2025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見どころ鑑賞の効率化

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
2022年度入学　34714072番

新宮　匠

目 次

第 1 章　はじめに **1**

第 2 章　見どころ鑑賞効率化手法 **4**
2.1　視線方向の定義 4
2.2　提案手法のアイデア 6
2.3　ベジェ曲線による平滑化 9

第 3 章　提案手法の評価 **11**
3.1　予備評価 11
3.2　評価検証 1 12
3.2.1　評価 1-1 の概要 12
3.2.2　評価 1-1 の手順 18
3.2.3　評価 1-1 の評価項目 19
3.2.4　評価 1-1 の結果と考察 21
3.2.5　評価 1-2 24
3.2.6　評価 1-2 の結果と考察 25
3.3　評価検証 2 27
3.3.1　評価 2 27
3.3.2　評価 2 の結果と考察 30

第 4 章　むすび **31**

謝辞 **32**

参考文献 **33**

第1章　はじめに

近年VR (Virtual Reality) 技術の発展に伴い、一般利用者を対象としたHMD (Head Mounted Display) を用いた没入型コンテンツの利用が広がっている。HMD とは、利用者の頭部に装着して使用する表示装置であり、両眼の前方に配置されたディスプレイを通じて映像を提示する。多くの HMD には、ジャイロセンサや加速度センサなどの姿勢計測センサが搭載されており、利用者の頭部の向きや回転運動を計測できる。HMD を用いて視聴されるコンテンツでは、利用者の頭部の向きに合わせて表示される映像の向きが変化する方式が一般的に採用されている。このような方式により、利用者は頭部を動かすことで周囲を見回すように映像を確認でき、従来の平面映像とは異なる没入的な視覚体験が得られる。このような没入型コンテンツは、エンタテインメント分野を中心に、実際のサービスとしても広く利用されている。

HMD を用いた没入型コンテンツが実際に利用される場の一例として、ソーシャルVR プラットフォームの一つである VRChat が挙げられる [1]。VRChat アプリは PC 向けに複数の配信形態により提供されている。そのうち、Valve 社が運営する PC ゲームのデジタル配信プラットフォーム Steam における同時接続ピーク人数は、2020 年から 2025 年にかけて 4 倍以上に増加しており、HMD を用いた没入型コンテンツの利用規模が拡大している [2]。VRChat では、ユーザーが制作した「ワールド」と呼ばれる仮想空間内で、コンテンツ鑑賞や他者との交流などが行われている [3]。

また、HMD を用いた没入型コンテンツの一例として、パノラマ 360 度画像が挙げられる。パノラマ 360 度画像は、観光地の疑似体験や博物館展示のバーチャル化、歴史的建造物や文化財の公開など、特定の空間や対象を提示する用途で多く用いられている [4][5]。これらの用途においてパノラマ 360 度画像が広く利用されている理由として、市販の 360 度カメラや、スマートフォンと専用アプリケーションを用

いることで容易に撮影できることに加え、全周囲方向の視覚情報を一つの画像として記録できる点が挙げられる。さらに、このような特性は鑑賞を目的とした用途にとどまらず、特定時点における建築物や展示空間の状態を包括的に記録する手段としても有効であり、文化財を対象としたデジタルアーカイブへの応用が進められている [6]。

一般に、パノラマ 360 度画像とは、実写により取得された一枚の全方位画像を指すことが多く、3DCG により構成された仮想空間とは区別される概念である。しかし、HMD を用いた視聴においては、パノラマ 360 度画像は、球体状に展開された状態で仮想的な空間内に配置されており、利用者はその内部から周囲を見回す形で視聴する。この視聴形態は、3DCG により構成された仮想空間内で視点を回転させて視聴する体験と、知覚上は同等である。そのため本研究では、このような視聴者視点における共通性から、実写によるパノラマ 360 度画像と、3DCG により構成された仮想空間の双方を含めて、パノラマ 360 度画像と総称する。

ところで、パノラマ 360 度画像は、制作者側が特に見て欲しい対象を想定して制作される場合がある。本研究では、このような制作者が見て欲しい対象を「見どころ」と呼ぶ。一方で、HMD を用いた視聴においては、視線を向ける方向や視線移動の速さが利用者に委ねられている。このことから、360 度画像視聴においては、視線が特定の方向に向けられる時間や視線の移動パターンが利用者ごとに大きく異なることが報告されている [7]。そのため、制作者の意図した見どころが画像内の特定箇所に存在していても、利用者が視線方向を変更するときに、見どころ方向の辺りを素早く通過してしまい、十分に鑑賞されない問題が生じる。このような視線挙動に起因する問題は、鑑賞体験の質を低下させる要因である。ところで、HMD を用いた 360 度画像視聴において、実際の視線方向と表示される映像の方向との対応関係を変化させる手法が従来より検討されている。例えば文献 [8] では、視野角が狭いので周りを探索するために頭部を多く回転させなければならない問題を対象にしており、また文献 [9] では、座位での後方視認が容易でない問題を対象にしている。

本研究では、利用者が HMD を用いてパノラマ 360 度画像を視聴する際に、見どころを見やすくする新たな手法を提案する。本手法においても、利用者の頭部の向きによって定まる視線方向と、HMD に表示される映像の方向との対応関係を変化

させる。具体的には、見どころの方向に向く過程においては視線の移動を促進し、見どころの付近では視線の移動を抑制することで、制作者が意図した見どころを鑑賞しやすくする。

本論文では、第 2 章において見どころ鑑賞を効率化する視線方向制御手法を提案し、第 3 章では構築した評価システムを用いて行った評価の概要と手順、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　見どころ鑑賞効率化手法

本章では、制作者が特に見て欲しい対象、すなわち見どころを効率的に鑑賞できる新たな仕組みを提案する。通常のパノラマ 360 度画像視聴では、利用者の頭部の向きに基づいて、その方向に対応する映像が HMD に提示される。これに対して新たな提案手法では、頭部の回転に対する表示映像の回転量を調整する。具体的には、見どころ方向へ視線を移動している間には表示映像の回転量を大きくすることで、見どころが視野内に入るまでに必要な頭部回転量を減少させ、見どころを視野内に捉えやすくする。一方で、見どころ付近では表示映像の回転量を小さくすることで、見どころが視野内に留まりやすくする。

2.1　視線方向の定義

本研究では、眼球運動の計測を行わないため、HMD から取得した頭部の向きを視線方向として扱う。HMD から取得した頭部の向きを実視線方向と呼び、HMD に表示する映像の向きを仮想視線方向と呼ぶ。仮想視線方向は、通常は実視線方向と等しい (図 2.1)。本研究で提案する手法では、実視線方向を構成する成分のうち、水平方向の角度をもとに状況に応じて仮想視線方向を定め、その仮想視線方向に対応する風景を HMD に表示する (図 2.2)。なお以下では、HMD の方向を読み取るセンサーに対して正面を向いている状態の視線方向の角度を 0 度と定義し、右真横方向を 90 度、左真横方向を -90 度とする。また、実視線方向の水平方向の角度を r 度、仮想視線方向の水平方向の角度を v 度とする。なお、視線方向を変化させる、すなわち回転移動することを視線の移動と表現する。

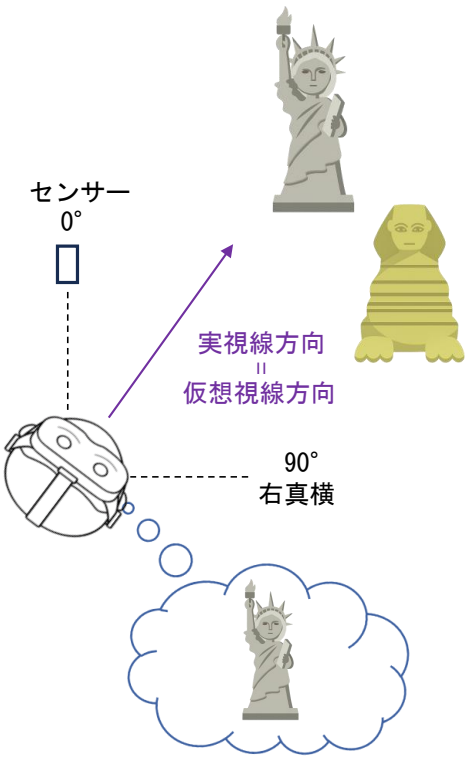


図 2.1: 通常の実視線方向と仮想視線方向

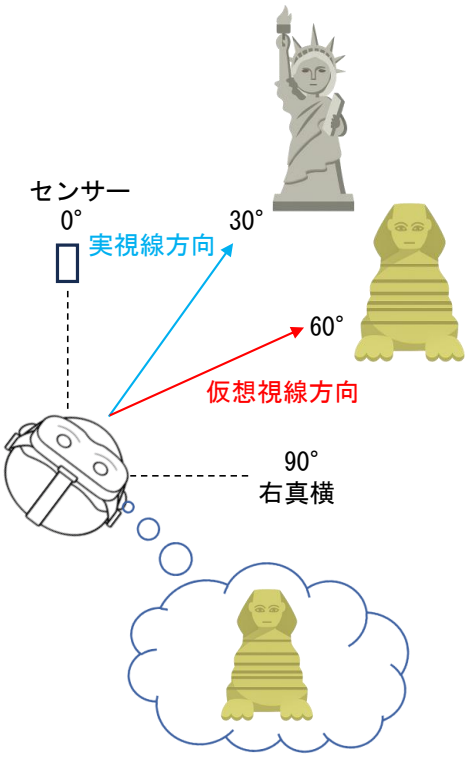


図 2.2: 本手法の実視線方向と仮想視線方向

2.2　提案手法のアイデア

パノラマ 360 度画像視聴では、利用者が自由に視線を移動できる一方で、制作者が意図した見どころが必ずしも十分に鑑賞されないという問題がある。本研究では、この問題を解決するために、見どころ方向へ視線を大きく移動している過程と、見どころ付近において見どころの鑑賞中に視線を小さく移動している過程に着目する。まず、見どころ方向へ視線を移動している過程では、仮想視線方向が実視線方向と等しい場合、見どころが視野内に入るまでに比較的大きな頭部回転を要するため、視線移動に負担が生じる場合がある。このため、見どころ方向への視線移動に要する頭部回転量を低減するよう、実視線方向の変化に対して仮想視線方向を大きく変化させ、視線移動を促進する。次に、見どころ方向の付近においては、利用者が見どころを注視しようとしていても、実視線方向には頭部の揺らぎなどによる微小な変動が生じる。仮想視線方向が実視線方向と等しい場合、これらの変動が仮想視線方向にそのまま反映されるため、見どころを安定して注視することが難しくなる場合がある。このため、見どころ方向の付近では、実視線方向の変化に対して仮想視線方向を小さく変化させ、視線移動を抑制する。

以上で述べた視線移動の促進および抑制を実現するために、実視線方向の角度 r と仮想視線方向の角度 v の対応関係を、区間ごとに傾きの異なる折れ線関数として定義する。r の定義域を $-90 \leq r \leq 90$ とし、点 $(-90, -90)$、$(90, 90)$ を通り、かつ原点 $(0, 0)$ を通るように定める。さらに、見どころ方向を ϕ 度（$-90 < \phi < 90$）とし、仮想視線方向の角度 v 上で、見どころ方向 ϕ を中心とし、幅 w を持つ角度区間を見どころ範囲と定義する。図 2.3 に、見どころ方向 ϕ と見どころ範囲の幅 w の概念図を示す。

見どころ範囲の左端および右端を、図 2.4 に示す関係図において、それぞれ折れ点 $P_1(r_1, v_1)$、$P_2(r_2, v_2)$ とする。すなわち

$$v_1 = \phi - \frac{w}{2} \tag{2.1}$$

および

$$v_2 = \phi + \frac{w}{2} \tag{2.2}$$

とする。見どころ範囲では、実視線方向の変化に対する仮想視線方向の変化を小さくすることを目的として、傾き s（$0 < s < 1$）の直線により r と v の関係を定める。このとき、r と v の関係は、次式で表される。

$$v = s(r - \phi) + \phi \quad (r_1 \leq r \leq r_2) \tag{2.3}$$

ここで、折れ点の r 座標を定めるため、式 (2.3) に 式 (2.1) および (2.2) をそれぞれ代入する。折れ点 P_1、P_2 の r 座標は次式で与えられる。

$$r_1 = \phi - \frac{w}{2s} \tag{2.4}$$

$$r_2 = \phi + \frac{w}{2s} \tag{2.5}$$

この折れ線関数により、原点 $(0, 0)$ から折れ点 P_1 を結ぶ線分の傾きは必然的に 1 より大きくなり、見どころ範囲に向くまでの区間では視線移動が促進される。一方で、見どころ範囲においては傾きは 1 より小さく視線移動が抑制される。

この折れ線関数は、見どころ範囲の両端の折れ点において、関数の傾きが変化する。このような区間ごとに異なる傾きを持つ形で定義することにより、実視線方向の角度に対する仮想視線方向の対応関係を明確に記述できる一方で、見どころ範囲の両端の折れ点において、関数の傾きが不連続に変化する。HMD による映像視聴では、利用者の意図しないタイミングで表示映像の向きが急に変化すると、視覚情報と前庭感覚 (内耳によって得られる頭部の回転や傾きを感じる感覚) との間に不一致が生じ、不快感を引き起こす要因の一つとなることが報告されている [10]。そのため、このアイデアを基に見どころ範囲の両端で生じる傾きの不連続性を緩和し、映像の変化を滑らかにしたい。

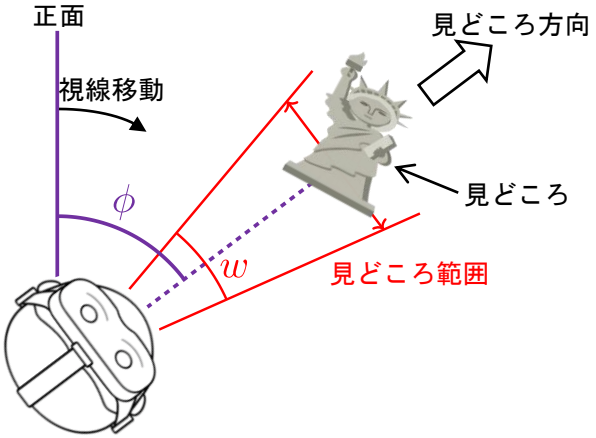


図 2.3: 見どころ方向 ϕ と見どころ範囲の幅 w の概念図

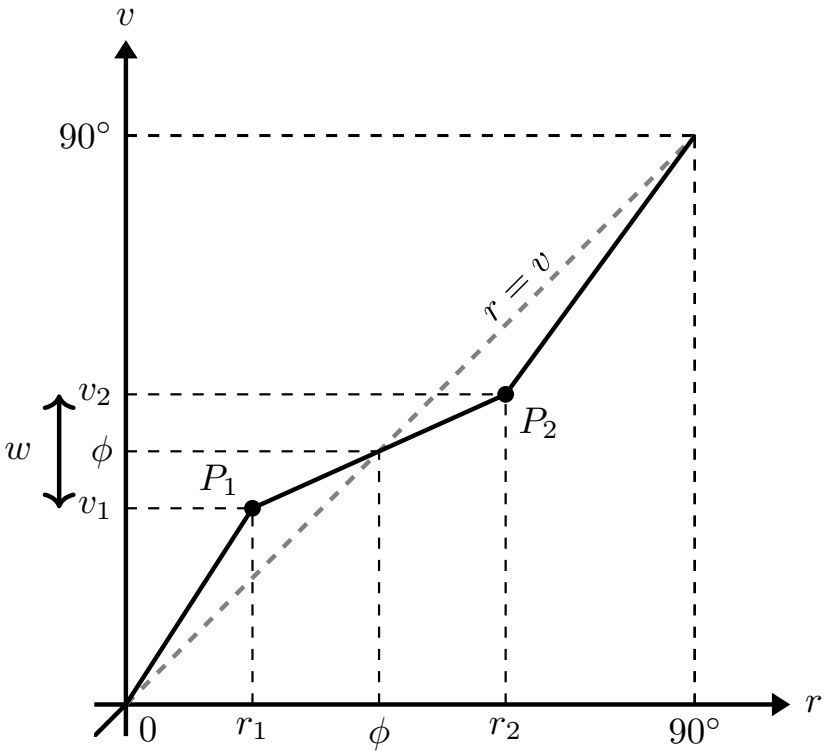


図 2.4: 折れ線による視線方向制御関数の概念図

2.3　ベジェ曲線による平滑化

本節では、前節で述べた提案手法のアイデアを基に、滑らかに表現された制御関数について述べる。折れ線で定義された視線方向制御関数の基本的な対応関係を保ったまま、傾きを連続的に変化させる必要がある。

折れ線関数が持つ実視線方向と仮想視線方向の基本的な対応関係を維持したまま、折れ点近傍のみを局所的に修正したい。さらに、計算手順が単純であり、導入するパラメータ数が必要最小限に抑えられていることが求められる。

これらの要件を満たす手法の一つとして、ベジェ曲線が挙げられる。ベジェ曲線は、始点および終点を含む少数の制御点によって形状が定義される曲線である。特に三次ベジェ曲線は、始点および終点の他に二つの制御点を持つため、折れ点に接続する二つの線分の方向を反映した曲線形状を構成できる。そこで、折れ線関数全体を変更するのではなく、折れ点近傍の一定区間を三次ベジェ曲線によって置き換える。

具体的には、折れ点に接続する二つの線分の方向に沿い、それぞれ距離 L だけ離れた二点を、三次ベジェ曲線の始点 $Q_0 = (r'_0, v'_0)$ および終点 $Q_3 = (r'_3, v'_3)$ として設定する。また始点 Q_0 と折れ点の中点を三次ベジェ曲線の制御点 $Q_1 = (r'_1, v'_1)$ とし、終点 Q_3 と折れ点の中点を制御点 $Q_2 = (r'_2, v'_2)$ とする。図 2.5 に滑らかな視線方向制御関数の概念図を示す。なお、点線は前節で定義した折れ線関数を表しており、実線は滑らかな視線方向制御関数を表している。

以上の点配置に基づき、三次ベジェ曲線を媒介変数表示によって定義する。媒介変数 t（$0 \leq t \leq 1$）に対して、曲線上の実視線方向の角度を $r(t)$、仮想視線方向の角度を $v(t)$ とすると、三次ベジェ曲線は次式で与えられる。

$$\begin{cases} r(t) = (1-t)^3 r'_0 + 3(1-t)^2 t r'_1 + 3(1-t) t^2 r'_2 + t^3 r'_3 \\ v(t) = (1-t)^3 v'_0 + 3(1-t)^2 t v'_1 + 3(1-t) t^2 v'_2 + t^3 v'_3 \end{cases} \tag{2.6}$$

2 つの折れ点近傍のみを式 (2.6) で定義される曲線で置き換えることで、前節の折れ線関数の性質を保ったまま、折れ点近傍における対応関係を滑らかにした視線方向制御関数を構成する。

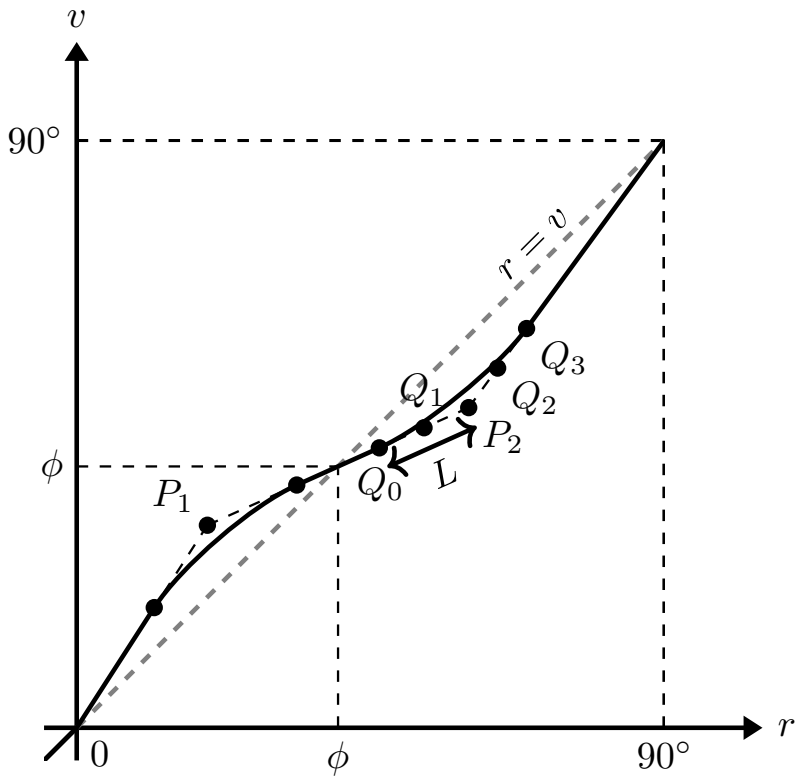


図 2.5: 三次ベジェ曲線による視線方向制御関数の概念図

第3章　提案手法の評価

本章では、提案する視線方向制御手法が、パノラマ 360 度画像視聴における見どころ鑑賞を実際に効率化するかどうか評価する。具体的には、視線方向制御によって見どころ方向への視線移動が促進されることで、見どころを視野内に捉えやすくなるか、見どころ範囲における視線移動の抑制によって、見どころを見やすくなるか、ならびに視聴体験に過度な違和感や酔いを生じさせないか検証する。

まず実用上問題のない制御パラメータの範囲を把握し、その範囲内における複数条件を比較評価することで、見どころ鑑賞の効率化に寄与するパラメータの傾向を明らかにする。さらに、得られた知見に基づき、実際のパノラマ 360 度画像視聴により近い環境において提案手法を適用し、その有効性を検証する。

3.1　予備評価

評価検証に先立ち、実用上問題のない制御パラメータの範囲を把握し、評価検証において検証する制御パラメータを決定するため、予備評価を行った。

評価対象のパラメータは、2.3 節で定義した滑らかな視線方向制御関数における、見どころ範囲の幅 w、範囲内における視線移動の抑制度合いを決定する傾き s、および境界部をベジェ曲線で滑らかにする範囲 L の三つである。本手法は実視線方向と仮想視線方向の対応関係を変更するものであり、パラメータの値によっては操作性の低下や違和感、酔いを引き起こす可能性がある。そのため、実用に適した範囲を事前に把握し、実用上問題のある挙動を示すパラメータを除外する必要がある。

そこで、HMD MetaQuest2 [11] を使用し、Unity [12] を使用して構築した三次元 CG 環境で予備評価を実施した。評価環境では、見どころ方向に鑑賞するオブジェクトを配置した。正面方向から見どころ方向へ視線を移動させてオブジェクトを鑑賞した後、正面方向に視線を戻す動作を繰り返し行った。予備評価は著者自身が実

施し、視線方向制御適用時における強い違和感や酔いの有無、ならびに視線移動が困難となる挙動の有無を確認した。

これらの動作において、見どころ範囲の幅 w および見どころ範囲における線分の傾き s の値を段階的に変化させ、それぞれの挙動を確認した。その結果、s の値が 0.35 を下回る場合には、見どころ範囲内において視線移動が急激に抑制され、強い不快感が生じることが確認された。そのため、評価検証においては十分な余裕を持たせ、$s = 0.4$ を下限値として設定した。また $s = 0.4$ の条件下において、w の値を 20 度より大きく設定した場合、正面方向から見どころ方向への視線移動が過度に促進され、視線移動が急激となり、違和感が生じた。一方で、w を 10 度未満、または s を 0.85 より大きく設定した場合には、視線方向制御による変化が小さく、提案手法による効果がほとんど感じられなかった。これらの結果を踏まえ、$10 \leq w \leq 20$ かつ $0.4 \leq s \leq 0.85$ を実用に適したパラメータ範囲として扱うこととした。また、ベジェ曲線で置き換える範囲を定めるパラメータ L については、値を大きく設定すると 2.2 節で定義した折れ線関数との乖離が大きくなり、制御関数の性質が損なわれる。そのため、見どころ範囲の境界において視線方向制御関数の傾きの変化が滑らかであると感じる最小の値である $L = 5$ に固定した。

3.2　評価検証 1

見どころ範囲の幅 w および見どころ範囲における線分の傾き s を変化させた複数の制御パラメータ条件を比較し、見どころを効率よく鑑賞するために適したパラメータの組み合わせを検証する。

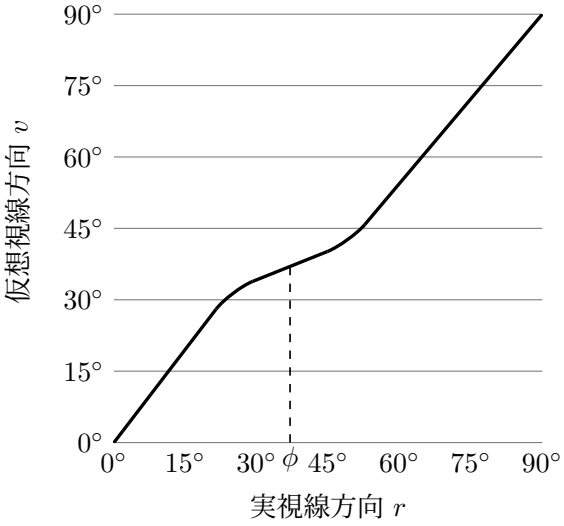
3.2.1　評価 1-1 の概要

予備評価の結果を基に、見どころ範囲の幅 w を 10 度、20 度の 2 パターン、見どころ範囲内における線分の傾き s を 0.85、0.70、0.55、0.40 の 4 パターンとし、これらの組み合わせによる計 8 条件を設定した。これらの 8 条件における、滑らかな視線方向制御関数のグラフを、幅 w ごとに図 3.1 および図 3.2 に示す。

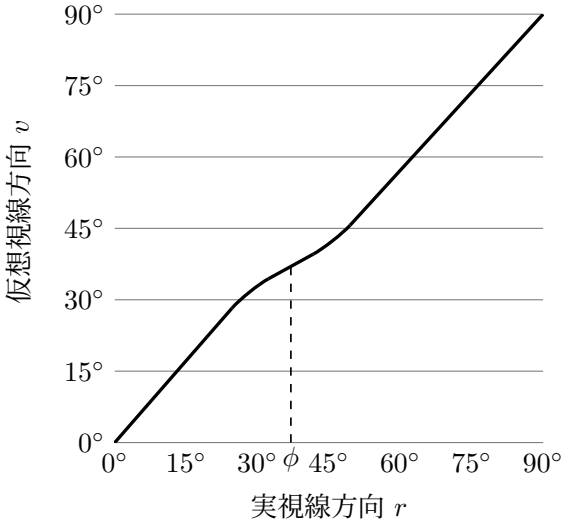
評価 1 では、予備評価と同様の三次元 CG 環境で評価を行った。評価参加者の

視点位置を基準として、あらかじめ定められた見どころ方向に鑑賞対象となるオブジェクトを配置した。正面に矢印を配置し、見どころ方向が左右のいずれに位置するかを示した。図 3.3 に、評価時に HMD に表示される視界の一例を、図 3.4 に評価の様子を示す。

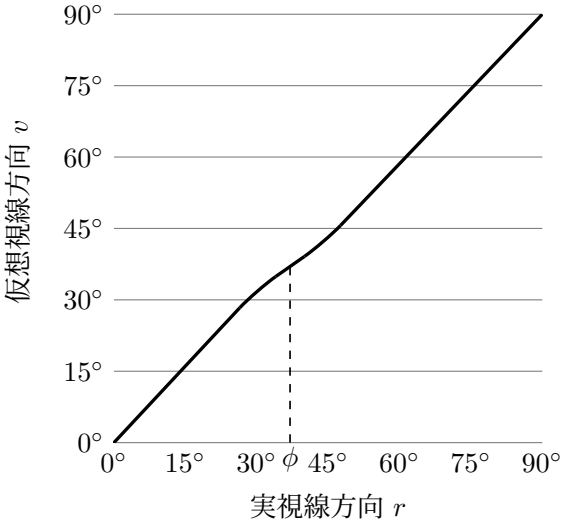
見どころ範囲の幅 w に応じて、鑑賞するオブジェクトの大きさが対応するよう、条件ごとに異なるオブジェクトを配置した。具体的には、$w = 10$ の条件では横方向の大きさが比較的小さい小屋を、$w = 20$ の条件では、横方向の大きさが小屋のおよそ 2 倍である風車を配置した。これらのオブジェクトについては、条件間で視認性が極端に変化しないよう、高さや色味、質感を統一した。評価時のオブジェクトの表示例を、図 3.5 および図 3.6 に示す。



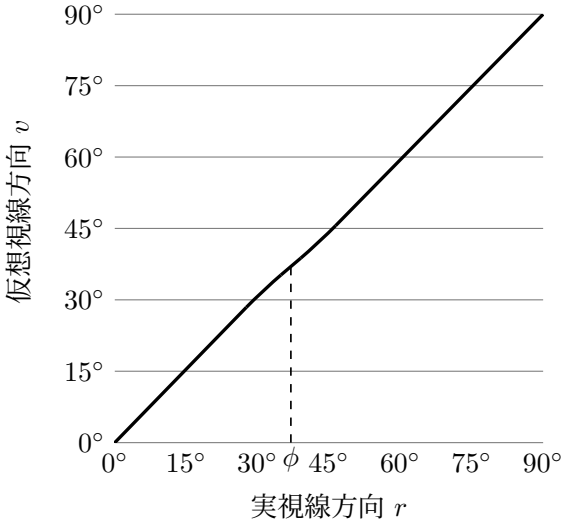
(a) $w = 10,\ s = 0.4$



(b) $w = 10,\ s = 0.55$

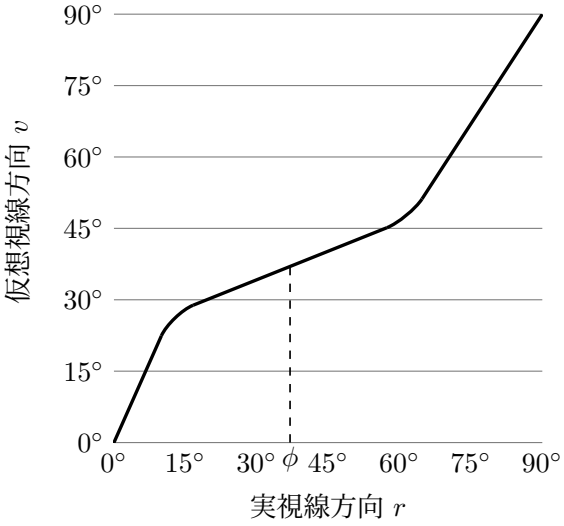


(c) $w = 10,\ s = 0.7$

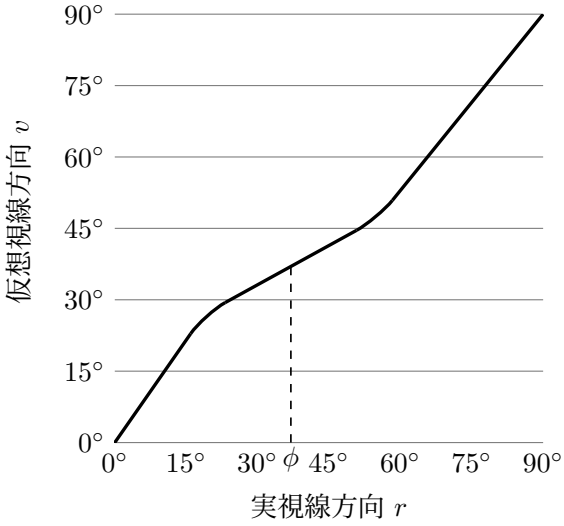


(d) $w = 10,\ s = 0.85$

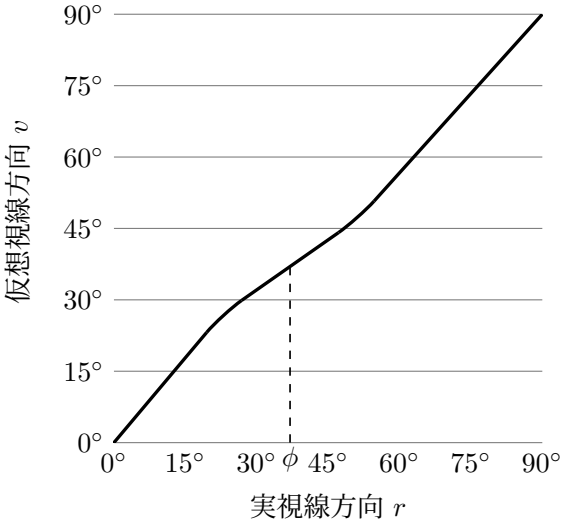
図 3.1: $w = 10$ における滑らかな視線方向制御関数のグラフ



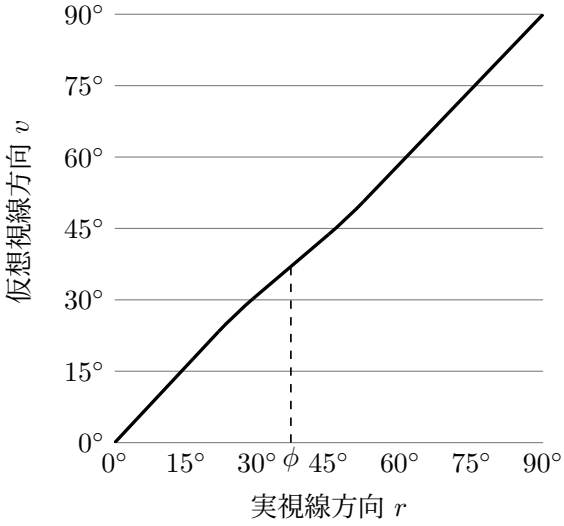
(a) $w = 20,\ s = 0.4$



(b) $w = 20,\ s = 0.55$



(c) $w = 20,\ s = 0.7$



(d) $w = 20,\ s = 0.85$

図 3.2: $w = 20$ における滑らかな視線方向制御関数のグラフ

図 3.3: 評価参加者から見た評価システム

図 3.4: 評価の様子

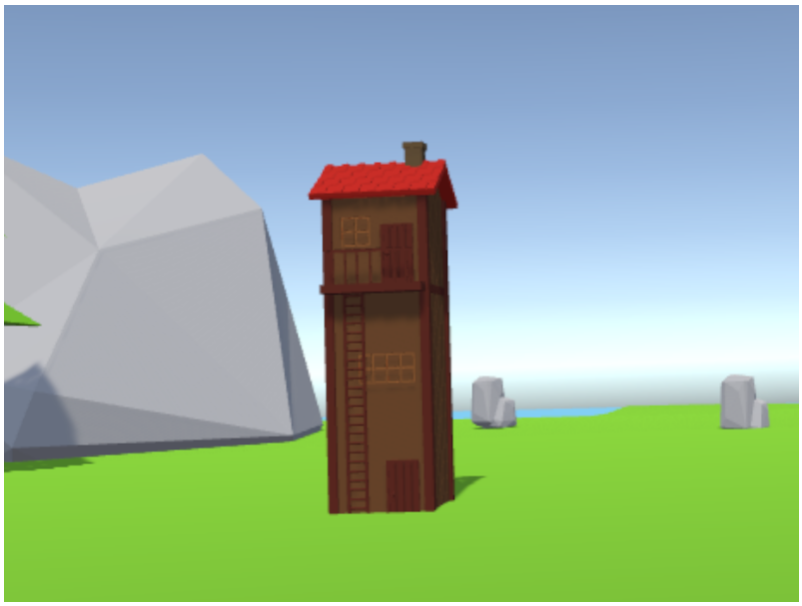


図 3.5: $w = 10$ の条件における鑑賞オブジェクト (小屋) の表示例

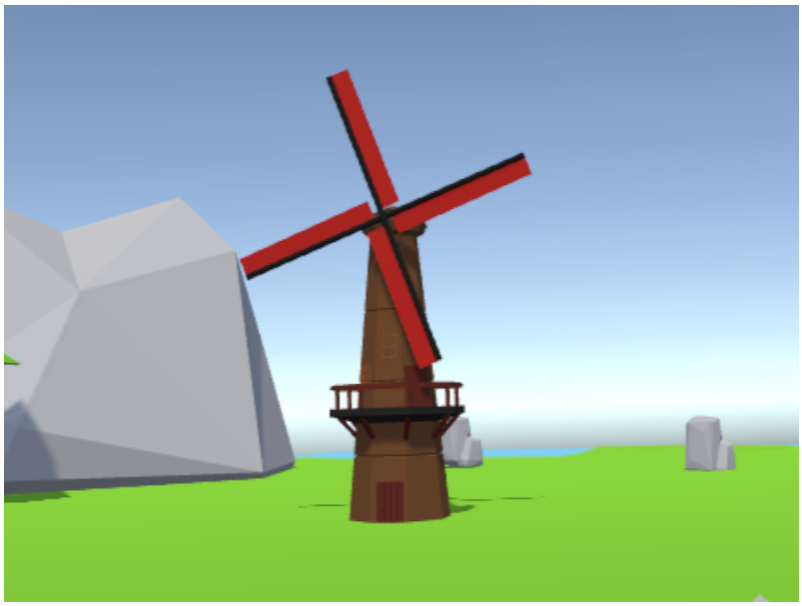


図 3.6: $w = 20$ の条件における鑑賞オブジェクト (風車) の表示例

3.2.2　評価 1-1 の手順

評価の実施に先立ち、各評価参加者に対して、本研究の目的、提案手法の概要、評価手順、ならびに次節で述べるアンケート項目について説明を行った。

本評価では、見どころ方向に視線を移動させ、鑑賞するオブジェクトを数秒間注視した後、正面方向に視線を戻す一連の動作を 1 試行と定義した。まず、評価参加者には視線方向制御を適用しない基準条件を約 30 秒間体験させ、その直後に、視線方向制御を適用した状態で前述の試行を連続して 10 回実施させた。すなわち、基準条件の体験と視線方向制御を適用した試行 10 回を 1 セットとして実施した。

1 セットの終了後に、直前に体験した基準条件と比較した主観評価をアンケートによって回答させた。8 つのパラメータ条件についてそれぞれ 1 セットずつ実施したため、評価参加者 1 人あたりの試行回数は合計 80 回となる。これによる疲労や慣れ、酔いの蓄積の影響を軽減するため、アンケートの終了ごとに短時間の休憩を設けた。1 セットに要する時間は個人差があるものの、おおよそ 60 秒から 80 秒程度であった。なお、見どころ範囲の幅 $w = 10$ において傾き s を 0.85、0.70、0.55、0.40 とした 4 条件と、$w = 20$ において同一の傾き s を設定した 4 条件を、それぞれ 1 つの条件群として扱い、各条件群内では制御パラメータ s の提示順をランダムに決定した。また、$w = 10$ と $w = 20$ の条件群の実施順についても、評価参加者ごとにランダムに決定した。

見どころ方向は各試行ごとに更新した。正面から無理なく首を回転できる範囲を考慮して、±40 度、±55 度、±70 度の計 6 方向とした。また、左右が偏らないよう交互に提示するとともに、角度の提示順はランダムとした。

3.2.3　評価 1-1 の評価項目

主観評価には、以下の 4 項目からなる 7 段階尺度のアンケートを用いる。表 3.1 から 3.4 に、アンケート項目と評価値をそれぞれ示す。

第 1 項目: 見どころ範囲に視線を向けるまでの操作を、素早く行えたと感じたか

正面から見どころ範囲に向くまでの区間において視線移動が促進されることにより、視線移動が素早く行えた (一定の角速度で回転していれば、促進させることで速く回転し、早く見どころ方向へと視線移動できる) と感じられたかを評価する。

第 2 項目: オブジェクトが見やすくなったか (オブジェクトの中心に視線を合わせやすくなったか)

見どころ範囲において視線移動が抑制されることにより、オブジェクトが見やすくなったと感じられたかを評価する。本評価では、見やすさを、オブジェクトの中心に視線を合わせやすくなったかという観点から評価する。

第 3 項目: 見どころ範囲を超えて視線が行き過ぎてしまうことはなかったか

見どころ範囲において視線移動が抑制されることにより、視線が行き過ぎることなく、オブジェクト付近に安定して留まることができたと感じられたかを評価する。

第 4 項目: 酔いを感じなかったか

視線方向制御の適用により、酔いを生じさせなかったかを評価する。

加えて、結果の解釈を補助する目的で自由記述による意見を収集する。

表 3.1: 評価アンケート項目 1

評価値	見どころ範囲に視線を向けるまでの操作を、素早く行えたと感じたか
7	非常に素早く行えたと感じた。
6	素早く行えたと感じた。
5	やや素早く行えたと感じた。
4	どちらともいえない。
3	あまり素早く行えたと感じなかった。
2	素早く行えたと感じなかった。
1	まったく素早く行えたと感じなかった。

表 3.2: 評価アンケート項目 2

評価値	オブジェクトが見やすくなったか (オブジェクトの中心に視線を合わせやすくなったか)
7	非常に見やすくなった。
6	見やすくなった。
5	やや見やすくなった。
4	どちらともいえない。
3	あまり見やすくならなかった。
2	見やすくならなかった。
1	全く見やすくならなかった。

表 3.3: 評価アンケート項目 3

評価値	見どころ範囲を超えて視線が行き過ぎてしまうことはなかったか
7	行き過ぎがほとんどなかった。
6	行き過ぎが少なかった。
5	行き過ぎがあまりなかった。
4	どちらともいえない。
3	行き過ぎがやや多かった。
2	行き過ぎが多かった。
1	行き過ぎが非常に多かった。

表 3.4: 評価アンケート項目 4

評価値	酔いを感じなかったか
7	まったく感じなかった。
6	ほとんど感じなかった。
5	あまり感じなかった。
4	どちらともいえない。
3	やや感じた。
2	強く感じた。
1	非常に強く感じた。

3.2.4　評価 1-1 の結果と考察

本評価は 20 代の男女 14 名を対象として実施した。評価 1-1 の結果について以下にまとめる。主観評価アンケートの結果について、各制御パラメータ条件における評価値の平均を算出した。図 3.7 から 3.10 に、見どころ範囲の幅 w ごとに、傾き s に対する各評価項目の平均値を示す。

第 1 項目の正面から見どころ範囲に向くまでの区間における視線移動の促進効果に関するアンケートでは、w が 10 度および 20 度のいずれの条件においても、見どころ範囲における線分の傾き s が小さくなる、すなわち見どころ範囲に向くまでの区間における線分の傾きが大きくなるにつれて、平均値が上昇する傾向が確認された。特に、$w = 20$ かつ $s = 0.40$ のときに最も平均値が高く、視線方向制御による促進効果が強い条件ほど、促進効果を実感できると評価されており、見どころを視野内に捉えやすいと感じられた可能性が示唆される。なお、図 3.7 の横軸には、括弧内に $\phi = 40$、$w = 20$ の条件での、見どころ範囲に向くまでの区間における線分の傾きを併記している。

第 2 項目の見どころの見やすさに関するアンケートでは、$w = 10$ の条件では、傾き s が小さくなるにつれて平均値が上昇する傾向が確認された。一方で、$w = 20$ の条件においても全体としては同様の傾向が認められたが、$s = 0.55$ で平均値が最大となり、$s = 0.40$ では平均値が低下する結果となった。この点について、自由記述では、複数の評価参加者から、見どころ範囲内で視線移動が過度に抑制されることにより、意図したとおりに視線を動かしにくく、見どころを見づらいと感じたという意見が得られた。

第 3 項目の行き過ぎ抑制効果に関するアンケートでは、いずれの w においても、平均値が 6.5 から 7 の範囲に集中しており、パラメータ条件による顕著な差は確認されなかった。自由記述では、複数の評価参加者から、視線方向制御を適用しない場合であっても、見どころ付近で余裕を持って視線をとどめることができ、視線が行き過ぎることは少ないという意見が得られた。本評価タスクでは、評価参加者が能動的に見どころを注視しようとしたため、視線の行き過ぎが生じにくく、その結果として条件間の差が現れにくかったと考えられる。

第 4 項目の酔いに関するアンケートでは、いずれの w においても、傾き s が小さくなるにつれて平均値が低下し、酔いが強くなる傾向が確認された。また、$w = 10$ に比べて $w = 20$ では、すべての s において平均値が低く、実視線方向と仮想視線方向の乖離が大きい条件ほど酔いが強くなる傾向が示された。

以上の結果から、$w = 20$ の条件では、促進効果の評価においては $s = 0.40$ が最も高い値を示した一方で、見どころの見やすさの評価は $s = 0.55$ のときに最大となった。幅 $w = 20$ の見どころに対しては、$s = 0.40$ から 0.55 辺りで見どころを効率的に鑑賞できそうである。また、見どころの見やすさを重視するか、視線移動の促進効果を期待するか、目的に応じてパラメータ s を設定すると良いだろう。一方で、$w = 10$ の条件では、見どころの見やすさの評価平均値が、評価範囲の下限である $s = 0.4$ で最大となっており、最適値が評価範囲外に存在する可能性を否定できない。

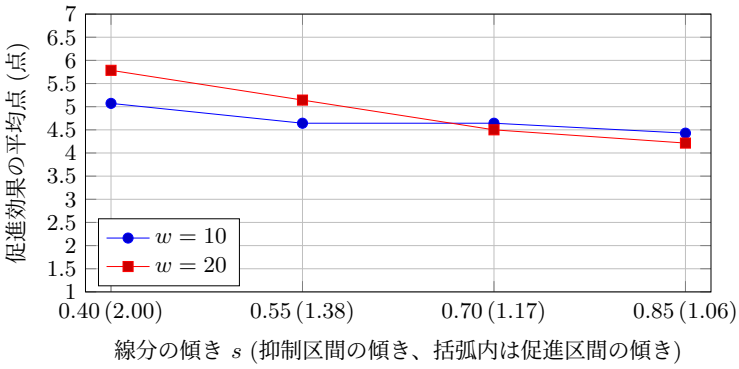


図 3.7: 促進効果の平均点

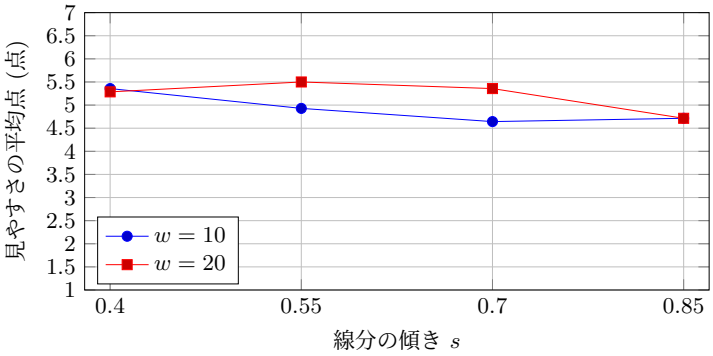


図 3.8: 見どころの見やすさの平均点

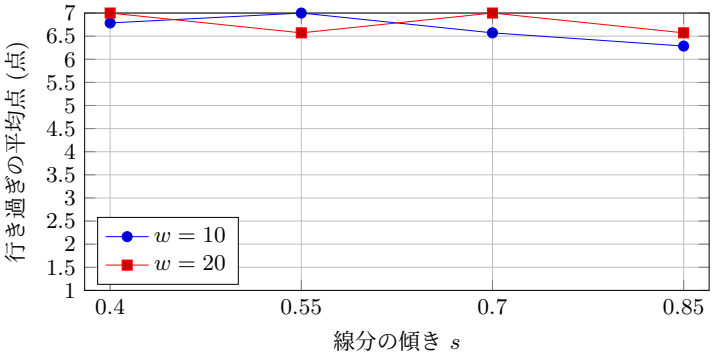


図 3.9: 行き過ぎ抑制効果の平均点

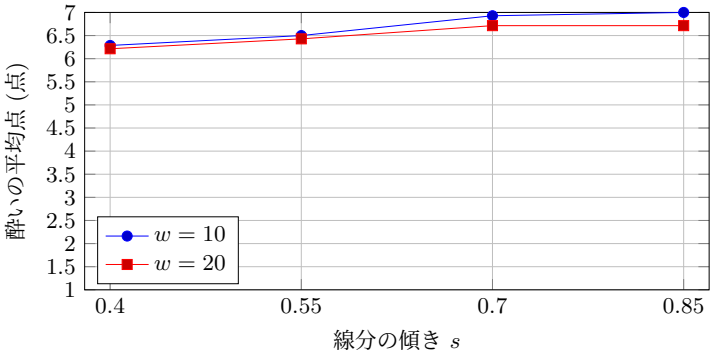


図 3.10: 酔いの平均点

3.2.5　評価 1-2

評価 1-2 では、$w = 10$ の条件における最適な傾き s を検証する。評価 1-1 の第 2 項目のアンケート結果では、$w = 10$ の条件において、評価した範囲内で最も小さい値である $s = 0.40$ のときに平均値が最大となった。しかしながら、この結果は最適な傾き s が評価範囲の下限である $s = 0.40$ 付近、あるいはそれより小さい領域に存在する可能性を示すにとどまり、最適値が評価範囲外 $(s < 0.4)$ に存在する可能性を否定できない。そのため、評価 1-1 の結果のみから、$w = 10$ の条件における最適な傾き s はわからない。

そこで評価 1-2 では、$w = 10$ の条件において最適な傾き s を明らかにするため、評価 1-1 よりも間隔を小さく設定した複数の傾き s を設定し、見どころの見やすさを確認する。評価 1-2 において対象とする傾き s を 0.50、0.45、0.40、0.35 の 4 条件とする。$s = 0.35$ は、予備評価において不快感が許容可能と判断された範囲内での最小値であり、これより小さい値では視聴体験への影響が大きいと判断されたため、本評価における下限値として設定する。その他の条件については、評価 1-1 において最適な傾き s が 0.4 付近に存在する可能性が示されたことから、0.05 刻みで等間隔に配置する。

評価 1-2 における評価環境、タスク内容、試行回数、提示順のランダム化については、評価 1-1 と同一の条件とした。主観評価アンケートについては、評価 1-1 の第 1 項目、第 2 項目、および第 4 項目のみを対象とする。これは、評価 1-1 における第 3 項目の結果では、制御パラメータ条件による顕著な差が確認されず、自由記述においても行き過ぎが問題となる場面は少ないという意見が多く見られたためである。

3.2.6　評価 1-2 の結果と考察

本評価は、評価 1-1 に参加した評価参加者のうち 9 名を対象として実施した。評価 1-2 の結果について以下にまとめる。主観評価アンケートの結果について、評価 1-1 と同様に、各制御パラメータ条件における評価値の平均を算出した。図 3.11 から 3.13 に、$w = 10$ の条件における傾き s に対する各評価項目の平均値を示す。なお、比較のため評価 1-1 での $w = 10$ の条件における評価平均値も併せて示している。

正面から見どころ範囲に向くまでの区間における視線移動の促進効果に関するアンケートでは、$w = 10$ の条件において、$s = 0.40$ のときに平均値が最大となった。評価 1-1 では、s が小さいほど促進効果に関する平均値が上昇する傾向が確認されていたのに対し、評価 1-2 では評価値が単調に変化する傾向は見られず、$s = 0.40$ で評価が高くなる傾向が見られた。このことから、促進効果の観点において s を小さくすることが必ずしも評価値の向上に寄与しない可能性が示唆される。なお、図 3.11 の横軸には、括弧内に $\phi = 40$、$w = 10$ の条件での、見どころ範囲に向くまでの区間における線分の傾きを併記している。

見どころの見やすさに関するアンケートでは、$s = 0.50$ のときに平均値が最大となり、s が小さくなるにつれて平均値が低下する傾向が確認された。また、$s = 0.35$ では平均値が最小となった。これは、予備評価で確認された挙動と同様に、s を過度に小さく設定したことで、見どころ範囲内における視線移動が強く抑制され、不快感が生じた結果、見やすさの評価が低下したためであると考えられる。

酔いに関するアンケートでは、評価 1-1 と同様に、s が小さくなるにつれて平均値が低下し、酔いを感じやすくなる傾向が確認された。

以上より、$w = 10$ の条件においては、促進効果の評価においては $s = 0.40$ が高く評価された一方で、見どころの見やすさの観点では $s = 0.50$ が最も高い評価を示した。幅 $w = 10$ の見どころに対しては、$s = 0.40$ から 0.50 辺りで見どころを効率的に鑑賞できそうである。幅 $w = 20$ と同様に、見どころの見やすさを重視するか、視線移動の促進効果を期待するか、目的に応じてパラメータ s を設定すると良いだろう。

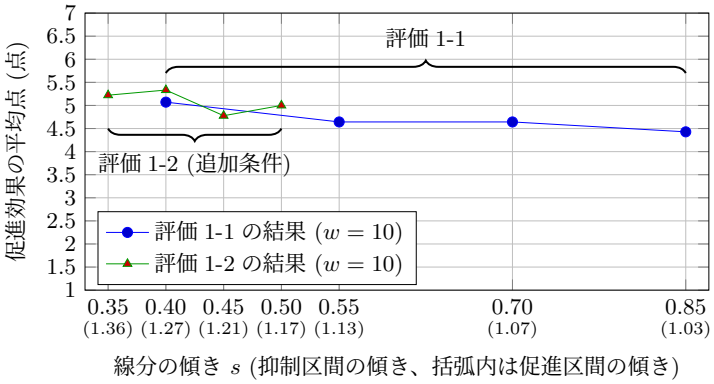


図 3.11: 促進効果の平均点 (追加評価)

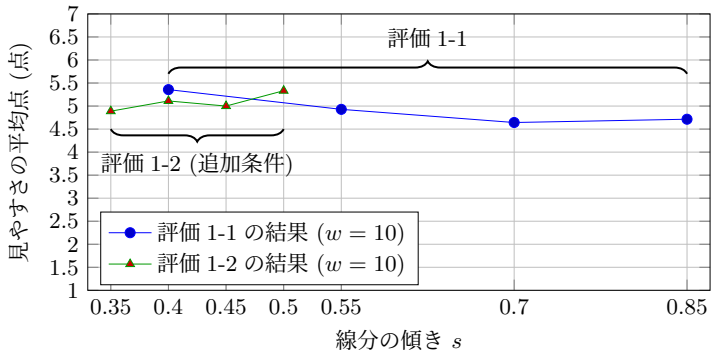


図 3.12: おける見どころの見やすさの平均点 (追加評価)

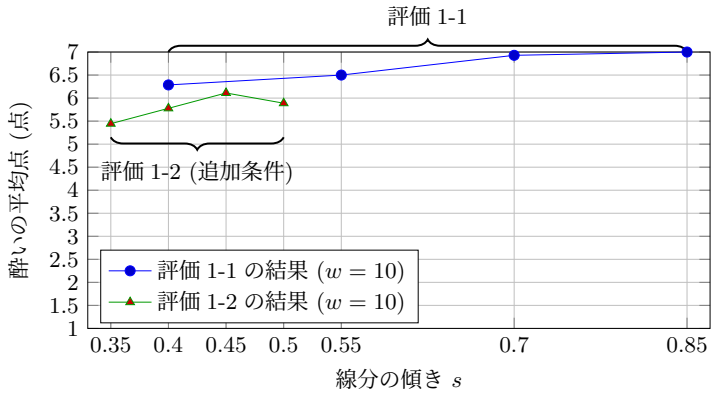


図 3.13: おける酔いの平均点 (追加評価)

3.3　評価検証 2

評価検証 2 では、評価検証 1 において得られた最適な制御パラメータ条件を用い、実写のパノラマ 360 度画像視聴において、提案する視線方向制御手法が見どころ鑑賞の効率化に寄与するかどうか検証することを目的とする。評価検証 1 では三次元 CG 環境を用いて制御パラメータの比較を行ったのに対し、評価検証 2 では実写のパノラマ 360 度画像を用いることで、実利用に近い視聴環境における提案手法の有効性を確認する。

3.3.1　評価 2

視聴する画像には、名古屋市栄周辺で撮影したパノラマ 360 度画像を用いた。使用した画像は街中の風景を写したものであり、中部電力 MIRAI TOWER が画像内に含まれている [13]。本評価では、この中部電力 MIRAI TOWER を見どころとして設定した。使用したパノラマ 360 度画像を図 3.14 に示す。

使用したパノラマ 360 度画像の横方向の解像度は 5376 ピクセルであり、見どころとして設定した中部電力 MIRAI TOWER が画像内で占める横幅は、およそ 300 ピクセルであった。ここで、パノラマ画像が水平方向に 360 度を表現していることを踏まえると、タワーが占める水平視野角は $300/5376 \times 360 \approx 20$ 度と見積もられる。これに基づき、本評価では見どころ範囲の幅を $w = 20$ と設定した。そこで、評価検証 1 において $w = 20$ の条件に対して得られた結果をもとに、見どころの見やすさを重視して傾き $s = 0.55$ の滑らかな視線方向制御関数で視線制御した。なお、見どころ方向は 45 度に設定した。

評価参加者には HMD を装着させ、まず視線方向制御を適用しない状態で 30 秒間、自由に画像を視聴させた。その後、視線方向制御を適用し、再度 30 秒間視聴させた。視聴に際しては、特定の指示は与えず、評価参加者が自由に画像を視聴できるようにした。これは、評価検証 1 が特定タスク下での操作性評価であったのに対し、本評価では一般的な視聴状況を想定したためである。視聴終了後、見どころの見やすさに関する主観評価アンケートおよび不快感に関する主観評価アンケートをそれぞれ実施し、あわせて自由記述による感想を収集した。アンケート項目を表

3.5 および表 3.6 にそれぞれ示す。

図 3.14: 名古屋栄のパノラマ 360 度画像

表 3.5: 見どころの見やすさに関するアンケート項目

評価値	見どころを見やすく感じたか
5	非常に見やすく感じた。
4	やや見やすく感じた。
3	変わらない。
2	やや見づらく感じた。
1	非常に見づらく感じた。

表 3.6: 不快感に関するアンケート項目

評価値	不快感を感じたか
5	全く不快感がない。
4	ほとんど不快感がない。
3	やや不快感がある。
2	不快感がある。
1	非常に不快感がある。

3.3.2　評価 2 の結果と考察

本評価は 20 代の男女 4 名を対象として実施した。評価 2 の結果について以下にまとめる。見どころの見やすさに関する主観評価アンケートの結果では、評価平均値は 4.25 点となり、実写のパノラマ 360 度画像視聴においても、提案手法により見どころが見やすくなることが確認された。一方で、不快感に関する主観評価アンケートの結果では、評価平均値は 3 点であり、やや不快感を感じたという評価が得られた。ただし、不快感の評価値は中程度にとどまっており、提案手法が実写のパノラマ 360 度画像視聴において顕著な違和感を生じさせることは少ないだろう。自由記述による感想を以下に示す。

- タワーを視野の中心に捉えやすかった、一方で見どころ以外を見ようとしたときに見づらくなった。
- タワーの方向に視線が引き寄せられているように感じた。
- 見どころを見ようとする意図がなくとも、視線が見どころ方向へ誘導され、自然に見どころを鑑賞できたように感じた。
- 見どころ方向付近で首を左右に往復させる動作を行った際に、不快感を覚えた。

これらの感想から、提案手法により、利用者が積極的に見どころを見ようとしなくても、見どころを自然に鑑賞できたと感じられていることが読み取れる。一方で、見どころ以外の部分を見ようとした場合や、見どころ方向付近で首を左右に往復させる動作を行った場合には、視線方向制御の影響により、見づらさや不快感が生じる可能性が示唆された。これらの結果から提案手法は、利用者の首の動かし方によっては違和感が生じることもあるかもしれないが、見どころ鑑賞の効率化に有効である。

第4章　むすび

本研究では、HMD を用いたパノラマ 360 度画像視聴において、制作者が特に見て欲しい対象である見どころを効率的に鑑賞できるようにすることを目的として、視線方向制御手法を提案した。提案手法では、実際の視線方向と HMD に表示される風景の方向との対応関係を制御することにより、正面方向から見どころ付近を向くまでの視線移動を促進し、見どころを視野に入れやすくするとともに、見どころ付近では視線移動を抑制することで、見どころが視野内に留まりやすくすることを狙った。この視線方向制御手法の妥当性および適切な制御方法を検証するため、複数の制御パラメータ条件における見どころの見やすさや視線移動のしやすさについて比較評価を行った。比較評価により得られた結果に基づいて本手法を適用したパノラマ 360 度画像視聴では、視線方向制御を適用しない通常の状態と比較して、見どころが見やすくなったとする評価が多く得られ、本手法の有用性を確認できた。

今後の課題として、より多様なパノラマ 360 度画像や見どころ配置に対する本手法の有用性の検証、複数の見どころに対応可能な視線方向制御手法の設計および検証、鑑賞時の違和感や酔いをさらに低減するための制御関数設計の改善、ならびに実際の利用環境に近い状況での評価の拡充が挙げられる。さらに、既存のパノラマ 360 度画像を用いたコンテンツに本手法を適用し、多様な利用者による評価を行うことで、本手法の有用性をより詳細に検証したい。

謝辞

本研究を進めるにあたって、日ごろ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評価参加者の皆様に深く感謝致します。

参考文献

[1] VRChat, VRChat Official Website, https://wiki.vrchat.com/wiki/Worlds

[2] Steam,VRChat の同時接続数, https://steamcharts.com/app/438100#All

[3] VRChat Wiki, Worlds, https://wiki.vrchat.com/wiki/Worlds

[4] 静岡県川根本町, 観光スポット・施設の 360 度パノラマ公開, https://www.town.kawanehon.shizuoka.jp/shisetsu/14529.html

[5] Musée du Louvre, Online Tours, https://www.louvre.fr/en/online-tours

[6] 宇田 紀之，中島 友貴，“VR パノラマ写真による歴史的文化財のデジタルアーカイブ作成”, 環境経営研究所年報, 第 19 号, 名古屋産業大学, 2020.

[7] I. Agtzidis, M. Startsev, M. Dorr, “360-degree Video Gaze Behaviour: A Ground-Truth Data Set and a Classification Algorithm for Eye Movement”, in Proceedings of the 27th ACM International Conference on Multimedia (MM’ 19), ACM, pp.1007-1015, 2019. https://dl.acm.org/doi/10.1145/3343031.3350947

[8] B. Bolte, G. Bruder, F. Steinicke, K. H. Hinrichs, M. Lappe, “Augmentation Techniques for Efficient Exploration in Head-Mounted Display Environments”, in Proceedings of the 17th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology (VRST’ 10), ACM, pp.11-18, 2010. https://dl.acm.org/doi/10.1145/1889863.1889865

[9] S. Inagaki, K. Funahashi, “Eye direction control and reduction of discomfort by vection in HMD viewing of panoramic images”, IEEE VR 2024, pp.915—916, 2024.

[10] Y. Zhu, G. Jiang, Z. Liang,Y. Wang, “Flow-Aware Diffusion for Real-Time VR Restoration: Enhancing Spatiotemporal Coherence and Efficiency”, arXiv preprint, arXiv:2506.18786, 2025. https://arxiv.org/abs/2506.18786

[11] Meta, Meta Quest 2, https://www.meta.com/jp/quest/products/quest-2/

[12] Unity Technologies, Unity, https://unity.com/ja

[13] 名古屋テレビ塔株式会社, 中部電力 MIRAI TOWER 公式サイト, https://www.nagoya-tv-tower.co.jp/