

2023年度 修士論文

論文題目

パノラマ360度画像のHMD視聴における

静的及び動的な視線方向制御と不快感の軽減

(Static and dynamic eye direction control and discomfort
reduction in viewing panoramic images with HMD)

指導教員

舟橋 健司 准教授

名古屋工業大学大学院 工学研究科 工学専攻
情報工学系プログラム 2022年度入学 34414012番

稲垣 正太郎

目次

第1章	はじめに	1
第2章	視線方向誇張手法の基本	4
2.1	視線方向の定義	4
2.2	提案手法の概要	4
2.3	提案手法の評価	8
2.3.1	実験システムの概要	8
2.3.2	評価実験と結果	8
第3章	シグモイド関数誇張	12
3.1	提案手法の概要	12
3.2	実験と考察	13
第4章	動的視線方向誇張	18
4.1	提案手法の概要	18
4.2	実験	19
4.2.1	概要	19
4.2.2	実験1	23
4.2.3	実験2	28
第5章	ベクシオン誘発による不快感軽減	30
5.1	ベクシオンについて	30
5.2	提案手法の概要	30
5.3	実験1	31
5.4	実験2	35
5.5	実験3	36
第6章	むすび	37
	謝辞	38
	参考文献	39
	発表論文リスト	41

第1章 はじめに

近年、VR (Virtual Reality) 技術の発達により HMD (Head Mounted Display) の開発が盛んに行われている。VR 技術とは、人工的に現実感を感じさせる技術である。そのために欠かせないものが出力インタフェース、すなわちディスプレイである。これらはバーチャル世界からの情報を人間の視覚や聴覚、前庭感覚など対応する感覚受容器に人工的な刺激として与える [1]。その中の視覚ディスプレイとして多くの人が VR サービスを利用する際に使用している装置が HMD である。HMD は両眼の前に映像を映し出すモニタを配置することで、どこを見ても常に目の前に映像を提示できるようにした上で、2 眼式と呼ばれる主に両眼視差による立体視によって臨場感あふれる映像を提示する機器である。HMD は Sony の PlayStationVR や Meta の MetaQuest のように様々な企業により製品化されている [2][3]。これらの開発に伴い、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、医療分野では難易度の高い手術現場に HMD が利用され [5][6]、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ている。また海外では軍事訓練にも VR シミュレーションが利用されている。総務省の令和 5 年版情報通信白書によると、日本のメタバース市場 (XR (VR, AR, MR) 機器の合計を含む) は 2021 年度が 744 億円の売り上げであったのに対し、2022 年度に 1825 億円となる見込みであり、2026 年度には 1 兆円にまで拡大すると予測されている [4]。こうしたサービスの中でも特にパノラマ 360 度静止画像や、パノラマ 360 度動画は我々の身近に溢れてきている。前述の疑似旅行体験においても観光地のパノラマ画像が主に使用され、不動産分野ではパノラマ 360 度画像を用いて物件をオンラインで内見するサービスが主流になりつつある。また我々が普段利用する SNS においても、Youtube や Facebook でパノラマ 360 度動画やパノラマ 360 度画像を投稿する利用者が増加している。

ところで、HMD には業務用のものも存在するが、最近では前述の HMD のように家

庭での利用も想定した機器が主流である。そのため多くの人が自宅でVRを楽しむことができるようになってきている。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[7]。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[8]。そこで当研究室ではこれまでに、椅子に座った状態でのHMD利用時の後方視認を容易化する“視線方向誇張手法”を提案している[9]。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。この手法では視線方向の角度をプログラムで誇張し、実際の視線方向と異なるより後方の風景をHMDに提示することで、腰を浮かせずとも容易に後方視認ができる。実験システムを作成し、実際に被験者らに体験してもらった上で、視線方向誇張がない通常の状態に比べ容易に後方が確認できたという意見を得たことで、手法の有用性を確認している。本研究ではこの視線方向誇張手法をもとに以下の3つの新たな提案を行う。

まず、視線方向誇張手法のひとつの問題点に着目する。それは容易に後方を振り向けない姿勢での利用を想定しており、視線方向が水平に一周しないと仮定していることである。実際のHMD利用では、姿勢の変更や回転する椅子に座ることで視線方向を一周させることも不可能ではない。そこで新たにシグモイド関数を用いた視線方向誇張、“シグモイド関数誇張”を提案する。これは入力値の絶対値が大きくなると傾きが小さくなるというシグモイド関数の特性を利用しており、これにより後方付近で視線方向の角度を滑らかに接続することができ、視線方向が一周した場合に対応できる。

次に、用途に着目する。利用する VR サービスによっては首の回旋速度に違いがあるのではないだろうか。例えば、パノラマ 360 度画像を用いた物件のバーチャル内見や、旅先のパノラマ風景を HMD で視聴する際には、全体を満遍なくゆっくり見回すだろう。それに対し、ゲームや軍事シミュレーションなどでは素早く周囲を見回す動作や、ターゲットに素早く視線方向を合わせる動作が必要になるため首の回旋速度が速くなると考えられる。また、向きたい方向や後方の風景がより早く視界に入ってくることで動作がスムーズになるだろう。そこで、新たに動的な視線方向誇張を提案する。首の回旋速度が速いときに、これまでの視線方向誇張をベースに角速度に応じて誇張量を変化させる。首の回旋速度が速いときにいち早くより後方の風景を視界に入れられるようにする。

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 酔いは例えば、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これ引き起こされる。視線方向誇張手法適用時にもこの不一致により VR 酔いしやすかった。先行研究ではパラメータ決定において不快感の小ささも考慮していたが、完全になくすことは困難であった。さらに、新たに提案するシグモイド関数誇張適用時にはさらに不快感を感じやすかった。そこで、視線方向誇張時に意図的にベクシオンを誘発することで不快感の軽減を試みる。ベクシオンとは視覚誘導製自己運動感覚のことであり [10]、水平移動するパーティクルを HMD 内に表示させることで被験者にベクシオンを感じさせる。

本論文ではまず、第 2 章において先行研究で提案している視線方向誇張手法の基本について説明する。第 3 章では視線方向が一周した場合に対応可能なシグモイド関数による誇張手法について述べる。また第 4 章において動的な視線方向誇張手法について説明し、第 5 章でパーティクルを用いたベクシオン誘発による不快感軽減について述べた後、最後に第 6 章でまとめと今後の課題について述べる。

第2章 視線方向誇張手法の基本

本章では当研究室の先行研究で提案された“視線方向誇張手法”について説明する。

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に関わらず実際目の向きを“実視線方向”と呼び，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 提案手法の概要

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，視線方向の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想定している。その上で，徐々に後方を向いたときに仮想視線方向が実視線方向と異なり始める角度を“変化点”と呼ぶ。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 $v = h(r)$ 度 ($-180 \leq v \leq 180$)，変化点の角度を a 度 ($0 \leq a \leq 90$)として以下の式を考える（図2.3）。

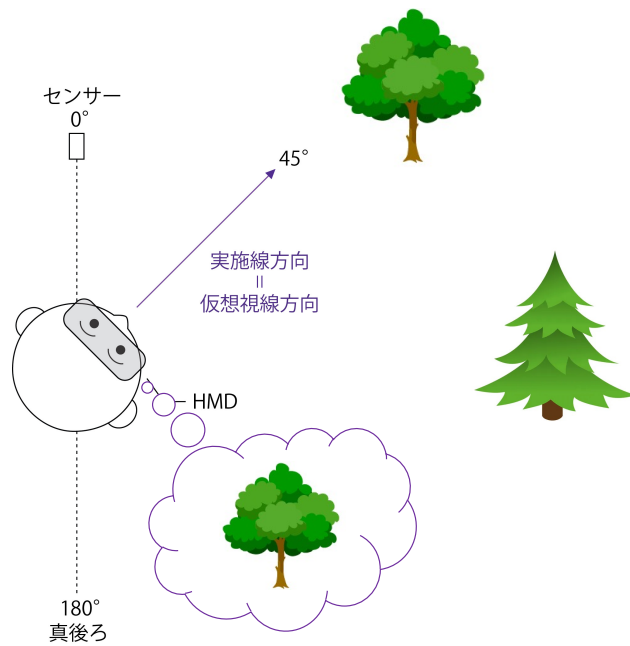


図 2.1: 通常の実視線方向と仮想視線方向

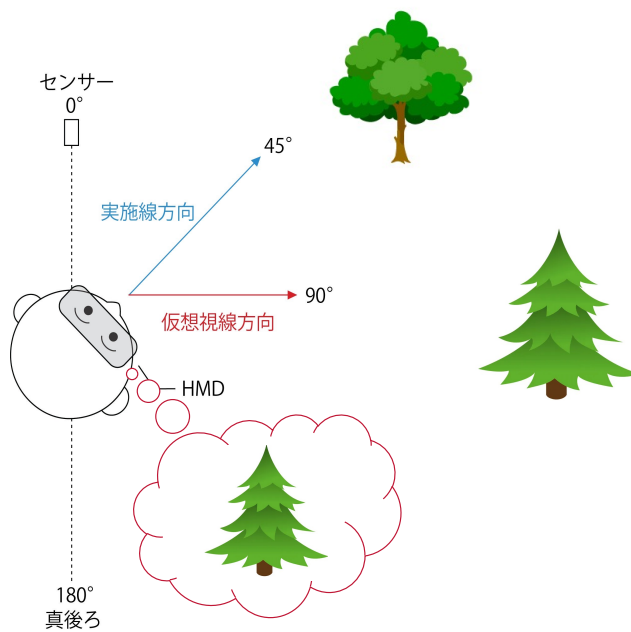


図 2.2: 本システムの実視線方向と仮想視線方向

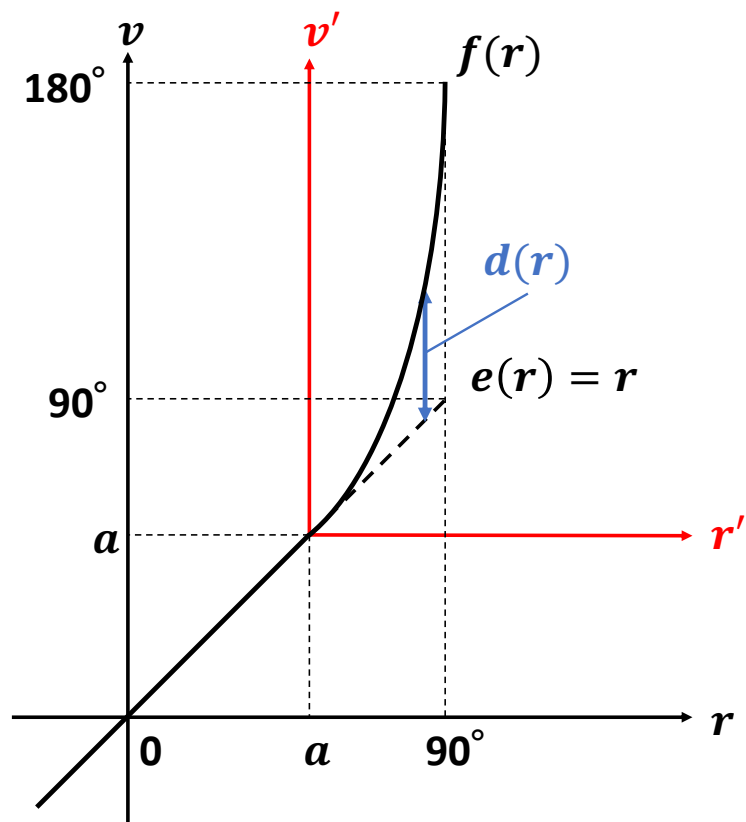


図 2.3: 視線方向誇張の概念図

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

式中の $e(r)$ と $f(r)$ は r の関数である。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。これを用いて $e'(r')$ 、 $f'(r')$ は次式のように定まる。また、式 (2.2) を式 (2.1) に代入することで $e(r)$ と $f(r)$ は式 (2.3) のように求められる。

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

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

これら $e(r)$ と $f(r)$ ($r \geq 0$) の差分である $d(r)$ について考えると、 $d'(r')$ は次式で表される。

$$\begin{aligned} d(r) &= f(r) - e(r) \\ f(r) &= d(r) + e(r) \end{aligned} \quad (2.4)$$

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

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ように考える。

$$d'(r') = br'^c \quad (c \subseteq N) \quad (2.6)$$

この b は“変化量”と呼び、 $r = 90$ の時に $v = 180$ となるように決める。また c ($c \subseteq N$) は“変化方法”と呼び、 $c = 1$ の場合を除き、 $r' = 0$ における $d'(r')$ の傾きは 0 である。ここから式 (2.7) を得る。また式 (2.1) を式 (2.8) のように改めて考える。

$$\begin{aligned} v &= f(r) = e(r) + d(r) = e(r) + d'(r - a) \\ &= e(r) + b \cdot (r - a)^c \end{aligned} \quad (2.7)$$

表 2.1: 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

$$\begin{cases} v = h(r) = e(r) = r & (|r| \leq a) \\ v = h(r) = f(r) = r \pm b|r - a|^c & (|r| > a) \end{cases} \quad (2.8)$$

式(2.8)における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.

2.3 提案手法の評価

2.3.1 実験システムの概要

実験では HMD OculusRift を使用した. 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 [11], 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 [12]. 実験で提示するパノラマ 360 度静止画像 (図 2.4) は INSTA360 ONE によって撮影した [13]. 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 2.1 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. 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の例を以下に示す (図 2.5).

2.3.2 評価実験と結果

実験では, 上述の 12 種類の誇張パターンに対して, 被験者に回転しない椅子に座った状態でパノラマ 360 度静止画像を自由に HMD 視聴してもらう. その後アンケートに回答してもらうことで最も適切な誇張パターンを見つける. 各誇張パターンの評価指標は“操作性”と“不快感”の 2 つである. 操作性に関して, “各誇張方法によ

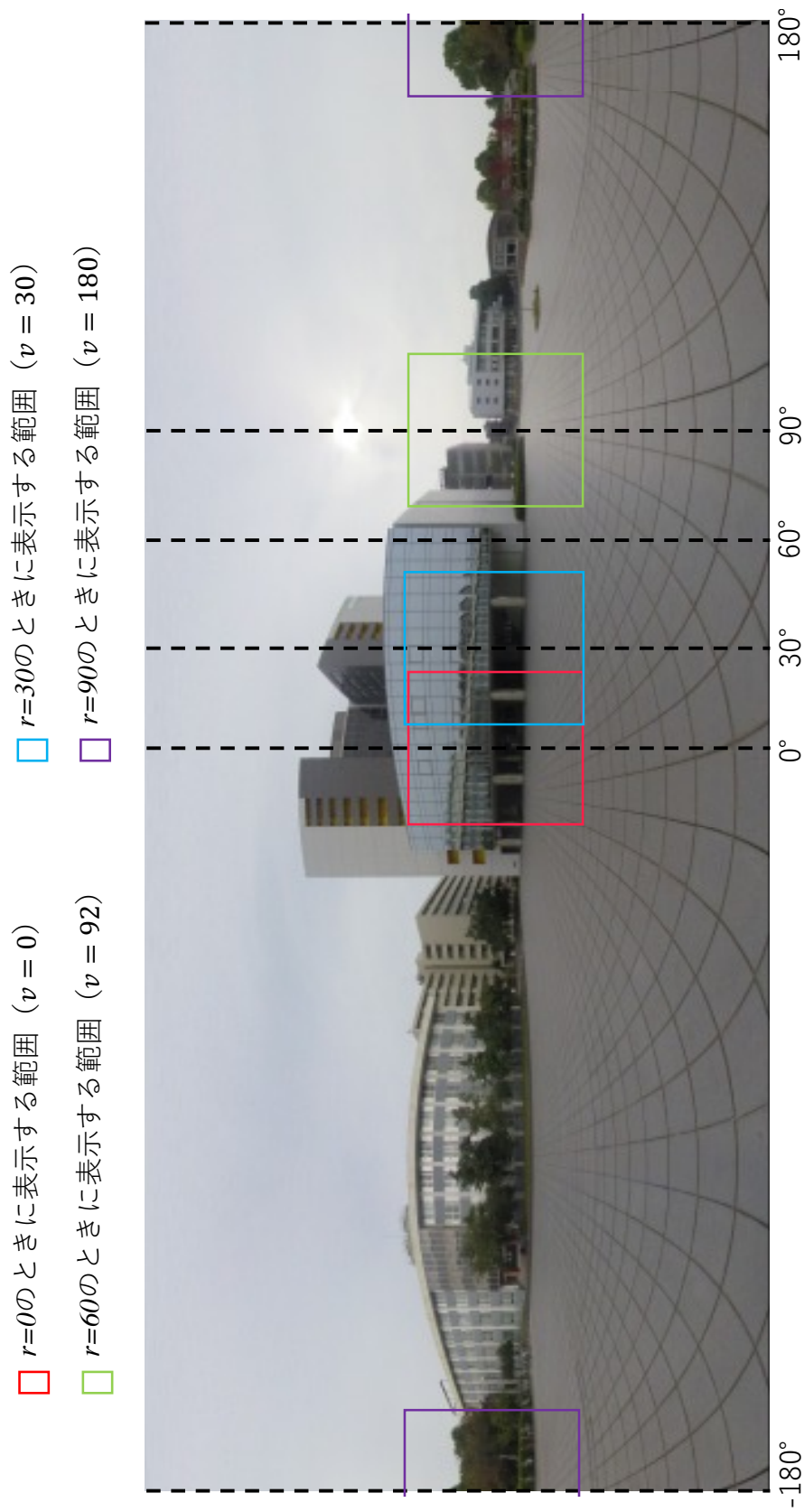


図 2.4: パノラマ 360 度静止画像の例

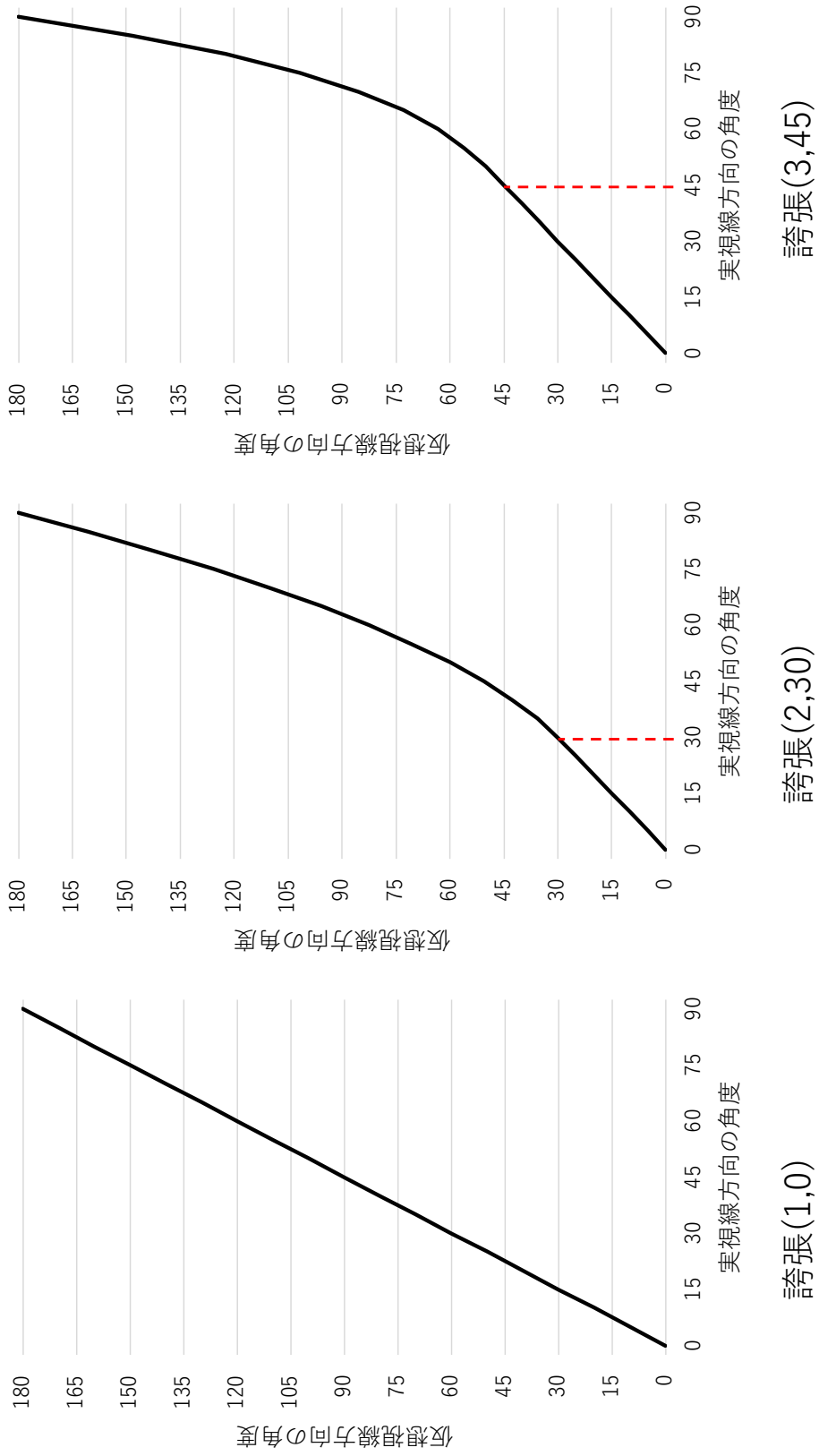


図 2.5: 視線方向誇張の例

表 2.2: 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 2.3: 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.

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, 不快感は誇張(0,90)を0点とする(表2.2, 表2.3). また, 操作性の点数から不快感の点数を引いたものを“満足度”とし, この値で比較評価を行った.

結果としては, 誇張(1,0)が最も満足度が高かった. また変化点の角度が大きくなるほど満足度が低く, 低次で直線に近い誇張が好まれることが確認された. 全般に, 通常の状態(誇張なし)では後方が見えにくい, 誇張により後方が見やすくなったとの感想が得られたことから, 視線方向誇張手法の有用性が確認できた.

第3章 シグモイド関数誇張

本章では新たに提案するシグモイド関数誇張について説明する。

3.1 提案手法の概要

前章で述べた視線方向誇張手法は座位での利用を前提としており、視線方向が水平に一周することを想定していない。そのため実視線方向が90度の時に仮想視線方向が180度になるように、すなわち顔が真横を向いた時点でHMD内の風景が真後ろを向くようにしており、首を90度以上後ろに向けることを想定していない。しかし家庭での座位においても、時には姿勢の変更や回転する椅子により90度より後方に顔を向けることもあるかもしれない。そこで、視線方向が一周した場合にも対応できるように、視線方向誇張手法の新しい誇張パターンを提案する。前章で述べた通り、過去実験において誇張(1,0)、すなわち直線に近く途中で傾きが大きくなるような誇張が好まれた。そこで前方付近では直線に近く、後方付近で傾きが小さくなるシグモイド関数による誇張を試みる。シグモイド関数誇張は、実視線方向の角度 r 度 ($-180 \leq r \leq 180$) に対して、仮想視線方向の角度 $v = h(r)$ 度 ($-180 \leq v \leq 180$) を以下のように表す。

$$v = h(r) = \frac{360}{1 + e^{gr}} - 180 \quad (3.1)$$

ゲイン g は例えば、関数 $h(r)$ の原点付近での傾きが、以前の実験で最も評価の高かった誇張(1,0)の傾きと等しくなるように次式のように設定する(図3.1)。

$$v = h(r) = \frac{360}{1 + e^{-0.025r}} - 180 \quad (3.2)$$

実験システムでは内部的に、180度を超える場合には -180 度に変換し、 -180 度を下回る場合には 180 度に変換する。前方付近では以前の視線方向誇張と同様に実際の首の角度より大きな角度の風景がHMD内に表示される。実視線方向の角度が90

度を超えて後方を向いた場合には、実視線方向と仮想視線方向の角度の差が小さくなり、最終的には後方180度付近で二つの値がほぼ等しくなる(図3.2~図3.6)。また、実視線方向の角度が90度の時点で仮想視線方向の角度は145度程度であり、真後ろまでは向けないが腰を浮かさずともある程度後方まで視認可能である。

3.2 実験と考察

視線方向が一周した場合に対応できているか確認するために簡易実験を行った。実験ではHMDにMetaQuest2を用いた。使用した実験環境は2.3.1と同じである。被験者にはパノラマ360度静止画像を自由にHMD視聴してもらい、一度は椅子から腰を上げて真後ろを視認してもらった。その後、後方付近での見え方や使用感について感想を尋ねた。被験者数は4名であり、以下のような感想が得られた。

- 後方の接続についてはそこまで気にならなかったが、不快感は増加したように感じた。
- 今までの視線方向誇張と特に変わらず、一周できる分良い方法ではないか。
- 実視線方向が90度の時点で視界の端では後方が見えているため、今までの視線方向誇張と同様に座ったままでもある程度便利なのがいいと思った。
- 後方付近では風景が首の回旋より遅いため不快感があったが、一周することには違和感はなかった。

以上の感想から、実視線方向の角度 $r = \pm 180$ において仮想視線方向の角度がほぼ滑らかに接続され、きちんと視線方向が一周した場合に対応できていることを確認した。また、視線方向が一周しない場合の利用でもある程度後方を視認できることから、本誇張は有用であると考えられる。一方で前章の誇張パターンに比べて、姿勢変更や椅子の回転により実際の後方へ首を向けている時に強い不快感を感じることも分かった。シグモイド関数誇張では $|r| > 150$ 辺りにおいて、実視線方向の角度の変化量に対する仮想視線方向の角度の変化量が非常に小さくなる。すなわち首が動いているにも関わらずHMD内の風景がほとんど変化しない。そのため不快感を感じたようである。

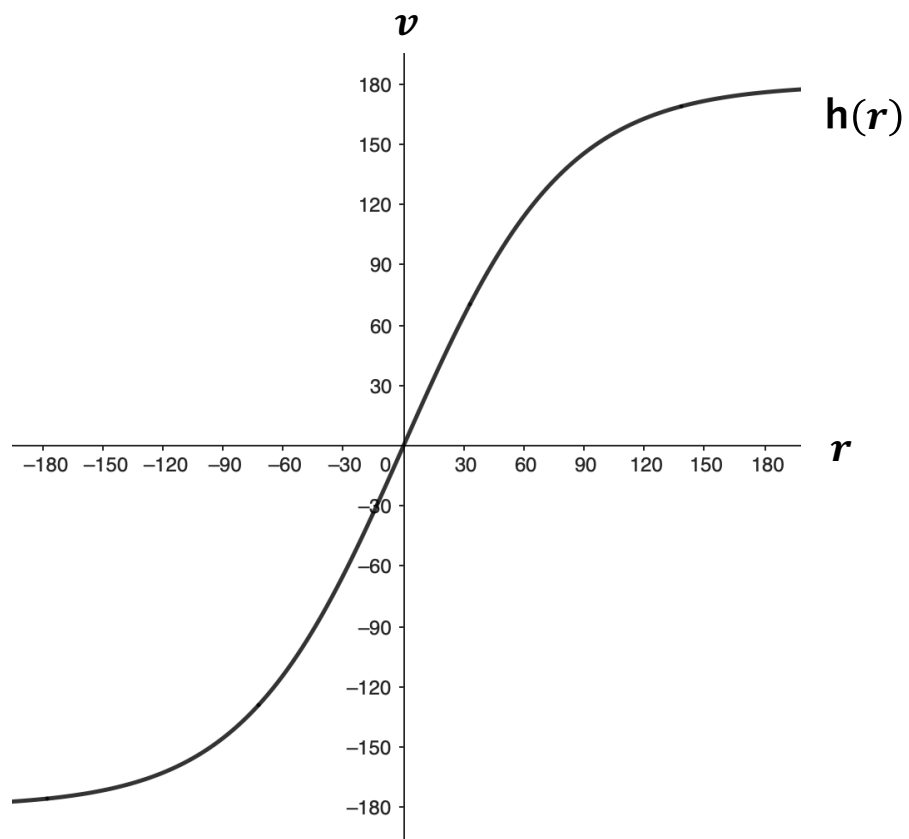


図 3.1: シグモイド関数誇張



図 3.2: シグモイド関数誇張における首の角度と HMD への表示例 (r=0)

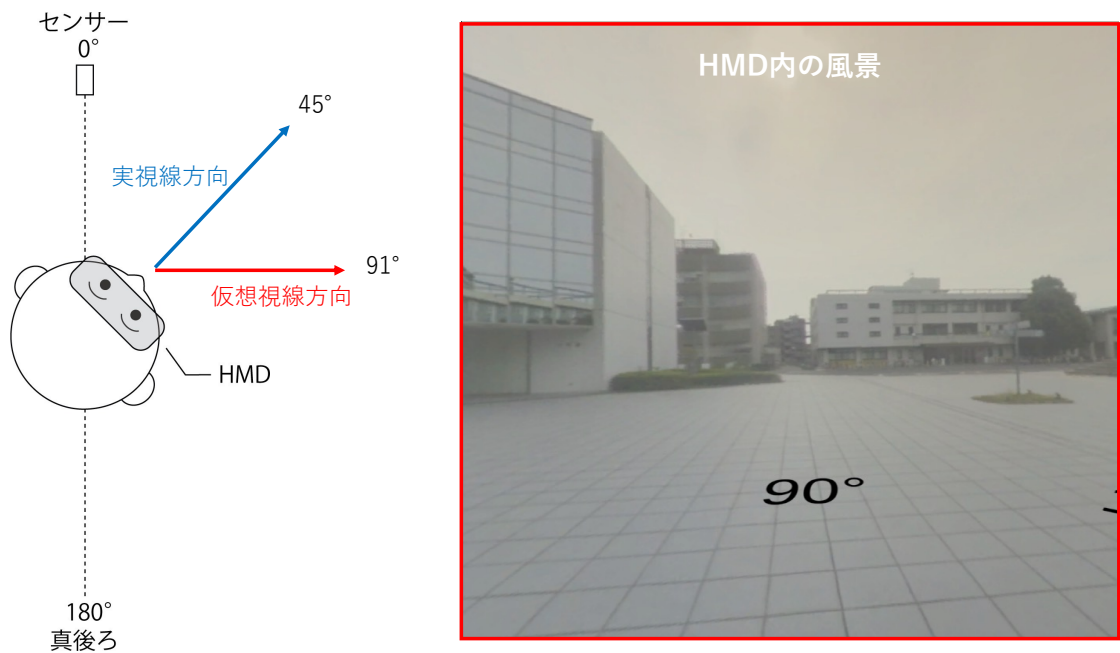


図 3.3: シグモイド関数誇張における首の角度と HMD への表示例 (r=45)

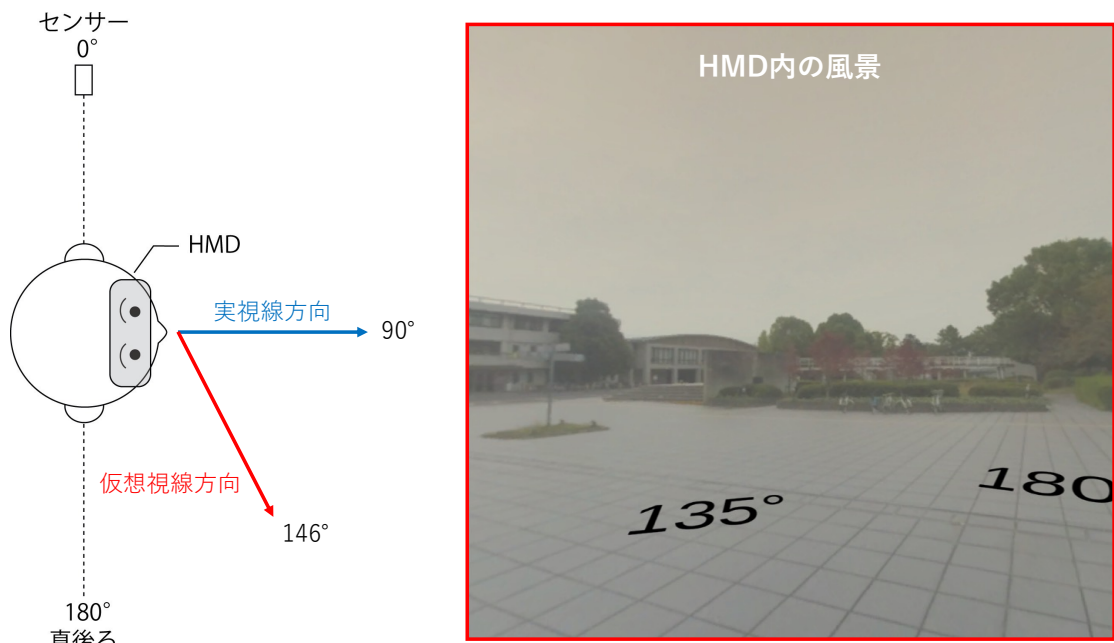


図 3.4: シグモイド関数誇張における首の角度と HMD への表示例 ($r=90$)

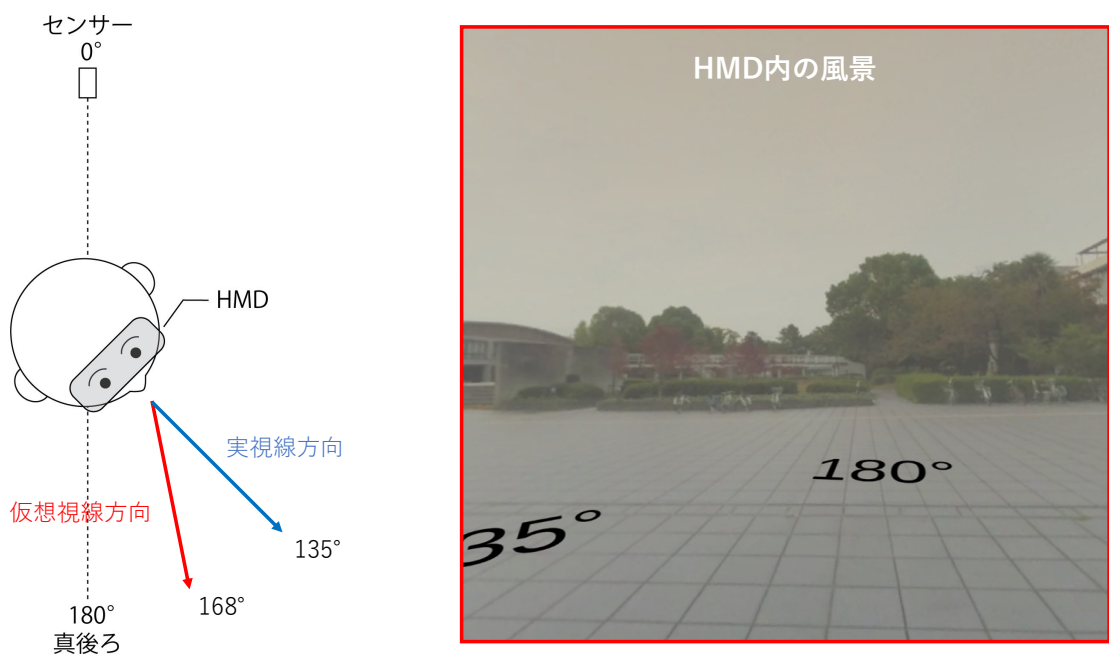


図 3.5: シグモイド関数誇張における首の角度と HMD への表示例 ($r=135$)

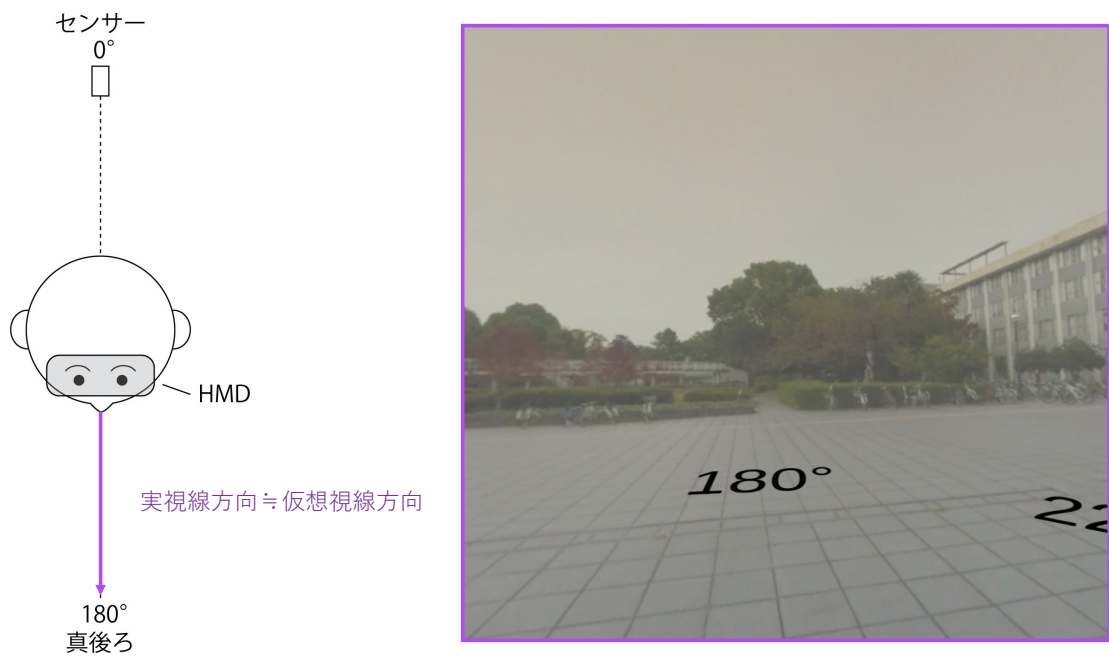


図 3.6: シグモイド関数誇張における首の角度と HMD への表示例 (r=180)

第4章 動的視線方向誇張

本章では、これまでの視線方向誇張をベースに、首の角加速度に応じて動的に誇張量を変化させる誇張方法について説明する。

4.1 提案手法の概要

これまでに提案してきた視線方向誇張パターンはどれも実視線方向の角度に応じた静的な誇張であった。しかしながら、HMDを用いてVRサービスを利用する際、コンテンツや用途によって首を動かすスピードが変わってくる。例えば、360度パノラマ画像や360度動画をHMD視聴する際、あたりを満遍なくゆっくり見渡そうとするだろう。一方でゲームをプレイしているときは、視界の外の敵やターゲットに視線を素早く合わせるために首を速く動かす必要が生じる。そこで、首を速く動かしている間は、より早く見たい方向の風景が視界に入るようにする。これまでの視線方向誇張をベースに首の角加速度に応じて動的に視線方向を誇張する方法を提案する。時刻 t における首の向いている角度、すなわち実視線方向の角度が $r(t)[deg]$ であるとする、首の角速度は $\omega(t) = r'(t)[deg/s]$ と表せる。また、首の角加速度は $\beta(t) = \omega'(t)[deg/s^2]$ と表せる。ここで、 ζ' を定数、画面のリフレッシュ間隔を Δt として、 $\zeta = \zeta' \Delta t[s^2]$ と定義する。この ζ は動的に視線方向を誇張する度合いを示しており、 ζ' はシステムのリフレッシュ間隔に応じて決定するパラメータである。この ζ を用いて動的視線方向誇張における従来の視線方向誇張との差分 d_2 を以下のように考える。

$$d_2 = \zeta \beta(t) \quad (4.1)$$

この d_2 を用いて動的視線方向誇張における仮想視線方向の角度 v は以下のように表す。

$$v = h(r) + d_2 \quad (4.2)$$

これにより、首の角速度が増加しているときは d が大きくなり、従来の視線方向誇張 $h(r)$ から乖離し、より後方を視認できる。一方で、首の角速度が減少しているときは d がマイナスになり乖離した分が少なくなって $h(r)$ に再び近づく。例えば仮に $v = h(r) = r$ であり、 $r = 0$ の時点で首の角速度が ω であるとする。そこから首が等角速度で回旋した場合、 v はそのまま線上を動く (図 4.1①)。一方で角速度が増加した場合、 v は $h(r)$ から乖離する (図 4.1②)。乖離したのち、角速度が一定のときは傾きは $h(r)$ と等しい (図 4.1③)。もし角速度が減少した場合には $h(r)$ に近づく (図 4.1④)。また図 4.2, 図 4.3 は、従来の視線方向誇張下 ($v = h(r) = 2r$) とそれに動的視線方向誇張を適用した状態においてそれぞれ首を 0 度から 90 度まで素早く回旋した場合の HMD 内の風景の様子を比較したものである。初めの正面を向いた状態は動的視線方向誇張の有無に関わらず同じである (図 4.2 (a))。しかし首を回旋し始めると、角速度が増加したことにより動的視線方向誇張ありの状態の方がわずかに後方の風景を表示している (図 4.2 (b))。途中首の角速度が同じ間は先ほどの乖離を維持し (図 4.2 (c))、後方に近づき角速度が減少するにつれ乖離が小さくなり従来の視線方向誇張と等しくなっている (図 4.3)。

4.2 実験

素早く視線方向を向きたい方向に合わせる動作にて、動的視線方向誇張と静的視線方向誇張で差があるかどうか調べるため実験を行った。

4.2.1 概要

実験のために、素早くターゲットに視線を合わせる簡単なゲームを Unity を用いて作成した。実験では HMD に MetaQuest2 を用いた。MetaQuest2 のリフレッシュ間隔を 90Hz に設定し、プログラムにおいて実測したところ約 93Hz であった。そこで Δt の値を小数点以下第四位を四捨五入して $\Delta t = 0.011$ とみなす。また、首の角速度、角加速度はそれぞれ直近 5 フレーム分の平均値とする。ここで、作成した実験システムを用いて動的誇張を試したところ、定数 ζ' の値によっては画面が大きくブレてしまい強い違和感を感じた。そこで予備実験を行い、違和感を感じない ζ' を

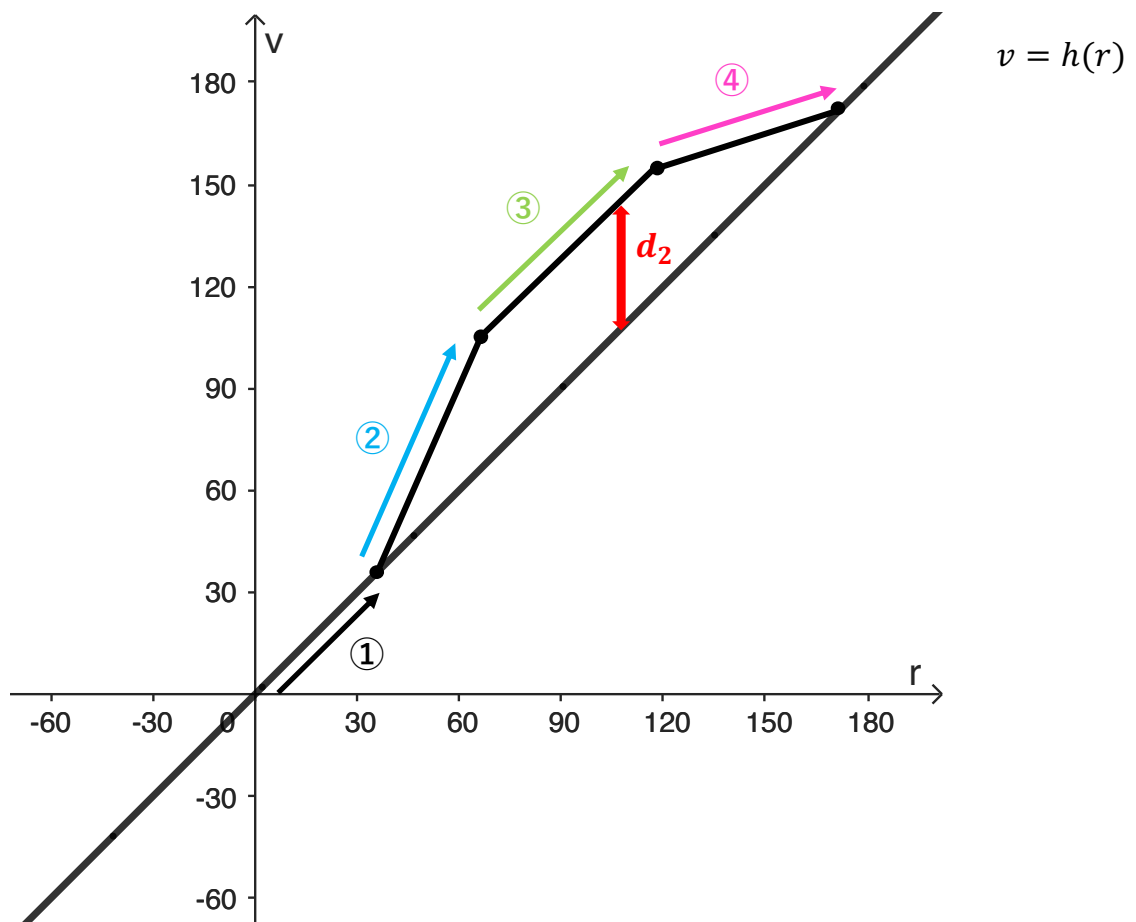
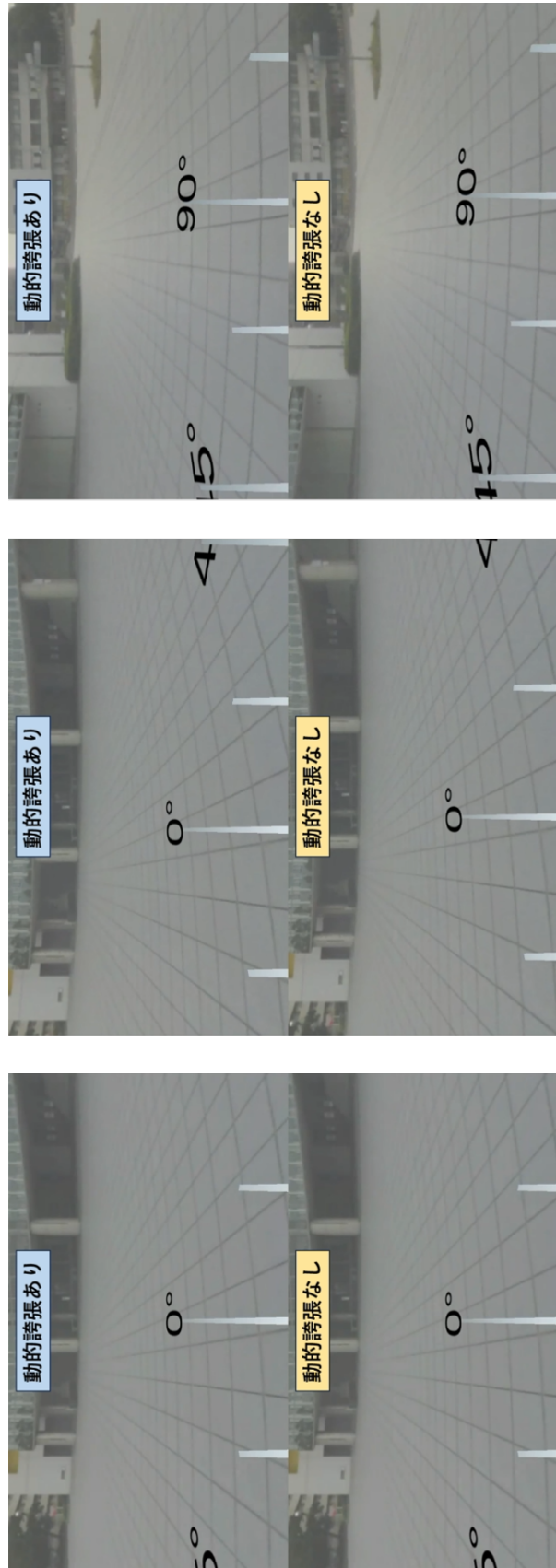


図 4.1: 動的視線方向誇張の概念図

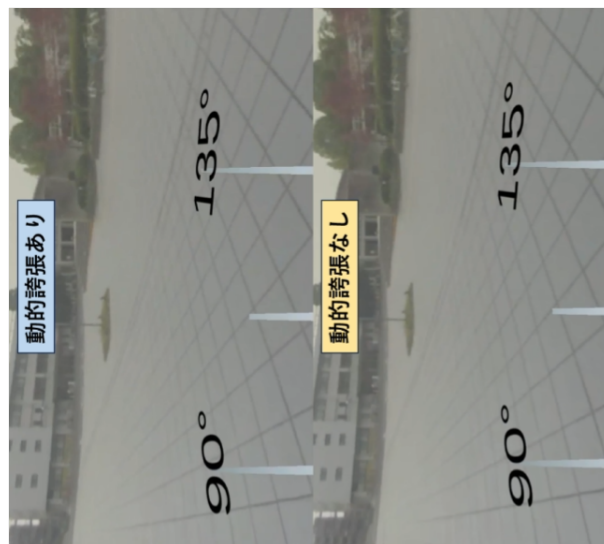


(c) 首の角速度が一定

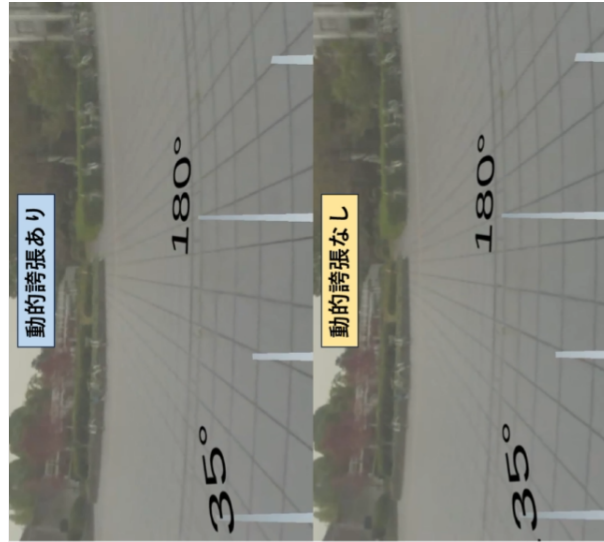
(b) 首の角速度が増加

(a) 首が停止 (正面)

図 4.2: 従来の視線方向誇張下における動的視線方向誇張の有無による HMD 内の風景の比較 (加速)



(d) 首の角速度が減少



(e) 首が停止 (後方)

図 4.3: 従来の視線方向誇張下における動的視線方向誇張の有無による HMD 内の風景の比較 (減速)

調査した。被験者には実験システムを自由に視聴してもらい、 ζ' の値を徐々に大きくしていった。途中で違和感が許容できないと感じたら視聴をやめてもらい、そのときの ζ' の値で記録した。被験者数は4名であり、結果は $\zeta' = 4$ であった。この ζ' を用いて、以下の本実験を行った。

4.2.2 実験1

被験者はHMDを装着し、周囲に現れる10個の的に順に視線方向を合わせるタスクを行う(図4.4)。的は1秒間視線方向を合わせ続けることで破壊でき(図4.5)、破壊されると次の的が出現する(図4.6)。全ての的を壊し終えるまでの時間を計測した。実験は誇張なしの通常の状態と2章で述べた単純な線形誇張(1,0): $v = 2r$ の二つに対して以下の通り行った。

1. 被験者に的を壊す実験タスクを練習してもらい、最低でも3回とし、慣れによるタスク完了時間の更新が見られなくなるまで練習してもらい。
2. 実験タスクを行ってもらい、通常状態、または線形誇張それぞれに対して、動的誇張ありとなしの2通りを2回ずつ、計4回のタスクを行ってもらい、完了までの各時間を計測する。
3. 実行時間の比較、簡単なアンケート調査を行う。

アンケート調査では通常状態と線形誇張それぞれで、各4試行において動的誇張の有無による何らかの違いに気づいたかどうか尋ねる。実験において時折、的から視線を外してしまい、失敗する様子も見られた。明らかな失敗試行は除外することもできるだろうが、わずかな失敗は客観的に判断することは困難であろう。そこで、タスク完了時間は動的視線方向誇張あり、なしのそれぞれ2回ずつの記録のうち、良い方の記録2つで比較する。被験者数は10名である。

各被験者のタスク完了時間の結果は表4.1、表4.2の通りである。通常の状態では動的視線方向誇張の有無でタスク完了時間が短くなる人数に差は見られなかった。一方で、線形誇張下ではやや動的視線方向誇張ありの方がタスク完了時間が短くなった。線形誇張下では風景の移動速度が速いために視線方向を合わせる動作は難易

度が高くなる。それに加えて、動的視線方向誇張ありの状態では動的視線方向誇張がない状態に比べて、的の周辺で減速する際には誇張の度合いが小さくなる。動的視線方向誇張ありの方が的に視線方向を合わせやすかったため、タスク完了時間が短くなったと考えられる。通常の状態では線形誇張下ほど風景の移動速度が速くないため、難易度がそこまで高くならず、差が生じにくかったのではないだろうか。



図 4.4: 実験システムの様子1, 左に的が表示されている



図 4.5: 実験システムの様子2, 的に視線を合わせたところ



図 4.6: 実験システムの様子 3, 的が消滅した

表 4.1: 通常の状態での動的視線方向誇張ありとなしにおける実験タスク完了時間の比較

動的視線方向誇張あり	20.394	19.848	18.578	19.124	20.705	22.355	18.255	19.558	21.674	21.719
動的視線方向誇張なし	19.5	20.193	19.747	19.335	20.415	21.259	18.444	19.46	21.051	22.888

表 4.2: 線形誇張下での動的視線方向誇張ありとなしにおける実験タスク完了時間の比較

動的視線方向誇張あり	22.276	24.448	20.66	23.735	23.568	25.628	22.097	23.79	24.793	23.278
動的視線方向誇張なし	23.356	24.548	20.738	24.002	23.746	24.703	20.85	22.298	25.138	25.873

またアンケートでは10名中10名が違いに気づかなかったと回答した。定数 ζ' を被験者が違和感を感じない範囲内で適切に設定できていたことが確認できた。しかしながら、時間を計測することでよりの意識が集中する分、 ζ' の値はもう少し大きいくとも良かったのかもしれない。定数 ζ' の値が大きくなれば動的視線方向誇張の変化量も大きくなるため、結果も変わってくるのではないだろうか。今後、より適切な ζ' を決定するための実験を行いたい。

4.2.3 実験2

実験2では被験者にHMDを装着してもらい、実験システム内の風景を通常の状態と線形誇張下($v = 2r$)で自由に視聴してもらおう。被験者には途中で画面の見え方が少し変わることを伝えておき、動的視線方向誇張の有無を切り替える。どちらからどちらに変わったかは明言せず、その前後における使用感について比較体験してもらおう。その後アンケートに答えてもらい、違いがあったと感じた人にはどのように感じたか感想を述べてもらった。アンケートでは見え方が変わると伝えた前後において、どちらが視線方向をよりの合わせやすいと感じたか以下の5つから選んで回答してもらった。

1. 前者の方が合わせやすく感じた
2. どちらかと言えば前者の方が合わせやすく感じた
3. 変わらない
4. どちらかと言えば後者の方が合わせやすく感じた
5. 後者の方が合わせやすく感じた

被験者数は7名である。

アンケート結果を表4.3、表4.4に示す。線形誇張下ではほとんどの被験者が違いを感じていなかった。また通常の状態では数名の被験者が違いに気づいたが、半数以上が変わらないと感じていた。また、以下の感想が得られた。

- 動的誇張下では風景の移り変わりが僅かに早い感じがした。

表 4.3: 通常の状態における動的視線方向誇張の有無による使用感の比較

どちらが視線方向を合わせやすかったか	人数
動的視線方向誇張あり	0名
どちらかと言えば動的視線方向誇張あり	1名
変わらない	4名
どちらかと言えば動的視線方向誇張なし	2名
動的視線方向誇張なし	0名

表 4.4: 線形誇張下における動的視線方向誇張の有無による使用感の比較

どちらが視線方向を合わせやすかったか	人数
動的視線方向誇張あり	0名
どちらかと言えば動的視線方向誇張あり	1名
変わらない	6名
どちらかと言えば動的視線方向誇張なし	0名
動的視線方向誇張なし	0名

- 違いがあるといわれてから注視して見ると、通常の状態では確かに動的誇張時は少し風景のぶれがあった。
- ほとんど、もしくは全く違いがわからなかった。

感想からも、多くの人がほとんど違いを感じないと答えた。これにより、動的視線方向誇張を適用しても体感では従来の視線方向誇張とほとんど差は感じられないことが確認できた。動的視線方向誇張を適用することで新たに不快感が増加したり、操作性が悪化するなどの悪影響も特になんことが確認できた。

第5章 ベクシオン誘発による不快感軽減

本章では視線方向誇張時に、パーティクルを用いて被験者にベクシオンを誘発することで不快感を軽減する方法について説明する。

5.1 ベクシオンについて

ベクシオンとは、“視覚誘導性自己運動感覚”と呼ばれ、実際には自分は動いていないのに、自分の体が動いて感じる錯覚のことである。日本バーチャルリアリティ学会 (VR 学会) の用語集には、「静止している観察者に視覚的運動が与えられたとき、観察者自身が運動しているように知覚される現象」と記されている。ベクシオンは広く研究されており、その中に視野領域とベクシオンの感じ方の関係を調査したものがあ。例えば、ベクシオンの発生には中心視野域よりも周辺視野域における視覚刺激が有効であると言われており [14]、また周辺視野域は中心視野域に比べ物体運動における反応時間が長いことや [15]、運動の知覚に優位であることがわかっている [16]。そこで本研究ではこれらを考慮した上で効果的に被験者にベクシオンを誘発できるように試みる。

5.2 提案手法の概要

これまでいくつかの視線方向誇張パターンを提案してきたが、全く不快感を感じない誇張パターンはなかった。ここでいう不快感とは主に首の動き、すなわち実視線方向と内の風景の、すなわち仮想視線方向のずれによるものである。特に第3章で述べたシグモイド関数誇張では他の誇張パターンに比べてより大きな不快感を感じた。その原因は、シグモイド関数誇張における後方付近では首が回旋しているにもかかわらず、風景はほとんど動かないことだと考えられる。そこで、被験者の周囲を水平円運動するパーティクルを追加することで被験者に水平回旋感覚を誘発で

きるのではないかと、実際の身体の動きと視覚的風景の旋回感覚のズレが小さくなることで不快感の軽減につながられるのではないかと考えた。パーティクルは白色不透明とし、不透明な尾を引くようにHMD内に表示する。コンテンツの視聴を妨げないように、またベクシオンを効果的に誘発するために、パーティクルの表示位置や大きさを適切に設定する必要がある。実視線方向の角速度がグローバル座標系において ω であるとき、HMD内の風景はHMD座標系において $-\omega$ で回転している。視線方向誇張時には、HMD内の風景は $-h'(r)\omega$ で回転する。この $h'(r)$ が1から大きく離れると、特に1よりとても小さいと、不快感を感じるようである。そこで、以下のようにパーティクルを描画する。

1. 仰角（俯角）が上下ともにHMD座標系で $\theta_1 \leq \theta \leq \theta_2$ の領域を右回旋または左回旋する
2. HMD座標系において角速度 $-\omega/h'(r)^\epsilon$ 相当で移動する（ ϵ は定数）
3. およそ5.5mの距離に対して直径10cmの大きさ
4. 上下合わせて同時に γ 個が被験者の周りに存在する（HMDの水平視野はおよそ90度であり、およそ $\gamma/4$ 個が視野内に存在する）
5. 透明度 α で、 δ 秒分の軌跡の尾を引く

ただし、 $\omega = 0$ 、すなわち視線方向が回旋していないときは表示しない。

5.3 実験1

まず、パーティクルの有無やその見かけの速さ（パラメータ ϵ ）が不快感の低減に寄与するかどうか調査する。具体的には、(a) シグモイド関数誇張の後方付近のように仮想視線方向の角速度が実視線方向の角速度よりとても小さい場合と、加えて、(b) 前方付近や2節で述べた方法において仮想視線方向の角速度が実視線方向の角速度よりとても大きい場合の両方を調査する。ここでは満遍なく前方から後方まで視認できることは考慮せず、実視線方向 r に対する仮想視線方向 $v = br$ に対して、前者(a)ではシグモイド関数誇張における $r = 130$ 付近相当の $b = 1/3$ とし、

後者 (b) では誇張 (2,30) や (3,45) における $r = 70$ 付近相当の $b = 3$ とした。定数 ϵ はパーティクルの動きが実視線方向の変化と同等な $\epsilon_0 = 0$ と仮想視線方向の変化の緩急に対して逆になる $\epsilon_1 = 1$ の2通りについて調査する。具体的には実視線方向の角速度 ω に対するパーティクルの角速度が、前者 (a) では等倍の $-\omega$ および大きくなる -3ω であり、後者 (b) では等倍の $-\omega$ および小さくなる $-\omega/3$ である。すなわち、上記 (a) と (b) においてそれぞれパーティクル無し、パーティクル有り（等倍）とパーティクル有り（緩急逆）を被験者に体験してもらう。実験時には自由に周囲を見渡してもらい、0から9の10段階で不快感をアンケート評価してもらう（図5.1）。被験者には事前に不快感0点相当として通常の状態（誇張なし）を体験してもらう。なお、パーティクルはパラメータを経験的に $\alpha = 0.005$, $\gamma = 100$, $\delta = 0.15$ と設定した。また、人間の最大視野角は垂直方向に約125度（上50度，下75度）であり [17]，そのうちの中心視野域は上下20度である [18]。そこで垂直方向の視野領域のうち上下20°より大きい周辺視野に対して $25^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$ の領域にパーティクルを表示する（図5.2）。被験者数は6名である。

実験の結果、各条件における不快感の平均点は表5.1のようになった。まず (a) 仮想視線方向の変化が実視線方向の変化に対して緩やかな場合は、パーティクル有りの両方で不快感の軽減が確認できた。特に、パーティクルの動きが実視線方向の変化と同等な $\epsilon = 0$ の条件下でより軽減された。いずれの条件下でも、多くの被験者からパーティクル無しと比べHMD内の風景の動きがより大きく感じられたという意見が得られた。パーティクルによりベクシオンを誘発できており、それが不快感の軽減につながったと考えられる。一方で (b) 仮想視線方向の変化が実視線方向の変化に対して急な場合は、パーティクルの動きが実視線方向の変化と同等な $\epsilon = 0$ の条件下で不快感がやや軽減した。しかしながら被験者の約半数から、大きな違いを感じられない、またはむしろ不快に感じたという意見が得られた。さらに、パーティクルの動きが実視線方向の変化に対して逆に緩やかな $\epsilon = 1$ の条件下では、不快感がやや増加した。仮想視線方向の角速度が実視線方向の角速度よりもとても小さい場合において、実視線方向の角速度、すなわち実際の首の回旋と同程度の角速度のパーティクルの提示が、不快感の軽減に効果的であることが確認できた。



図 5.1: 実験の様子

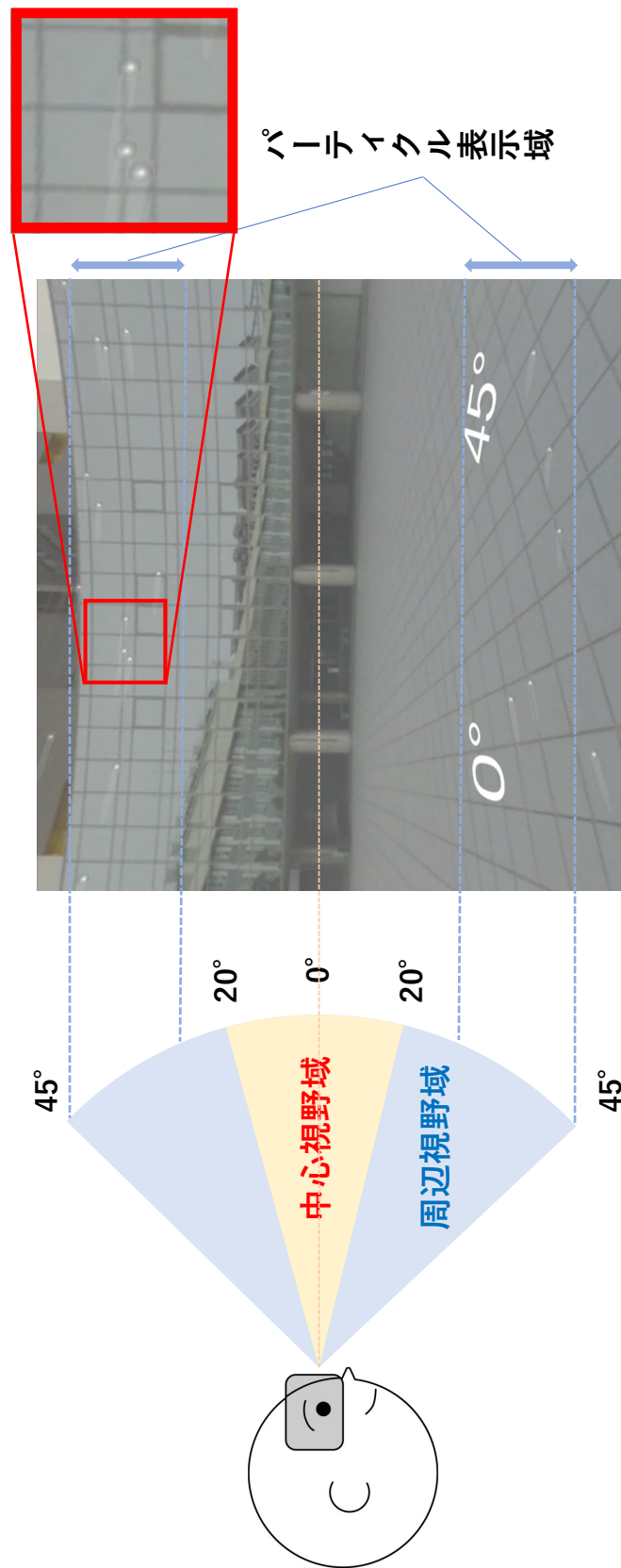


図 5.2: 視野領域とパーティクル表示 ($\omega = 3.7[\text{rad/s}]$, $-\omega/h(r)^\epsilon = -3.7[\text{rad/s}]$ の例)

表 5.1: パーティクルの有無による不快感

背景	(a) (緩)			(b) (急)		
	無	ϵ_0 (等)	ϵ_1 (急)	無	ϵ_0 (等)	ϵ_1 (緩)
評価の平均点	4.3	3.3	3.6	3.6	3.3	3.9

5.4 実験2

続いて、実際に容易に後方視認ができる手法であるシグモイド関数誇張（ゲイン $g = 0.025$ ）に対してパーティクルを提示し、（仮想視線方向ではなく）実視線方向が側方よりも後方へ向き一周した場合も含めて不快感の感じ方を調査する。なお実験1の結果をもとにパーティクルの各パラメータは、定数 ϵ は0とし、その他は実験1と同じである。またパーティクルの表示は $h'(r) < 1/3$ を目安に、実視線方向 r が $120 \leq |r| \leq 180$ の範囲に限定する。被験者には自由に周囲を見渡してもらい、特に意図的に腰を浮かすなどして真後ろを超えて一周してもらおう。パーティクルの有無による不快感の感じ方や、また一周できることの有用性について感想を尋ねる。被験者数は3名である。

各被験者から以下のような感想が得られた。

- パーティクル無しよりも有りの方が後方付近での不快感が軽減し、全体的に使用感が良くなった。
- 今までの誇張では首を 90° 以上後ろに向けるとどこを向いているかわからなくなったが、一周できることで自分の向きを見失わなく、良い誇張方法だと思う。後方付近の不快感はパーティクルの有無であまり変わらなかった。
- パーティクル無しのシグモイド誇張は、一周できる代わりに以前の誇張に比べて後方での不快感が増したが、パーティクルの提示によりやや軽減された。

これらの感想から、実験1同様にパーティクルの提示によってやや不快感を軽減できていることが確認できた。またシグモイド関数誇張と適切なパーティクルの提示を合わせることで、容易な後方視認を可能にしつつ違和感が少なく一周できることを確認できた。

表 5.2: 動的視線方向誇張下でのパーティクルの有無による不快感

背景	(a) (緩)			(b) (急)		
	無	ϵ_0 (等)	ϵ_1 (急)	無	ϵ_0 (等)	ϵ_1 (緩)
評価の平均点	6.1	4	4.5	3.3	3	3.3

5.5 実験3

最後に、素早く振り返る場合に焦点を当てた動的誇張に対してパーティクルを提示し、角速度が加速減速している場合も含めて不快感の感じ方を調査する。具体的には (a) 仮想視線方向の角速度が実視線方向の角速度よりとても小さい場合と、(b) 仮想視線方向の角速度が実視線方向の角速度よりとても大きい場合において、それぞれ動的視線方向誇張ありの状態で行う。実験における手順、各値、評価方法は実験1と同じである。また動的視線方向誇張の定数 ζ' は4である。被験者には事前にアンケート評価における不快感0点相当として動的視線方向誇張ありの通常の状態を体験してもらう。被験者数は6名である。

各条件における不快感の平均点を表5.2に示す。(a) 仮想視線方向の変化が実視線方向の変化より緩やかな場合において、パーティクル無しでは動的視線方向誇張がないときに比べ不快感の値が大きくなっている。動的視線方向誇張は仮想視線方向の変化が実視線方向の変化より緩やかである場合には不快に感じるのかもしれない。しかし、実験1と同様にパーティクル有りの両方で不快感が軽減されており、動的視線方向誇張ありでもパーティクルによる不快感軽減が有効であることは確認できた。一方、(b) 仮想視線方向の変化が実視線方向の変化より急な場合においては、パーティクル無しの不快感も実験1と同程度であり、パーティクルありによる不快感の軽減もほとんど見られなかった。

第6章 むすび

本研究では、視線方誇張手法の新しい誇張パターンであるシグモイド関数誇張と首の角速度の変化に応じて動的に誇張量を変える動的視線方誇張、さらにパーティクル提示によって不快感を軽減する方法を提案した。シグモイド関数誇張は姿勢変更や回転する椅子に座るなど、従来の視線方向誇張だけでは対応できなかった、視線方向が一周する状況に対応可能にする誇張パターンである。実験では後方付近でほぼ滑らかに風景が接続され、視線方向を一周できることが確認できた。また動的視線方向誇張によって、素早く首を回旋している間、従来の視線方向誇張よりも後方の風景を表示することで、より早く見たい方向の風景を視界に入れられる。素早く視線方向を的に合わせるタスクにおいて、成績の向上が確認できた。しかし、視線方向を誇張すると多かれ少なかれ不快感を感じてしまい、特にシグモイド関数誇張では他の誇張パターンに比べてより大きな不快感を感じた。そこで水平円運動するパーティクルを被験者の周囲に提示することで水平回旋感覚を誘発し、不快感の軽減を試みた。実験ではHMD内の風景の動きが首の動きよりも緩やかな場合と急な場合について、それぞれパーティクルの有無で不快感が変わるか調査した。風景の動きが首の動きよりも緩やかな場合において、不快感が軽減した。これを踏まえてシグモイド関数誇張にパーティクルを適用したところ、少ない違和感で視線方向を一周できることが確認できた。今後の課題として、動的視線方向誇張における動的誇張度合いの精査が挙げられる。また視線方向誇張手法を実際に利用されているVRサービス、コンテンツに適用し、長期的に利用してもらうことで新たな課題の調査や本手法の有用性についての評価を行いたい。

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] 舘 暲, 佐藤 誠, 廣瀬 通李, “バーチャルリアリティ学”, バーチャルリアリティ学会 (編), コロナ社, 2011.
- [2] SONY, “PlayStation VR,”
<https://www.playstation.com/ja-jp/ps-vr/> (2023/12/26 閲覧)
- [3] Meta, “Meta Quest 2,”
<https://www.meta.com/jp/quest/products/quest-2/> (2023/12/26 閲覧)
- [4] 総務省, 令和 5 年度版情報通信白書, “ICT サービス及びコンテンツ・アプリケーションサービス市場の動向”,
<https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/r05/html/nd247520.html> (2023/12/26 閲覧)
- [5] 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.
- [6] 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, Vol.59, No.6, pp.324-328, 2016.
- [7] 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.
- [8] 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.

- [9] Seitaro Inagaki, Kenji Funahashi, “Easy rearward visibility by the control of eye direction in viewing panoramic images with HMD,” ACM SIGGRAPH Posters, 2022.
- [10] 妹尾武治, 鈴木宏昭, “ベクションとは何だ!? (共立スマートセレクション 16)”, 共立出版, 2017.
- [11] iNFINITE Production, “VR Headset database and utility,”
<https://www.infinite.cz/projects/HMD-tester-virtual-reality-headset-database-utility> (2024.1.10 閲覧)
- [12] Unity Technologies, “Unity,”
<https://unity.com/ja> (2024.1.18 閲覧)
- [13] Arashi-Vision, “Insta360 ONE,”
<https://unity.com/ja> (2024.1.18 閲覧)
- [14] Johansson G, “Studies on visual perception of locomotion,” Perception, Vol. 6, No. 4, pp. 365 - 376, 1977.
- [15] 早福澄子, “周辺視における知覚特性に関する研究—刺戟出現方位と反応時間の関係について—”, 産業工芸試験所報告, Vol. 58, pp. 11 - 16, 1969.
- [16] 山岸典子, S.J. Anderson, “周辺視野の位置知覚における色情報と運動情報の役割”, 電子情報通信学会技術研究報告, ヒューマン情報処理, Vol. 98, No. 397, pp. 23 - 30, 1998.
- [17] 増田千尋, “3次元ディスプレイ (ディスプレイ技術シリーズ)”, 産業図書, p. 49, 1990.
- [18] 小西晃広, “視野領域と視覚誘導性自己運動感覚 (vection) について”,
<http://www.rm.is.ritsumei.ac.jp/~konishi/VectionHTML/AboutVection.html> (2024.1.16 閲覧)

発表論文リスト

1. Seitaro Inagaki, Kenji Funahashi, “Facilitating rearward visibility by controlling eye direction in HMD viewing of panoramic images,” Proc. NICOGRAPH International 2022, p.100, Poster, 2022.
2. Seitaro Inagaki, Kenji Funahashi, “Easy rearward visibility by the control of eye direction in viewing panoramic images with HMD,” Proc. ACM SIGGRAPH 2022, Poster, Article 24, 2022.
3. 稲垣正太郎, 舟橋健司, “パノラマ 360 度画像の HMD 視聴における視線方向制御とベクションによる不快感の軽減”, 日本バーチャルリアリティ学会第 28 回大会講演論文集, 3C1-02, 2023.
4. Seitaro Inagaki, Kenji Funahashi, “Eye direction control and reduction of discomfort by vection in HMD viewing of panoramic images,” Proc. IEEE VR 2024, Poster, 2024.