



THE VIRTUAL REALITY SOCIETY OF JAPAN

# ハンドリダイレクションが時間知覚・時間評価に与える影響の検証

池嶋壮太<sup>1)</sup>, 松本啓吾<sup>2,3)</sup>, 鳴海拓志<sup>1)</sup>

1) 東京大学 (〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1, {ikejimasa, narumi}@cyber.t.u-tokyo.ac.jp)

2) 筑波大学 (〒305-8577 茨城県つくば市天王台 1-1-1, matsumoto@iit.tsukuba.ac.jp)

3) 産業技術総合研究所 (〒305-8560 茨城県つくば市梅園 1-1-1)

**概要:** 運動感覚は時間感覚に影響を与えることが知られている。本研究では、ハンドリダイレクションを用いてユーザの到達運動を視覚的に操作し、運動感覚の操作を介して時間感覚に影響を与えることができるかを検証した。認知負荷も時間感覚に影響することを考慮し、ハンドリダイレクションの知覚閾値内と知覚閾値外に分けて検証を行った。実験の結果、知覚閾値内において、ハンドリダイレクションによる視覚操作が時間知覚・時間評価に影響を与えることが示唆された一方で、知覚閾値外において、その影響は確認されなかった。

**キーワード:** ハンドリダイレクション, 時間知覚, 時間評価

## 1. はじめに

時間感覚は、数秒以内の短い持続時間を直接的に判断する時間知覚と、数秒以上の長い持続時間を様々な手がかりから間接的に推定する時間評価の 2 つから構成される。身体感覚への意識の差に起因して、バーチャルリアリティ (VR) における時間感覚は現実空間の時間感覚と異なることが知られている [1]。この VR での時間感覚の歪みは、VR での職業訓練を通じて獲得した技能が現実で反映できないといった問題を生じさせることが指摘されている [4]。訓練効果の高い VR の実現には、現実と同等の時間感覚が生じるよう、時間感覚を補正可能な手法を確立する必要がある。そこで本研究では、時間感覚が運動感覚の影響を受け、速く運動していると知覚されるほど時間評価が短くなる [3] という知見に着目し、身体運動の視覚的な速度を変化させることで運動感覚を操作し、それが時間知覚・時間評価に与える影響を検証する。

本研究では、実際の手の運動と視覚提示されるアバターハンドの動きにずれを生じさせるハンドリダイレクション (HR) を用いて、身体運動を拡大・縮小し、運動感覚を介して時間感覚を操作する手法を提案する (図 1)。ただし、認知負荷や心的負担も時間感覚に影響を及ぼすことが知られている [5] ため、HR に対する知覚の有無が認知負荷や心的負担を通じて時間感覚に与える影響の可能性を考慮し、参加者ご

との HR 知覚閾値を算出した上で、知覚閾値内 (認知負荷や心的負担が低い条件) と閾値外 (認知負荷や心的負担が高い条件) に分けて HR の効果を検証する。なお、知覚閾値外の条件では、HR の許容可能な最大値 (許容閾値) を適用した。

## 2. 実験

### 2.1 実験概要

HR による身体運動の視覚的変調が時間感覚に与える影響を検証した。実験 1 で参加者ごとの HR 操作に気づく値である知覚閾値、および HR 操作を許容できる閾値である許容閾値を算出し、それらの閾値を利用して時間知覚・時間評価を検証する実験 2 を行った。実験は参加者内計画で行った。また、予め時間評価が目的であることを参加者に通知し、予期的時間評価を対象として実験を行った。

### 2.2 実験参加者

参加者は 21 名 (男性 16 名・女性 5 名, 平均年齢 22.5 歳 ( $SD = 1.14$ )) であった。全ての実験参加者は実験に関する事前知識を持たなかった。21 名のうち 2 名が左利きで、残りの参加者は右利きであった。実験所要時間は 60 分ほどであり、参加者には謝礼として、Amazon ギフト券 1,500 円分を渡した。

### 2.3 視覚操作手法

本研究では、身体運動の視覚操作手法として HR を利用した。HR の適用方法には複数の手法が存在するが、本研究では、現実物体とのインタラクションを行わない点、および視覚的な運動速度を操作することが目的である点を踏まえて、Zenner & Krüger [2] の手法を採用した。バーチャルハンドの位置  $\vec{p}_v$  は、実際の手の位置  $\vec{p}_r$ 、リダイレクションの原点  $\vec{p}_o$ 、ゲイン  $g$  を用いて以下のように表される。

$$\vec{p}_v = \vec{p}_o + g \cdot (\vec{p}_r - \vec{p}_o)$$



図 1 研究概要



図2 実験1のVR環境



図3 実験2のVR環境

## 2.4 実験1：知覚閾値・許容閾値の検出

実験1では、図2のVR環境で1方向へのリーチングタスクを行い、参加者ごとの知覚閾値および許容閾値を測定した。HRは、上述のZenner & Krügerの手法を用いて、奥行き方向のリダイレクションを適用した。リダイレクションゲインの値は、0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5の11段階に設定した。各条件は10回ずつ試行され、合計で110試行を実施した。参加者は、手前に配置された球状のオブジェクトから、奥行き方向に配置された立方体のオブジェクトへ向けて手を動かし、順にそれぞれに触れるよう指示された。リーチングの開始点となる球状オブジェクトの位置は、HMDの垂直方向に30 cm下、かつ身体の正面方向に30 cmの位置に設定し、この位置をリダイレクションの原点とした。リーチングの終点となる立方体オブジェクトの位置は、開始点から前方40 cmの位置とした。また、各オブジェクトは、バーチャルハンドの人差し指の先端が触れると黄色に変化するように設定した。閾値測定には、2AFC法を用いた。各リーチング試行後に、参加者は以下の2つの質問に「はい/いいえ」で回答した。

- Q1：バーチャルハンドの動きは、実際の手の動きと一致していましたか。
- Q2：バーチャルハンドの動きは、許容できるものでしたか。

110回の試行後、リダイレクションに気づいた割合および、許容できなかったと感じた割合をゲインごとにプロットした。プロットした結果はシグモイド曲線でフィッティングを行った。シグモイド曲線は式(1)で表され、パラメータ $a$ および $b$ をフィッティングにより求める。

$$S(x) = \frac{1}{1 + e^{-ax+b}}$$

フィッティングの結果、それぞれの回答割合が50%になる点のゲインを知覚閾値・許容閾値とした。ゲインが1より大きい知覚閾値を上方知覚閾値、1より小さい知覚閾値を下方知覚閾値とした。許容閾値も同様に、上方許容閾値、下方許容閾値を定めた。

## 2.5 実験2：時間感覚の検証

実験2では、実験1で得られた知覚閾値および許容閾値を用いて、時間評価および反応時間を検証した。本研究において、反応時間をSETモデル[6]におけるパルス生成速度の変化、すなわち時間知覚の加速または減速を反映する指標として利用した。実験は参加者内計画で行い、ゲイン条件は、上方許容閾値・上方知覚閾値・ゲイン1・下方知覚閾値・下方許容閾値の5条件で行った。

ゲイン条件5条件と、45秒/60秒/75秒の3つの時間条件の計15条件で3方向へのリーチングタスクを行い、参加者は各試行の持続時間を言語的見積もり法により回答した。実験を行ったVR環境は図3の通りである。リーチングタスクにおいて、参加者は一定時間ベースオブジェクトに接触し続けた後、3つのターゲットオブジェクトのうちランダムに点灯した一つに向かってリーチングを行った。点灯したターゲットオブジェクトは、参加者が触れることで消灯した。これを、試行時間内繰り返した。ベースオブジェクトは、HMDの垂直方向30 cm下かつ身体前方30 cmの位置に配置され、リダイレクションの原点とした。中央のターゲットオブジェクトは原点からさらに前方に40 cmの位置に配置され、各ターゲット間の中心距離は30 cmに設定した。ターゲットオブジェクトが点灯してから、リーチングを開始するまでに要した時間を、反応時間として計測した。

## 3. 仮説

視覚誘導性自己運動感覚と時間評価の関係を調べた先行研究[3]の結果から、ゲインが増加する、すなわち知覚される身体運動の速度が高まるにつれて、評価時間が短くなると仮定する。この効果は、認知的負荷の観点からリダイレクションが知覚されない範囲に限定されると予想される(H1)。反応時間に関しては、ゲインが高い条件では内的時計が加速し、反応時間が短くなると仮定する。この効果も、認知的負荷の観点からリダイレクションが知覚されない範囲に限定されると予想される(H2)。

**H1:** 知覚閾値内において、HRのゲインが大きいほど評価時間が短くなる。知覚閾値外においては、ゲイン条件が時間評価に影響を与えない。

表 1 知覚閾値内における時間評価

条件	効果量 $r$	$p$ 値	補正後の $p$ 値
上方知覚閾値 - 下方知覚閾値	0.612	.00244	.00733
ゲイン 1 - 下方知覚閾値	0.438	.0413	.0827
上方知覚閾値 - ゲイン 1	0.231	.300	.300

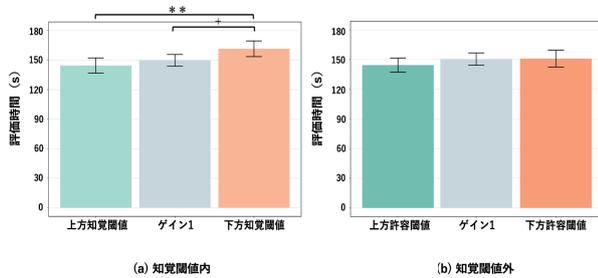


図 4 時間評価の実験結果

**H2:** 知覚閾値内において、HR のゲインが大きいほど反応時間が短くなる。知覚閾値外においては、ゲイン条件が反応時間に影響を与えない。

## 4. 実験結果

### 4.1 時間評価

#### 4.1.1 知覚閾値内の時間評価

知覚閾値内、すなわち上方知覚閾値条件、ゲイン 1 条件、下方知覚閾値条件の 3 つのゲイン条件での時間評価の結果を分析した。Shapiro-Wilk の正規性検定を行った結果、正規性が認められたため、ゲイン条件を要因とする一元配置分散分析を行った。その結果、有意な主効果が認められた ( $F(2, 40) = 3.739, p = .0324, \eta_p^2 = 0.1575$ )。平均値のグラフを図 4 (a) に示す。エラーバーは標準誤差を表す。

下位検定として、対応のある t 検定を用いた多重比較を行った (表 1) ところ、上方知覚閾値条件と下方知覚閾値条件の間に有意差が認められた ( $p = .00733$ , 効果量  $r = 0.61$ )。また、下方知覚閾値とゲイン 1 条件の間に有意傾向 ( $p = .0827$ , 効果量  $r = 0.438$ ) が確認された。なお、 $p$  値の調整には Holm の方法を用いた。

#### 4.1.2 知覚閾値外の時間評価

知覚閾値外、すなわち上方許容閾値条件条件、ゲイン 1 条件、下方許容閾値条件の 3 つのゲイン条件での時間評価の結果を分析した。Shapiro-Wilk の正規性検定を行った結果、正規性が認められたため、ゲイン条件を要因とする一元配置分散分析を行った。その結果、有意な主効果は確認できなかった ( $F(2, 40) = 0.3974, p = .6746, \eta_p^2 = 0.0195$ )。平均値のグラフを図 4 (b) に示す。エラーバーは標準誤差を表す。

表 2 知覚閾値内における反応時間

条件	効果量 $r$	$p$ 値	補正後の $p$ 値
上方知覚閾値 - 下方知覚閾値	0.384	.0126	.0380
上方知覚閾値 - ゲイン 1	0.313	.0420	.0841
ゲイン 1 - 下方知覚閾値	0.0736	.633	.633

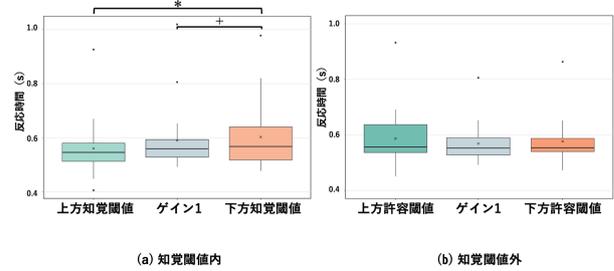


図 5 反応時間の実験結果

## 4.2 反応時間

### 4.2.1 知覚閾値内の反応時間

知覚閾値内、すなわち上方知覚閾値条件、ゲイン 1 条件、下方知覚閾値条件の 3 つのゲイン条件での反応時間の結果を分析した。Shapiro-Wilk の正規性検定を行った結果、正規性が認められなかったため、ゲイン条件を要因とするフリードマン検定を行った。その結果、主効果に有意傾向が認められた ( $p = .0851, \eta^2 = 0.0476$ ) (図 5 (a))。

次に、Wilcoxon の符号順位検定を用いた多重比較を行った (表 2) ところ、上方知覚閾値条件と下方知覚閾値条件の間に有意差が認められた ( $p = .0380$ , 効果量  $r = 0.384$ )。また、上方知覚閾値条件とゲイン 1 条件の間に有意傾向 ( $p = .0841$ , 効果量  $r = 0.313$ ) が確認された。なお  $p$  値の調整には Holm の方法を用いた。

### 4.2.2 知覚閾値外の反応時間

知覚閾値外、すなわち上方許容閾値条件、ゲイン 1 条件、下方許容閾値条件の 3 つのゲイン条件での反応時間の結果を分析した。Shapiro-Wilk の正規性検定を行った結果、正規性が認められなかったため、ゲイン条件を要因とするフリードマン検定を行った。その結果、有意な主効果は確認できなかった ( $p = .564, \eta^2 = 0.0272$ ) (図 5 (b))。

## 5. 考察

本研究では、HR のゲイン変化が時間評価および時間知覚に影響を与えることが示唆された。

### 5.1 知覚閾値内の結果と SET モデルによる解釈

知覚閾値内の条件においては、ゲインの値が大きくなるほど、時間評価が有意に短くなり、反応時間も短くなる傾向が確認された。これらの結果は、仮説 H1 を支持しており、SET モデル (Scalar Expectancy Theory) [6] の内的時計を用いて説明できる。SET モデルでは、時間知覚は脳内のペー

スメーカーが発生するパルスがスイッチを通過してアキュムレータに蓄積されることで成立する。パルスの蓄積速度が速くなると、単位時間あたりに蓄積されるパルス数が増加し、時間評価および時間知覚に影響を与えられられる。本研究の高ゲイン条件では、視覚的な手の運動が拡大されることで、実際の運動に対してより大きく・速い視覚的運動が提示され、これが運動速度感覚の増加を引き起こした。このような運動感覚の変調は、SET モデルにおける内的時計の加速を促進し、その結果としてパルスの蓄積速度が高まり、時間評価の短縮および反応時間の短縮につながったと解釈できる。本研究結果は、先行研究の結果とも一致する。Rietzler ら [9] は、身体動作をスローモーションで提示すると時間の経過が遅く感じられることを報告しており、視覚的な運動情報が自己運動感覚を変化させ、時間感覚に影響を与える可能性を示唆している。また、Landeck ら [3] は、VR 環境内でトンネルの移動速度が速いほど時間評価が短くなることを示し、視覚誘導性自己運動感覚に基づく運動感覚操作が時間感覚に影響を与えることを報告している。

## 5.2 知覚閾値外の結果と AG モデルによる解釈

一方、知覚閾値外の条件では、時間評価および反応時間のいずれにおいても有意な変化は観察されなかった。これらの結果は、仮説 H1, H2 を支持しており、SET モデルの拡張である AG モデル (Attentional Gate Model) [7] によって解釈可能である。AG モデルでは、ペースメーカーからのパルスがどの程度アキュムレータに蓄積されるかは、時間推定課題中の時間に対する注意資源の配分によって変化するとされる。リダイレクションを認知している条件下では、感覚に矛盾が生じたり身体感覚の一貫性が崩れたりすることで、注意が時間感覚から逸れ、不自然な運動の統合や補正といった処理に向けられると考えられる。このような注意の再配分により、時間評価および反応時間に対するリダイレクションの効果は減衰した可能性がある。

本研究では、下方許容閾値条件および上方許容閾値条件において、知覚閾値内の条件と比べて一貫した変化は見られなかった。この結果は、過度な視覚操作が認知的負荷を増大させ、注意を分散させたことによる可能性があることを示唆している。

## 6. 今後の展望

本研究では5つのゲイン条件を用いたが、知覚閾値内外それぞれにおいて、より細かな段階でのゲイン設定を行うことで、時間知覚の変容メカニズムをより精緻に捉えることができると考えられる。また、時間感覚の測定手法に関して、今後は客観的な心拍変動や瞳孔径変化などの生理指標 [8] を導入することを予定している。このようなマルチモーダルな手法によって、実験設計の客観性を高め、時間知覚のメカニズムに関する理解を一層深めたい。

## 7. おわりに

本研究では、HR を用いて身体運動を視覚的に操作することが、VR における時間評価および時間知覚にどのような影響を与えるかを検証した。知覚閾値内においては、ゲインの増加にともなって評価時間および反応時間が短く傾向が確認された。一方で、知覚閾値外においてこの傾向は見られず、リダイレクションによる認知的負担が影響したと考えられる。本研究結果は、VR を活用した視覚操作が時間感覚に影響を与えることを示唆しており、今後は現実同等の時間感覚の補正を可能にする手法の確立を目指す。

謝辞本研究の一部は、JST さきがけ (JPMJPR24IC)、科研費若手研究 (24K20809)、基盤研究 (A)(23H00076) の支援を受けて行われた。

## 参考文献

- [1] G. Mullen and N. Davidenko, "Time compression in virtual reality," *Timing & Time Perception*, 2021
- [2] André Zenner and Antonio 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. IEEE, 2019.
- [3] M. Landeck, et al. "Journey through a virtual tunnel: Simulated motion and its effects on the experience of time," *Frontiers in Virtual Reality*, 3:1059971, 2023.
- [4] K. Lofca et al. "Does adding physical realism to virtual reality training reduce time compression?," *IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces Abstracts and Workshops*, 2023.
- [5] R. Block et al. "How cognitive load affects duration judgments: A meta-analytic review," *Acta psychologica*, 134(3), 330–343, 2010.
- [6] J. Gibbon et al. "Scalar timing in memory," *Annals of the New York Academy of sciences*, 423(1), 52–77, 1984.
- [7] D. Zakay and A. Block. "Temporal cognition," *Current directions in psychological science*, 6(1), 12–16, 1997.
- [8] S. Warda et al. "Pupillometry tracks errors in interval timing," *Behavioral Neuroscience*, 136(5), 495, 2022.
- [9] M. Rietzler et al. "The matrix has you: realizing slow motion in full-body virtual reality," In *Proceedings of the 23rd ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, pp. 1–10, 2017.