



身体感覚と視覚情報にずれが生じる没入環境における 映像遅延のユーザーパフォーマンスへの影響に関する研究

門脇拓也¹⁾, 丸山三智佳¹⁾, 早川智彦¹⁾, 松澤直熙¹⁾, 岩崎健一郎¹⁾, 石川正俊¹⁾

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, takuya_kadowaki@ipc.i.u-tokyo.ac.jp)

概要: 本研究では, 視覚情報と身体感覚の間にずれが生じる没入環境において, 映像遅延がユーザーのパフォーマンスに与える影響について調査した. 最小遅延の平均が 4.3ms, 標準偏差が 0.38ms であり, 高速カメラと高速プロジェクタからなる任意遅延時間制御可能な入出力システムを開発し, 従来研究では未調査の低遅延領域のパフォーマンスの探索を可能にした. 10 人の被験者に対して, フィッツの法則に基づくポインティングタスクを実施し, 24.3ms から 44.3ms の間にパフォーマンスが減少し始める領域が存在することを明らかにした.

キーワード: VR 心理学, マルチモーダル・クロスモーダル, 入出力デバイス

1. はじめに

近年, タッチスクリーンやヘッドマウントディスプレイ (HMD), Grass タイプのディスプレイなどの新たな映像提示デバイスが登場している. 身体の動きを入力として 3D 空間とのインタラクションを可能とするデバイスも数多く開発されている. しかし, インタラクティブな映像提示デバイスには操作に対する映像の表示 (応答) に遅延が内在している. 遅延はコンピューターシステムにおける情報処理や通信によって生じ, 完全に遅延を 0 にすることはできない [1]. そして遅延がユーザーに対して様々な面で悪影響を与えることが知られている. 例えば, AR や VR 技術において遅延が発生すると, ユーザーの没入感が低下することや [2], 遅延に対する違和感は「simulator sickness」と呼ばれる現象の原因にもなる [3]. 上記のことから映像提示における遅延は重要な研究対象になっており, 遅延の大きさとユーザーのパフォーマンスの関係や, ユーザーが知覚可能な遅延の閾値などを調査した研究が数多くなされている.

Ng らは最小 1ms の低遅延なタッチスクリーンに対してドラッグタスクにおける遅延の影響を調査し, ユーザーは 10ms 以下の遅延でも知覚可能であることを明らかにした [4]. しかしタッチスクリーンの場合, 入力となる指とスクリーン上のターゲットが同時に見えるため常に比較可能であり, 明示的に遅延を知覚しやすい. また Friston らはマウスを入力デバイスとして, ポインティングタスクを行い 100ms 以下の低遅延領域におけるユーザーのパフォーマンス性能をフィッツの法則を用いて評価している [5].

上記のように様々なモダリティにおける低遅延領域の遅延の影響が調査されており, また VR 空間における遅延の

影響も調査されている. Nelson らは HMD を装着し, 50ms または 100ms の遅延がバーチャルな物体を追従する能力に影響を与えると報告している [6]. Ware らは, 被験者に 3D メガネを装着させ, ディスプレイ上の 3D 空間においてポインティングタスクを行わせた [7]. しかし従来の研究において, 100ms 以下での詳細な調査は不十分である.

また HMD を装着した場合の低遅延の影響を調べた研究として, Kawamura らの研究がある [8]. 首振り運動における映像提示遅延の, 片足立ちするユーザーの安定性に対する影響について調査している. 補正を加えることで, 1ms という最小遅延を達成し, 1ms から 66ms の遅延の範囲において評価実験を行っている. しかし入力が手やマウスなどの自由度の高いマニピュレーターではなく首振り運動だけに制限されている.

本研究では, VR 空間を想定した環境において, ユーザーが入力をするマニピュレーター (手) に対する身体感覚と, その視覚情報に遅延が生じ, かつ 100ms 以下の詳細な低遅延領域を対象としている. よって上記のようなモダリティにおける, 遅延のユーザーの手元の動きのパフォーマンスへの影響を調査する.

2. 実験方法

2.1 被験者

被験者は健康な男女 10 名 (男性が 8 名, 女性 2 名, 平均年齢 24 ± 1.2 歳) であった. 全ての被験者が右利きであり, 正常な視力を持つ健常者であった. この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) に認証されたものであり, 被験者には事前に実験の方法などの説明を行い, 書面にて実験参加の同意を得た.

2.2 実験装置: 提案装置とその最小遅延

図 1 のような実験装置を用いた. ユーザーに入る視覚情報とシステムの入力となる身体感覚にずれが生じる環境を

Takuya Kadowaki, Michika Maruyama, Tomohiko Hayakawa, Naoki Matsuzawa, Kenichiro Iwasaki and Masatoshi Ishikawa

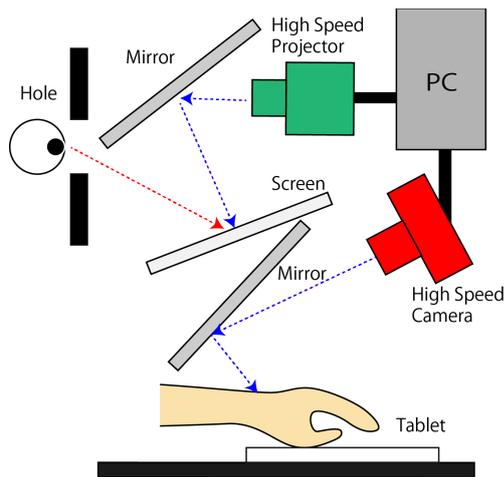


図 1: 本研究で用いた提案装置の模式図

構築するため、光真坊らの研究における実験装置のような、手の動きをカメラで撮り、その映像をミラーを介して、映像提示デバイスによって表示する実験装置を開発した [9]。カメラは 1ms ごとに撮像可能な高速カメラ（MIKROTRON 社 Eosens 4CXP）を用い、映像提示デバイスとしては投影までの遅延が約 3ms であり 1ms ごとに投影可能な高速プロジェクター（東京エレクトロデバイス社 DynaFlash）を用いた。ユーザーは現実の自らの手を見ることはできず、覗き穴越しにスクリーン上に投影された仮想的な自らの手を見ながら、机上にあるタブレットを操作した。

予備実験として、本実験装置の遅延最小値を物理的に計測するため、カメラの画角内で LED を点灯し、LED が点灯してからプロジェクターが投影されるまでに要した時間を計測した。50000fps の photron 社 FASTCAM シリーズで撮影し、合計で 50 回計測し、解析した結果、システムの最小遅延時間は、平均 4.3ms、標準偏差 0.38ms と判明した。このシステムの最小遅延は、リアリティのあるインタラクティブな映像提示デバイスとしては十分小さいものであると考えられる。また、PC 上で待ち時間を設けることで、本システムは約 4.3ms 以上の任意の大きさの遅延を与えることが可能である。

2.3 実験課題：ポインティングタスク

被験者の手元のタブレット（12.9 インチ iPad Pro）を用いて、ポインティングタスクの実験を行った。本研究のポインティングタスクとは、タブレット端末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ものである。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。

被験者はできるだけ早く、正確に目標ターゲットをタップするように指示された。

ターゲット間の距離 D は 200, 300pixel の 2 通り、目標ターゲットの幅 W は 960, 1440, 2160pixel の 3 通りであった。これは MacKenzie の実験における条件を参照した [10]。それぞれの組み合わせは、6 通りであり、ID の種

類は重複をするため 4 通りとなった。実験の 1epoch においてシステムの遅延は固定し、 $6 \times 3 = 18$ 回のタスクを行った。6 段階 (4.3ms, 24.3ms, ..., 104.3ms) の遅延があり、各遅延を 5 回行うため、合計で 30epoch の実験を行なった。また各遅延モードの順番はランダムとした。全体の合計で $18 \times 30 = 540$ 回のタスクを行なった。また実験システムに慣れるために、実験を開始する前の 2-3 分の間、4.3ms の遅延の下で練習を行なった。全体の実験時間は 40 分程度であった。

2.4 実験評価：フィッツの法則によるパフォーマンス

フィッツの法則はユーザーインターフェースにおける、ポインティングタスクを行う人間の動作を以下の方程式によって、定式化したものである。

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

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

MT, ID はタップするまでに動いた時間、タスクの難しさを表し、 ID は D, W をそれぞれタップするまでにかかった時間、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 $We = 4.133\sigma$ が使用するのが良いとされる [11]。 We は有効なターゲットの幅を意味し、 σ 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 IDe と定義する。そしてユーザーのパフォーマンス TP は以下のように定義される [11]。

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

x は W, D の組み合わせの個数を表す。本実験では 6 通りであった。 TP の単位は bps である。

3. 実験結果

本実験において、システムの遅延とタップする時間 (MT) の平均値との関係を図 2 に示す。システムの遅延の大きさとパフォーマンス (TP) の関係を被験者ごとにプロットした結果、各被験者の平均値をプロットした結果は図 3, 図 4 である。

4. 考察

図 2 によると、タスクの難しさである ID が大きくなるほど、動いた時間 MT が大きくなるのがわかる。そして遅延が大きくなるほど、 MT が大きくなることを示唆している。しかし今回の図で表示はしていないが、個人による分散があることがわかった。

図 4 より、ユーザーのパフォーマンスに与える閾値は 24.3ms から 44.3ms の間であると考えられる。4.3ms と 24.3ms においては TP の変化量が比較的小さく、44.3ms 以降は変化量が大きくなっており、減少している。しかし図 3 より、個人差があることがわかった。

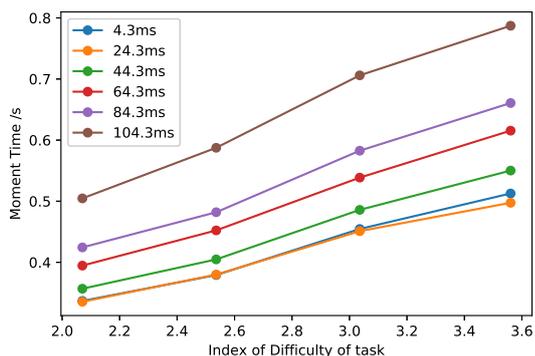


図 2: 各遅延における, ID と MT をプロットした図

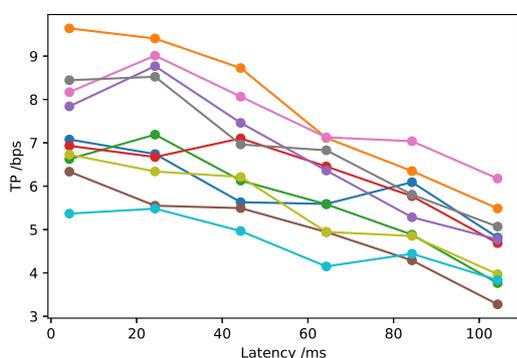


図 3: 各被験者における遅延と TP をプロットした図

今後の展望として, 4.3ms から 44.3ms の間のパフォーマンス性能をより詳細に評価する必要がある。またフィッツの法則において, 距離 D の値を等比数率的に取ることは交絡を生じさせるという研究がある [12]。よって D の値をランダムに確率的に生じさせる実験設計にする方が望ましいと考えられる。

本研究では, 平行に指を動かし一方向の動きに制限したポインティングタスクを採用したが, タスクの内容によってパフォーマンスの値は変化することから, 複数のタスクを用いて評価することを検討中である。

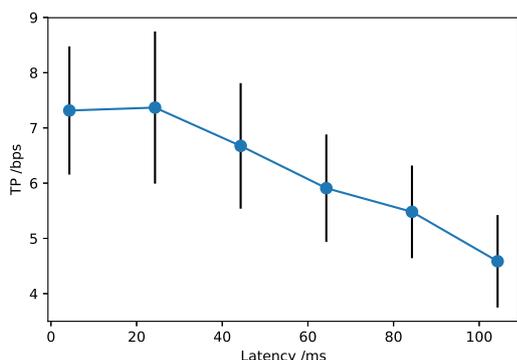


図 4: 各遅延における TP の平均と標準偏差

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.247254, 2001.
- [3] Moss, Jason D., et al. "The effects of display delay on simulator sickness." Displays32.4, 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 graphics22.5, pp.1605-1615, 2016.
- [6] Nelson, W. Todd, et al. Assessing simulator sickness in a see-through HMD: Effects of time delay, time on task, and task complexity. No. ASC-00-1047. AIR FORCE RESEARCH LAB WRIGHT-PATTERSON AFB OH, 2000.
- [7] Ware, Colin, and Ravin Balakrishnan. "Reaching for objects in VR displays: lag and frame rate." ACM Transactions on Computer-Human Interaction (TOCHI) 1.4, pp.331-356, 1994.
- [8] Kawamura, Soma, and Ryugo Kijima. "Effect of HMD latency on human stability during quiescent standing on one foot." 3D User Interfaces (3DUI), 2016 IEEE Symposium on. IEEE, 2016.
- [9] 光真坊悟, and 嶋田総太郎. "自己認識における身体映像の回転と遅延の与える影響." 認知科学 18.1, pp.41-49, 2011.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Gori, Julien, et al. "The Perils of Confounding Factors: How Fitts' Law Experiments can Lead to False Conclusions." Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. ACM, 2018.