

Title	誇張表現によるVR環境下での疾走感の変化の調査
Author(s)	滝上, 亮太
Citation	
Issue Date	2023-03
Type	Thesis or Dissertation
Text version	author
URL	http://hdl.handle.net/10119/18262
Rights	
Description	Supervisor: 宮田 一乗, 先端科学技術研究科, 修士(知識科学)

修士論文

誇張表現による VR 環境下での疾走感の変化の調査

滝上 亮太

主指導教員 宮田 一乗

北陸先端科学技術大学院大学
先端科学技術研究科
(知識科学)

令和 05 年 3 月

Abstract

The purpose of this study was to investigate whether the use of speed emphasis in VR space affects the sense of speed, and to examine the effectiveness of the conventional emphasis on speed in a highly immersive environment such as VR space.

In this experiment, we created an emphasis expression using afterimages and distortions used in manga and other media. The experiment was conducted using these expressions, and it was confirmed that the sense of speed was higher when the emphasis expression was used, and that both afterimages and distortions were effective. The sense of speed with emphasis was higher than that with background, but the sense of speed without emphasis was also highly evaluated, so it will be necessary to investigate this in more detail.

In addition, it can be said that the emphasized expressions created in this experiment are unlikely to cause VR sickness. However, VR sickness itself did occur. Since this was only a short-time verification, future investigation of VR sickness through a long-time experiment is desired.

目次

第1章	はじめに	1
1.1	研究背景	1
1.2	研究目的	2
1.3	研究意義	2
1.4	論文の構成	3
第2章	関連研究	4
2.1	VR酔いについて	4
2.2	疾走感の強調表現	5
2.3	3D空間でのスピード線、残像、ゆがみの表現	6
2.4	本研究の位置づけ	8
第3章	提案手法	9
3.1	実験環境	9
3.2	VR環境	10
3.2.1	VR空間	10
3.2.2	プレイヤーの移動	13
3.2.3	強調表現の長さの変更	14
3.3	残像	15
3.4	ゆがみ	17
第4章	実験設計	22
4.1	予備実験1 特徴的な制御パラメータの適正值調査	22
4.1.1	実験内容	22
4.1.2	実験結果	24
4.2	予備実験2 強調表現の長さ適正值調査	24
4.2.1	実験内容	24
4.2.2	実験結果	26
4.3	本実験	27
4.3.1	パターン1 背景なし	28
4.3.2	パターン2 背景あり	28

第5章	結果と考察	30
5.1	結果	30
5.1.1	パターン1 背景なし	30
5.1.2	パターン2 背景あり	30
5.1.3	疾走感とVR酔いの回答標本	31
5.2	考察	32
5.2.1	強調表現の有無による疾走感の影響	32
5.2.2	強調表現の種類による疾走感の差	34
5.2.3	本実験で発生したVR酔いの程度	34
第6章	結論	36
6.1	本研究のまとめ	36
6.2	今後の課題	36
第7章	謝辞	38

目次

1.1	斬撃動作体験システム [1] でのブラー表示	2
2.1	Speedlines[2] によるレンダリング結果	5
2.2	Lapides らが開発したリアルタイムスタイライゼーション [3]	6
2.3	モデル変形 (左図) と境界線ブラー (右図) [4]	7
2.4	スピード線 (左図)、残像 (中央図)、ゆがみ (右図) の表現例 [5]	7
2.5	横からの視点 (左図) と正面からの視点 (右図) [6]	8
3.1	実験中の様子	10
3.2	利用した Meta Quest 2	11
3.3	上から見た、作成した VR 空間全体図	12
3.4	プレイヤー初期位置付近から見た、作成した VR 空間	12
3.5	プレイヤーの移動速度 (<i>playerSpeed</i>) の変化を示すグラフ	14
3.6	表示・非表示を判定する $\text{clip}(\text{frac}(i.\text{localPos}.x * \text{SliceSpace}) - \text{Interval})$ のグラフ	16
3.7	<i>SliceSpace</i> 変更によって変わる描画間隔	17
3.8	<i>Interval</i> 変更によって変わる残像部分の幅	17
3.9	プレイヤーの視点によって変わる街灯の移動方向	19
3.10	<i>TopColorAmount</i> の値による変化	20
3.11	残像とゆがみの強調表現 描画結果	21
4.1	予備実験 1 での強調表現比較用画像	23
4.2	予備実験 2 での強調表現比較用画像	26
4.3	パターン 1 での強調表現	28
4.4	パターン 2 での強調表現	28
4.5	上から見た、パターン 2 の VR 空間全体図	29
4.6	プレイヤー初期位置付近から見た、パターン 2 の VR 空間	29
5.1	疾走感のアンケート回答の散布図	31
5.2	VR 酔いのアンケート回答の散布図	32

表 目 次

3.1	Meta Quest 2 仕様	9
3.2	使用PC 仕様	10
3.3	プレイヤーの移動に関する変数	13
3.4	強調表現の長さ変更に関する変数	14
3.5	残像に関する変数	15
3.6	ゆがみに関する変数	19
4.1	残像の制御パラメータ 設定値	23
4.2	ゆがみの制御パラメータ 設定値	23
4.3	制御パラメータの適正值評価アンケート 結果	24
4.4	残像の長さ調整用パラメータ 設定値	25
4.5	ゆがみの長さ調整用パラメータ 設定値	26
4.6	長さの適正值評価アンケート 結果	26
5.1	背景なしのアンケート評価 (疾走感)	30
5.2	背景なしのアンケート評価 (VR 酔い)	30
5.3	背景ありのアンケート評価 (疾走感)	31
5.4	背景ありのアンケート評価 (VR 酔い)	31

第1章 はじめに

1.1 研究背景

一般的にVRが普及してから、VRは様々な利用が期待され始めた。現在でも、リハビリテーション [7][8] やVR空間でのディスカッション [9]、バーチャル空間によるブース展示 [10] としての利用など、様々な提案・商品が開発されている。しかし、1990年代に広く認知されてから研究され続けているVRには、いまだに課題が多い。大きな課題として取り上げられるのは、VR酔いや体験の質の向上だろう。著者が調べた限りだと、昔からVR体験の質に注目した研究が行われているが、2010年からVR酔いに関する研究も活発に行われるようになってきた。[11]

そんな中、VR体験の質に関する研究を目にした。腕を振った時の剣の描写タイミングを変更して体感速度を上げることで、爽快感を与えることを目的とした斬撃動作体験システムの研究 [1] である。この研究を見たときに、ブラーの描写が非常に気になった。論文上ではモーションブラーを模した円盤状のエフェクトとして利用しているが、図 1.1 のような板を張り付けたような見た目であり、あくまでも軌道を示す形での使い方をされていた。この研究の参考動画を見た私は、剣の描写や効果音は爽快感に効果があっても、ただ軌道を示すだけのモーションブラーを模したエフェクトは体感する速度（以下、疾走感と定義する）に影響を与えず、爽快感を与えられないと考えた。この研究で最も違和感を抱いたのは、モーションブラーを模した円盤状のエフェクトがぱっと現れて消えるような表現である。これが、板が現れて消えるように見えた。

よくあるスピードの表現として、漫画的な描画を基にした、スピード線・残像・ゆがみを用いる方法がある [6]。板が現れて消える表現よりも、漫画やアニメで使われるようなスピード表現に近づけた方が疾走感に影響を与え、より強い爽快感を

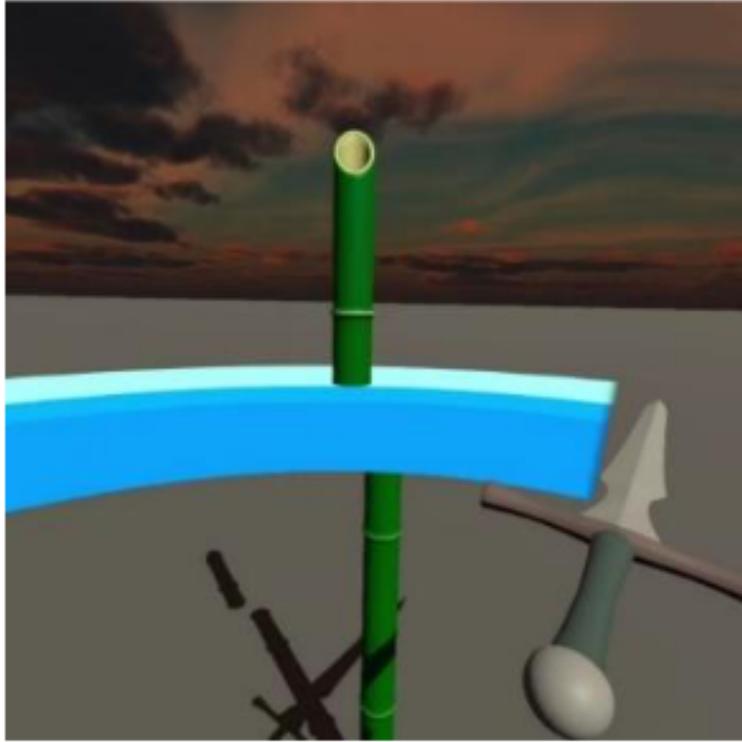


図 1.1: 斬撃動作体験システム [1] でのブラー表示

得られるようになるのでは?と考えた。しかし、スピード線・残像・ゆがみを用いる方法が VR 空間で疾走感に影響があるかを確認した論文は見つけれなかった。

1.2 研究目的

VR 体験において、残像表現・ゆがみの表現といった速度の強調表現を用いることで、疾走感に影響があるのか、強調表現の描写によって疾走感に差異はあるか解明するために調査実験を行う。調査のために Unity で作成した VR 空間を Meta Quest 2 で被験者に提供する。

1.3 研究意義

VR 空間では、速度を出したときに使うエフェクトとしてトンネルエフェクトやモーションブラーを利用する研究がされており、同時に VRChat などのソフトへ

の実装も進んでいる。本修士論文では、そのエフェクトの実装の手段の一つとして、残像表現やゆがみの表現がVR空間にて効果的かを解明する。

少なくとも、漫画やアニメなどの平面的なものの演出として、残像表現やゆがみの表現が疾走感に良い影響を与えることは自明である。しかし、これを没入感の高いVR空間にて利用した場合、疾走感を損なわないかを調査する必要があると考えた。

効果があるのであれば、VR空間にて移動するときの体感速度の強調として利用の検討ができる。プレイヤーアバターが歩行・走行するときだけでなく、乗り物に乗っている時にも利用できると考えている。

1.4 論文の構成

第2章でVR酔いや疾走感の強調表現、3D空間での強調表現に関連する研究の説明を行う。第3章で今回実験に利用したVR空間と強調表現についての説明を記述する。第4章で本研究において行った全実験の内容を記述する。前実験に関しては、実験結果も同章でまとめて記述する。第5章で本実験の結果を記述し考察を行う。第6章で本論文のまとめを行う。

第2章 関連研究

2.1 VR酔いについて

第1章にて、VR酔いの研究が活発になってきたと記述した。これは、VR酔いによって引き起こされる健康被害が無視できないものだからである。そもそもVR酔いとは、VR体験中に吐き気や頭痛に襲われる症状を指す。これまで、VR酔いを軽減するための方法 [12][13] や、VR酔いが起こっている状態を客観的に調査する論文 [14][15] は数多く発表されているが、明確な原因はわかっていない。しかし、有力な説である感覚不一致説では、これまでの体験から基づく予測と現在の体験からくる感覚情報の食い違いにより酔いの症状が発生すると言われている。[16][17] この感覚不一致を引き起こす原因の一つとして、ヘッドマウントディスプレイ (以下HMDと記述) の画面解像度が十分でなかったり、フレームレートが低いことが挙げられている。[12]

本研究にて行う実験は受動的である。現実世界では被験者は全く動かないのに対し、VR空間では動く様子を目で見ることになり、視覚の情報とほかの感覚器官の情報が食い違った結果、感覚不一致説に基づくVR酔いが発生する可能性がある。

VR酔いを完全に防ぐため、体験の質に関する研究よりVR酔いに関する研究の方が活発になっていると著者は考えている。そんな中でも、VR酔いに配慮しながら、被験者が大きくなったり小さくなったりすることにより、長い距離を移動したように感じさせる研究 [18] や、公園の遊具を使ったVR体験の開発 [14] など、VR体験に関する研究は発表され続けている。

2.2 疾走感の強調表現

疾走感は五感から感じる情報を基に得る感覚だが、特に視覚からの情報が重要になる。ある物体を見る観測者がいたとき、対象物体の運動により生じた動きの軌道を見ることで、動いていない観測者が動いている錯覚を抱くことがある。この現象を視覚誘導自己運動感覚と呼ぶ。視覚誘導自己運動感覚は、特に周辺視野から受ける刺激によって発生しやすい。これを利用し、LEDを接続した複数の四角いフレームを4本の柱でつないだ装置を利用し、LEDによる点灯を、被験者の遠くから近くへどんどん近づける実験を行い、疾走感を与える効果を確認した論文[19]がある。

漫画やアニメで使われてきたスピード線で行う疾走感の表現を、コンピュータグラフィックに用いて動きを表す試みは1999年に発表されたMasuchらの研究[2]でも確認できる。この頃からスピード線や残像による疾走感の表現は認知されている。図2.1はMasuchらの研究では開発したレンダラーによってスピード線や残像を自動描画するものである。

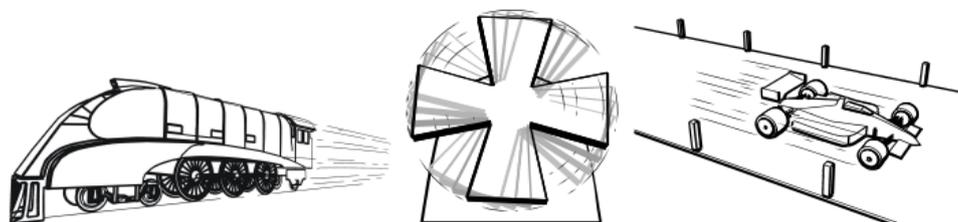


図 2.1: Speedlines[2] によるレンダリング結果

他にも、Lapidesらが開発したリアルタイムスタイライゼーション[3]による、スピード線や残像を自動生成する手法がある。ぼかし・変形・スピード線・残像(論文では振動線と表記)などを用いて静止画の中に動きの感覚を表現する、モーションスタイライゼーションという技術がある。この研究では、ユーザの自由な入力に応じてモーションスタイライゼーションをリアルタイムにレンダリングしている。論文に記載されていた図2.2の(b)(c)(d)にて自動生成されたスピード線や残像の例が示されている。(b)(c)は移動速度に応じたスピード線が自動生成されてお

り、(d) は急停止によってオブジェクトの右側に残像が自動生成されている。

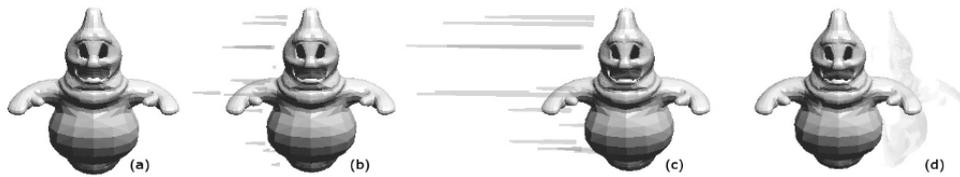


図 2.2: Lapidés らが開発したリアルタイムスタイライゼーション [3]

日本では、マンガのスピード線の視覚的効果を検証した研究 [20] がある。この研究では、漫画の中でよく使われる記号的表現である「スピード線」が、どのように理解されているのかを調査したものである。結果として、水平に描かれるスピード線は、物体が運動していると認識させる表現として有用であることを示した。しかし、漫画的表現に注目してスピード誇張表現の変遷を研究した論文 [21] でも言及されていたが、漫画は日本でかなり親しまれており、加えて様々な表現が研鑽された結果残った表現方法にスピード線の表現が含まれている。そのため、漫画を読んだことがない人を対象にしても、スピード線が物体の運動を認識させる表現であるのか調査する必要があると述べている。

2.3 3D 空間でのスピード線、残像、ゆがみの表現

3DCG でのスピード線による表現は開発されていた。先ほど説明したリアルタイムスタイライゼーション [3] もその一つである。しかし、スピード線関係の研究はほとんどがモーションブラーに関する研究に使われるようになっており、最近の研究論文でスピード線に関するものは確認できなかった。

3DCG における漫画的なスピード誇張表現に関する研究 [4] では、スピード線による効果のほか、残像とゆがみによる効果も加味して、境界線のモデルを変形したり、モーションブラーとパーティクルを利用する境界線ブラーを作成する手法を開発した。図 2.3 がレンダリング結果である。境界線のモデル変形 (図 2.3 左) がスピード線とゆがみの要素を取り入れており、境界線ブラー (図 2.3 右) はスピード線と残像の効果を取り入れている。

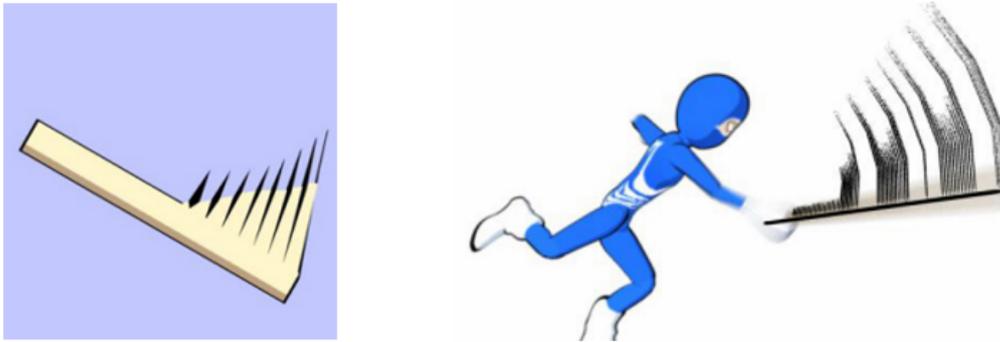


図 2.3: モデル変形 (左図) と境界線ブラー (右図) [4]

この「スピード線 (図 2.4 左)・残像 (図 2.4 中央)・ゆがみ (図 2.4 右)」の3つの表現は、漫画的なスピード誇張表現としてほかの論文 [5] でも出てくるため、この3つの表現はスピード誇張表現として基本的な表現であると言える。図 2.4 のゆがみの表現では、斧の先端の波打ったエフェクトの長さが長くなるように描写されている。これは観測者から見た速度を基に作成したエフェクトであり、弧を描くように振った場合 (斧の手元より先端が速く見える場合) を想定した表現だからである。そのため、同じ速度であれば同じ長さになる。



図 2.4: スピード線 (左図)、残像 (中央図)、ゆがみ (右図) の表現例 [5]

また、VR 空間などの 3D 空間上では、カメラの位置に対応した表現の作成をしなければならない。図 2.5 のように、オブジェクトの軌跡に沿って線を描画するだけだと、カメラの視点を変えることによって線が見えなくなり、効果を得られなくなってしまう。こういった表現作成の難易度が、スピード線・残像・ゆがみの3つの表現がスピード誇張表現として基本的な表現であると言えるのに、開発され

ていない原因だと考える。

今回の実験でもこの問題が発生した。



図 2.5: 横からの視点（左図）と正面からの視点（右図） [6]

2.4 本研究の位置づけ

本研究では、スピード誇張表現として基本的な表現である「残像・ゆがみ」の2つの表現を利用して、VR空間にて利用する誇張表現を作成し、効果を検証する。少なくとも、漫画やアニメなどの平面的なものの演出として、残像表現やゆがみの表現が疾走感に良い影響を与えることは自明である。しかし、こういった表現は現実には起こらない現象である。没入感の高いVR空間にてスピード誇張表現を利用した場合、違和感を抱かないかは調査する必要があると考えた。

本実験では、最終的に残像とゆがみの誇張表現を作成した。関連研究でもすでに開発されており [2] 最も効果が期待できると考えているスピード線を利用した強調表現も作成していたが、スピード線のランダムな作成がうまくいかず、断念した。

第3章 提案手法

本実験にて、疾走感を与える強調表現は、残像を模した強調表現（以下、残像と記述）とゆがみの表現を模した強調表現（以下、ゆがみと記述）の2種類を用意する。強調表現はすべて Unity の Shader を用いて描画する。

3.1 実験環境

全実験で、同じ実験環境を利用した。実験の様子を図 3.1 に示す。

ハードウェアは Meta Quest 2(旧 Oculus Quest 2) で VR 環境を提供する。Meta Quest 2 とは、Meta が開発した VR ヘッドマウントディスプレイ (VR HMD) である。コントローラーは Meta Quest 2 付随の Touch コントローラーを使用した。写真を図 3.2 に示す。

本体仕様は表 3.1 の通りである。

表 3.1: Meta Quest 2 仕様

項目	説明
サイズ	295.5 × 191.5 × 102mm
片目あたりの解析度	1832 x 1920 ドット
リフレッシュレート	90Hz
自由度	6DoF
重さ	504g+189g(ヘッドストラップ)

VR 環境を提供するための PC の実行環境は表 3.2 の通りである。



図 3.1: 実験中の様子

表 3.2: 使用 PC 仕様

項目	説明
CPU	AMD Ryzen 5 5600X 6-Core Processor 3.70 GHz
GPU	NVIDIA GeForce RTX 3060 Ti
メモリ	32GB
OS	Windows 11 Home

3.2 VR 環境

3.2.1 VR 空間

VR 環境構築のために、Unity を使用した。Unity とは、ユニティ・テクノロジーズから開発した、統合開発環境を内蔵し複数の機材に対応する、左手系座標を採用したゲームエンジンである。VR 対応しているプラットフォームだったため、本実験での使用を決定した。本研究では、2020.3.27f1 バージョンを使用した。

Unity にはプリミティブオブジェクトとして Plane という平たい板のようなオブジェクトがある。これのメッシュに Material というオブジェクトの質感を変更す



図 3.2: 利用した Meta Quest 2

る機能を適用して描画を行い、強調表現として見せる。そのため、作成した強調表現はオブジェクトとして管理される。強調表現の長さは、基本的にオブジェクトの大きさを示すパラメータである *Scale* の X 軸を操作して調整する。X 軸がどの方向かは図 3.3 を参照すること。強調表現の対象は、色が単色で残像表現にて表示する形が単純である、街灯の支柱を対象として選んだ。強調表現の色も街灯の支柱に合わせている。

実験は受動的であり、プレイヤーの移動開始・停止、シーン切り替えなどの操作はすべて私が行った。被験者には、頭を動かして自由に VR 空間を見てもらった。

全体図は図 3.3 を参照すること。左の赤色がプレイヤーの位置で、右の赤色がゴールの位置を指す。全体図での視認性を高めるために、本来透明にしているプレイヤーとゴールを赤色に着色し、大きくした状態で図 3.3 の撮影を行っている。また、図の X 軸の矢印方向がワールド座標 (原点を対象とした絶対座標位置) を示している。

全体図では街灯や道路がわかりづらいため、近づいてプレイヤー初期位置から

見た VR 空間を図 3.4 に載せている。白い立方体がプレイヤーの位置を示しているが、これも実験中は透明である。

全体図作成時含め、オブジェクトの配置、光源の角度はすべてのシーンで同じである。



図 3.3: 上から見た、作成した VR 空間全体図

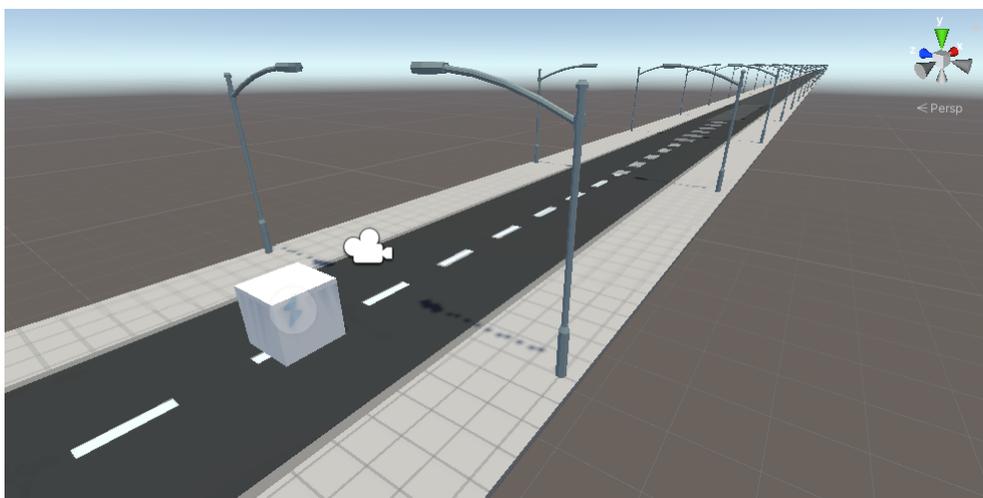


図 3.4: プレイヤー初期位置付近から見た、作成した VR 空間

3.2.2 プレイヤーの移動

プレイヤーの移動について説明する。移動に関する変数リストを作成した。表 3.3 を参考にすること。

表 3.3: プレイヤーの移動に関する変数

項目	初期値	説明
<i>speed</i>	0.04	上限速度
<i>playerSpeed</i>	0	プレイヤーの現在の移動速度
<i>calcSpeed</i>	0.005	加速度 (減速時も参照)

プレイヤーはワールド座標の正の X 軸方向のみに直進して、ゴールへ向かう。プレイヤーの現在速度は *playerSpeed* と定義して管理する。*playerSpeed* の遷移については図 3.5 で示す。

動き出しは $playerSpeed = 0$ と設定しているため速度が出ない。プレイヤーは走り出すと、時間経過とともに等加速運動を行う。加速 (減速) 量は *calcSpeed* で定義しており、本実験では 0.005 で固定した。設定した速度に達すると速度を維持する。この設定した速度を *speed* という変数として管理しており、コンテンツ開始時点では 0.04 に設定している。初期設定の *speed* が実験での上限速度である。

ゴールしたり停止信号を送ると、*speed* を 0.0 にオーバーライドする。これにより設定速度が 0 (停止) となり、*calcSpeed* を参照に *playerSpeed* を減算していき、等加速度で速度を落とす。0 まで速度を落としたら停止するので、*playerSpeed* の減少をやめる。ゴールによる停止後にシーンリセットを行ってスタート地点へ戻る。

上限速度 *speed* はすべての実験で固定する。一般的な CG での表現にて、残像やゆがみの表現は速度が速くなるほど長くなるため、オブジェクトが動く速度に対して、適切な強調表現の制御ステータスが存在する可能性があるが、本論文では考慮しない。調査量が膨大になる上に「VR 空間で強調表現を使ったときに疾走感に影響があるか」という研究目的からずれる内容と考えたからである。

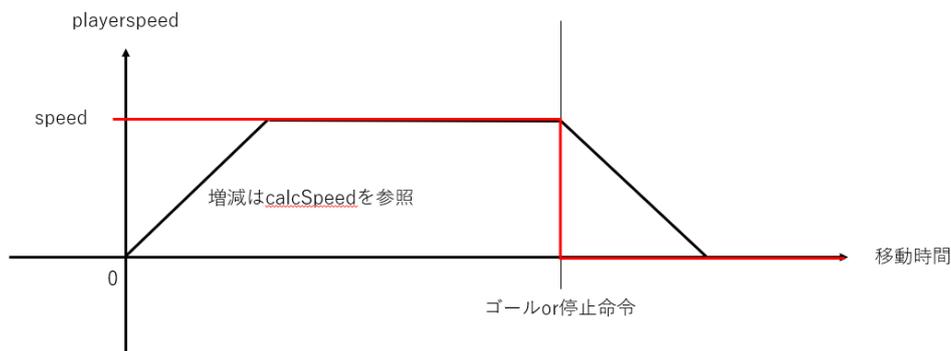


図 3.5: プレイヤーの移動速度 (*playerSpeed*) の変化を示すグラフ

3.2.3 強調表現の長さの変更

プレイヤーが移動すると、速度に応じて強調表現の長さが増減する。こちらにも変数リストを作成した。表 3.4 を参考にすること。

表 3.4: 強調表現の長さ変更に関する変数

項目	初期値	説明
<i>ef fecScale.x</i>	強調表現の大きさに対応	強調表現の X 軸方向の大きさ
<i>ef fecPos.x</i>	強調表現の位置に対応	強調表現の原点から X 軸方向の距離
<i>changeScale</i>	0.0008	大きさ変化量
<i>changePos</i>	0.004	位置変化量

強調表現を長くする場合を式 3.1 に、逆に強調表現を短くする場合を式 3.2 に示す。

$$ef fecScale.x+ = changeScale \quad (3.1)$$

$$ef fecScale.x- = changeScale * 5 \quad (3.2)$$

ef fecScale.x が現在のオブジェクトの X 軸方向の大きさを示し、*changeScale* は長さの変更量を指している。減速した時に早く強調表現を消したい (*ef fecScale.x* を 0 にしたい) ため、*changeScale* に 5 の定数をかけた。定数は早く強調表現を消せる値で、一瞬で消えない値が望ましく、試行錯誤した結果 5 に決定した。

また、オブジェクトの大きさは、オブジェクトの中心を基準にして拡大する形で変更されるため、違和感をなくすためにオブジェクトの位置を同時に変更する

必要があった。強調表現を長くする場合を式 3.3 に、逆に強調表現を短くする場合を式 3.4 に示す。

$$effecPos.x+ = changePos \quad (3.3)$$

$$effecPos.x- = changePos * 5 \quad (3.4)$$

$effecPos.x$ が現在のオブジェクトの X 軸上の位置を示し、 $changePos$ は位置の変更量を指す。強調表現の縮小速度に合わせるため、速度低下時の $changePos$ にかける定数を $changeScale$ にかける定数と合わせている。

$changeScale$ と $changePos$ は、 $calcSpeed$ に、各変数に対応する値をかけて算出している。このときにかける値の比率が重要で、式 3.5 に示した比率にしないと位置ずれが発生する。

$$changeScale \text{ にかける整数} : changePos \text{ にかける整数} = 1 : 5 \quad (3.5)$$

3.3 残像

残像表現は、同じ色で描画したオブジェクトに対して一定間隔で描画する範囲を指定することにより、描画する間隔を開けることによって表現している。この描画の表示・非表示を判定する式を式 3.6 に、グラフを図 3.6 に示す。

$$clip(\text{frac}(i.localPos.x * SliceSpace) - Interval) \quad (3.6)$$

また、変数リストを表 3.5 に記載する。

表 3.5: 残像に関する変数

項目	初期値	説明
$i.localPos.x$	説明参照	描画対象のローカル座標 X 軸位置
$SliceSpace$	0~2	描画間隔の調整
$Interval$	0~1	描画部分の幅の調整

Unity のスクリプトで用意されている関数について説明する。clip 関数は、与えられた値が 0 以上の座標のみを描画するように操作する関数である。frac 関数は、

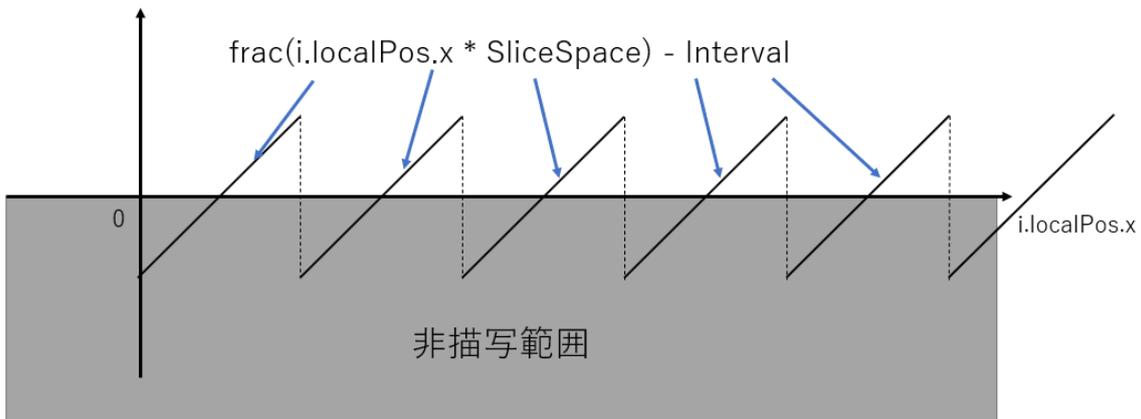


図 3.6: 表示・非表示を判定する $clip(\frac{i.localPos.x * SliceSpace}{SliceSpace} - Interval)$ のグラフ

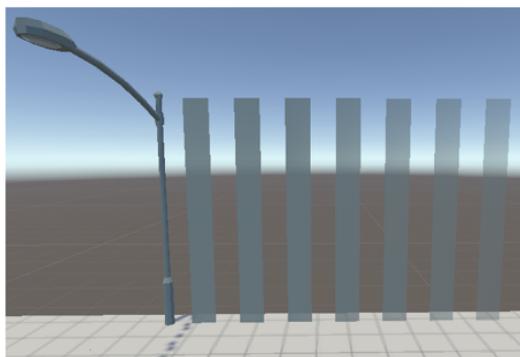
小数値を取り出す関数である。結果として、frac 関数で返ってくる値は 0 以上 1 未満となる。

変数についての説明を行う。 $i.localPos.x$ は、描画対象の各頂点 (i) のローカル座標 ($localPos$) の X 軸 (x) を示す、描画位置の指定に関わる値である。Unity には原点から見た座標を示すワールド座標と、オブジェクトの一つ上の親オブジェクトから見た相対的な座標を示すローカル座標がある。 $i.localPos$ は、描画対象となるオブジェクトのローカル座標のすべての座標軸のデータを保持している。そこから X 軸のデータのみを取り出すために、 $i.localPos.x$ と指定する。

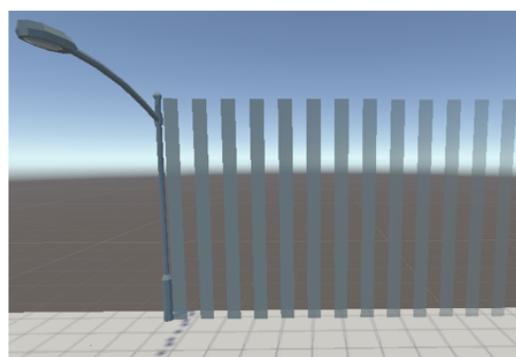
$SliceSpace$ は 1 つ目の制御ステータスであり、代入する値によって残像を描画する間隔が決定される (図 3.7 参照)。代入する値が大きいくほど、残像を描画する間隔が小さくなる。本研究では 0~2 の範囲で調整できるように残像表現のプログラムを作成した。

$Interval$ は 2 つ目の制御用ステータスであり、frac 関数によって導出された値を調整するための、この値によって残像表現の幅が決定される (図 3.8 参照)。前述の frac 関数の仕様の関係で、 $Interval$ は 1 以上の値を設定しても意味がない。そのため、今回の実験にて $Interval$ の指定範囲は 0~1 で設定している。 $Interval$ を引いた値の結果、つまり $\frac{i.localPos.x * SliceSpace}{SliceSpace} - Interval$ が 0 を下回る (図 3.6 の灰色のエリアにグラフがある) とき、式 3.5 で利用した $i.localPos.x$ の

Materialは描画しない。また、ゆがみと同じ方法を用いて、残像表現にグラデーションを施している。詳しい内容は後述する。

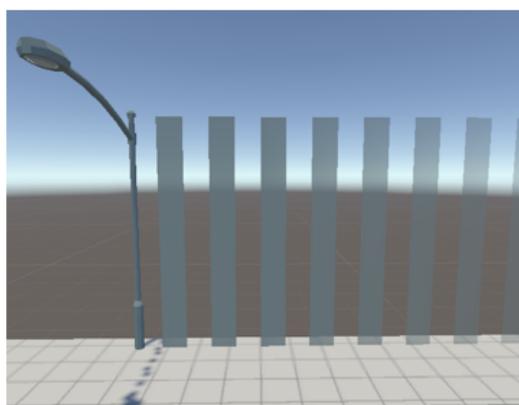


SliceSpace = 1

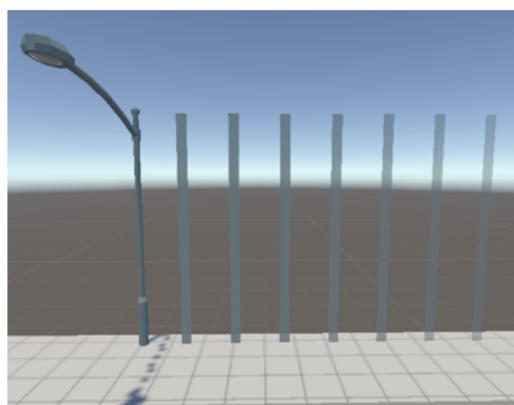


SliceSpace = 1.75

図 3.7: *SliceSpace* 変更によって変わる描画間隔



Interval = 0.5



Interval = 0.8

図 3.8: *Interval* 変更によって変わる残像部分の幅

実際の描画結果は図 3.11 を参照すること。

3.4 ゆがみ

図 2.4 右のゆがみの表現で、斧の先端の波打ったエフェクトの長さが長くなるように描写されていた。これは観測者から見た速度を基に作成したエフェクトだからである。しかし、本修士論文で作成したゆがみの表現は、プレイヤー視点の街

灯の支柱の速度が高さ (ワールド座標の Y 軸) によって変わらないと仮定して作成している。理由を順に説明する。

基本的に人間は、違和感を感じてしまうとその違和感の方を気にしてしまう。その違和感を強調表現で起こしてしまうと、強調表現によって感じた違和感の方に注意が向いてしまい、結果として疾走感を損なうことになる。また、強調表現は効果的に使えばよい影響を与えるものの、基本的に現実に起こりえない現象である。そのため、注視されるほど現実的じゃない状態として違和感を覚えられてしまう。そして、遠い位置にある物体より、近い位置にある物体の方がプレイヤーに細部まで注視されやすく、強調表現は違和感として覚えられる可能性が高まる。このことから、作成する強調表現は、プレイヤーに最も近い位置に街灯が来た時に注視されても違和感を抱かれにくい強調表現にしないといけない。

今回作成したコンテンツにおいて、プレイヤーと強調表現が最も近い位置にある時とは、強調表現がプレイヤーの真横に位置する時である。普通、プレイヤーは進行方向である前を見ているため、街灯は奥から手前に移動しているように見える (図 3.9 上参照)。しかし、プレイヤーが真横を向いているときは、街灯はまっすぐ右から左 (もしくは左から右) へ横切るように見える (図 3.9 下参照)。図はコンテンツ内で左を向いた時の図である。横を向いている時の街灯はかなり大きく見えるため、プレイヤー視点だと流れが図示しづらい。そのため、図 3.9 下はプレイヤーが移動する道路上から離れた位置で撮影している。

ゆがみの表現は、図 2.4 右に示したように見かけの移動速度に応じた物体の変形を行うことを基本とする。しかしながら、VR 空間での体験では視点の移動が任意であることと、ゆがみのモデル描画という実装手法を用いたために、前述のゆがみの表現をリアルタイムで違和感なく変更することは困難であった。そのため、プレイヤーと強調表現が最も近い位置にある時のゆがみの表現を、街灯が奥から手前に移動する時の強調表現とした。

街灯はまっすぐ移動するため、軌道は直線的であり、上端と下端で見かけの移動速度は同じと言える。このことから、プレイヤー視点の街灯の支柱の速度が高さによって変わらないと仮定した。

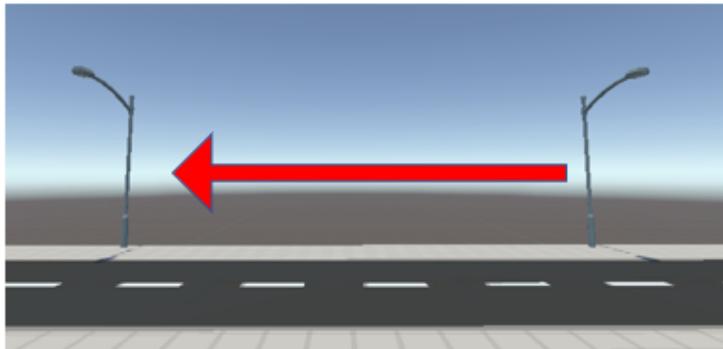
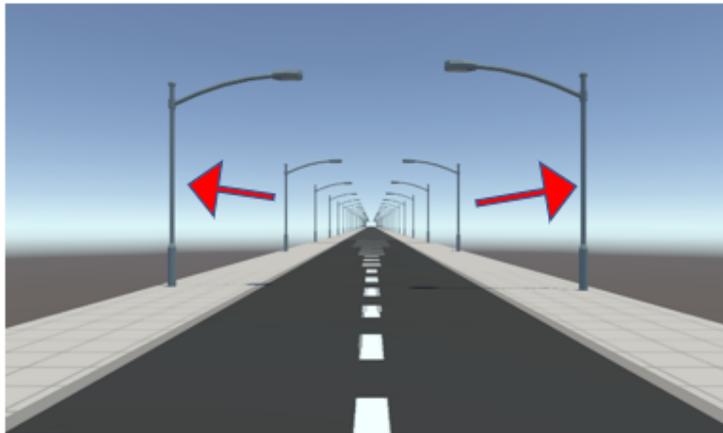


図 3.9: プレイヤーの視点によって変わる街灯の移動方向

ゆがみの表現で扱う変数のリストを表 3.6 に記載する。

表 3.6: ゆがみに関する変数

項目	初期値	説明
<i>TopColor</i>	色を指定	強調表現の始点の色
<i>ButtomColor</i>	色を指定	強調表現の終点の色
<i>TopColorPos</i>	1	強調表現の開始位置
<i>TopColorAmount</i>	0~1	強調表現の濃淡の変更

2つのカラーパレットの、透明度のステータスであるアルファ値を制御して、グラデーションを表現することでゆがみの再現をしている。まず2つのカラーパレットを用意する。どちらにも同じ色を指定するが、強調表現の開始点の色はアルファ値を1にして不透明に、強調表現の終点の色は0にして透明にする。強調表現の開始点として指定した色を *TopColor*、終点に指定した色を *ButtomColor* と定義

する。

本研究で作成したゆがみの表現は、グラデーションの濃淡を調整することができる。残像表現のグラデーションも同じ方法で作成した。数式は式 3.7、式 3.8 の通りである。

$$amount = clamp(abs(TopColorPos - i.uv.x) + (0.5 - TopColorAmount), 0, 1) \quad (3.7)$$

$$i.color = lerp(TopColor, BottomColor, amount) \quad (3.8)$$

強調表現の開始位置を *TopColorPos* と定義する。街灯を開始位置としたいので、基本的に初期値 1 で固定される。制御ステータスである *TopColorAmount* の値によって、グラデーションの濃淡を調整できる (図 3.10 参照)。値が小さいと *BottomColor* の影響が強くなり色が薄くなる。逆に値が大きいと *TopColor* の影響が強くなり色が濃くなる。

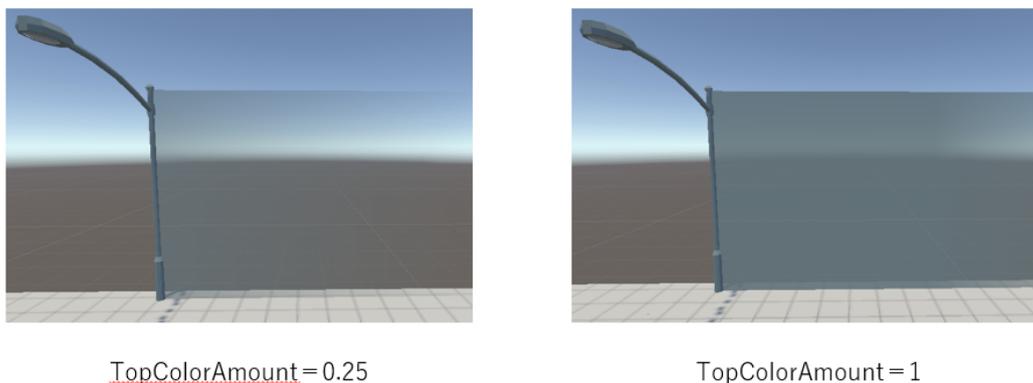
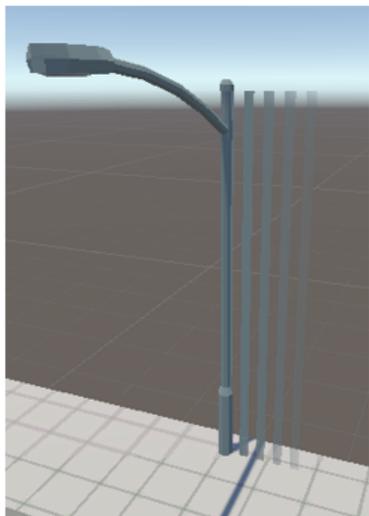


図 3.10: *TopColorAmount* の値による変化

amount は、*clamp* 関数によって出力される値が 0~1 の範囲に固定されている。*i.uv.x* は、ゆがみの表現を適用したオブジェクトの UV 座標 X 軸を指す。基本的に UV 座標は U 軸 V 軸なのだが、Unity で扱うプログラム上では X 軸 Y 軸で管理されており、横方向が X 軸、縦方向が Y 軸である。UV 座標 X 軸はワールド座標の X 軸と方向を合わせている。

lerp 関数は、入力 A と入力 B の間を入力 T によって線形補間した結果を返す。今回は、入力 A が *TopColor*、入力 B が *BottomColor*、線形補間に必要となる入

力 T が *amount* である。lerp 関数によって、レンダリングするときの色 *i.color* が滑らかなグラデーションになっている。描画結果は図 3.11 を参照すること。



残像



ゆがみ

図 3.11: 残像とゆがみの強調表現 描画結果

第4章 実験設計

実際に行った本実験と、本実験を行う前に実施した予備実験について説明する。各実験で目的が違うので、目的はセクションの冒頭で記述する。

4.1 予備実験1 特徴的な制御パラメータの適正值調査

本実験で利用する強調表現の制御パラメータを設定するにあたり、適正がわからない値があった。論文で残像やゆがみの適した描画距離が示されているものもなかったため、各強調表現の特徴的な制御パラメータの適正值と、強調表現ごとの適した長さがわからない。このため、各制御パラメータの適正を求める予備実験を行った。

予備実験1では、各強調表現の特徴的な制御パラメータの適正值を調査する。VR体験にかかる時間は、各強調表現のパターンひとつにつき20秒程度であり、合計して2分程度である。一人の被験者に対する実験時間は、説明・アンケート回答時間も合わせて10分程度である。

4.1.1 実験内容

本実験と同じVR環境で実験を行った。

被験者には残像とゆがみで制御パラメータが異なるものを体験してもらう。

残像では、描画する間隔の適正值を求める。間隔が狭い設定と広い設定、その中間の3種類を用意した。対象の制御パラメータは *SliceSpace* と *Interval* の2つである。設定値の詳細は表4.1を参照すること。

間隔が違う3つの強調表現において、強調表現を描画するオブジェクトの長さは同じであり、残像の幅も同じになるように調整している。3つの強調表現をそれ

ぞれ VR 空間にて体験してもらい、体験が終わったら疾走感を 5 段階評価してもらった。体験する順番はランダムにした。

表 4.1: 残像の制御パラメータ 設定値

パラメータ	狭い	中間	広い
SliceSpace	1.5	1	0.5
Interval	0.5	0.7	0.8

ゆがみはグラデーションの適正値を求める。グラデーションが薄くすぐに透明になるものと、逆に濃くて不透明な部分が長いもの、その中間の 3 種類を用意した。対象の制御パラメータは *TopColorAmount* のみである。設定値の詳細は表 4.2 を参照すること。

3 つグラデーションが違う 3 つの強調表現において、強調表現を描画するオブジェクトの長さは同じである。残像表現と同様に体験してもらい、疾走感を 5 段階評価してもらった。体験する順番はランダムにした。

表 4.2: ゆがみの制御パラメータ 設定値

パラメータ	薄い	中間	濃い
TopColorAmount	1.5	1	0.5

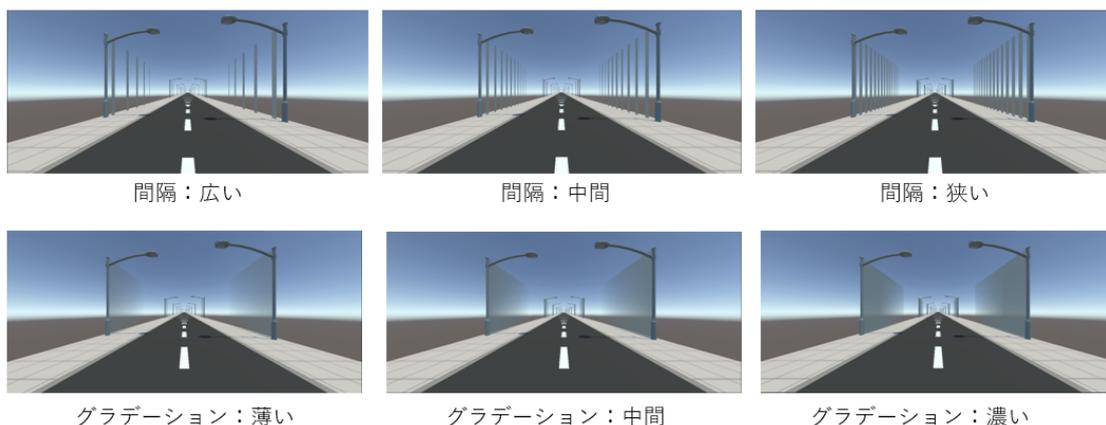


図 4.1: 予備実験 1 での強調表現比較用画像

アンケート評価の平均値を比較して、適正値を求める。

4.1.2 実験結果

実験には、5人の20代男性に協力していただいた。各被験者の5段階評価の平均値を表4.3に記載する。

表 4.3: 制御パラメータの適正值評価アンケート結果

強調表現	広い・薄い	中間程度	狭い・濃い
残像	2.8	3.8	3.4
ゆがみ	4	3.6	3

残像は中間程度の設定が、ゆがみはグラデーションが薄いものが最も疾走感を感じる結果となった。ゆがみは、濃いと壁のように見えて疾走感が落ちるという意見があった。

4.2 予備実験2 強調表現の長さ適正值調査

予備実験2では、各強調表現の適した長さを決めるために、長さの制御パラメータの適正值を調査する。ここで言っている長さは、速度を維持した状態（＝強調表現の長さが最大の状態）を対象としている。VR体験にかかる時間は、各強調表現のパターンひとつにつき20秒程度であり、合計して2分程度である。一人の被験者に対する実験時間は、説明・アンケート回答時間も合わせて10分程度である。

4.2.1 実験内容

長さは、上記の特徴的な制御パラメータの適正值を求めた後に実施した。速度を上げたときの最大長さが短いものと長いもの、中間程度の3種類を各強調表現で用意し、VR空間にて体験してもらった。ひとつ体験が終わるたびに、疾走感を5段階評価してもらった。

残像は、強調表現の長さ $ef fecScale.x$ に応じて残像の間隔が変化する。オブジェクトの最大長さ $limitScale.x$ を変更すると、それに応じて強調表現の長さが最大の時の残像の間隔も変わってしまう。そのため、 $limitScale.x$ を操作することによる強調表現の長さの変更ができなかった。このことから、 $TopColorAmount$ を

操作し、グラデーションによる可視範囲の調整を行うことで長さの調整を行った。*TopColorAmount* の値を小さくすると長さが短くなり、大きくすると長くなる。詳細値は表 4.4 に記載する。

オブジェクトの最大長さ *limitScale.x* の説明は次のゆがみの項で記述する。

表 4.4: 残像の長さ調整用パラメータ 設定値

パラメータ	短い	中間	長い
TopColorAmount	0.25	0.5	0.75

ゆがみは、各強調表現にアタッチしている、オブジェクトの大きさを操作するスクリプトを書き換えることによって調整を行った。スクリプトの数式は式 4.1、式 4.2 の通りである。

$$limitScale.x = firstScale.x + (speed * 12) \quad (4.1)$$

$$limitPos.x = firstPos.x + (speed * 60) \quad (4.2)$$

3章2節で説明した *ef fecScale.x* と *ef fecPos.x* の最大値を決めるのが *limitScale.x* と *limitPos.x* である。これらの変数は、コンテンツ開始時の X 軸方向の大きさ *firstScale.x* と X 軸上の座標 *firstPos.x* に、*speed* に特定の倍率をかけたものを足すことによって導出する。この特定の倍率を変えることによって、表現の長さを変更している。

speed にかける倍率は、整数に限定し、明らかに残像表現の長さが変化して見える値を選択した。初めに残像表現が短く見える倍率と長く見える倍率を決定し、その中央を取る形で中間の長さの値を決定しようと考えた。今回の中央の値は 10 だった。しかし、中央の値を採用すると、強調表現の長さが短い時と長さが大して変わらなかったため、10 に近い値で、長さの差がわかると判断できた値に変更している。詳細値は表 4.5 に記載する。

各被験者の 5 段階評価の平均値を比較する。

表 4.5: ゆがみの長さ調整用パラメータ 設定値

対応するパラメータ	短い	中間	長い
limitScale	4	12	16
limitPos	20	60	80

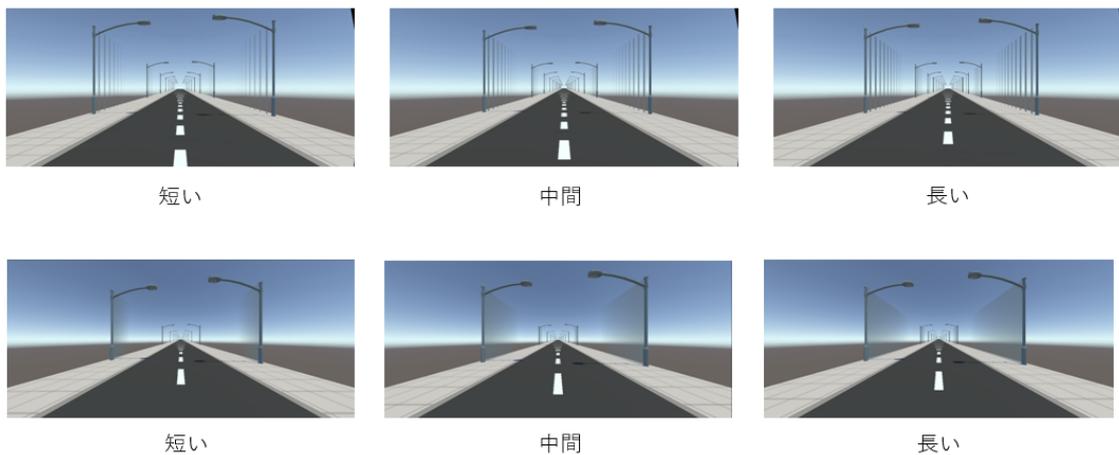


図 4.2: 予備実験 2 での強調表現比較用画像

4.2.2 実験結果

実験には、5人の20代男性に協力していただいた。今回の被験者は、予備実験1の時の被験者は含まれていない。表4.6にアンケート結果の平均値を記載する。

表 4.6: 長さの適正值評価アンケート 結果

強調表現	短い	中間程度	長い
残像	2.6	3.8	4
ゆがみ	2.2	3.4	3.4

残像は長い設定が最も疾走感を感じ、ゆがみは中間程度と長い設定が同値となった。これは、オブジェクトの速度が速いほどモーションブラーの長さが長くなることからこの結果になったと考察する。

残像は長い方が評価が高かったことも考慮し、残像とゆがみ、共に長さを長く設定した強調表現で本実験を行うことに決定した。

4.3 本実験

予備実験で決定した制御ステータスを基に、残像とゆがみの強調表現を作成した。これと強調表現なしの状態を被験者に体験してもらい、どれだけの疾走感を感じるのか、疾走感に差があるのか、残像表現によってVR酔いが発生しているのかを調査する。

これまで、著者が作成したVR空間にて被験者が目で見えるものは道路と街灯のみだった。しかし、本来VR空間には背景として建物や森といった背景オブジェクトがある。それらを配置した状態で、強調表現が疾走感に影響を及ぼすか調べる必要がある。本実験では、用意した強調表現と、強調表現を設定しない場合の3種類を用意し、背景なし・背景ありの2パターンを、それぞれ被験者に体験してもらおう。強調表現を体験する順番や、背景なし・背景ありのどちらを先に実験するのはランダムにした。

ひとつのパターンで強調表現3つを体験し終えるごとに、疾走感とVR酔いの評価を5段階で回答してもらった。これはVR酔いを防ぐための休憩も兼ねている。アンケートには、最後に自由記述欄を設けており、感想などを自由に記入してもらった。

VR空間にて、強調表現なし・残像・ゆがみのどれかひとつを体験するのにかかる時間は20秒程度で、背景あり・なしを合わせたVR体験時間の合計は2分程度である。一人の被験者に対する実験時間は、説明・アンケート時間も含めて20分程度である。

実験前の仮説として「背景なしの場合は疾走感に良い影響を与えるが、背景ありの場合は影響が少なくなる」と考えていた。アンケートの回答を基に、強調表現による疾走感の影響はあるのか、最も疾走感を感じる強調表現はどれだったのか、VR酔いが発生したか、VR酔いの強さはどれぐらいだったのかを判断する。

4.3.1 パターン1 背景なし

前実験と同じVR空間を用意する。道路上を自動で移動するので、被験者は周りを見てもらう。速度を上げると、街灯に設定した強調表現が現れる（強調表現なしの場合は現れない）。ゴールまで移動したらゆっくり止まる。これを計3回行う。



図 4.3: パターン1での強調表現

4.3.2 パターン2 背景あり

前実験と同じVR空間に、ビル等の建物のオブジェクトを追加で設置する。建物のオブジェクトを設置したVR空間の全体図を図4.5に、プレイヤー初期位置付近から見た様子を図4.6に示す。コンテンツの動作や強調表現・試行回数はパターン1と同じである。また、プレイヤーとゴールの位置、ワールド座標軸のX軸の正負の方向も同じである。



図 4.4: パターン2での強調表現



図 4.5: 上から見た、パターン 2 の VR 空間全体図



図 4.6: プレイヤー初期位置付近から見た、パターン 2 の VR 空間

第5章 結果と考察

5.1 結果

本実験の結果を記述する。本実験では、男性13人と女性2人の計15人に協力していただいた。また、被験者は全員20代である。

考察のために、平均値・最頻値をExcelの関数を用いて導出した。また、導出した平均値の有効数字は小数第3位までとして、小数第4位を四捨五入している。

5.1.1 パターン1 背景なし

始めに、背景無しの場合のアンケート結果を表5.1、表5.2に記述する。

表 5.1: 背景なしのアンケート評価（疾走感）

強調表現	なし	残像	ゆがみ
平均値	2.467	3.400	3.867
最頻値	3	3	4

表 5.2: 背景なしのアンケート評価（VR酔い）

強調表現	なし	残像	ゆがみ
平均値	1.533	2.000	2.067
最頻値	1	1	1

5.1.2 パターン2 背景あり

次に、背景ありの場合のアンケート結果を表5.3、表5.4に記述する。

表 5.3: 背景ありのアンケート評価 (疾走感)

強調表現	なし	残像	ゆがみ
平均値	2.600	3.600	3.733
最頻値	3	4	4

表 5.4: 背景ありのアンケート評価 (VR酔い)

強調表現	なし	残像	ゆがみ
平均値	1.733	1.800	1.800
最頻値	1	1	1

5.1.3 疾走感と VR 酔いの回答標本

回答のばらつきを視覚化するために、各アンケートの回答を標本として散布図にした。背景なしの評価を図 5.1 に、背景ありの評価を図 5.2 に掲載する。

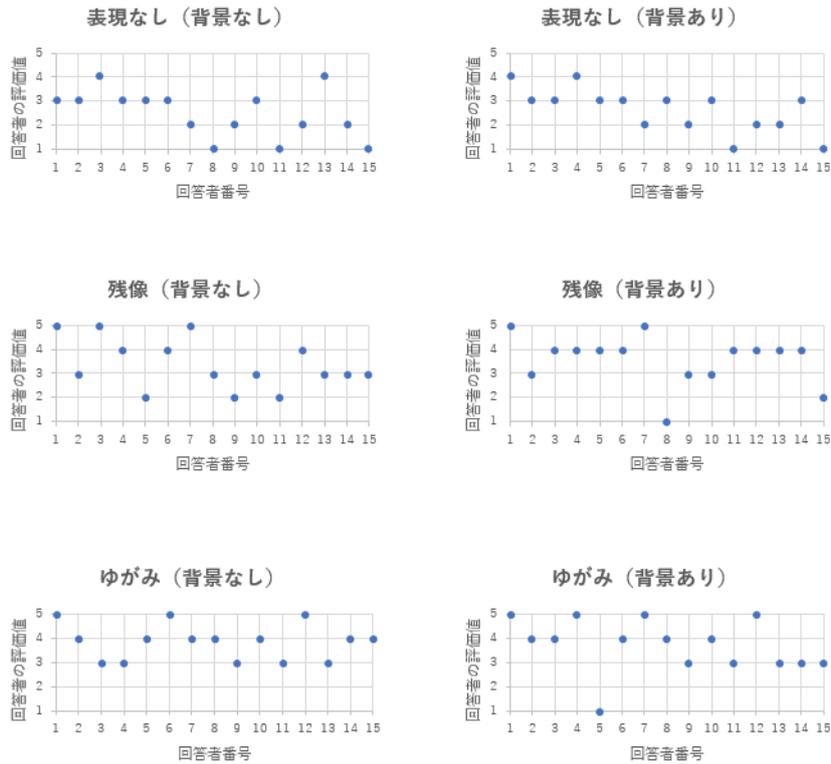


図 5.1: 疾走感のアンケート回答の散布図

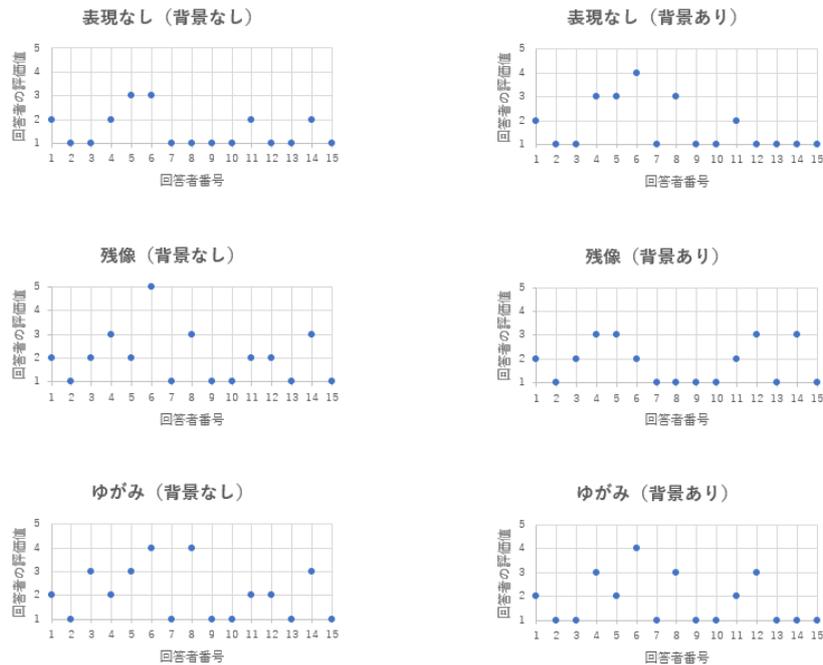


図 5.2: VR酔いのアンケート回答の散布図

5.2 考察

本実験の考察を記述する。考察では、平均値と最頻値を比較し、背景なし・背景ありともに、等分散を仮定した2標本によるt検定を行った（以降、「等分散を仮定した2標本によるt検定」を「t検定」と省略する）。すべてのt検定において両側検定を行っており、有意水準を0.05に設定した。帰無仮説は「群1の母平均と群2の母平均は同じ」としている。

5.2.1 強調表現の有無による疾走感の影響

強調表現なしの場合と、残像とゆがみを適用した強調表現ありの場合を比較し、疾走感の影響を考察する。t検定は、強調表現なしと、残像もしくはゆがみの強調表現を対象とした。

平均値を比較した場合、背景の有無に関係なく、強調表現なしよりどちらかの強調表現を利用の方が評価の平均値が高い。最頻値を比較した場合、背景なしの場合は、強調表現なしと残像の最頻値が同値である。しかし、ゆがみの表現は

強調表現なしより高い。背景ありの場合は、残像とゆがみの表現どちらも強調表現なしより評価の最頻値が高くなった。

t検定の結果を、背景なしの場合から記述していく。強調表現なしと残像のt検定の結果、 p 値 = 0.018667 < 0.05 となったため、帰無仮説を棄却、有意差があると言える。強調表現なしとゆがみの表現のt検定の結果、 p 値 = 0.000151 < 0.05 となったため、帰無仮説を棄却、有意差があると言える。

背景ありの場合、強調表現なしと残像のt検定の結果、 p 値 = 0.009639 < 0.05 となったため、帰無仮説を棄却、有意差があると言える。強調表現なしとゆがみの表現のt検定の結果、 p 値 = 0.004667 < 0.05 となったため、帰無仮説を棄却、有意差があると言える。

以上より、強調表現の種類にかかわらず結果に有意差があると言える。このことから、強調表現を利用することで疾走感を高めることができると言える。

自由記述欄に書かれた内容を、疾走感に関する内容で絞り抜粋すると「強調表現がないよりは、あった方が疾走感を感じる事ができた」「背景ありの方が疾走感をより感じた」「少し横を向いていた方が疾走感があった」「背景なし強調表現なしでも、加速を感じられたので疾走感があった」といった内容となる。

強調表現がある方が疾走感を強く感じるようだが、ない場合でも疾走感を感じる人はいたことがわかる。強調表現の有無にかかわらず背景ありのほうが疾走感を感じるのは、周辺視野の情報量が増えたことにより、視覚誘導自己運動感覚が発生しやすくなったからだと考察する。

また、「歪みを表現したものは、不自然に感じた」「残像で少し点滅に似た違和感を感じた。しかし、建物があると感じなかったと思う」といった内容を書いた被験者もいたため、双方の強調表現ともに表現に違和感を感じる人が現れる可能性がある。この違和感が疾走感に影響するかは、アンケート結果からは読み取れなかった。

上記結果を総合して、強調表現なしよりも、残像やゆがみといった強調表現を設定する方が疾走感を感じやすいと考えられる。そして、背景なしよりも背景ありの方が、疾走感が高まる傾向にあるようだ。

5.2.2 強調表現の種類による疾走感の差

先ほどの考察では、残像が与える疾走感への影響が、ゆがみの時よりも少ないと考えられる。そのため、強調表現である残像とゆがみを比較し、強調表現によって与える疾走感に差があるのかを考察する。t検定は、残像とゆがみの強調表現を対象とした。

平均値を比較した場合、背景の有無に関係なく、残像よりゆがみの方が評価の平均値が高い。しかし、強調表現なしと比較した場合よりも、差は小さい。最頻値を比較した場合、背景なしの場合は、残像よりもゆがみの方が最頻値が高い。背景ありの場合は、残像とゆがみの表現どちらも最頻値が同値である。

t検定の結果を、背景なしの場合から記述していく。背景なしでt検定を行った結果、 p 値 = 0.172497 > 0.05 となったため、帰無仮説を棄却できず、有意差があると言えない。背景ありでt検定を行った結果、 p 値 = 0.737323 > 0.05 となったため、帰無仮説を棄却できず、有意差があると言えない。

以上より、背景の有無にかかわらず結果に有意差があるとは言えない。

自由記述欄では特に記述は見当たらなかった。

上記結果を総合して、残像とゆがみには、疾走感に与える影響の差はない、もしくは非常に小さいものだと考えられる。

5.2.3 本実験で発生したVR酔いの程度

前提として、全実験を通して実験を中止・休憩するほどの重度のVR酔いが発生した被験者はいなかったことを記述する。また、ゴールした後の停止する時にVR酔いが発生したことを報告する被験者が多かったが、これは感覚不一致説を基にしたVR酔いと考えられるため、本研究では強調表現による影響とは別の原因と考える。

t検定は、背景なしとありで分けて、強調表現なし・残像・ゆがみの3つで組み合わせを作成し、すべてにt検定を行った。平均値を比較すると、背景の有無にかかわらず、どちらかの強調表現ありの方が強調表現なしよりもVR酔いの評価が

高い。しかし、背景ありの場合は平均値にほとんど差がない。最頻値はすべての条件・強調表現において1だった。強調表現なしの場合も1なので、実験自体がVR酔いを起こしづらい内容だったとも考えられる。

自由記述欄にて、VR酔いに関する内容を抜粋すると「背景ありの場合、情報量が多いために酔いやすい気がする」「疾走感が増すと、少しだけ酔う気がする」といった内容が書かれていた。さらに「疾走感を感じることで、酔いはトレードオフなんだろう」と書いた被験者がいた。これらの内容は、疾走感を高まったことによる感覚の不一致によってVR酔いが発生していると考えられる。

強調表現とは関係が薄い「フレームレートが低いせいか、映像がスムーズじゃないので、VR酔いの原因または疾走感の欠如につながりそう」と書いた被験者もいた。フレームレートが低いと、映像がコマ送りのように見えてしまう。これは感覚の不一致を引き起こし、VR酔いが発生する。

また、口頭にて「中止するほどではないが軽く酔う」と言った被験者は多かったこともここに記述する。

t検定の結果は、すべての組み合わせで p 値 > 0.05 となったため、帰無仮説を棄却できず、有意差があると言えない。強調表現なしの場合とも有意差がないため、強調表現の有無でVR酔いの程度は変わらないと言える。

以上から、今回作成した強調表現は、強いVR酔いを引き起こすものではないと考えられる。しかし、本実験はごく短時間のものだったため、長時間利用した場合のVR酔いはさらに強くなると考えられる。さらに、フレームレートが低いなどの、実験環境の問題がVR酔いの発生を誘発していたとも考えられる部分があるため、実験条件を細かく設定した調査によって、強調表現がVR酔いを引き起こすか調べる必要があると考える。

第6章 結論

6.1 本研究のまとめ

今回の研究はVR空間において、速度の強調表現を用いることで、疾走感に影響が出るのかを調べた。VR空間のような、没入感の高い状態でこれまで使われてきた疾走感の強調表現が有効かを調べるためである。

今回の実験では、漫画などで使われる残像とゆがみを用いた強調表現を作成した。それを用いて実験を行った所、強調表現を用いた場合の方が疾走感が高く、残像・ゆがみ共に効果があることが確認できた。背景ありの場合でも強調表現ありの方が疾走感が高いことが確認できたが、強調表現無しの場合も感じる疾走感が高い評価だったため、詳しく調査する必要があるだろう。

また、本実験で作成した強調表現はVR酔いを引き起こしづらいと言える。しかし、VR酔い自体は発生している。短時間での検証しかしてないため、今後は長時間での実験によるVR酔いの調査が望まれる。

6.2 今後の課題

今回作成した強調表現は、オブジェクトと色を同じにしている。そのため、一部の背景と同化して見づらい問題が発生した。この問題の解決法として、白や黄色などの見えやすい色にしたり、背景オブジェクトに使われていない色を用いることが考えられる。この方法を使う場合、オブジェクトと違う色を強調表現に使う場合の疾走感への影響を調べる必要がある。

他にも、*calcSpeed* や *calcScale* といった変数や、強調表現の大きさなど、強調表現を作成するにあたって私自身の試行錯誤や仮定のみで決定した値がかなり多

い。強調表現の適した制御ステータスは、プレイヤーの速度に対応するものだと考えているため、別の速度による調査も必須だと考えている。

また、実験中の被験者は進行方向である前を見ている人が多かった。横をむいて強調表現をまっすぐ見た被験者からは、強調表現が壁や柵のように見えるという人が多かった。しかし、横を向く方が疾走感を感じたと言う被験者もいたため、強調表現のデザインに関して、より違和感なく強調表現を見れるものにできるのかを調査する必要がある。

最後に、今回の研究では、スピード線による強調表現を作成できなかった。この表現は速度を強調するにあたりとても一般的な方法であるため、今回利用した残像やゆがみよりも疾走感を感じさせる強調表現である可能性が高い。違和感のないスピード線の表現を作成し、検証する価値は十分にあるだろう。

第7章 謝辞

本研究を遂行するにあたり、主指導教員である宮田一乗教授と副指導教員である謝浩然教授から研究に関して様々なご指導を賜り、心より感謝申し上げます。研究計画や手法、実験内容を検討する中で頂きました多くのご助言により、無事に本研究を形にすることができました。2年間ご指導いただき、本当にありがとうございました。

また、本研究へ議論してくれた宮田研究室の同期や先輩方、実験に協力いただいた被験者のみなさんにも、この場を借りてお礼申し上げます。

参考文献

- [1] 山本 And 福地. VR 環境における高速度な斬撃動作体験システムの開発. Interaction 2022, pp. 788–791, 2022.
- [2] Maic Masuch, Stefan Schlechtweg, and Ronny Schulz. Speedlines: depicting motion in motionless pictures. SIGGRAPH' 99, July 1999.
- [3] Paul Lapides, Mario Costa Sousa, and Ehud Sharlin. Real-time interactive motion stylization for mesh objects. <https://utouch.cpsc.ucalgary.ca/docs/RealTimeMotionStylization-NPAR10-PL.pdf>. Accessed: 2022-11-29.
- [4] 古野 泰. 3DCG における漫画的なスピード誇張表現に関する研究. Technical Report 39, 東京工科大学, メディア学部, 2006.
- [5] Y. Kawagishi, K. Hatsuyama, and K. Kondo. Cartoon blur: nonphotorealistic motion blur. In Proceedings Computer Graphics International 2003, pp. 276–281, 2003.
- [6] 川崎真吾. 漫画的動線によるカメラの位置を考慮したスピード表現の研究. Technical Report 31, 東京工科大学, メディア学部, 2007.
- [7] Davide Corbetta, Federico Imeri, and Roberto Gatti. Rehabilitation that incorporates virtual reality is more effective than standard rehabilitation for improving walking speed, balance and mobility after stroke: a systematic review. J. Physiother., Vol. 61, No. 3, pp. 117–124, July 2015.

- [8] 吉岡聖美. VR デバイスを活用したリハビリテーションプログラムの臨床研究. デザイン学研究, Vol. 67, No. 4, pp. 443–450, 2021.
- [9] 羽伸曹. VR ディスカッションにおける発言促進・阻害要因. Technical report, March 2021.
- [10] イクスアール株式会社. exhivision. <https://exhivision.exr.co.jp/>. Accessed: 2021-9-NA.
- [11] Google. Google books ngram viewer. <https://books.google.com/ngrams/graph>. Accessed: 2023-1-23.
- [12] 佐々木隼太, 菊地慶仁. VR 空間上の移動操作における酔いやすいシチュエーション及び対応策の模索. 2022.
- [13] Rongkai Shi, Hai-Ning Liang, Yu Wu, Difeng Yu, and Wenge Xu. Virtual reality sickness mitigation methods: A comparative study in a racing game. Proc. ACM Comput. Graph. Interact. Tech., Vol. 4, No. 1, pp. 1–16, April 2021.
- [14] 社本勇希, 檜垣泰彦. VR コンテンツの臨場感と高所におけるストレス反応の関係性に関する研究. 電子情報通信学会技術研究報告; 信学技報, Vol. 6, pp. 37–42, March 2018.
- [15] 泉博之, 神代雅晴, 戸上英憲, 岩下丈太郎, 杉村久理, 高橋雄三, 赤築秀一郎, 三宅晋司. バーチャルリアリティ操作時の生体影響に関する研究 (1). 人間工学, Vol. 36, No. Supplement, pp. 378–379, 2000.
- [16] 中川千鶴, 大須賀美恵子. VE 酔い研究および関連分野における研究の現状. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 3, No. 2, pp. 31–39, 1998.
- [17] 氏家弘裕, 渡邊洋. 映像酔いと立体映像. 視覚の科学, pp. 60–64, 2013.

- [18] Andrey Krekhov, Sebastian Cmentowski, Katharina Emmerich, Maic Masuch, and Jens Krüger. GulliVR: A Walking-Oriented technique for navigation in virtual reality games based on virtual body resizing. In Proceedings of the 2018 Annual Symposium on Computer-Human Interaction in Play, CHI PLAY '18, pp. 243–256, New York, NY, USA, October 2018. Association for Computing Machinery.
- [19] 山下真由, 深町太一, 可知怜也. Ocluduss: Optical curved device for user's speed sensation. コンピューティングシンポジウム ..., 2016.
- [20] 林 聖将 and 松田 剛 and 玉宮 義之 and 開 一夫. マンガのスピード線の視覚的效果. 認知科学, Vol. 20, pp. 79–89, 2013.
- [21] Takumu Kishimoto. 日本の漫画におけるスピード誇張表現に関する研究.