

2021年度 卒業論文

論文題目

パノラマ360度画像のHMD視聴における
視線方向制御による後方視認の容易化

指導教員

舟橋 健司 准教授

名古屋工業大学 工学部 情報工学科

2018年度入学 30114011 番

稲垣 正太郎

目次

第1章 はじめに	1
第2章 視線方向誇張手法	3
2.1 視線方向の定義	3
2.2 提案手法	3
第3章 評価実験	8
3.1 実験システムの概要	8
3.2 評価実験1	9
3.2.1 実験1-1の手順	9
3.2.2 実験1-1の結果	10
3.2.3 実験1-2の手順	11
3.2.4 実験1-2の結果	11
3.2.5 評価実験1全体の結果とその考察	20
3.3 評価実験2	20
3.3.1 実験2の手順	20
3.3.2 実験2の結果と考察	20
第4章 むすび	23
謝辞	24
参考文献	25

第1章 はじめに

近年、VR技術の発達により PlayStationVR や Oculus をはじめとした家庭用 VR 機器が普及している。これらの普及に伴い、様々な分野で VR を用いたサービスが広まっている。例えば不動産分野では物件を内見するサービスが、旅行分野では旅先の景色を疑似体験するサービスが取り入れられ、我々の身近なものになりつつある。総務省の令和2年版情報通信白書によると、世界の VR/AR 関連ソフトウェアサービス支出は2016年が2.3億ドルであったのに対し、2019年では10.6億ドルとなっている [1]。こうしたサービスの中でもパノラマ360度静止画像や、パノラマ360度動画は特に我々の身近に溢れてきている。これは Youtube をはじめとした動画配信プラットフォームや、Twitter、インスタグラムなどの写真投稿 SNS が急速に普及し、様々なコンテンツを共有できるようになったことも背景にある。「VRに関する意識調査」によると、VR の実際の体験率は全体の 21 % であり、体験内容の内訳（複数回答可）は VR 動画視聴が 44 %、ゲーム機・PC・スマホでの VR ゲームが 38 %、アミューズメント施設の VR アトラクションが 31 % であった [2]。

ところで、HMD (Head Mounted Display) は VR サービスを利用するために有効な装置の一つである。HMD とは左右の目の視差を用いた立体映像を提示する装置であり、臨場感溢れる映像空間を体験できる。HMD は様々な企業が製品化をしており、医療分野でも用いられている [3][4]。家庭用としては2016年にSONYから発売された PlayStationVR や [5]、2012年に Oculus から発売された OculusRift などを筆頭に開発が進んでいる。最近ではスマートフォンを取り付けるタイプの HMD も開発されており、多くの人が自宅で VR を楽しむことができるようになっている。自宅で利用される VR サービスは動画、ゲームなどが多く、また座った状態で利用されることが多いだろう。しかし、座った状態での HMD 視聴にはひとつ問題が生じる。それは、後方の視認が面倒なことである。一般的に人間の首の回旋（右を向い

たり左を向いたりする動作)における可動域は左右それぞれ60度, 座位における腰の回旋の可動域は左右それぞれ40度である [6]. そのため座った状態で後方を視認することは困難であり, そのためには腰を浮かせるか立ち上がる必要がある. この動作をHMDを装着中に何度も行うことは大変であるため, 必然的に後方を視認する回数は減ってしまう. そのため360度分のデータが用意されているが, 主に使用されるのは前方のデータだけとなり後方のデータは利用率が低くなる. また回転する椅子に座れば後方の視認は容易であるが, HMDを用いて360度動画を視聴する場合には座面の回転がユーザーの体の動きを増幅して感覚の不一致を増大させると報告されている [7]. そこで本研究では首の回旋だけで後方を視認できる新たな仕組みを提案する. 見ている方向, すなわち目を向けている方向を視線方向というが, 本研究ではこの視線方向をプログラムにより変更する. 実際の目の向きと異なる, より後方の風景をHMDに提示することで, 首の回旋だけで後方を見ることができるようにする. ところで, HMDベースVRシステムの欠点の一つにVR酔いがある. 酔いとは一般的に脳に送られる情報の不一致によって引き起こされる症状である. VR酔いの場合, 視覚情報によって脳に送られる自分の体が動いているという信号と, 平衡感覚から送られる自分の体が止まっている信号とで知覚の不一致が起り引き起こされる. 視線方向の変更に伴うVR酔いができるだけ発生しないように, より快適に後方が視認できるシステム作成を目標とする.

本論文では, 第2章において視線方向の変更の仕組みについて説明し, 第3章では構築した実験システムを用いて行った被験者実験の概要と手順, またその結果と考察を述べる. 最後に第4章で本論文のむすびと今後の課題について述べる.

第2章 視線方向誇張手法

本章では、首の回旋だけで後方を視認できる新たな仕組みを実現するために、視線方向をプログラムにより変更する手法について考える。具体的には、視線方向を後方に向けたときに、その角度を適切に誇張する視線方向誇張手法を説明する。実際の目の向きと異なる、より後方の風景をHMDに提示して、首の回旋だけで後方を見えるようにする。

2.1 視線方向の定義

見ている方向、すなわち目を向けている方向を視線方向と呼ぶが、本研究では特に、HMDに関わらず実際の目（顔）の向きを“実視線方向”，プログラムによりHMDに表示する風景の方向を“仮想視線方向”と呼ぶ。仮想視線方向は、本来は実視線方向と等しい（図2.1）。本研究で提案するシステムでは、実視線方向と異なる仮想視線方向の風景をHMDに表示する（図2.2）。なお以下では、HMDの位置を読み取るセンサーに正面から向いているときの視線方向の角度を0度とし、真後ろを180度とする。

2.2 提案手法

人間の首の回旋動作における可動域は正面0度から左右60度程度である。また座位での腰の回旋可動域は左右40度程度である。そのため、椅子に座った状態でも上半身を少し背もたれから浮かせるだけで100度程度の方向までは顔を向けることが可能である。なお真後ろ180度となると、座位であれば腰自体を浮かせる必要があり、足の裏を固定して直立している場合には腰下のひねり動作も含める必要があるだろう。提案する、視線方向すなわち角度を誇張する方法では、座った状態において左右0度から90度までは容易に顔を向けられると考えた上で、正面付近は仮想視線方向

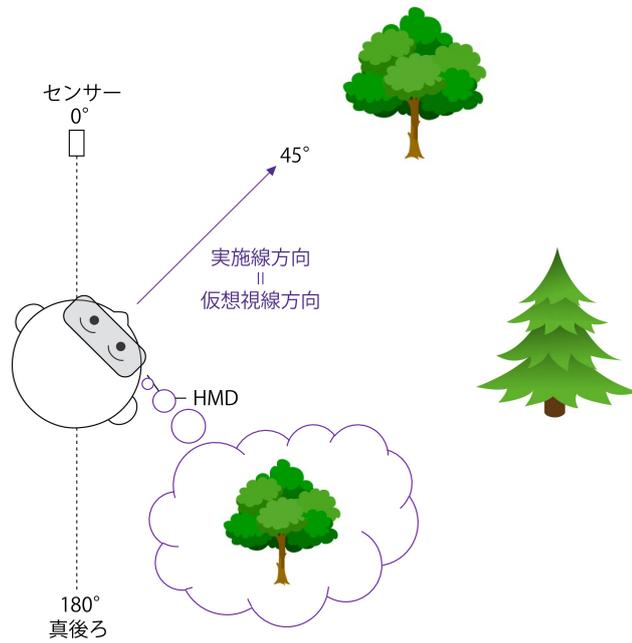


図 2.1: 通常の実視線方向と仮想視線方向

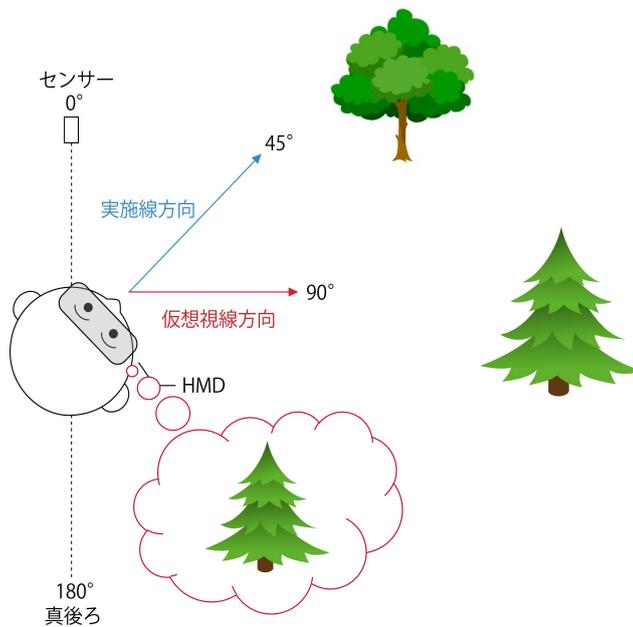


図 2.2: 本システムの実視線方向と仮想視線方向

を変えないことにする。すなわち、実視線方向の角度と仮想視線方向の角度が（0度を除いて）常に異なるように視線方向を変更するのではなく、実視線方向がある角度以上回旋した場合のみ視線方向を変更する。徐々に後方を向いたときに仮想視線方向が実視線方向から異なり始める角度を“変化点”と呼ぶことにする。そして実視線方向が90度の時に仮想視線方向が180度となるように誇張する。以下、右回旋時の視線方向の角度を正の値、左回旋時の視線方向の角度を負の値とし、実視線方向の角度を r 度（ $-90 \leq r \leq 90$ ）、仮想視線方向の角度を v 度（ $-180 \leq v \leq 180$ ）、変化点の角度を a 度（ $0 \leq a \leq 90$ ）とした上で、次式を考える（図2.3）。なお $e(r) = r$ を想定しており、原点 $(0,0)$ と変化点 (a,a) を通る。また $f(r)$ は変化点と点 $(90,180)$ を通る。

$$\begin{cases} v = e(r) & (|r| \leq a) \\ v = f(r) & (|r| > a) \end{cases} \quad (2.1)$$

ここで $r \geq 0$ 、 $v \geq 0$ に注目した上で、便宜的な座標軸 r' 、 v' を考える。

$$\begin{cases} v' = v - a \\ r' = r - a \end{cases} \quad (2.2)$$

式(2.1)へ式(2.2)を代入して、 $e'(r')$ 、 $f'(r')$ を定める。

$$\begin{cases} v' = e(r' + a) - a = e'(r') \\ v' = f(r' + a) - a = f'(r') \end{cases} \quad (2.3)$$

すなわち以下である。

$$\begin{cases} e'(r - a) + a = e(r) \\ f'(r - a) + a = f(r) \end{cases} \quad (2.4)$$

関数 $f(r)$ と $e(r)$ （ただし $r \geq a$ ）の差分 $d(r)$ を考える。

$$\begin{aligned} d(r) &= f(r) - e(r) \\ f(r) &= d(r) + e(r) \end{aligned} \quad (2.5)$$

同様に差分 $d'(r')$ は式(2.2)、式(2.3)より以下である。

$$\begin{aligned} d'(r') &= f'(r') - e'(r') = f(r' + a) - e(r' + a) = f(r) - e(r) \\ &= d(r) \end{aligned} \quad (2.6)$$

ここで、実視線方向と仮想視線方向の差分を、変化点を原点として次の通り考える。

$$d'(r') = br'^c \quad (c \subseteq N) \quad (2.7)$$

$c = 1$ の場合を除き、 $r' = 0$ における $d'(r')$ の接線の傾きは0である。そこで次式を得る。

$$\begin{aligned} v &= f(r) = e(r) + d(r) = e(r) + d'(r - a) \\ &= e(r) + b \cdot (r - a)^c \end{aligned} \quad (2.8)$$

式(2.1)を改めて以下のように考える。

$$\begin{cases} v = e(r) = r & (|r| \leq a) \\ v = f(r) = r \pm b|r - a|^c & (|r| > a) \end{cases} \quad (2.9)$$

ここで b を“変化量”と呼ぶことにする。変化量 b は $r = 90$ の時に $v = 180$ となるように設定する。また c ($c \subseteq N$) を“変化方法”と呼ぶ。 $c = 1$ の場合を除き、 $r = a$ において式(2.9)は滑らかに繋がる。ただし、式中の加減算符号は右回旋の時は加算、左回旋の時は減算として計算する。

以上により変更された v が仮想視線方向の角度であり、HMDではこの向きにある風景を表示する。この手法を適用したHMDを通して本来の風景の視認を可能にする。すなわち、少ない回旋角度での後方視認を容易にする。

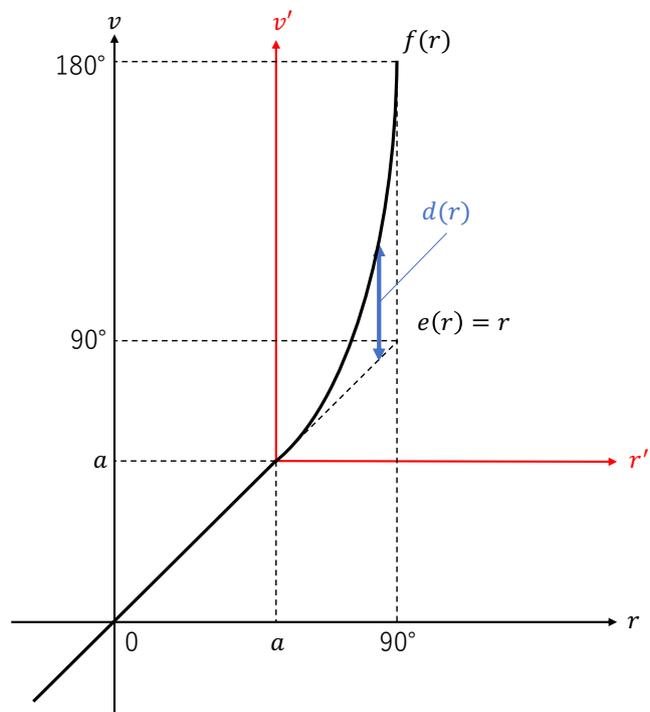


図 2.3: 視線方向誇張の概念図

第3章 評価実験

本章では、提案する視線方向誇張手法による実験システムの概要、及び評価実験について説明する。実験では誇張自体に問題がないか、またどのような誇張方法が良いのか比較評価する。

3.1 実験システムの概要

実験ではHMD OculusRiftを使用した[8]。このHMDの視野角は公式の値では110度であるが、実際に使用した被験者70名による実測値が約90度であったため[9]、本研究では実測値の90度（視線方向を0度として左右に45度ずつの視野角である）と想定する。実験システムはUnityを利用して構築した[10]。実験で提示するパノラマ360度静止画像（図3.1）はINSTA360 ONEによって撮影した[11]。視線方向の誇張は、変化方法 $c = 1 \sim 3$ 、変化点 $a = 0, 30, 45, 60$ 度の組み合わせで合計12パターンとして比較実験する。また通常のHMD利用状況（便宜的に $a = 90, b = 0, c = 0$ と扱う）との比較も行う。誇張パターンを表3.1に整理した上で、それぞれの変化量 b を示す。以下では各パターンを「誇張(c, a)」と表記する。これにより得られる、誇張における実視線方向 r と仮想視線方向 v の関係を表したグラフを以下に示す（図3.2～図3.4）。なおグラフでは、正の角度（右回旋の時）の変化のみ表しているが、負の角度（左回旋の時）についても同様である。

表 3.1: 誇張パターン（変化方法 c , 変化点 a ）の組み合わせとその変化量 b

$c \setminus a$	0	30	45	60
1	1	1.5	2	3
2	1/90	1/40	1/22.5	1/10
3	1/8100	1/2400	1/1012.5	1/300

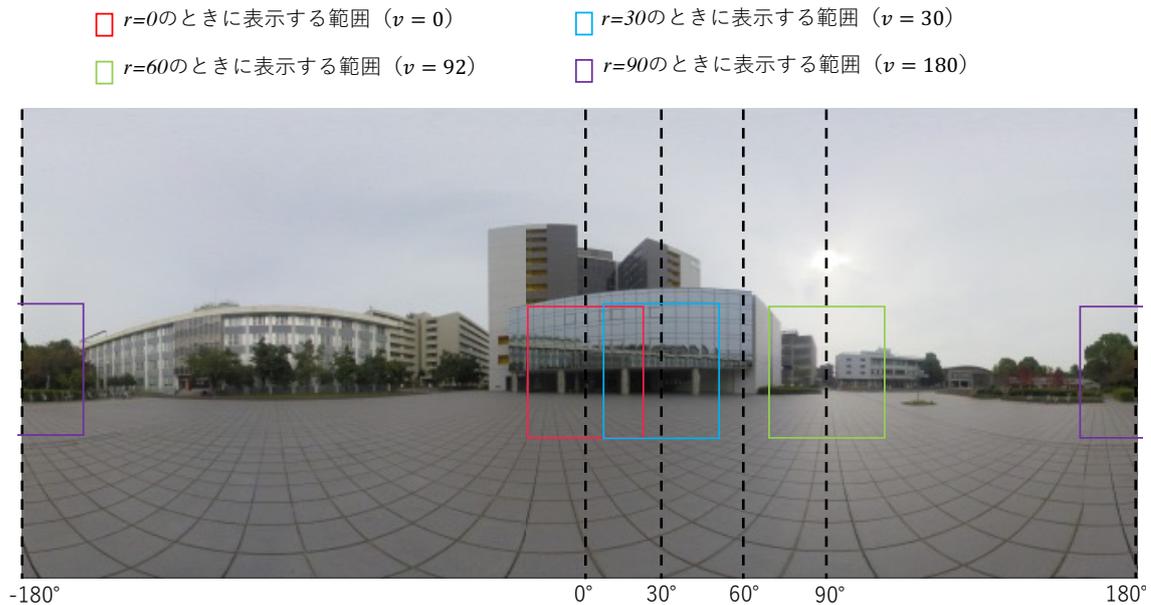


図 3.1: パノラマ 360 度静止画像の例

以下に例として、誇張 (1,45) のパターンにおける HMD への表示の様子を図 3.5～図 3.8 に示す。風景画像に表示されている数値は、右が実視線方向の角度 r であり、左が仮想視線方向の角度 v である。この例は変化点が 45 度であるため、実視線方向の角度が変化点を越える前の図 3.5 と図 3.6 では二つの数値は同じであるが、実視線方向の角度が変化点を越えた後の図 3.7 と図 3.8 では二つの値が異なっている。

3.2 評価実験 1

評価実験 1 では、12 種類の誇張パターンそれぞれに対する使用感を調査し、適切な誇張方法を見つける。実際には、実験 1-1 を行った後さらに確認したい事項が判明したため追加で実験 1-2 を行った。

3.2.1 実験 1-1 の手順

被験者は男性 8 人であり、各被験者には最初に誇張 (0,90) (通常の状態) を体験してもらった後、12 種類の誇張パターンをランダムな順番で体験してもらう。HMD によりパノラマ画像を見てもらう際、回転しない椅子を使用し、腰を椅子から浮か

表 3.2: 操作性の点数

点数	判断基準
0点	視線方向を全く思い通りに合わせられない.
1点	視線方向をほとんど思い通りに合わせられない.
2点	視線方向を思い通りに動かしづらい.
3点	視線方向をほとんど思い通りに動かせる.
4点	通常の状態と同程度の操作性. 視線方向を思い通りに合わせられる.

表 3.3: 不快感の点数

点数	判断基準
0点	通常の状態と同程度の不快感. 不快感は全くない.
1点	不快感はほとんどない.
2点	やや不快感がある.
3点	不快感がある.
4点	非常に不快感がある.

せないようにする. 途中で一度はパノラマ画像における真後ろを見てもらい, あとは自由に首を動かして見てもらう (図 3.9, 図 3.10). 全てのパターンを見てもらった後に, アンケートに回答してもらう. この実験では, 使用感の良し悪しを評価するために“操作性”と“不快感”の2つを指標とした. 操作性に関して, “各誇張方法による視線方向の見たい方向への合わせやすさ”を尋ねる. 不快感に関して, “変化点もしくはその前後における酔いや気持ち悪さの程度”を尋ねる. 両者とも0点~4点の5段階評価であるが, 操作性は誇張(0,90)を4点として, 不快感は誇張(0,90)を0点として比較評価してもらった (表 3.2, 表 3.3).

3.2.2 実験 1-1 の結果

各条件における操作性, 不快感の平均点を表したグラフを図 3.11, 図 3.12 に示す. まず同一の変更方法 c において比較すると, 変化点 $a = 0$ の誇張パターンが他の変化点の誇張パターンよりも操作性の点数が高く, 不快感の点数が低い. どちらの評価指標においても良い評価を得ている. 加えて変化点 a が 0 度, 30 度, 45 度, 60 度と大きくなるにつれて操作性の点数は低くなり, 不快感の点数は高くなっている. 次

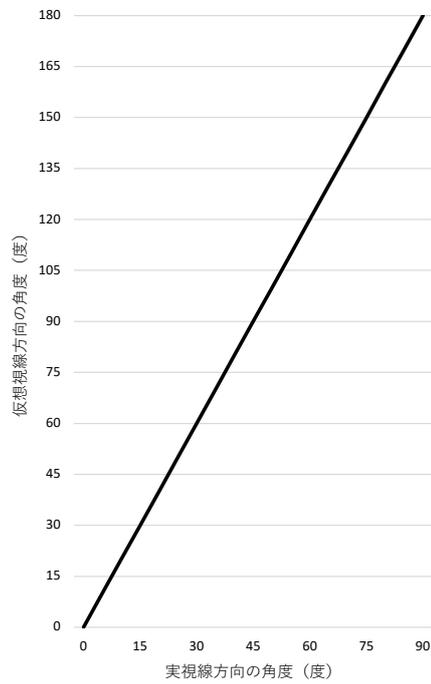
に変更方法 c の異なる誇張パターンで比較をする。例として誇張 (1,0) と誇張 (2,0) を比較する場合、操作性と不快感共に誇張 (1,0) の方が評価が良いため誇張 (1,0) の方が優れていると判断できる。しかし誇張 (1,30) と誇張 (2,30) のように、操作性は誇張 (2,30) の方が評価が良いが不快感は誇張 (1,30) の方が評価が良いような誇張パターンを比較する際、操作性と不快感の評価の関連が不明であり、単純に比較できない。

3.2.3 実験 1-2 の手順

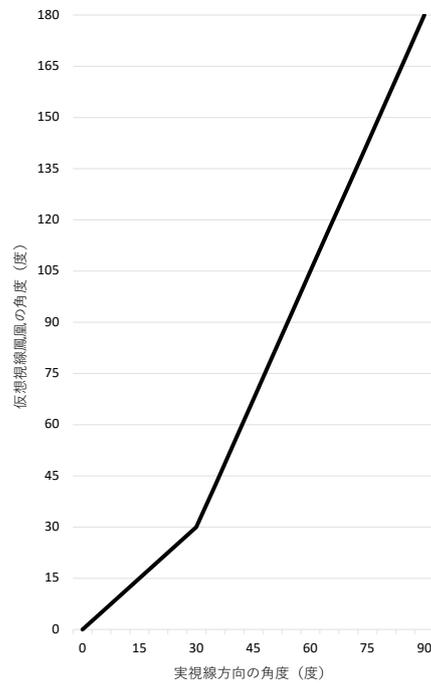
実験 1-2 は、操作性と不快感の法則性を見つけるために行う。被験者は男女合わせて 2 人である。各被験者には実験 1-1 と同様の手順で誇張 (0,90) を合わせた 13 種類の誇張パターンを体験してもらう。また、全パターンを見てもらった後、アンケートに回答してもらう。今回は操作性と不快感の他に、“満足度” を新たに加え、この 3 つを指標とする。満足度に関して、“各誇張方法における使用感の良し悪し” を尋ねる。満足度は -4 点~4 点の 9 段階評価であり、誇張 (0,90) における満足度を 0 点とし比較評価してもらった。

3.2.4 実験 1-2 の結果

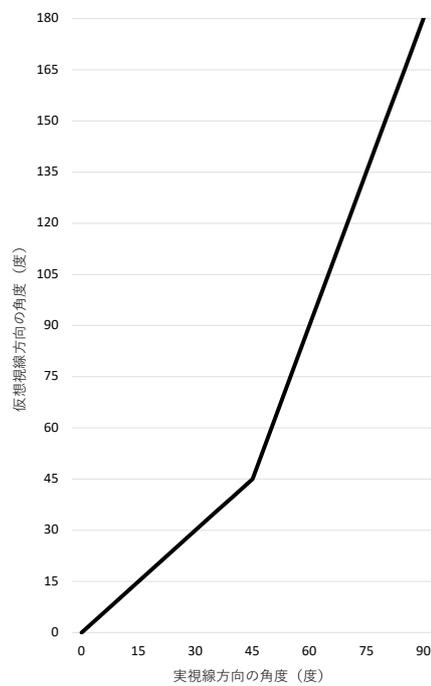
被験者 2 名の各誇張パターンにおける評価指標ごとの点数を表 3.4、表 3.5 に示す。被験者 2 人の合計 24 のデータにおいて、16 データでは満足度が操作性の点数から不快感の点数を引いた値であり、7 データでは満足度は操作性の点数から不快感の点数を引いた上でさらに 1 を引いた値である。そこで満足度の点数は操作性の点数から不快感の点数を引いた値として考える。



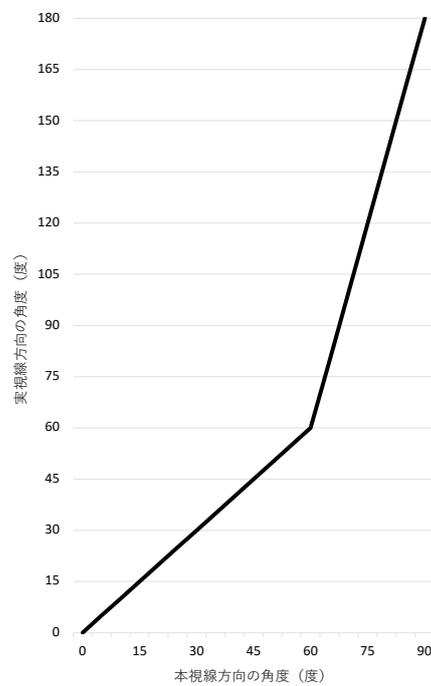
(a) 誇張 (1,0)



(b) 誇張 (1,30)

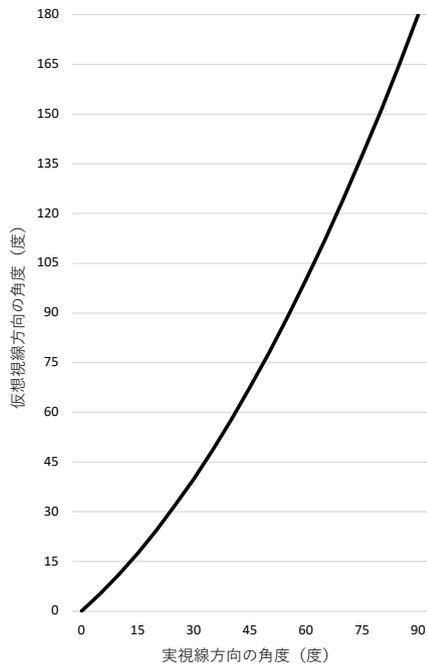


(c) 誇張 (1,45)

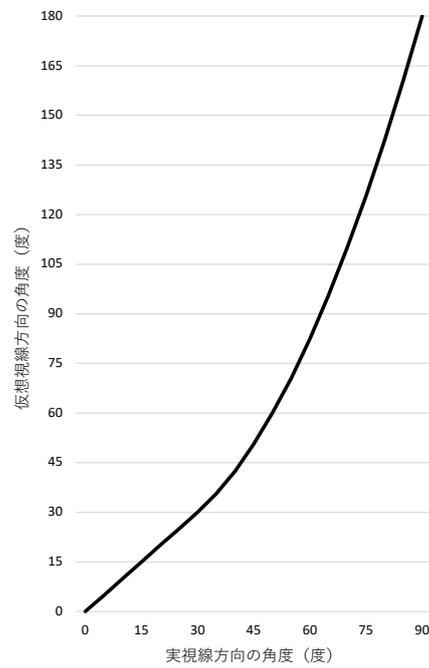


(d) 誇張 (1,60)

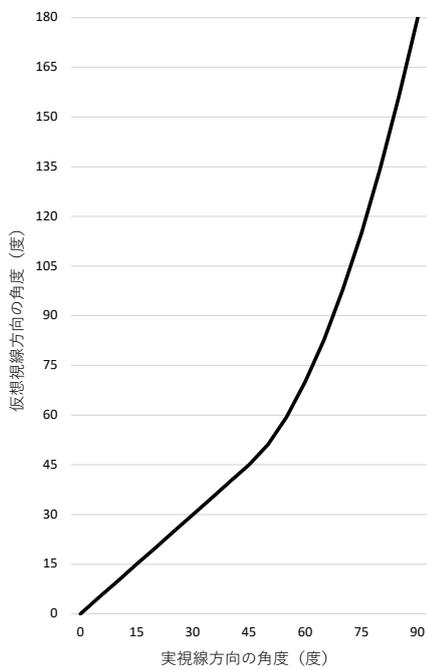
図 3.2: 誇張 (1,a) のグラフ



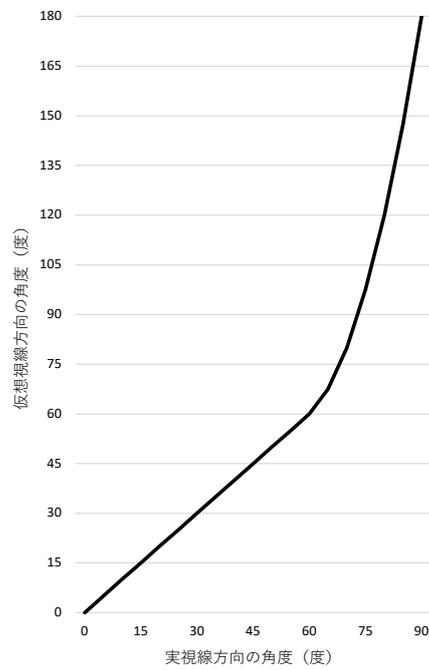
(a) 誇張 (2, 0)



(b) 誇張 (2, 30)

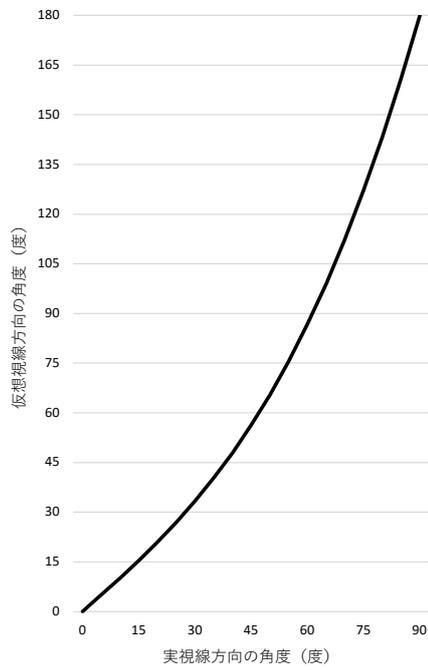


(c) 誇張 (2, 45)

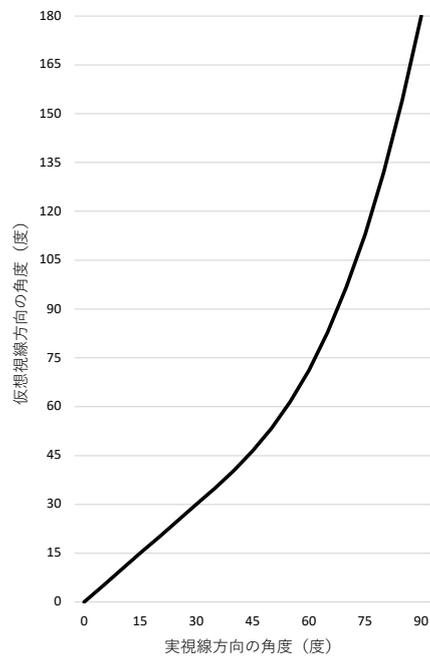


(d) 誇張 (2, 60)

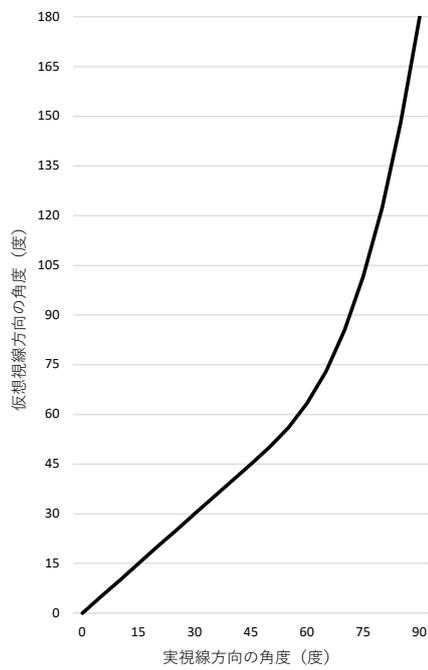
図 3.3: 誇張 (2, a) のグラフ



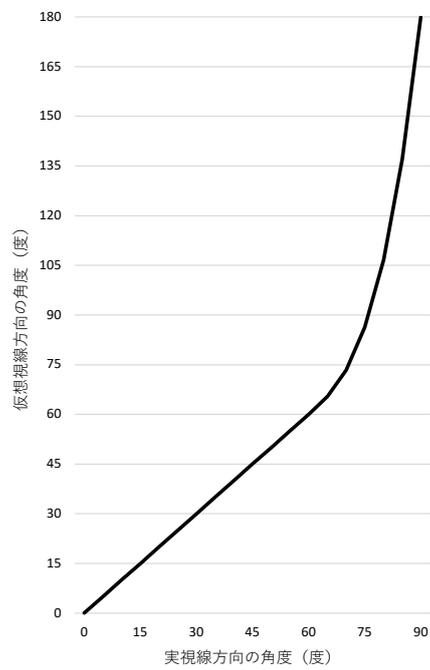
(a) 誇張 (3, 0)



(b) 誇張 (3, 30)



(c) 誇張 (3, 45)



(d) 誇張 (3, 60)

図 3.4: 誇張 (3, a) のグラフ

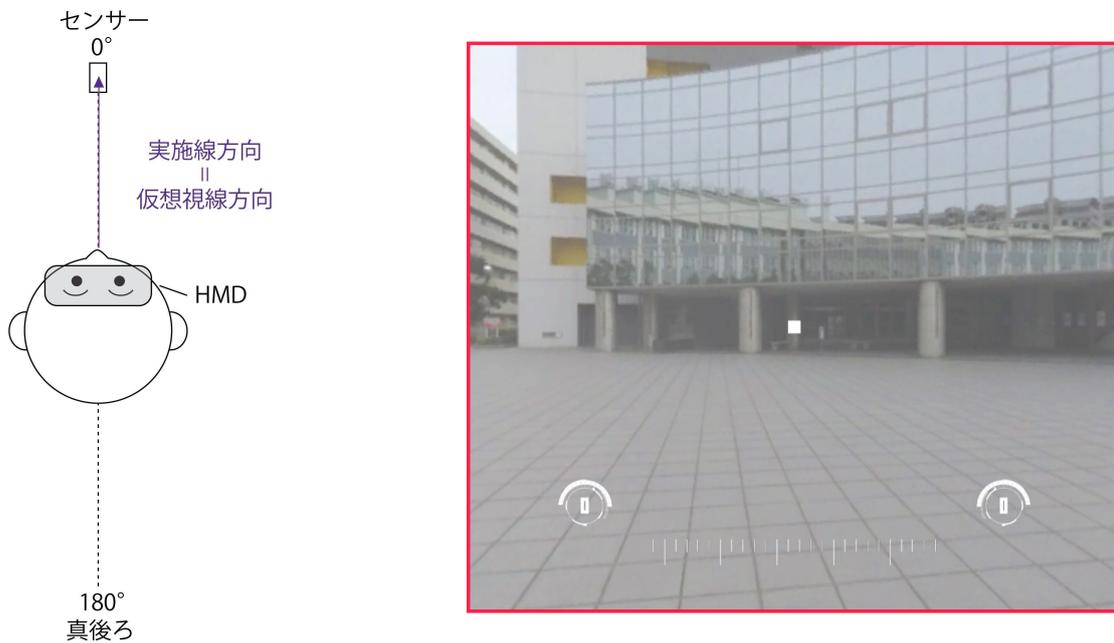


図 3.5: 実験の模式図と HMD への表示例 (0 度)



図 3.6: 実験の模式図と HMD への表示例 (30 度)

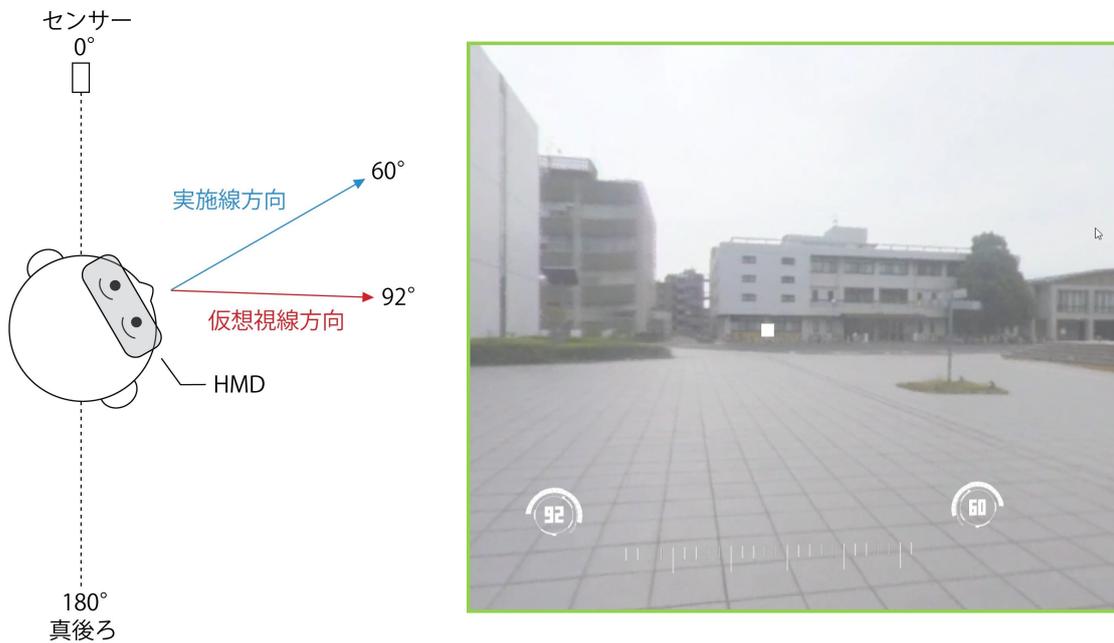


図 3.7: 実験の模式図と HMD への表示例 (60 度)

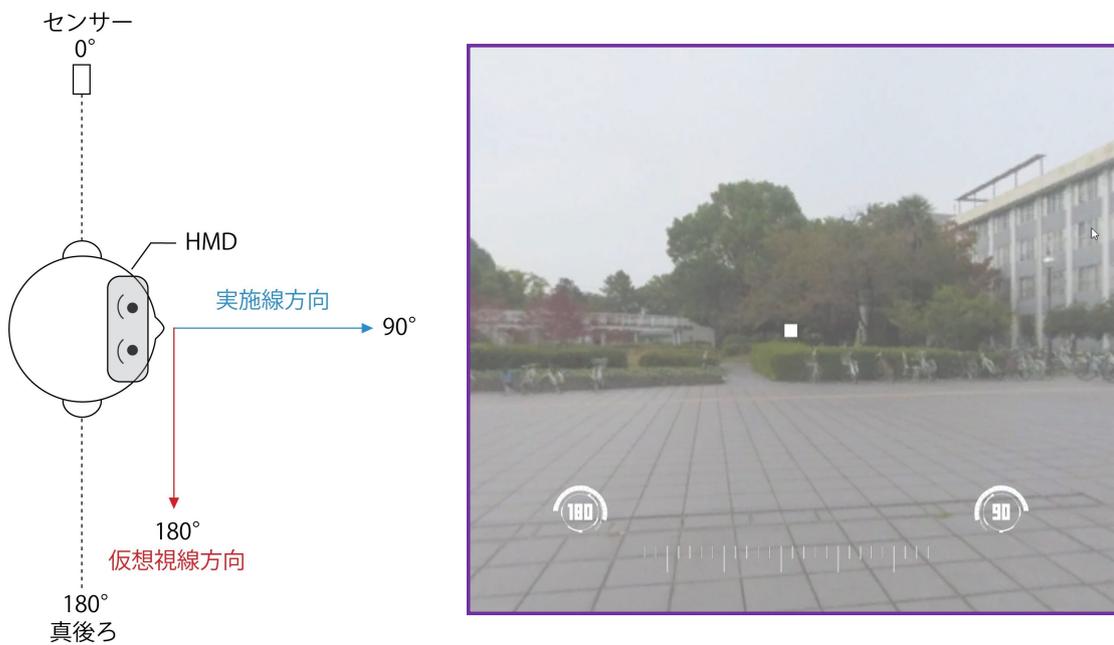


図 3.8: 実験の模式図と HMD への表示例 (90 度)



図 3.9: 実験で正面を見ている様子



図 3.10: 実験で後ろを見ている様子

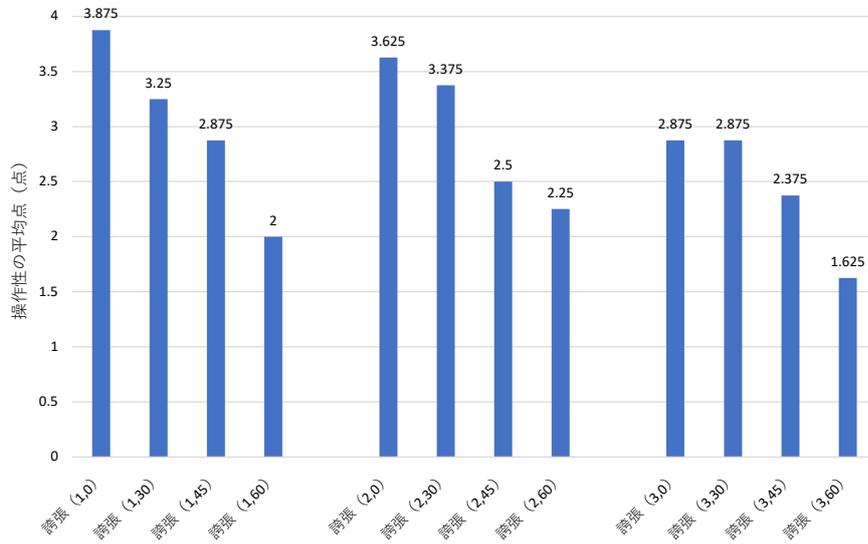


図 3.11: 実験 1-1 における誇張パターンごとの操作性の平均点数

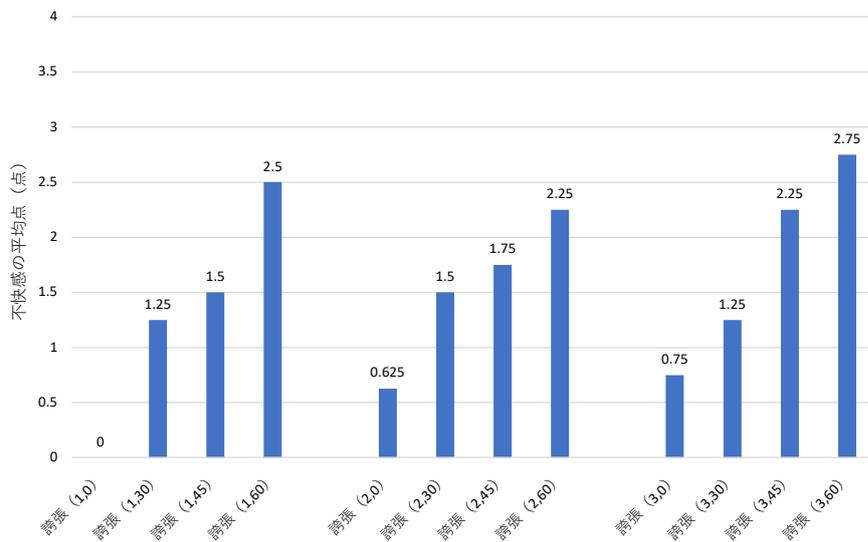


図 3.12: 実験 1-1 における誇張パターンごとの不快感の平均点数

表 3.4: 被験者 1 の誇張パターンごとの評価指標の点数

評価指標	(1,0)	(1,30)	(1,45)	(1,60)	(2,0)	(2,30)	(2,45)	(2,60)	(3,0)	(3,30)	(3,45)	(3,60)
操作性	4	4	4	3	3	4	3	2	3	3	2	2
不快感	0	1	2	2	0	1	2	2	1	0	0	3
満足度	4	2	2	1	3	2	1	0	1	3	2	-1

表 3.5: 被験者 2 の誇張パターンごとの評価指標の点数

評価指標	(1,0)	(1,30)	(1,45)	(1,60)	(2,0)	(2,30)	(2,45)	(2,60)	(3,0)	(3,30)	(3,45)	(3,60)
操作性	4	4	3	2	4	4	3	3	4	4	3	3
不快感	0	1	1	3	0	1	1	3	0	1	2	1
満足度	3	2	2	0	4	2	2	0	4	2	1	2

3.2.5 評価実験1全体の結果とその考察

実験1-2の結果を踏まえて実験1-1の結果から満足度を算出する。合計10人分の満足度の平均結果を図3.13に示す。誇張(1,0)が最も満足度が高いことがわかる。また、変化方法 c が同じ誇張パターンの中では変化点 a が小さいものほど満足度が高いことがわかる。これらは、変化点の前後において傾きが大きく変化することに加えて、変化点 a が大きくなるほど実視線方向 r が大きな箇所では回旋動作とHMD内の風景の動きに大きな差異があり、操作性が悪く感じ不快感もより強く感じたと考えられる。さらに、変化点 a が同じ誇張パターン同士で比較すると、変化方法 c , すなわち次数の高い方が満足度は低い傾向にある。次数が低く線形に近い誇張の方が好まれるようである。

3.3 評価実験2

評価実験2は、評価実験1で最も評価の高かった誇張方法と誇張(0,90)（通常の状態）を、より実際の利用に近いコンテンツを対象に改めて比較することで、提案する誇張手法の有用性を調査する。

3.3.1 実験2の手順

被験者は男性4人である。各被験者には、海外の観光地でのパノラマ360度風景画像（図3.14）を楽しんでもらうことを想定して、評価実験1で最も評価の高かった誇張(1,0)と誇張(0,90)の2パターンで体験してもらおう。HMDで画像を見てもらう際、回転しない椅子を使用し、腰を椅子から浮かせないようにして自由に風景を楽しんでもらう。2つのパターンを見てもらった後、両者を比較して感想を述べてもらう。

3.3.2 実験2の結果と考察

被験者からの感想を以下に示す。

- 通常では首だけで後ろを見ることは難しいが、この手法を用いると首だけで後ろの風景を見ることができた。

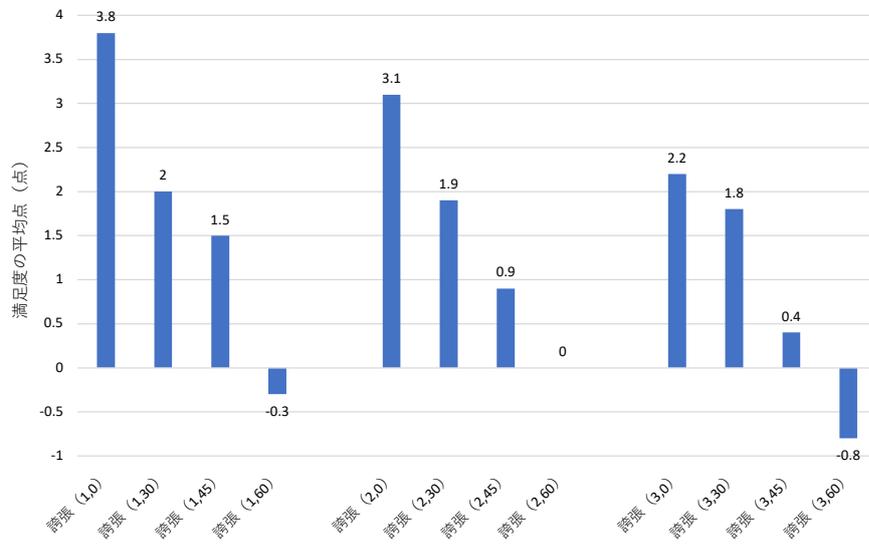


図 3.13: 実験 1 全体の誇張パターンごとの満足度の平均点数



図 3.14: 海外観光地ののパノラマ 360 度風景画像

- このシステムの方が後ろを見れる点が良い。実視線方向と仮想視線方向のズレによる違和感にはすぐ慣れるが、少し酔いも感じた。
- 座った姿勢のまま楽に後ろを振り向けていいと思った。
- 誇張後の方がキビキビと視界が動き使いやすく感じた。後ろを見れる点もいいと思った。

まず「普通では首だけで後ろを見ることは難しい」という感想から、通常の状態において後方の向きにくさを感じていることがわかる。それに対して「この手法を用いると後ろを見ることができた」、「楽に後ろを振り向けていい」、「首だけで後ろを見ることができた」といった感想から、誇張によって後方視認が容易化され、全方位の風景を容易に見られることに有用性を感じてくれていることがわかる。しかし「少し酔いも感じた」という感想もあり、不快と感じにくい誇張方法を見つけ、改良する必要があるだろう。

第4章 むすび

本研究では、椅子に座った状態でHMDを使用する際に、腰を浮かせずとも容易に後方が視認できるようにするために視線方向誇張手法を提案した。視線の方向、すなわち角度をプログラムで誇張して実際の目の向きと異なる、より後方の風景をHMDに提示することで、少ない回旋動作で後方を見ることができる。誇張すること自体に問題がないか、またどのような誇張方法が適切であるか検証するために被験者実験を行い、比較評価した。その結果、通常の状態よりも視線方向を誇張した状態の方が、容易に後方が視認できるという意見が得られ、本手法の有用性を確認できた。今後の課題として、視線方向誇張によって発生するVR酔いをさらに抑えること、より実際の利用に近いコンテンツに適した誇張方法を模索することが挙げられる。また、様々な種類のパノラマ360度画像に対して実験を行い、使用画像とVR酔いとの関係も検証したい。また現在、すでに利用されているコンテンツに本手法を実装し、より多くの被験者に体験してもらうことで本手法の有用性についてより深く考察したい。

謝辞

本研究を進めるにあたって、日頃から多大なご尽力をいただき、ご指導を受け賜りました名古屋工業大学、舟橋健司 准教授、伊藤宏隆 助教に心から感謝致します。最後に、本研究に多大なご協力をいただきました舟橋研究室諸氏並びに被験者の皆様に深く感謝致します。

参考文献

- [1] 総務省, 令和 2 年度版情報通信白書, “世界の AR/VR の市場規模等の推移及び予測”, <https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/r02/html/nd114110.html> (2021.1.15 閲覧)
- [2] 株式会社マクロミル, “VR に関する意識調査”, [https://prtimes.jp/main/html/rd/p/000000484.000000624.html](https://prt看imes.jp/main/html/rd/p/000000484.000000624.html) (2021.1.15 閲覧)
- [3] 清水一秀, “脳神経外科における 3D ヘッドマウントディスプレイ (3D-HMD) を用いた経鼻内視鏡手術”, JSCAS, Vol.19, No.4, pp.316–327, 2017.
- [4] 小林 正佳, 畑崎 聖二, “内視鏡下頭蓋底手術へのヘッドマウントディスプレイの応用”, 耳鼻咽喉科展望, 59(6), pp.324-328, 2016
- [5] SONY, PlayStation VR, <https://www.playstation.com/ja-jp/ps-vr/>
- [6] 米本恭三, 石神重信, 近藤徹, “関節可動域表示ならびに測定法”, リハビリテーション医学, Vol.32, No.4, pp.207–217, 1995.
- [7] 伴地芳啓, 吉川佳祐, 河合隆史, “HMD を用いた 360 度動画視聴時の座面の回転がユーザ体験に及ぼす影響”, 日本バーチャルリアリティ学会, Vol.23, No.3, pp.217–227.
- [8] Oculus, Oculus Rift, <https://www.oculus.com/rift/>
- [9] iNFINITE Production, “VR Headset database and utility”, <https://www.infinite.cz/projects/HMD-tester-virtual-reality-headset-database-utility> (2022.2.1 閲覧)
- [10] Unity Technologies, Unity, <https://unity.com/ja>

- [11] Arashi-Vision, Insta360 ONE, <https://www.insta360.com/jp/product/insta360-one>