、それぞれタップするまでに動いた時間とタスクの目標到達における難しさを表し、 $D, W$  はそれぞれ両ターゲット同士の距離、目標ターゲットの幅とする。 $a, b$  は定数項と係数である。

また  $W$  は  $We = 4.133\sigma$  を使用することが良いとされる [8].  $We$  は有効なターゲットの幅を意味し,  $\sigma$  はある  $W, D$  におけるタスクにおいて, タップした点と開始ターゲットの距離の標準偏差である.  $We$  を用いた  $ID$  を  $ID_e$  と定義する.  $TP$  の単位は bps (bits per second) である.

ユーザーのパフォーマンスを表す指標であるスループット  $TP$  (throughput) は以下のように定義される [8].  $x$  は  $W, D$  の組み合わせの個数を表す. 本実験では前述したように 6 通りであった.

$$TP = \frac{1}{x} \sum_{j=1}^x \frac{ID_e e_{ij}}{MT_{ij}}. \quad (3)$$

#### 4. 実験結果

フレームレートの値を最大 1000 fps 及びシステム上のフレームレートの低下を除去した環境で, 遅延時間と各被験者のスループットとの関係を図 3 に示す. システムの遅延の大きさに対するスループットのプロットを被験者ごとに平均した結果, 各被験者のスループットには個人差があることが確認でき, 各タスクの困難性などが関連していると推測される. また, 外れ値に該当し, 除外した被験者は左利きであった. 図 4 より, 映像遅延が内在する VR 環境において, フレームレートの大きさが人の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. 4.3 ms と 24.3 ms の領域間は  $TP$  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激しく減少している.

図 5 に, 本実験で調査したフレームレートの低下有り (門脇らの実験) とフレームレートの低下なし (本実験, 1000 fps) で比較した遅延時間とスループットの平均値を示す. この結果より, 1000 fps の結果 (赤線) と比べ, フレームレートが低下していく条件 (青線) では, 24.3~44.3 ms の間に著しくパフォーマンスが低下していくことがわかった. 一方, それぞれのスループットのオフセットが異なる結果となり, 変化の度合いを比較を見やすくするため, 隣接する遅延条件の計測点同士の割合を図 6 で可視化した. その結果, 映像遅延が生じる際にフレームレートが低下しない本実験の結果の方が, 人のパフォーマンスの低下が緩やかであることが確認された.

#### 5. 結論

本研究では, 高い没入環境において自ら動作させた手が映像として, 投影されるまでの遅延が人の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 の範囲で設定することによる検証を行った. その結果, フレームレートが高い場合に, 遅延が生じる際の人のパフォーマンスの低下率が緩和されることが判明した. 今後は本成果に基づき, さらにフレームレートの種類を増やして実験を行うことで, 映像提示デバイスにおける人のパフォーマンス性能に関してフレームレートが与える影響の標準化に寄与できると考えられる.

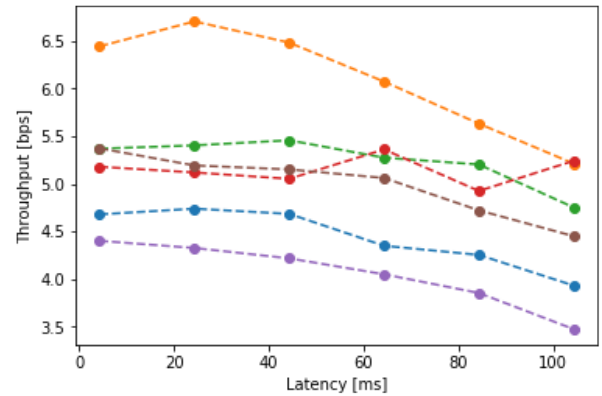


図 3: 各被験者の遅延時間とスループットの関係 (フレームレートの低下なし).

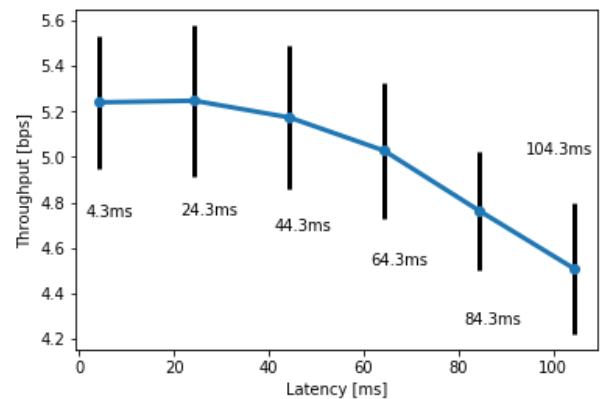


図 4: 遅延時間とスループットの平均値. エラーバーは標準誤差 (フレームレートの低下なし).

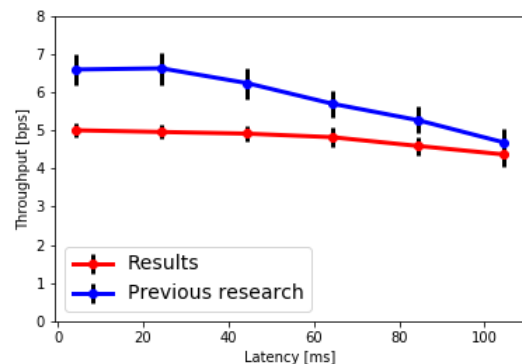


図 5: フレームレートの低下有り (門脇らの実験 [6]) とフレームレートの低下なし (本実験) で比較した, 遅延時間とスループットの平均値, エラーバーは標準誤差.

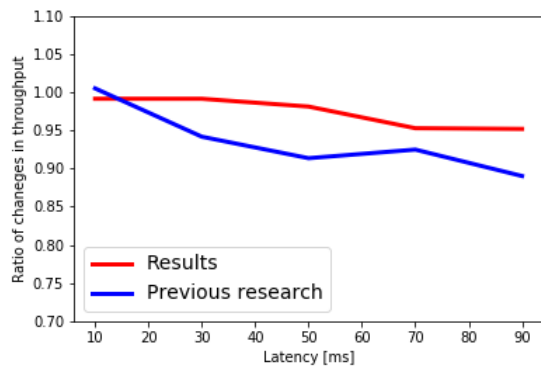


図 6: 青：門脇らの実験 [6] と、赤：フレームレートの低下のない本実験を比較した、隣接遅延条件間の変化率。

#### 参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] Moss, Jason D., et al. "The effects of display delay on simulator sickness," Displays 32.4, pp. 159-168, 2011.
- [4] Ng, Albert, et al. "Designing for low-latency direct-touch input," Proceedings of the 25th annual ACM symposium on User interface software and technology, ACM, 2012.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Soukoreff, R. William, and I. Scott MacKenzie. "Towards a standard for pointing device evaluation, perspectives on 27 years of Fitts' law research in HCI," International journal of human-computer studies 61.6, pp. 751-789, 2004.