



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

Control of eye direction and reducing discomfort by vection
in viewing panoramic images with HMD

稲垣正太郎¹⁾, 舟橋健司¹⁾

Seitaro Inagaki, Kenji Funahashi

1) 名古屋工業大学大学院 (〒 466-8555 愛知県名古屋市昭和区御器所町)

概要: 我々はこれまでに、座位でパノラマ 360 度画像を HMD 視聴する際に、視線方向の角度をプログラムで誇張することで後方視認を容易化する視線方向誇張手法を提案した。しかし誇張により VR 酔いなどの不快感が強まることもあった。本研究では、水平移動するパーティクルを提示することで安定的にベクションを誘発して誇張による違和感を抑えることで、不快感の低減を試みた。

キーワード: HMD, パノラマ 360 度画像, 視線方向制御, ベクション

1. はじめに

家庭用 HMD の普及が進み、多くの人が気軽に自宅で VR コンテンツを楽しんでいる。自宅で利用される VR サービスは動画やゲームなどが多く、また座った状態で利用されることが多い。しかし人間の首腰の回旋可動域では座った状態で後方を視認することは困難である [1]。実際に Youtube での 360 度動画再生時間のうちの 75% の間、動画の正面方向を中心とした 90 度の範囲に視聴者の視線が向けられていることが明らかになっている [2]。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 [3]。そこで我々はこれまでに、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 [4]。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。この手法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することを考慮していない。しかしながら、姿勢の変更や回転する椅子により視線方向を一周させることも不可能ではない。そこで本研究では、視線方向の角度誇張により後方視認性を確保した上で、視線方向が一周した場合にも対応できる新たな誇張方法を提案する。また、視線方向誇張時に意図的にベクションを誘発することで不快感を削減する方法も提案する。ベクションとは視覚誘導性自己運動感覚のことであり [5]、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ョンを感じさせる。

2. 視線方向誇張手法

本節では、これまでに提案している視線方向誇張手法について簡単に説明する。見ている方向を視線方向と呼ぶが、本手法では特に、HMD に関わらず実際の顔の向きを“実視線方向”、プログラムにより HMD に表示する風景の向きを“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が、本手法では視線方向の角度を誇張して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 1)。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)。

$$\begin{cases} v = h(r) = e(r) & (|r| \leq a) \\ v = h(r) = f(r) & (|r| > a) \end{cases} \quad (1)$$

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) を式 (1) に代入することで $e(r)$ と $f(r)$ は式 (3) のように求められる。

$$\begin{cases} v' = e(r' + a) - a = e'(r') \\ v' = f(r' + a) - a = f'(r') \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} e'(r - a) + a = e(r) \\ f'(r - a) + a = f(r) \end{cases} \quad (3)$$

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。

$$\begin{aligned} d(r) &= f(r) - e(r) \\ f(r) &= d(r) + e(r) \end{aligned} \quad (4)$$

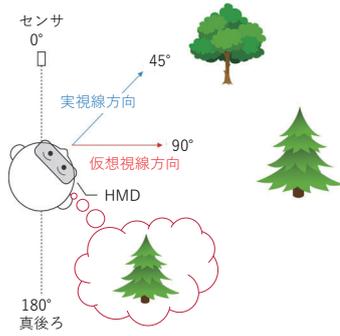


図 1: 実視線方向と仮想視線方向

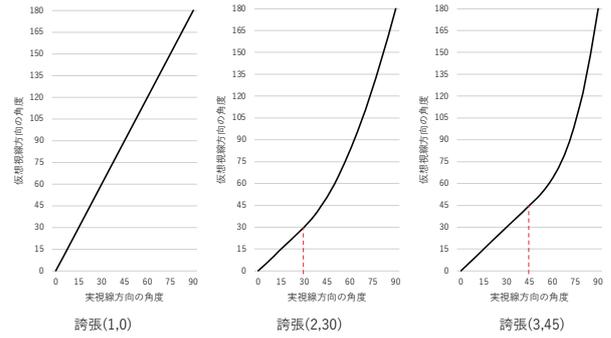


図 3: 視線方向誇張の例

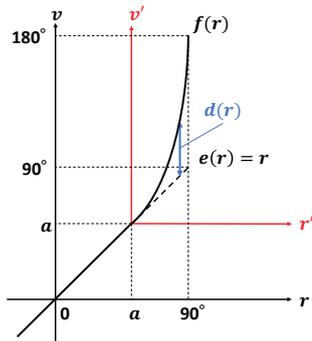


図 2: 視線方向誇張の概念図

$$\begin{aligned}
 d'(r') &= f'(r') - e'(r') = f(r' + a) - e(r' + a) \\
 &= f(r) - e(r) \\
 &= d(r)
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

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。

$$d'(r') = br'^c \quad (c \subseteq N) \tag{6}$$

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 (7) を得る。また式 (1) を式 (8) のように改めて考える。

$$\begin{aligned}
 v &= f(r) = e(r) + d(r) = e(r) + d'(r - a) \\
 &= e(r) + b \cdot (r - a)^c
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

$$\begin{cases} v = h(r) = e(r) = r & (|r| \leq a) \\ v = h(r) = f(r) = r \pm b|r - a|^c & (|r| > a) \end{cases}
 \tag{8}$$

式 (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。実験ではパラメータ c と a を変えることで、図 3 のようにいくつかの誇張パターンを用意した。各誇張パターンを“誇張 (c, a)”のように表す。

実験では、12 種類の誇張パターン (パラメータ c が 3 種類、パラメータ a が 4 種類) に対して、誇張 (1,0) が最も満足度が高かった。変化点の角度が大きくなるほど満足度が

低く、また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のが、誇張により後方が見やすくなったとの評価を得た。

3. シグモイド関数誇張

前節で述べた視線方向誇張手法は、家庭での座位を前提にしており、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。また、前節で述べたとおり、実験では誇張 (1,0)、すなわち直線に近く途中で傾きが大きくなる誇張が好まれた。そこで本節では新たに、前方付近では直線に近く後方付近では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。

$$v = h(r) = \frac{360}{1 + e^{gr}} - 180 \tag{9}$$

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 4)。

$$v = h(r) = \frac{360}{1 + e^{-0.025r}} - 180 \tag{10}$$

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。簡易実験では、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ることを確認した。しかし一方で前節の誇張方法に比べて、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。

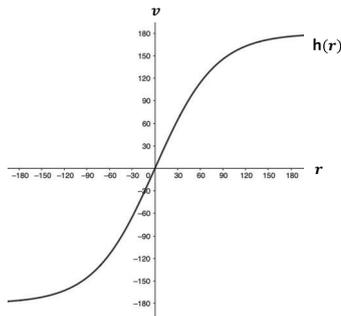


図 4: シグモイド関数誇張

4. ベクシオンによる不快感軽減

被験者の周囲を水平円運動する白色不透明のパーティクルを半透明な尾を引くように HMD 内に表示して、実視線方向の変化を適切に感じられるようなベクシオンを誘発させる。コンテンツの視聴を妨げないように、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 β 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 $\beta/4$ 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. 実験

5.1 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も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も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 $v = b'r$ 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 $b' = 3$



図 5: 実験の様子

表 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_1 (等)	ϵ_2 (緩)
評価の平均点	4.3	3.3	3.6	3.6	3.3	3.9

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）。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 $\alpha = 0.005$ 、 $\beta = 100$ 、 $\delta = 0.15$ と設定して、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 $25^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$ の領域に表示する（図 6）。

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 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

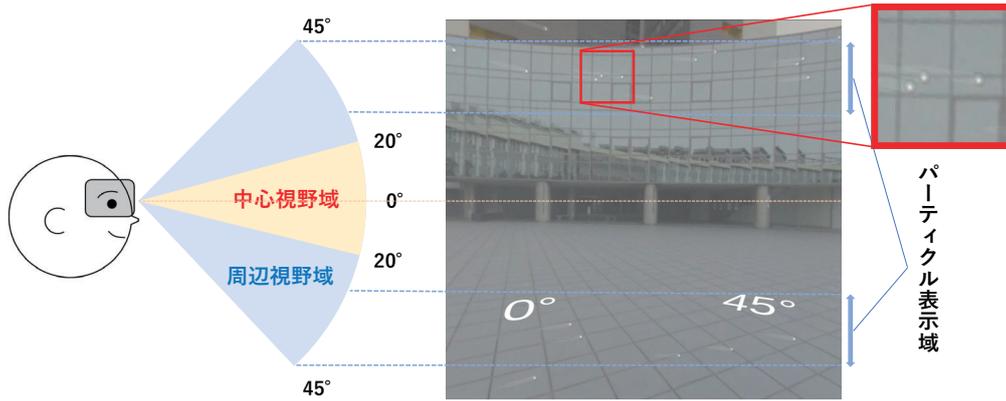


図 6: 視野領域とパーティクル表示 ($\omega = 3.7[\text{rad/s}]$, $-\omega/h'(r)^\epsilon = -3.7[\text{rad/s}]$ の例)

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な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。

5.2 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い、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。

シグモイド関数誇張と適切なパーティクルの提示により、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。

6. むすび

本研究では、視線方向の角度をプログラムで誇張して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手法に対して、視線方向が一周した場合にも対応できるシグモイド関数による新たな誇張方法を提案した。また、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を削減する方法も提案した。

今後の課題として、パーティクルの各パラメータの精査や動的な変更を検討したい。なおパーティクルの追加による効果は個人差が大きく、人により不快感を増加させてしまうこともあった。パーティクル提示以外の試みや、シグモイド関数とは異なる視線方向変換も考えたい。

謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 JP20K11918 と JP23K11182 および JP22K12337 の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] 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 (平成 7 年 4 月改訂), リハビリテーション医学, Vol.32, No.4, pp.207-217, 1995.
- [2] 高田真也, 西岡大, 齊藤義仰: 360 度インターネット生放送における視聴者 POV の分析, マルチメディア・分散・協調とモバイルシンポジウム (DICOMO2019) 論文集, Vol.2019, pp. 889-894, 2019.
- [3] 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論文誌, Vol.23, No.3, pp.217-227, 2018.
- [4] Seitaro Inagaki and Kenji Funahashi: Easy rearward visibility by the control of eye direction in viewing panoramic images with HMD, ACM SIGGRAPH 2022 Posters, 2022.
- [5] 妹尾武治, 鈴木宏昭: ベクシオンとは何だ!? (共立スマートセレクション 16), 共立出版, 2017.