

# VRにおける剣撃の視覚効果の違いが ユーザの速度知覚に与える影響

平野祐也<sup>1</sup> 橋本直<sup>1</sup>

**概要:** 本研究では、剣撃体験に主眼を置いた VR アクションゲームにおいてユーザに身体能力の限界以上の速度で行動していると知覚させることを目的に、ユーザの高速な動作に同期した剣の透明化と時間スケール変換を行う手法を提案する。上空から落下するオブジェクトを剣で斬る実験において、剣の透明化の有無、時間スケール変換の有無、効果の発動条件などを比較した結果、発動条件に関わらず時間スケール変換を行うことで、爽快感や剣を速く振っている感覚が向上することが明らかになった。また剣の透明化によって、ユーザが無意識に爽快感や剣の振りやすさを感じる場合があることを確認した。

## 1. はじめに

VR アクションゲームにおいて、剣は登場頻度の高い武器である。現在 Valkyrie Blade VR[a]や Sword Master VR [b], SWORDS of GARGANTUA[c]のような剣撃体験に主眼を置いた VR アクションゲームが多数登場しており、剣を振って敵を倒す体験は、エンタテインメントコンテンツとして楽しめるものとなった。これらのゲームではユーザの身体動作が直接ゲームに反映されるため、ユーザは「まるで自身が剣士になったかのような感覚」を得ることができる。一方で、この操作方法はユーザの持つ身体能力や技術に依存するため、フィクション作品に登場するような超人的なアクションを行う演出の際に、身体感覚と演出との間に齟齬が発生する恐れがある。特にユーザの動作速度が変化せずに超人的速度の演出がなされる場合、演出から推測される動作速度との乖離により、ユーザは違和感を覚えると予想される。そこで本研究では、ユーザに身体能力の限界以上の速度で行動していると知覚させることを目的に、ユーザの高速な動作に同期した剣の透明化と時間スケール変換を行う手法を提案する。本稿では提案手法の概要と実装方法、評価実験とその結果から得られた知見について述べる。

## 2. 関連研究

### 2.1 VRにおける剣の触覚表現

VR 空間における剣の表現手法として、剣を持って振り回した際に感じる触覚情報に着目したアプローチが提案されている。古賀らのバーチャルチャンバラ[1]では、回転する錘が急停止する際の慣性力により、刀がバーチャルな敵と衝突したときの反力を提示している。茂山らの Transcalibur[2]では、ハンドヘルドコントローラの重量と角度を動的に変化させることで、剣や弓などの形状の触覚を再現している。また藤輪らは、質量特性を触覚的に知覚される形状に関連付ける形状知覚モデルを構築し、触覚形状知覚を維持しながら実際の形状が目標形状より小さいハン

ドヘルド VR コントローラの自動設計を可能にした[3]。これらの研究はいずれも触覚刺激を工夫することによって、コントローラを現実の剣のように知覚させている。

本研究では、フィクション作品に登場するような超人的な剣撃体験の提供を目的とし、視覚的なアプローチによって素早く剣を振ったように感じさせることを目指した。

### 2.2 視覚情報による身体運動知覚の錯覚

人間の身体運動知覚は視覚情報の影響を受けることが知られている。笠原らの Malleable Embodiment[4]では、HMD 越しに自身の身体を時空間的に変化させた映像を観測することで、自身の身体の軽さといった物理的な感覚の変化を感じることを示した。また人間の周辺視野が動きに対する感度が高いことに着目し、それを速度感提示に利用する研究も行われている[5]。山下らの制作した Ocluduss[6]は、トンネル状に配置した LED アレイが周辺視野に提示するオプティカルフローによって体感速度を増強させるデバイスである。この研究では、提示するオプティカルフローの速度が速くなることで体感速度も速くなることが示された。本研究では、高速に剣を振っている最中に剣を透明にすることで、高速に剣を振っている感覚を提示する。

### 2.3 時間スケール変換の作業支援やコンテンツへの応用

時間スケール変換を利用して人間が知覚する速度を変化させ、状況判断や行動を容易にする手法が提案されている。篠原らは時間スケール変換を利用したトレイグジスタンスシステムを提案している[7]。この手法では、ロボットを作業対象の動きに追従させ、ユーザに作業対象の速度を遅く知覚させている。スロー再生した映像における手話知覚について調査した阿部らの研究[8]では、再生速度を 50% にすることで手話の学習効率が向上することが示した。この他に、時間スケール変換によって人間が感じる印象に影響を与える例もある。井手口らの研究では、映像内の「迫力のある」という評価をされたフレームの提示時間を延長させるスローモーション表現により、印象の強化を確認した[9]。

<sup>1</sup> 明治大学  
Meiji University  
a) [https://www.oculus.com/experiences/rift/1272603409520828/?locale=ja\\_JP](https://www.oculus.com/experiences/rift/1272603409520828/?locale=ja_JP)

b) [https://store.steampowered.com/app/523710/Sword\\_Master\\_VR/](https://store.steampowered.com/app/523710/Sword_Master_VR/)  
c) <https://www.gargantuavr.com/home>

橋本らの開発したスローモーション触覚再生装置[10]では、人間が普段知覚できない周波数領域の現象を可触化させ、臨場感や異様さ、美しさを感じさせる効果があることを示した。本研究では時間スケール変換による知覚速度の変化が、剣を振る速度の知覚に与える影響を明らかにする。

## 2.4 VR アクションゲームにおける時間スケール変換

VR アクションゲームにおいては、戦闘を有利に進めるためのギミックや、キャラクターの個性を表現するための演出として時間スケール変換が用いられることがある。例えば、Blade and Sorcery[d]では、敵の動きを遅くする魔法が登場する。また、Sairento VR[e]では、忍者のような激しいアクションと操作のしやすさを両立するため、任意にスローモーションに切り替える機能がある。SUPERHOT VR[f]では、ユーザの動きに合わせて時間が進むという独特のアクションルールが採用されている。ユーザが静止している間は非常にゆっくりと時間が流れるため、飛び交う銃弾を避けたり、相手から武器を奪ったりすることが可能となる。このようなスローモーション演出を行う際の要素として発動条件がある。多くの場合はコントローラのボタン押下で発動するが、前述した SUPERHOT VR のように自分の動作速度により発動するものや、Space Pirate[g]のように敵のレーザが近づくと自動で発動するものがある。本研究では「自分がより速く動いている」と印象付けるため、高速に剣を振っている最中に時間スケール変換を行う。

## 3. 提案手法

提案手法では、ユーザに身体能力の限界以上の速度で行動していると知覚させるために、ユーザの剣の振りに同期した剣の透明化と時間スケール変換を行う。また、剣の振りに合わせて音と振動の提示も行う。実装に用いたハードウェアは Oculus Rift S、ソフトウェアは Unity 2018.2.21f1、Oculus Integration 1.42 である。以下に詳細を述べる。

### 3.1 剣の振りの検出

剣の振りの検出には、コントローラから得られる角速度を用いる。現在の実装では、振り降ろしの回転軸の角速度が  $7[\text{rad/s}]$  以上になった状態を「剣を振っている状態」としている。また「高速に剣を振っている状態」の角速度の値に関しては個人差があるため、ユーザごとに角速度の平均値を算出する。この値は後述する剣の透明化と時間スケール変換を行うための閾値として用いた。

### 3.2 剣の振りに同期した剣の透明化

VR 空間における剣の CG の描画方法について図 3.1 を用いて説明する。通常の描画処理では、コントローラの三次元位置・姿勢情報に基づいて、フレーム毎の剣の位置に CG を描画するが、この方法では剣を高速に振った際に離散的な残像が生じてしまい、不自然な見え方となる。そこで提

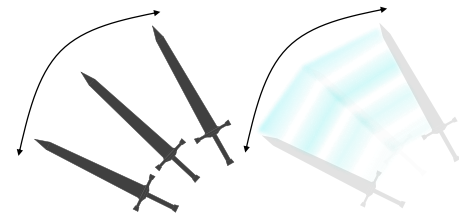


図 3.1 剣の描画方法

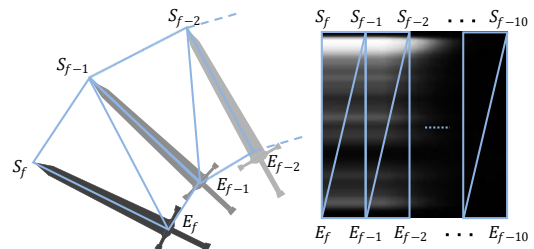


図 3.2 テクスチャの割り当て

案手法では、剣を高速に振っている最中に剣を透明化し、軌跡の表示を行う。剣オブジェクトの不透明度を  $\alpha$  ( $0.0$ : 完全に透明,  $1.0$ : 不透明), 剣の振る速さが閾値を下回ってからの経過時間を  $t[s]$  とおくと,  $\alpha$  は次式で計算される。

$$\alpha = \begin{cases} 0.1, & 100 t^2 \leq 0.1 \\ 100 t^2, & 0.1 < 100 t^2 < 1.0 \\ 1.0, & 1.0 \leq 100 t^2 \end{cases} \quad (1)$$

予備実験において、不透明度が  $0$  の場合は剣を振っているように感じず、 $0.2$  以上では剣の残像が消えにくかったことから、本研究では不透明度の下限を  $0.1$  に設定した。

軌跡の表示は、フレーム毎に記録した剣先と剣元の三次元位置を頂点とするメッシュに、テクスチャを貼り付けることで実装した。剣の移動軌跡とテクスチャの割り当て例を図 3.2 に示す。テクスチャの黒い部分は透過部で、徐々に薄れて消えていく剣の軌跡を表現した。実装では  $10$  フレーム前までの位置情報を記録し、 $10$  個の四角形によって剣の軌跡の表示を行った。Unity でのメッシュ作成は三角形で構成する必要がある。そのため  $f$  フレーム目の剣先の位置を  $S_f$ 、剣元の位置を  $E_f$  とすると、剣の軌跡を表現する四角形のメッシュは  $E_{f-1} \cdot S_{f-1} \cdot E_f$  の 3 つの頂点からなる三角形と、 $E_f \cdot S_{f-1} \cdot S_f$  の 3 つの頂点からなる三角形の 2 つから構成する。メッシュのテクスチャは、テクスチャの横幅をメッシュの個数で分割し、左から順に割り当てている。

### 3.3 剣の振りに同期した時間スケール変換

時間スケール変換係数 (VR 空間内での経過時間と現実世界での経過時間の比) を  $k$  と定義する。  $0.0 \leq k < 1.0$  では、世界が静止または遅く動くことになる。このとき、ユーザの主観的な捉え方として「世界が遅くなった」と「自

d) [https://store.steampowered.com/app/629730/Blade\\_and\\_Sorcery/](https://store.steampowered.com/app/629730/Blade_and_Sorcery/)  
e) <https://www.sairentovr.jp/>

f) <https://www.jp.playstation.com/games/superhot-ps4/>  
g) [https://store.steampowered.com/app/418650/Space\\_Pirate\\_Trainer/?l=japanese](https://store.steampowered.com/app/418650/Space_Pirate_Trainer/?l=japanese)

分が速くなった」という2つの解釈が成り立ち、両者は相対的な関係にある。提案手法では、自分がより速く動いていることを印象づけるために、ユーザの高速な剣の振りに同期した時間スケール変換を行う。変換倍率の下限値を  $k_{min}$ 、剣の振る速さが閾値を下回ってからの経過時間を  $t[s]$  とおくと、時間スケール変換係数  $k$  は、次式で計算される。

$$k = \begin{cases} k_{min}, & 5t^2 \leq k_{min} \\ 5t^2, & k_{min} < 5t^2 < 1.0 \\ 1.0, & 1.0 \leq 5t^2 \end{cases} \quad (2)$$

剣を振る速さが閾値を超えている間、 $k$  は  $k_{min}$  と同じ値に維持される。なお実装では、時間スケール変換係数  $k$  は Unity の Time.timeScale に対応する。

### 3.4 音と振動の提示

時間スケール変換に伴い、コンテンツ内で再生される音のピッチを変化させた。また剣で物体を斬った際にコントローラを振動させた。現在の実装では、環境音として雨が降る音、効果音として剣を振ったときの風切り音を使用した。BGMは使用していない。音のピッチを  $p$ 、時間スケール変換係数を  $k$  とすると計算式は以下ようになる。

$$p = \begin{cases} 0.025, & 2k \leq 0.025 \\ k, & 0.02 < 2k < 1.0 \\ 1.0, & 1.0 \leq 2k \end{cases} \quad (3)$$

## 4. 実験 1: 時間スケール変換と剣の透明化による身体動作の速度知覚への影響の調査

### 4.1 実験条件

時間スケール変換に関する条件を4条件、剣の透明化に関する条件を2条件設定し、これらの組み合わせた計8条件で比較を行った。以下に各条件について説明する。

#### 時間スケール変換に関する条件

**N 条件 (Non-effect)** : 時間スケール変換を行わない。

**Q 条件 (Quick)** : 高速に剣を振ることで時間スケール変換を発動させる。本条件が提案手法である。図 4.1 に T 条件における時間スケール変化の様子を示す。

**T 条件 (Trigger)** : コントローラのトリガーの押下によって時間スケール変換を発動させる。時間スケール変換倍率の下限値を  $k_{min}$ 、トリガーから手を離してからの経過時間を  $t[s]$  とおくと、時間スケール変換係数  $k$  は、(2) 式で計算される。なおトリガーを押している間、 $k$  の値は  $k_{min}$  に維持される。図 4.2 は T 条件における時間スケール変化の様子を示す。

**P 条件 (Passive)** : 一定のタイミングで時間スケール変換を発動させる。ユーザの行動は時間スケール変換に関与しない。時間スケール変換倍率の下限値を  $k_{min}$ 、時間スケール変換係数を  $k$  とすると、キューブが落下を開始して 0.8[s] 後から、 $0.05 \div k_{min}$  [s] 間、 $k$  の値を  $k_{min}$  に固定する処理を行う。その後  $k$  の値は、この処理が終了して

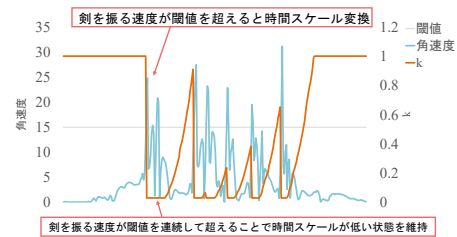


図 4.1 Q 条件における時間スケール変化

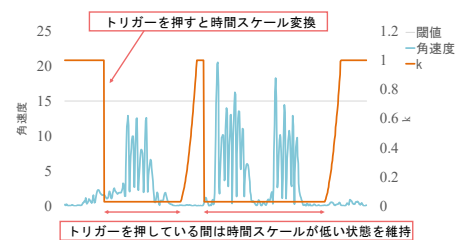


図 4.2 T 条件における時間スケール変化

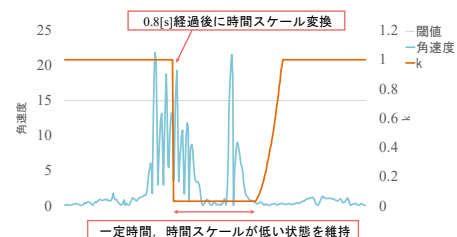


図 4.3 P 条件における時間スケール変化

からの経過時間を  $t[s]$  とおくと (2) 式で計算される。図 4.3 は P 条件における時間スケール変化の様子を示す。

#### 剣の透明化に関する条件

**V 条件 (Visible)** : 剣の透明化を行わない。

**I 条件 (Invisible)** : 剣の透明化を行う。

例えば、高速に剣を振ることで時間スケール変換を発動させる条件 (Q) に対して、剣の透明化処理を行わない条件 (V) を「Q-V 条件」、剣の透明化処理を行う条件 (I) を「Q-I 条件」のように表記する。すべての条件において時間スケール変換倍率の下限値  $k_{min}$  は 0.03 で固定とした。この値は予備実験により決定した。

### 4.2 実験環境

参加者は HMD を装着し、両手に VR コントローラ (Oculus Touch) を把持する。利き手側を剣用コントローラ、非利き手側を操作用コントローラと定義する。VR 空間内の実験環境を図 4.4 に、参加者の手元に表示される CG を図 4.5 に示す。VR 空間内では参加者の前方にパネルが配置されており、剣でキューブを斬った回数 (コンボ数) と選択中の条件が表示される。選択中の条件は A または B という文字で提示され、具体的にどの実験条件が選択されている

るかは参加者に伏せられている。剣用コントローラの位置には剣のモデルが表示され、剣を振る動作で物体を斬ることができる。剣のグリップとコントローラのグリップの位置姿勢が一致するように設定した。操作用コントローラの位置には Oculus Touch と手のモデルが表示される。また、コントローラ上部には時間スケール変換の条件に応じた操作説明が表示される (表 4.1)。参加者はボタン操作で実験条件の変更を行うことができる。

### 4.3 実験課題

実験課題を以下のように設定した。

- 参加者は実験開始の合図とともに高さ 4[m]の位置から落下する赤色のキューブを地面に落下するまでの間、自由に剣で斬る。なお、キューブの落下は実験者の操作によって開始され、キューブの破片がすべて地面に落ちるたびに繰り返す。
- 剣の振り方や剣で斬る回数は指定しない。ただし、各条件によって操作の異なる部分に関しては、コントローラ上部に表示される操作説明に従う。

### 4.4 実験参加者

実験参加者は 20 代の大学生 14 名 (男性 13 名, 女性 1 名) であり, うち 13 人が 1 人称 VR アクションゲームの経験があると回答した。

### 4.5 実験手順

実験開始前に, 参加者に実験の趣旨や方法, 流れを説明し, 参加同意書と事前アンケートへの記入を求めた。参加者に HMD を装着させ, 両手にコントローラを持たせ, VR 空間内の実験環境を確認させた。操作に慣れるための練習試行として 1 分間, N-V 条件下で落下するキューブを剣で斬るという動作をさせた。キャリブレーションのために剣を大きく強く振るよう指示し, このときの剣の振りの各速度から剣を速く振っているかを判定する閾値を決定した。特に問題がない場合は, 実験 1 での課題やコントローラの操作についての詳細説明を行った後, 本試行に移行した。

本試行では, 参加者は 2 種類の条件 (A/B で区別される) をコントローラの操作で自由に切り替えながら課題を行う。参加者は 2 種類の比較が十分だと感じた時点で課題を終了し, アンケートに回答する。以上を 1 試行とし, 試行毎に A/B の条件を変更して計 10 試行を実施した。なお, 後半の試行になるにつれ疲労の影響を受けやすいと考え, 順序効果をなくすために実施順序をランダムにした。表 4.2 に各試行の組み合わせを示す。また, アンケート項目を表 4.3 に示す。Q6 は, 時間スケールが変化するという現象に対する運動主体感[11]を問う質問である。なおここでの運動主体感とは, 時を止めているのは自分自身であるという主観的感覚を指す。Q1~Q7 は A と B を比較して, 「A が B より強く感じた」, 「A が B よりやや強く感じた」, 「どちらも同程度に感じた, または感じなかった」, 「B が A よりやや強く感じた」, 「B が A より強く感じた」の 5 段階で回答する。

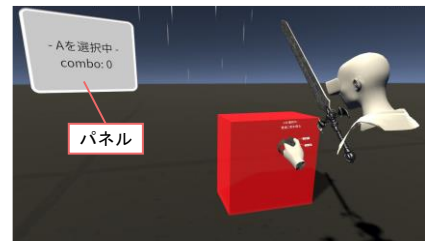


図 4.4 実験 1 での実験環境

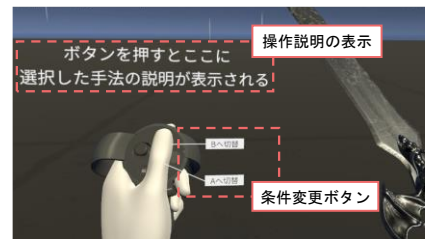


図 4.5 実験 1 でのコントローラの UI

表 4.1 各条件で表示される操作説明

N 条件	普通に剣を振る
Q 条件	大きく強く剣を振る
T 条件	人差し指トリガーを押しながら剣を振る
P 条件	普通に剣を振る

表 4.2 試行の組み合わせ

時間スケール変換条件		剣の透明化処理	
A	B	A	B
Q-V 条件	N-V 条件	N-V 条件	N-I 条件
T-V 条件	N-V 条件	Q-V 条件	Q-I 条件
P-V 条件	N-V 条件	T-V 条件	T-I 条件
T-V 条件	Q-V 条件	P-V 条件	P-I 条件
P-V 条件	Q-V 条件		
P-V 条件	T-V 条件		

表 4.3 アンケート項目

Q1	爽快感があった
Q2	剣が消えたように感じた
Q3	剣を速く振れている感覚があった
Q4	身体が超人的な速さで動いている感覚があった
Q5	世界が遅くなっていると感じた
Q6	自分が時を止めている感覚があった
Q7	ソフトウェアの処理速度が遅くなったと感じた
Q8	その他, 意見・感想・気づきがあれば お願いします (自由記述)

表 4.4 質問の回答に対する評点

回答	評点
A が B より強く感じた	-4 点
A が B よりやや強く感じた	-2 点
どちらも同程度に感じた, または感じなかった	0 点
B が A よりやや強く感じた	+2 点
B が A より強く感じた	+4 点

## 4.6 結果

### 4.6.1 比較方法

時間スケール変換条件による影響を調べるために、時間スケール変換に関する4条件の対比較（計6試行）を行った。主観評価の分析にはシェッフェの対比較法（中屋の変法）[12]を用いた。質問項目（表4.2, Q1~Q7）への回答結果に対して、表4.4のように5段階で評点を与えた。その後、質問と条件ごとに参加者全員の評点の平均値（平均嗜好度）を算出し、有意水準5%で有意差が認められた場合は、どの条件間に差があるのかを算出した。また、剣の透明化による影響を調べるために、N-V条件とN-I条件のように剣の透明化処理のみ異なる条件の組み合わせ（計4試行）について比較を行った。こちらも表Xに基づき5段階で評点を与え、質問と条件ごとに平均を算出し、1標本t検定により有意差を検定した。

### 4.6.2 時間スケール変換による効果と発動条件による違い

Q1~Q7の質問項目ごとにN-V条件、Q-V条件、T-V条件、P-V条件に対する個人嗜好度並びに参加者全員の平均嗜好度を算出した。質問ごとの平均嗜好度を図4.6に示す。ただしQ7の質問のみ、極端な評価をしていた参加者1名を除く13名のデータで算出した。分散分析を行ったところ、Q2とQ7を除く他の5項目の主効果において有意差が認められた。そこで評価対象間のどの組み合わせに有意差があるかを特定するためにヤードスティック $Y_{0.05}$ を求め、多重比較を行った。各条件の平均嗜好度の差が $Y_{0.05}$ の値を上回っていれば有意差があると言える。なお $t=4$ （試料数）、 $f=39$ （誤差の自由度）に対応した $P_{0.05}(4, 39)$ に該当する値は存在しなかったため、 $P_{0.05}(4, 40)$ を使用して $Y_{0.05}$ を求めた。以降、有意差が認められた質問に対して詳細に述べる。

爽快感を問う質問（Q1）での平均嗜好度は高い順にQ-V条件、T-V条件、P-V条件、N-V条件となっており、N-V条件と他3条件との間で有意差が認められたが、それ以外の条件間では有意差は認められなかった。この結果より、時間スケール変換を行うことで剣を振る際の爽快感を強く感じられることが示唆された。

身体動作の速度知覚を問う質問（Q3, Q4）での平均嗜好度はどちらもT-V条件が最も高く、N-V条件が最も低い点となった。「剣を速く振れている感覚があった」（Q3）ではN-V条件と他3条件との間では有意差が認められたが、それ以外の条件間では有意差は認められなかった。「身体が超人的な速さで動いている感覚があった」（Q4）ではN-V条件とP-V条件、N-V条件とT-V条件の間で有意差が認められた。これらの結果から時間スケール変換を行うことで「自分が速くなった」という解釈が生まれる可能性が示唆された。一方、「世界が遅くなっていると感じた」（Q5）でも同様に、N-V条件と他3条件との間では有意差が認められ、それ以外の条件間では有意差は認められなかった。このことから、「世界が遅くなった」と「自分が速くなった」とい

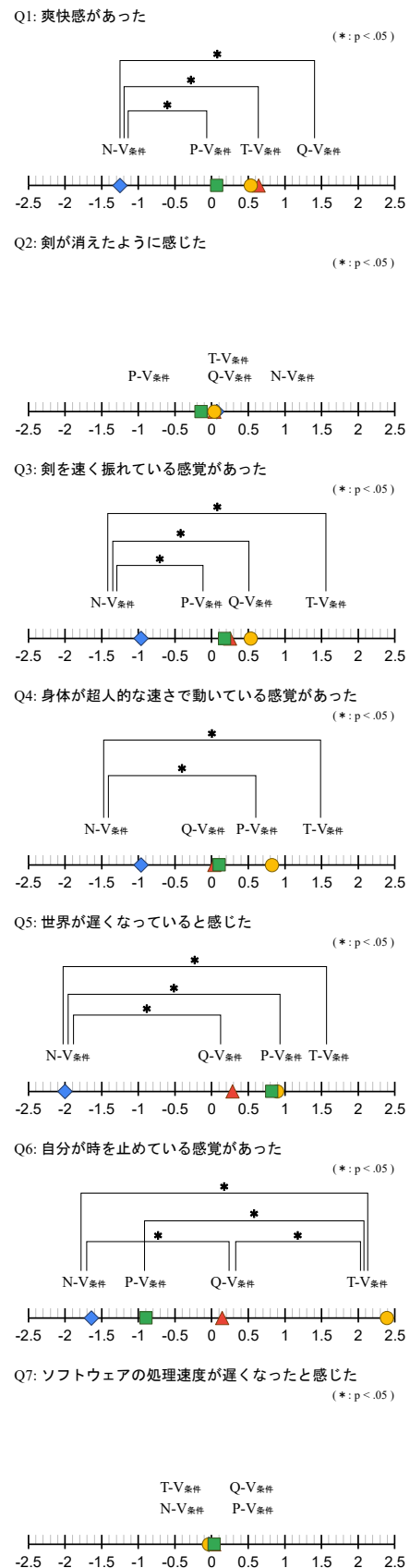


図4.6 質問ごとの平均嗜好度

う解釈は同時に生起しうるものであることが確認された。時間スケールが変化するという現象に対する運動主体感

を問う質問 (Q6) での平均嗜好度は高い順に T-V 条件, Q-V 条件, P-V 条件, N-V 条件となった。また, N-V 条件と T-V 条件, N-V 条件と Q-V 条件, P-V 条件と T-V 条件, Q-V 条件と T-V 条件の間で有意差が認められた。Q5 の結果と比較すると, 時間スケール変換条件によって「世界が遅くなった」という解釈が異なることが示唆された。

#### 4.6.3 剣の透明化の影響

Q1~Q7 の質問項目ごとに N-I 条件, Q-I 条件, T-I 条件, P-I 条件に対する参加者平均を表 4.5 に示す。値が 0 より大きい緑色の部分では I 条件の方が高評価, 0 よりも小さいオレンジ色の部分では V 条件の方が高評価であることを示す。参加者平均が, どちらも同程度に感じた場合の 0 点を母平均と仮定して 1 標本  $t$  検定をしたところ, Q4 の Q-I 条件でのみ有意差が認められた。多数の項目において有意差が認められない結果となったが, 「剣が消えたように感じた」(Q2) において I 条件をより高く評価した参加者からは, 身体動作の速度知覚を問う質問 (Q3, Q4) についても I 条件を高く評価する傾向が見られた。

### 5. 実験 2: 時間スケール変換の強度による影響の調査

#### 5.1 実験条件

時間スケール変換の強度は時間スケール変換係数の下限値  $k_{min}$  の値により決定する。そこで時間スケール変換を行わない N-V 条件と N-I 条件を除いた 6 条件に対して,  $k_{min}$  を 0.01 から 0.10 まで 0.01 刻みの 10 段階設定した。時間スケール変換の強度は  $k_{min}$  が 0.01 に近づくほど高まり, 0.1 に近づくほど低くなる。その他の実験条件並びに実験課題は実験 1 と同様である。

#### 5.2 実験環境

実験 1 からの変更点は 2 点あり, 1 つは図 5.1 のようにパネルに現在の時間スケール変換の強度 (倍率) の表示が追加される点, もう 1 つは図 5.2 のようにコントローラのアナログスティック部分への表示が追加される点である。

#### 5.3 実験参加者

実験参加者は実験 1 と同様, 20 代の大学生 14 名 (男性 13 名, 女性 1 名) である。

#### 5.4 実験手順

実験 2 は実験 1 終了後, 5 分間の休憩をはさんで続けて行った。実験 2 における課題やコントローラの操作についての詳細説明を行った後, 本試行に移行した。

本試行では, 参加者は実験者が選択した条件の時間スケール変換の強度をコントローラの操作で自由に切り替えながら課題を行う。参加者は全ての時間スケール変換の強度で課題を行ったあとで, 参加者自身が最も好みだと感じた時間スケール変換の下限値とその理由を回答する。以上を 1 試行とし, Q-V 条件, Q-I 条件, T-V 条件, T-I 条件, P-V 条件, P-I 条件の順で計 6 試行を実施した。

表 4.5 各 I 条件の平均点

	N-I 条件	Q-I 条件	T-I 条件	P-I 条件
Q1	-0.14	-0.57	0.42	-0.28
Q2	0.42	0.42	0.71	0.71
Q3	-0.14	-0.42	0.42	0.28
Q4	-0.28	-0.57	0	-0.14
Q5	0	0.14	-0.42	-0.42
Q6	0	-0.28	-0.57	-0.14
Q7	0.14	0	0.14	0

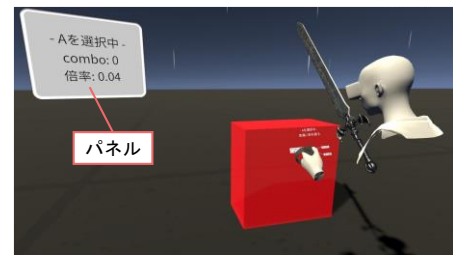


図 5.1 実験 2 での実験環境

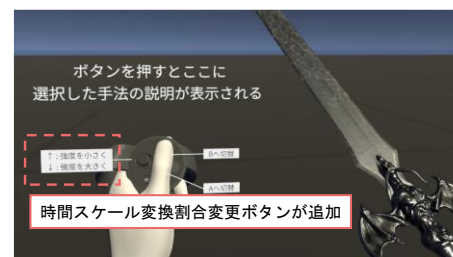


図 5.2 実験 2 でのコントローラの UI

### 5.5 結果

#### 5.5.1 好みの時間スケール変換の強度

各条件の好みの時間スケール変換の強度についての回答結果を図 5.3 に示す。条件ごとに詳しく述べる。

#### Q-V 条件, Q-I 条件に対する好みの時間スケール変換の強度

Q-V 条件, Q-I 条件はどちらも個人差が大きく, 偏りは見られなかった。

#### T-V 条件, T-I 条件に対する好みの時間スケール変換の強度

T-V 条件は個人差が大きく, 偏りは見られなかった。一方で, T-I 条件の方が T-V 条件よりも強度の低い方を好む参加者が多く, T-I 条件では 0.05 以下の範囲に回答の過半数が集中する結果となった。しかしこの理由についてはインタビューでは明らかにならなかった。

#### P-V 条件, P-I 条件に対する好みの時間スケール変換の強度

P-V 条件, P-I 条件は共に 0.04 が好みだと回答した人が一番多く, また回答の多くが 0.04 周辺に集中する結果となった。また P-I 条件の方が P-V 条件よりも強度の高い方を好む参加者が多かった。

これらの結果から P-V 条件、P-I 条件においては時間スケール変換の下限値は 0.04 が適切であると考えられる。しかしその他の条件に関しては個人差が大きく、適切な下限値を発見するためには更なる調査が必要である。

### 5.5.2 好みの時間スケール変換条件

参加者は条件ごとに決定した好みの時間スケール変換の強度で Q-V 条件、Q-I 条件、T-V 条件、T-I 条件、P-V 条件、P-I 条件をもう一度ずつ試した後、「どの条件が好みか」という質問に回答した（複数回答可）。回答結果を図 5.4 に示す。なお、Q 条件と T 条件の両方を選択した参加者は存在せず、Q 条件と T 条件で好み分かれる結果となった。

Q 条件と回答した参加者の意見としては「大きく振っているときは斬っている感覚、速く動いている感覚がある。」  
 「剣の残像が見えない方が速く振っている感覚になる。」  
 「剣で戦う VR ゲームを想像したとき、剣を振っている間のみ連動してスローモーションがかかる方が演出として自然である。」などがあつた。対して、T 条件と回答した参加者の意見としては「時を止める能力を使ったという設定の方が、エフェクト（時間スケール変換）への理解がしやすい。」  
 「自分のタイミングで時間を止められるため、どんな斬り方にも対応できる。」などがあつた。

### 5.5.3 剣の透明化に対する反応

実験の最後に剣が半透明になる仕様について説明を行い、実験中にこの仕様に気付いていたかを回答させた。結果を図 5.5 に示す。剣の透明化に対する参加者の意見は好意的なものが多く、剣の透明化に「気付いた」と回答した参加者からは、「剣の透明化を行った方が爽快感や速く振っている感覚が強くなった。」といった意見が得られた。また剣の透明化に「気付かなかった」、「気が付かなかったが、何か変化を感じることはあつた」と回答した参加者からも「理由はわからないけれど、斬りやすさや動きやすさを感じた。」といった意見が得られた。一方で、剣の透明化に気付いた参加者の中には「剣を振り終えた瞬間には剣が見えてほしい。」という意見が得られた。

## 6. 議論

### 6.1 剣の振りに同期した時間スケール変換の妥当性

実験結果より、提案手法によってユーザに「より剣を速く振っている感覚」を提示可能であることが示唆された。参加者からの意見として「Q 条件では斬っていて爽快感があつた。T 条件では時間スケール変換の発動が任意であるため、斬りやすかったが、トリガーで操作しているために斬る楽しさが損なわれた。」「Q 条件では自分が本当にこの速さで斬れているような感覚、T 条件では超能力を使用して速く動いている感覚があつた。」などが得られた。このことから Q 条件は T 条件と比較して、自身の力で速く振っていることを印象付けることが出来たと考えられる。しかし本実験では、時間スケール変換を行う条件間に有意差は認

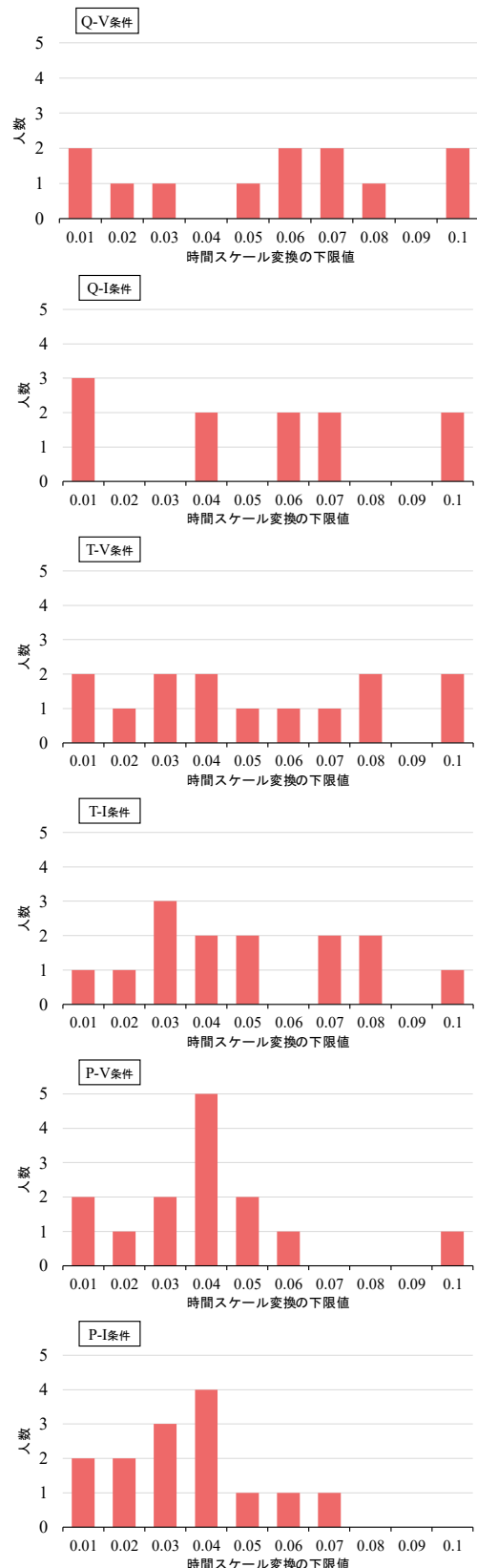


図 5.3 好みの時間スケール変換の強度の分布

められなかった。この理由として、Q 条件での時間スケール変換のしにくさが挙げられる。今回の実装において、T 条件ではトリガーを押すことで時間スケール変換を発動でき、スロー状態の維持も容易であつた。これに対し、Q 条件で

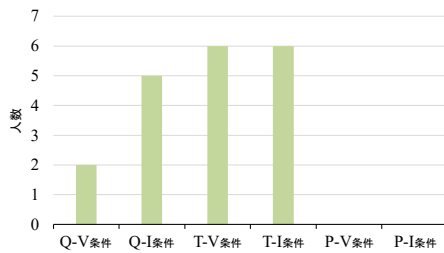


図 5.4 好みの時間スケール変換条件

はスローモーション状態を維持するために剣を何度も振る必要があり、また剣を振る速さが閾値を一度でも下回ると約 0.4[s]後には等倍となる。このため、複数の参加者が Q 条件において、我々が想定していた動作を十分に行えていなかった。この点に関しては実装上の工夫により改善可能であると考えている。また時間スケール変換条件によって、スローモーションの要因の感じ方が変化することが分かった。このことから提案手法とその他の時間スケール変換条件を併用することで、同じ超人的速度の演出でも異なる意味付けが可能になると考えられる。例えば「時を止める魔法」の表現にはトリガー押下による時間スケール変換を行い、「自分自身が強化されたことで速く動いている」表現には高速の動作に同期した時間スケール変換を行うといった時間スケール変換の使い分けが想定される。

## 6.2 剣の振りに同期した剣の透明化の妥当性

本実験では剣の透明化を行うことによる有意差は認められなかった。これは参加者の過半数が剣の透明化の有無に気付かず、また違いを感じなかったためである。しかし剣の透明化に気付いたと回答した参加者からは「剣を速く動かしているように感じた」という意見が得られた他、気付かなかったと回答した参加者の中にも「剣が振りやすくなった」、「剣が軽い」といった印象を受けた参加者や、「理由を説明することはできないが、何となく振っていて楽しい」という参加者もいた。このことから剣の透明化はユーザが意識しているかに関わらず、剣を振る速度の知覚に影響があることが分かった。

## 7. おわりに

本稿では、ユーザの高速な動作に同期した剣の透明化と時間スケール変換を行うことで、ユーザに身体能力の限界以上の速度で行動していると知覚させる手法を提案した。アンケートによる評価実験の結果、発動条件に関わらず時間スケール変換を行うことで、爽快感や剣を速く振っている感覚が向上することが明らかになった。また剣の透明化によって、ユーザが無意識に爽快感や剣の振りやすさを感じる場合があることを確認した。一方で、ユーザの高速な動作に同期した時間スケール変換は、ユーザの剣の振り方に大きく影響されるため、評価が分かれた。また、「トリガーを押す」ことで時間スケール変換を行う条件と比較する

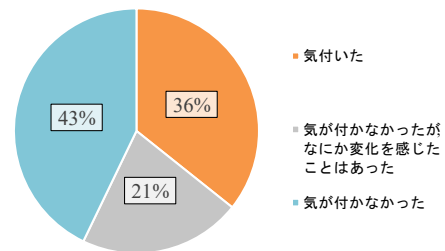


図 5.5 透明化処理に気付いた人の割合

と、「自分が時を止めている感覚」に違いがあることが分かった。そのため、例えば「時を止める魔法」の表現にはトリガーを押して時間スケール変換を行う方法、「自分自身が強化されたことで速く動いている」表現には提案手法といった使い分けによって同じ超人的速度の演出でも異なる意味付けが可能になると考えられる。

## 参考文献

- [1] Daijiro K and Takahiro I. Virtual Chanbara. SIGGRAPH, 2002.
- [2] Jotaro Shigeyama, Takeru Hashimoto, Shigeo Yoshida, Taiju Aoki, Takuji Narumi, Tomohiro Tanikawa, and Michitaka Hirose.. Transcalibur: dynamic 2D haptic shape illusion of virtual object by weight moving VR controller. SIGGRAPH, 2018.
- [3] Eisuke Fujinawa, Shigeo Yoshida, Yuki Koyama, Takuji Narumi, Tomohiro Tanikawa, and Michitaka Hirose.. Computational design of hand-held VR controllers using haptic shape illusion. VRST, 2017.
- [4] Shunichi Kasahara, Keina Konno, Richi Owaki, Tsubasa Nishi, Akiko Takeshita, Takayuki Ito, Shoko Kasuga, and Junichi Ushiba.. Malleable Embodiment: Changing Sense of Embodiment by Spatial-Temporal Deformation of Virtual Human Body. CHI, 2017.
- [5] 中嶋慶輔, 福地健太郎. 周辺視野の動的知覚特性にもとづくスポーツ映像の速度感増強. 情報処理学会研究報告. 2013, vol. 152, no. 8.
- [6] 山下真由, 深町太一, 可知怜也, Adam Myers, Jesse Marcian, 伊藤雄一. Ocoduss: オプティカルフロー制御による速度感提示デバイス. 情報処理学会 インタラクシオン. 2017, p. 745-748.
- [7] 篠原亮, 梶本裕之, 川上直樹, 舘暲. テレイグジスタンスの研究 (第 49 報) 時間スケール変換による オグメンティド テレイグジスタンスの研究. 日本バーチャルリアリティ学会 第 11 回大会論文集. 2006, p. 25-26.
- [8] 阿部悟之, 遠田望, 山本英雄, 鎌田一雄, Susan FISCHER. 手話映像の再生速度と知覚との関係に関する一考察(福祉工学および一般). 映像情報メディア学会技術報告. 2002.
- [9] 井手口健, 西山元規, 古賀広昭. 迫力感性増幅を意図した映像提示方法の検討. 映像メディア学会誌. 2000, vol. 54, no. 1.
- [10] 橋本悠希, 梶本裕之. スローモーション触覚再生装置. 情報処理学会 インタラクシオン. 2009
- [11] P.Haggerd and V.Chambon.. Sense of agency. Current Biology. 2012, vol. 22, no. 10, p.R390-R392.
- [12] 高木英行. 使える! 統計検定・機械学習-III-主観評価実験のための有意差検定. システム制御情報学会. 2014, vol. 58, no. 12, p. 514-520.