

修士論文

狭視野シースルー HMD のための視野外オブジェクトへの
視線誘導手法に関する研究

渡邊 貴弘

2019 年 3 月 15 日

奈良先端科学技術大学院大学
情報科学研究科

本論文は奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科に
修士（工学）授与の要件として提出した修士論文である。

渡邊 貴弘

審査委員：

清川 清 教授 （主指導教員）

加藤 博一 教授 （副指導教員）

酒田 信親 准教授 （副指導教員）

狭視野シースルー HMD のための視野外オブジェクトへの視線誘導手法に関する研究*

渡邊 貴弘

内容梗概

近年 AR を用いたアプリケーションが多く見られるようになってきた。それに伴い、AR ヘッドマウントディスプレイも盛んに開発されており、今後普及していくと考えられる。しかし、光学シースルー方式の AR ヘッドマウントディスプレイでは視野角を広くすることが難しく、提示すべきオブジェクトが表示領域外となることが多く見受けられる。このような問題はデバイス普及後もしばらく継続すると予想される。本研究では、視野角の狭い AR ヘッドマウントディスプレイを対象として、ユーザの視線を視野外の目標とする地点に効果的に誘導する提示手法について比較と検討を行った。目標地点方向を表す提示を、視界中央部に表示する場合と端部に表示する場合、距離や詳細な方向を示す情報の有無によって分類し、2D Arrow Center, 3D Arrow, 2D Arrow End, Halo という 4 種類の提示手法を選定した。実験では、提示による視線誘導の迅速さを検証するための視線誘導タスクと、提示から目標地点を予測する精度を検証するためのポインティングタスクを行った。視線誘導タスクの結果、画面端かつ距離の情報を提示の大きさとして含んだ提示が効果的であった。また、視界中央部での表示では、正確な方向を示す情報が有効であることも示された。ポインティングタスクでは、提示ごとの差を検証することは出来なかったが、周囲の環境認識を阻害せずに、迅速な視線誘導を促すことが可能であると示唆された。

キーワード

AR, VR, HMD, 視野外, 視線誘導

*奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 修士論文,
2019 年 3 月 15 日.

A study on gaze guidance methods for off-screen objects on narrow-field see-through HMDs*

Takahiro Watanabe

Abstract

In recent years, many augmented reality (AR) applications have emerged. A variety of head mounted displays (HMD) for AR have also been actively developed. It is expected that AR HMDs will become widespread and prevalent in the near future, but that their viewing angles of optical see-through HMDs will remain relatively narrow. On such narrow field-of-view (FOV) HMDs, the overlaid information to be presented often goes out of screen.

In this research, we report on the user study that compared and examined a number of visualization methods to see how effectively each method guides user gaze to an off-screen 3D target point by using a narrow FOV AR HMD. We selected four types of visualization methods: 2D Arrow Center, 2D Arrow End, 3D Arrow, and Halo, that differ in the screen location (center or border) and in the absence or presence of target distance information. In the user study, a gazing task and a pointing task were conducted. In the gazing task, the visualization method shown on the screen border with distance information (Halo) was found to be the most effective. In addition, the visualization method indicating the accurate target direction (3D Arrow) was more effective when shown on the screen center. In the pointing task, no visualization method was found to be the winner, however, it was suggested that it is possible to promptly guides user gaze without disturbing surrounding environment recognition.

Keywords:

*Master's Thesis, Department of Information Science, Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, March 15, 2019.

AR, VR, HMD, Off-screen, Gaze guidance

目次

第 1 章	はじめに	1
1.1	背景	1
1.2	目的	3
1.3	論文の構成	3
第 2 章	AR ヘッドマウントディスプレイの現状と関連研究	4
2.1	現在の AR ヘッドマウントディスプレイの視野角	4
2.2	関連研究	5
2.2.1	方向を提示する手法	6
2.2.2	方向と距離を提示する手法	8
2.2.3	その他の提示手法	12
2.3	本研究の位置付け	16
第 3 章	AR アプリケーションの作成と問題点	17
3.1	AR アプリケーションの作成	17
3.1.1	アプリケーション概要	17
3.1.2	ハードウェア構成	17
3.1.3	サポート提示手法の実装	18
3.2	問題点	21
第 4 章	視野外オブジェクトへの視線誘導手法	24
4.1	実験の場面設定	24
4.2	使用した機器	24
4.3	実験用アプリケーションの実装	25
4.3.1	2D Arrow (Center)	29
4.3.2	2D Arrow (End)	30
4.3.3	3D Arrow	31
4.3.4	Halo	33
4.3.5	Tunnel	33

4.4	実験	33
4.5	結果と考察	37
4.5.1	視線移動タスク	39
4.5.2	ポインティングタスク	44
第 5 章	おわりに	49
	謝辞	50
	参考文献	51

第 1 章 はじめに

1.1 背景

近年，AR (Augmented Reality) アプリケーションが盛んに開発されている．AR とは日本語で拡張現実感と訳され，文献 [1] において以下のように示されている．

ユーザ が見ている現実のシーンにコンピュータグラフィックス (CG) によって描かれた仮想物体を重畳表示することで，ユーザがいる場所に応じた情報を直感的に提示する技術 である．

また，似た表現としてバーチャルリアリティ (Virtual Reality: VR) が知られているが，VR ではユーザの周囲はすべて仮想物体で表現される．現在見られる AR アプリケーションはデバイスが多く普及していることから，スマートフォン等のハンドヘルドデバイスを用いたものが多く見られる．しかしデバイスを対象とする現実物体の方向に向ける動作が必要という煩雑さや立体視ができないなどの点から，AR アプリケーションが発展していくにつれ，AR は頭部装着型のヘッドマウントディスプレイへと移行していくことが考えられる．

ヘッドマウントディスプレイには大きく分けてビデオシースルー型と光学シースルー型の 2 種類が存在する．ビデオシースルー型はカメラを通して取得した映像に情報を付加して非透過ディスプレイに表示するもので，機器としては VR に近い．光学シースルー型は透過ディスプレイを用いて表示を行う機器であり，現実世界の映像を直接視認可能である．しかし光学シースルー型の AR ヘッドマウントディスプレイでは技術的な問題により，CG の表示領域である視野角を広くすることが難しいとされている [2] [3]．現在開発用に販売を行っている光学シースルー型デバイスのほとんどは視野角が 30-50 度程度であり，人間の視野角とされている水平 200 度，垂直 125 度 [4] の領域をカバーすることができない．今後 AR ヘッドマウントディスプレイが普及した後も，しばらくの間視野角の問題は継続すると予想される．

ヘッドマウントディスプレイで提供される AR の用途としてよく挙げられるのは



図 1.1 宇宙船 ORION の開発における HoloLens 活用のイメージ [5]

作業支援である。例えば，ロッキードマーティン社が宇宙船 ORION の製作工程に AR による支援システムを用いているという記事 [5] も発表されている (イメージ図：図 1.1)。こういった支援を目的とした AR アプリケーションでは注意すべき物体や領域，またその種類を視覚的な情報として実物体に対して重畳表示することが多い。

しかし，先に述べた狭い視野角の影響から，提示しようとしている注視点がディスプレイの表示領域外となってしまうことが多く，提示された CG を視認できないといった問題がある。特に視野外に存在する危険因子の提示や，身体機能にかかわるような提示を行う場合，正確に提示された位置を視認するだけでなく，ユーザが視認するまでの時間も重要な要素となってくる。したがって，今後普及するであろう AR ヘッドマウントディスプレイとそのアプリケーションのパフォーマンス向上のために，視野外のオブジェクトへ視線誘導を行う方法の検討や研究は必要であると考えられる。

1.2 目的

以上のような背景を踏まえ，本研究では提示された注視点にユーザの視線方向を迅速に誘導する手法について検討を行う．特に視野角の狭い AR ヘッドマウントディスプレイを用いて視線誘導を行うシーンを想定して提示手法ごとの比較を行い，効果的な提示を実現する要素を明らかにすることが本研究の目的である．また，本研究での効果的な提示とはユーザの視線が正確に目標地点へと誘導されることおよび誘導の速さ，安定性を備えた提示であるものとする．

1.3 論文の構成

本論文では，2 章で市販されている AR ヘッドマウントディスプレイの例を挙げ，その視野角の狭さを確認し，さらに，視線誘導の関連研究を述べる．3 章では視野角の問題を認識するに至った HoloLens によるアプリケーション開発を示し，視線誘導の具体的な活用シーンと問題の設定を行う．4 章で有効な視線誘導手法を検証するための実験準備，実験内容とその結果及び考察を述べ，5 章ではまとめと今後の展望を述べる．

第 2 章 AR ヘッドマウントディスプレイの現状と関連研究

2.1 現在の AR ヘッドマウントディスプレイの視野角

現在の主な光学シースルー方式の AR ヘッドマウントディスプレイとその仕様を以下に示す。これらは昨今の代表的な AR デバイスであるが，仕様から視野角は，どの機器でも共通して人間の標準的な視野角に比べて大幅に狭いことがわかる。図 2.3 に示す Meta 2 は 90 度という比較的広い視野角を持つが，人の視野角約 210 度に対してまだ十分とは言えない。



図 2.1 Microsoft HoloLens



図 2.2 Magic Leap One

表 2.1 HoloLens 仕様

CPU	Intel Atom x5-Z8100 1.04GHz
RAM	2 GB
GPU	Custom Holographic Processing Unit (HPU)
OS	Windows 10 32bit
表示タイプ	両眼
解像度	1280×720
フレームレート	60Hz
視野角	約 30 度
トラッキング	1×IMU, 4× 環境認識カメラ, 1× 深度カメラ
重量	579 g

表 2.2 Magic Leap One 仕様

CPU	Nvidia Tegra X2 (Parker) SoC 2×Denver 2.0 64-bit cores 4×ARM Cortex A57 64-bit cores
RAM	8 GB
GPU	Pascal-based GPU with 256 CUDA cores (HPU)
OS	Lumin OS
表示タイプ	両眼
視野角	約 40 度
トラッキング	位置トラッキング
重量	415 g

2.2 関連研究

AR デバイスを利用した目標物や目標地点への誘導手法は数多く研究されてきた。本研究では特にユーザの視線方向を誘導することを目的としているため、その関連研究を挙げる。



図 2.3 Meta 2

表 2.3 Meta2 仕様

表示タイプ	両眼
解像度	2560×1440
フレームレート	60Hz
視野角	約 90 度
トラッキング	位置トラッキング
重量	約 500 g

2.2.1 方向を提示する手法

シンプルな手法としては方位磁石の針のように，目標へ向いた矢印を視界内に表示してユーザを誘導する提示がある．Feiner らは光学シースルー方式の AR ヘッドマウントディスプレイを用いて画面上に矢印を表示し，現実世界の物体に重畳表示することによって目標地点への方向を提示する手法を提案しシステムの構築を行った [6]．矢印はユーザの GPS 情報と目標地点の座標から差分によって方向を算出し，ディスプレイ平面上に投影することで方向を決定し，画面下端中央に表示されている (図 2.4)．

Wagner らはスマートフォンのようなカメラとディスプレイを搭載したハンドヘルドデバイスによるビデオシースルー AR 上に三次元形状の矢印を表示して方向提示を行っている [7](図 2.5)．

後に Schinke らはスマートフォンを用いたビデオシースルー AR 上で，目標地点



図 2.4 Feiner らによるユーザ誘導システムとアプリケーション実行画面 [6]

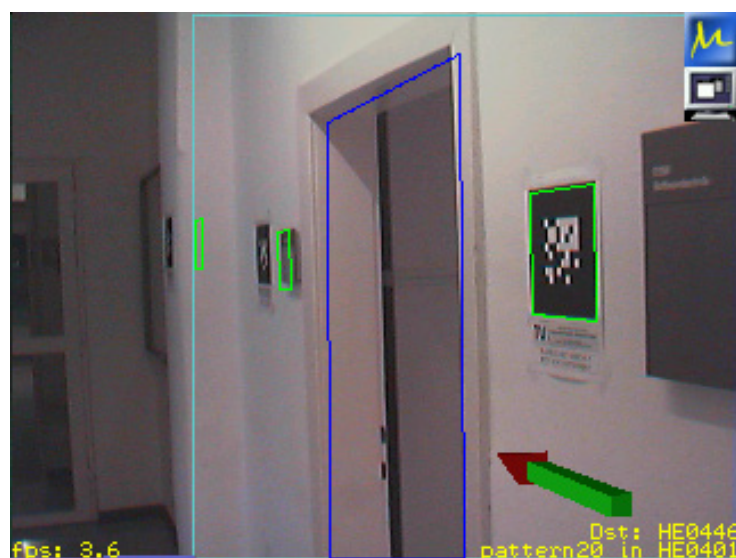


図 2.5 Wagner らによるアプリケーションの実行画面 [7]

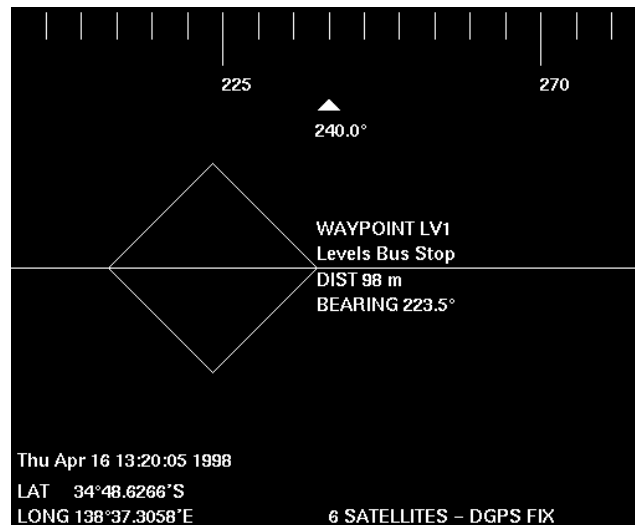


図 2.6 Thomas らのアプリケーションによる表示画面 [9]

と現在地を含んだ地図を俯瞰視点から眺めたものをミニマップとして表示して方向提示する場合と，三次元形状の矢印を重畳表示する場合を比較し，三次元形状の矢印の方が目標地点への方向をユーザが覚えるのに効果的であることを示した [8]．また，Thomas らは光学シースルー AR ヘッドマウントディスプレイを用いて，ユーザに対するターゲットの水平方向方位角を画面上部に矢印によって表示した． [9](図 2.6)．

上記のような矢印型の提示手法ではユーザが直感的に方向を認識できる．しかし，問題として方向と同時に距離を提示することが難しいという点が挙げられる．Feiner らは矢印の横に文字による距離表示を，Thomas らは画面上部の矢印とは別に，ターゲット方向に提示したボックス状オブジェクトのサイズを変化させることで距離を示していた．

2.2.2 方向と距離を提示する手法

方向と距離を同時に提示する手法として，Baudisch らの Halo が挙げられる [10]．Halo ではハンドヘルドデバイスに表示された地図上で画面外に存在する目標地点



図 2.7 Halo [10]

をユーザに認識させるため、目標物を中心とした円を描画し、その一部である円弧が画面内に表示される手法を用いた。円弧の位置から目標の方向を円弧の曲率から目標までの距離を視覚的に認識することが可能である (図 2.7)。また、Halo では目標物体が複数存在する場合に表示同士が重なってしまうことが問題であったため、Gustafson らは Halo で用いられていた円弧での表示を、三角形の形状で置き換えた Wedge を提案した [11]。Wedge では目標地点を頂点とした二等辺三角形を描画し、底辺とその他の辺の一部を画面端部分に表示させることで方向と目標との角度差を認識可能とした。また、距離によって底辺の長さを変化させることで目標までの距離を提示している (図 2.8)。

Jo らは、目標の方向をスマートフォンの画面端に表示させる AroundPlot という手法を提案した [12]。この手法ではユーザを中心とした天球上に目標の方向を投影してスマートフォンのディスプレイ平面上に展開、視野外の領域を画面端に圧縮して表示している。ユーザは画面端に表示された点状の提示から目標の方向を、また画面端から点までの距離から目標までの距離を大まかに認識することができる。ユーザの動きに合わせ、旋回方向の画面端領域を拡大して表示することで、



図 2.8 Wedge による提示の Halo との比較 [11] (a) : Halo では目標地点が複数ある場合に認識が困難 (b) : Wedge では重なりを避けた提示を行い複数地点の認識が容易

探索予定領域に存在する目標地点の方向と距離を認識しやすくしている (図 2.9). AroundPlot は特に目標とする地点が複数存在する場合に有効であることが示されており, 俯瞰視点での二次元的な表示や三次元の矢印群を用いた場合と比較して探索速度の向上が報告されている.

目標までの方向に加えて距離も認識可能とする提示手法として, 一般的には俯瞰視

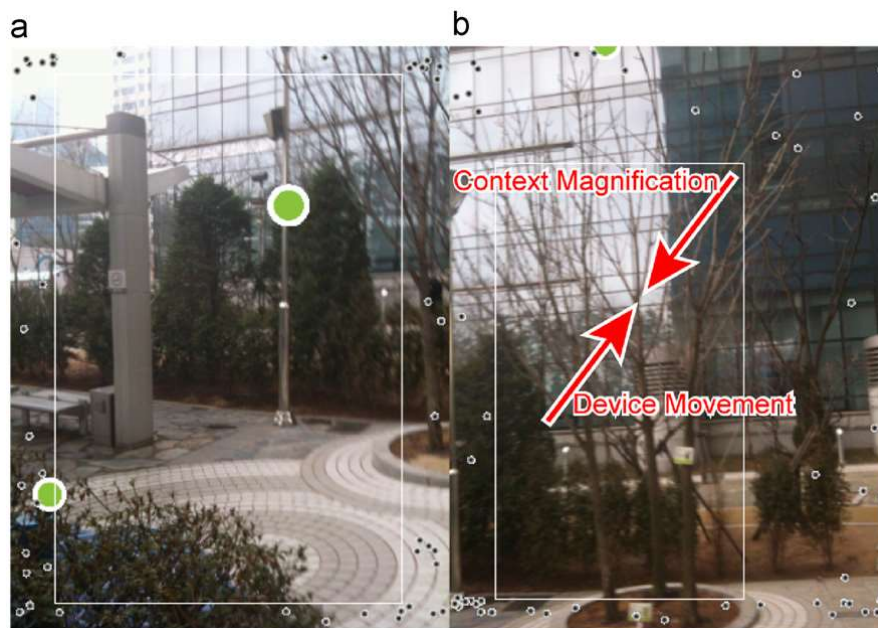
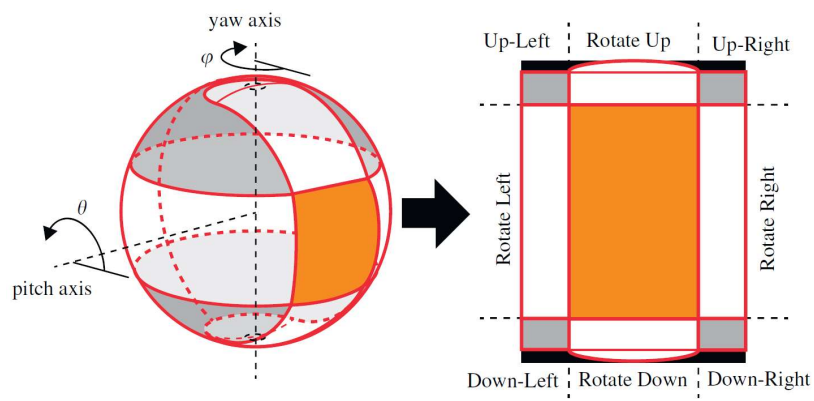


図 2.9 AroundPlot[12] による画面へのマッピング：上 と アプリケーションの実行画面 (画面端に目標地点がプロットされ，ユーザの動作に従ってズームを行う)：下

点での提示が知られている．これはいわゆるスマートフォンなどの画面に表示された地図である．俯瞰視点での提示はユーザの誘導を目的とした AR 分野の研究において、比較対象として良く用いられている．Mulloni らは誘導支援において俯瞰視点での地図とビデオシースルーを用いた主観視点での AR 表示を利用した場合の効果を比較する実験を行った [13]．俯瞰視点での地図を用いた場合、ユーザは常に利用していたのに対し、AR 表示では分岐点以外での利用頻度が減少することが確認されている (図 2.10)．この結果から主観視点での AR 表示がユーザに目標とする方向を認識させ、目的地までの経路形成を支援するのにより効果的であることが示されている．Wither らは AR での主観視点表示と俯瞰視点での表示を組み合わせた場合の距離認識精度の違いを検証した [14]．目標物体の位置に仮想マーカを AR 表示し、そのサイズや色を変化させた場合、AR 表示に加えて俯瞰視点でのマーカ位置をミニマップとして画面内に表示した場合、奥行きが分かるようテクスチャを描画した垂直、水平方向の仮想壁面を重畳表示して壁面にマーカ位置を投影して表示した場合について距離認識の誤差を比較した (図 2.11)．誤差の比較では統計的な有意差は見られなかったが、ユーザへのアンケートより AR 表示と俯瞰視点を組み合わせた場合に最も距離を判断しやすいという意見を得ている．

距離も認識可能とした手法では提示される情報量が増加するためユーザの認識負荷が増加する．AR での仮想物体は表示の仕方によってはユーザが注視点を移動する必要があることが示されており [15]、認識と視線誘導の速度を必要とした場合は Halo や Wedge のように単純な形状から直感的に認識できる提示が好ましい．

2.2.3 その他の提示手法

視野外の物体にできるだけ早く視線を誘導する手法の一つとして考案されたものとして Biocca らの Tunnel が挙げられる [16]．ワイヤフレーム状の 3D オブジェクトをトンネルの形状に沿って配置することで、誘導経路を含めた目標地点の提示が可能である (図 2.12)．このような提示方法は目標地点を視覚的に強調するより効果があるという結果を得ている．実際に Schwerdtfeger らは改良した Tunnel の手法を用いることで実際のオーダーピッキング作業の効率が改善されることを明らかにしている [17]．



図 2.10 Mulloni らの実験で俯瞰表示マップ（上部）および AR（下部）インタフェースが使用された場所（色が濃いほど、より多くの参加者が同じ場所でインタフェースを使用したことを意味する）[13]

Siu らはモバイル端末を用いた消防士向けの AR アプリケーションデザインである SidebARs を提案した [18]。SidebARs ではディスプレイの左右端に矢印を表示して目標地点の方向と距離を提示，さらに火事や警察署の位置といった目標の種類をアイコンとして表示することで重要な目標の認識を補助しており，緊急時の迅速な対応につながるとしている (図 2.13)。



(a) Shadow Planes



(b) Top-Down View



(c) Color Encoded Markers

図 2.11 Wither らによる実験 [14] で用いられた比較ケース (a) : マーカを投影した仮想壁面の重畳表示 (b) : 俯瞰視点でのマーカ位置の表示 (c) : マーカの色及びサイズを距離に応じて変化させる表示

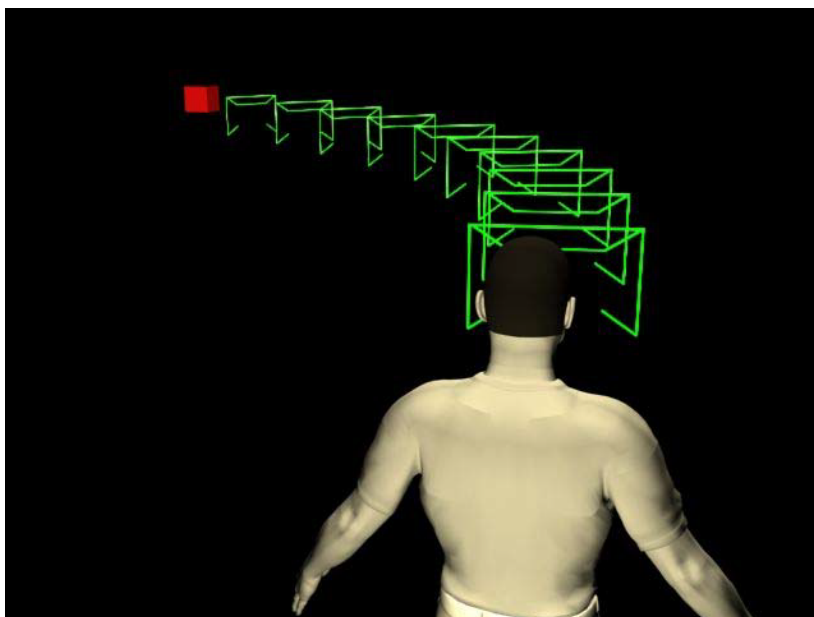


図 2.12 Tunnel [16]



図 2.13 SidebARs [18]

2.3 本研究の位置付け

本研究では，AR ヘッドマウントディスプレイを対象として，迅速かつ正確に視線誘導を行うための視覚的提示手法について比較と検証を行う．特に長期にわたって継続すると予想される狭視野の状況を想定した検証を行っていく．

第 3 章 AR アプリケーションの作成と問題点

本章では，光学シースルー AR ヘッドマウントディスプレイを用いてスポーツ支援を行うことを想定して開発を行ったアプリケーションについて説明を行う．以下にアプリケーションの概要とハードウェア構成，実装について述べる．加えてアプリケーションの実装によって明らかになった問題点を挙げる．

3.1 AR アプリケーションの作成

3.1.1 アプリケーション概要

光学シースルー型の AR ヘッドマウントディスプレイを用いてバドミントンを支援することを目的としたアプリケーションを作成した．支援する種目にバドミントンを選択した理由としては，バドミントンのシャトルコックに関する研究（[19], [20], [21]）より，特殊かつ高い減速特性が，初心者のプレイヤにとって感覚をつかみにくくしている点があることや，シャトルコックの初速が多くのスポーツと比較しても速いため，AR による情報提供によって認識や予測の処理をサポートすることが有効であると考えられたためである．

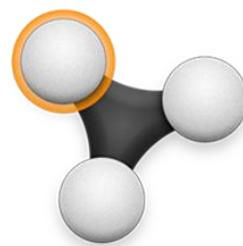
サポートの内容としては打ち出されたシャトルコックに関するサポートを中心に開発を行った．具体的にはプレイヤがシャトルコックの減速を把握しやすくするためにシステムが計算した予測軌道を提示するサポート，飛来する軌道上で，適切な打点を予測して提示するサポートを実装した．

3.1.2 ハードウェア構成

使用した機器は Microsoft HoloLens（図 2.1），OptiTrack モーションキャプチャシステム（図 3.1），データ処理用 PC（表 3.1）である．処理の流れは図 3.2 のように示される．(1) モーションキャプチャシステムによりシャトルコックの位置を 120Hz で取得してデータ処理用 PC に送信，(2) データの整形及び誤データの排除を行った後に HoloLens へと無線 LAN 経由でデータを送信し，(3) HoloLens 側の



(a) Flex3 Camera



(b) Motive Software

図 3.1 OptiTrack モーションキャプチャシステム (a): モーションキャプチャ用カメラ Flex3 (b): モーションキャプチャ用ソフトウェア Motive

表 3.1 データ処理用 PC の仕様

項目	詳細
CPU	Intel Corei7-3770K 3.50GHz-3.90GHz
Memory	DDR3 1600MHz 16.0GB
GPU	NVIDIA GeForce GTX 750Ti
OS	Windows 10 Enterprise
Storage	HDD 500GB

処理によりサポート提示を行っている。

3.1.3 サポート提示手法の実装

AR ヘッドマウントディスプレイで提供するサポート情報としてシステムによる予測軌道と予測打点の表示を行った。

まず予測軌道では伊藤らの Laplacian Vision の研究 [22] をもとにシャトルコックに合わせて改変を行った。伊藤らの研究では現実空間で飛来するボールをモー

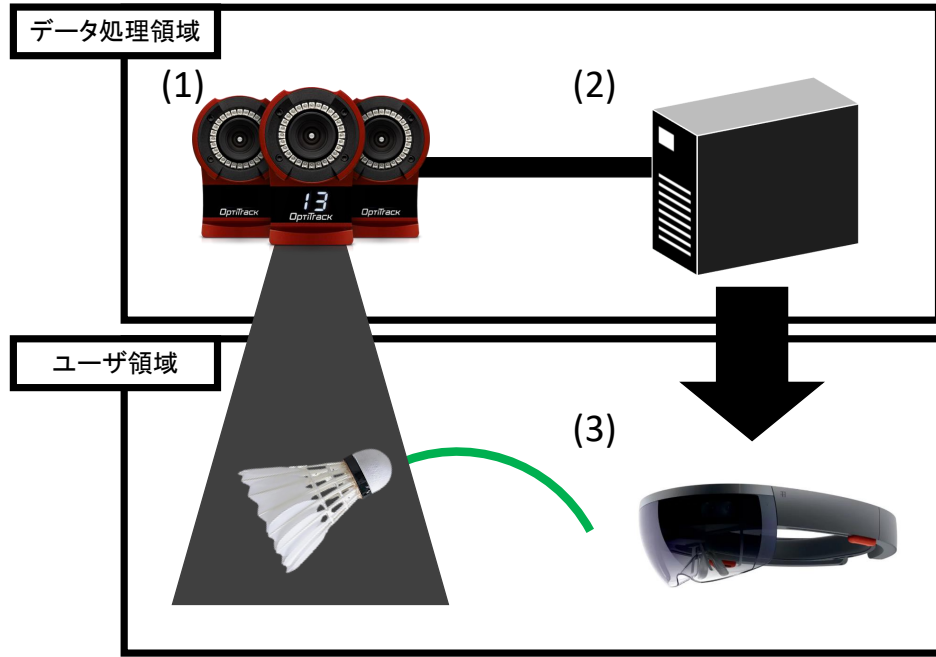


図 3.2 アプリケーションのシステム流れ図

ションキャプチャシステムによって取得，得られた位置データをもとにカルマンフィルタ処理による推定を行って軌道を算出，システム遅れを考慮した補正を行い，HoloLens 上で帯状にレンダリングして表示している．今回はこの Laplacian Vision のカルマンフィルタ処理による推定部分を矢戸らの研究 [23][24] を参考に以下に示す式へと改良した．

$$\mathbf{X}_k = \{x_k, \dot{x}_k, \ddot{x}_k, y_k, \dot{y}_k, \ddot{y}_k, z_k, \dot{z}_k, \ddot{z}_k, \} \quad (3.1.1)$$

$$\mathbf{X}_k = \mathbf{A}\mathbf{X}_{k-1} + \mathbf{B}u_k + \boldsymbol{\omega}_k \quad (3.1.2)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & \delta_t & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \delta_t & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-c}{m}\delta_t & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \delta_t & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \delta_t & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-c}{m}\delta_t & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \delta_t & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \delta_t \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-c}{m}\delta_t & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & -g \end{bmatrix} \quad (3.1.3)$$

式 (3.1.1) でシャトルcockの状態として三次元位置，速度及び加速度を設定，カルマンフィルタの状態モデルは式 (3.1.2) で表される．式 (3.1.3) の $\mathbf{A}$ は状態遷移行列であり，空気抵抗を考慮した項 $-c/m$ が組み込まれている． $\mathbf{B}$ は制御入力であり，ここでは重力加速度を入力としている． $\mathbf{u}_k$ は単位行列としている．また ω_k は誤差入力を表す．以上の事前予測位置と観測位置から推定されるシャトルcockの位置を算出している．実装後に実際のシャトルcockを用いて提示を行ったアプリケーション実行画面を図 3.3 に示す．

次に，飛来したシャトルcockの予測打点を示すシステムの構築を行った．打点の予測は重回帰分析を用い，モーションキャプチャで取得された最初の 3 フレーム分の位置，速度，加速度およびそれぞれの値の 2 乗値までを用いてモデルの作成を行った．重回帰分析とは式 (3.1.4) で示され，

$$\mathbf{Y} = \mathbf{a}_1 X_1 + \mathbf{a}_2 X_2 + \mathbf{a}_3 X_3 + \dots + \mathbf{a}_0 \quad (3.1.4)$$

目的変数 Y を任意個数の説明変数 X_k によって示されるよう各係数 a_k を設定する方法である．また説明変数の個数を減らすため Step-Wise 法 ([25]) を用いて説明変数の取捨選択を行っている．プレイヤから 7 メートル離れた位置よりシャトルマシンによって様々な方向にシャトルを射出し，モーションキャプチャを用いて軌道と打点を計測した．42 球分の打点データを用いて Step-Wise 回帰分析を行ったところ今回の環境で予測誤差をおよそ 0.244 [m] とする結果を得た．図 3.4 にモデル作成に用いたデータと，そのモデルによる予測のテスト結果を示す．左図に計測したシャトルの軌道を示す．グラフ左側からシャトルcockが飛来し，最終プロット

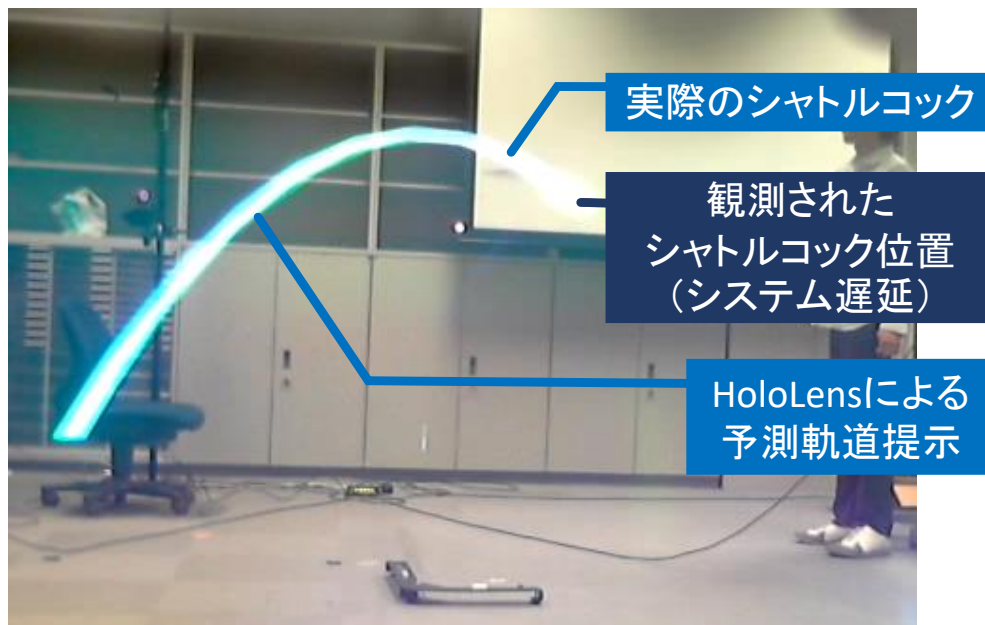


図 3.3 HoloLens によるシャトルコックの予測軌道提示

地点が打点である．右図が計測データの内からテストデータを分割し，作成された重回帰モデルを用いて予測を行った結果である．実装後に実際のシャトルコックを用いて提示を行ったアプリケーション実行画面を図 3.5 に示す．

3.2 問題点

実際に上記のアプリケーションを使用したシャトルコックの打ち返しを行ったところ，実用上の問題点がいくつか明らかになった．まず問題点としてシステムの遅れが挙げられる．モーションキャプチャ用カメラから処理用 PC への接続，処理用 PC から HoloLens への無線 LAN 経由のデータ転送，及び HoloLens 内での描画処理，それぞれの遅れにより図 3.3 にみられるようにシャトルコックの速度に表示が追従できない問題が見られた．また計測誤差も大きく，シャトルコック形状の特性上，飛翔角度によって貼付した再帰性反射材の位置がモーションキャプチャのカメラから観測しづらくなり，計測位置のずれが発生していた．次に，HoloLens の

計測されたシャトルの軌道

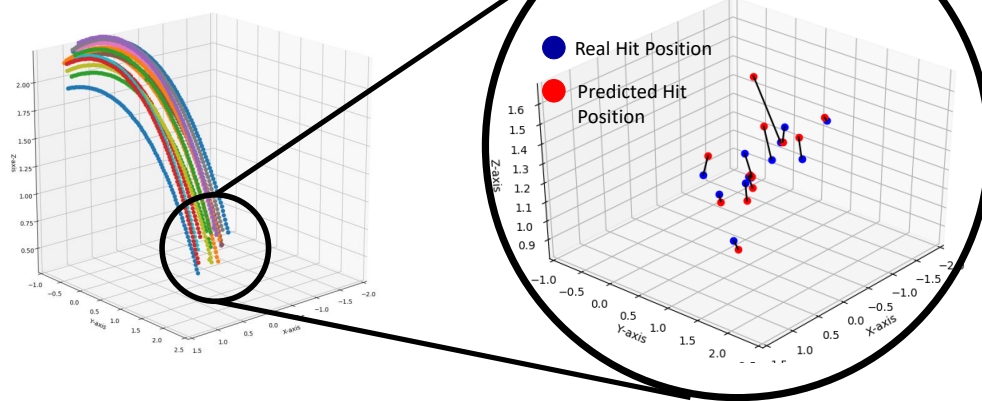


図 3.4 計測データからの予測

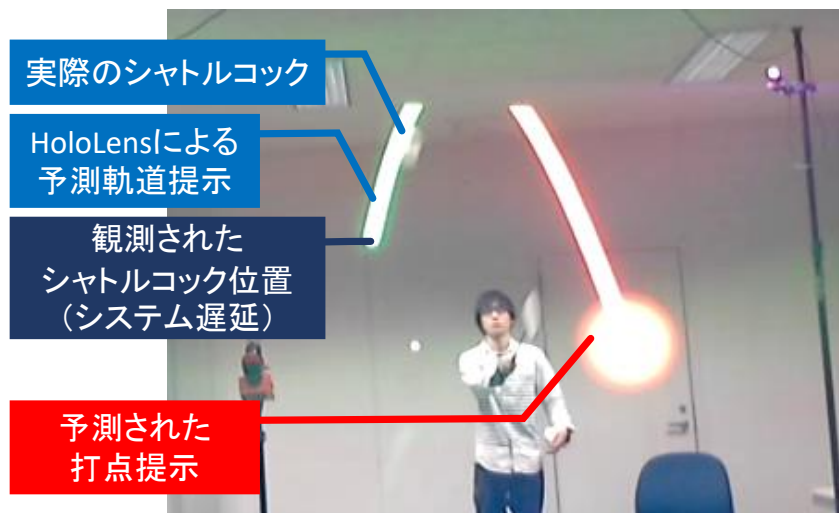


図 3.5 HoloLens による予測打点提示の様子



図 3.6 提示が視認しづらい場合の表示例

視野角が狭いことにより，提示した情報が表示画面内に収まらず視認できないという問題が見られた．図 3.6 では，軌道と打点が提示されているが，その一部分しか画面内に収まっていない．視野角の狭さは現在の光学シースルー方式の AR ヘッドマウントディスプレイに多く共通してみられる問題であり，今後同様の AR アプリケーションが作成された際にパフォーマンスを低下させる要因となることが懸念される．

このような問題を受け，次章以降ではオブジェクトが視野外に提示される場合にユーザがオブジェクトを迅速かつ正確に視認するための AR による情報支援を行う提示方法について検証していく．

第 4 章 視野外オブジェクトへの視線誘導手法

視野角の狭い AR ヘッドマウントディスプレイで提示する目標地点が視野外にある場合に、ユーザの注視点を迅速に目標地点へと誘導するために効果的な提示手法を検証するため実験を行った。以下では、実験の場面設定、用いた機器および実装方法、実験で行ったタスクの詳細、実験結果を述べ、評価と考察を行う。

4.1 実験の場面設定

視野外の目標地点へ迅速な注視点方向の誘導が必要となる場面としては、歩行や自動車での移動時にユーザが前方などの一定方向に集中している状態で視野外の危険方向に注意喚起を行う場面、スポーツなど視野の変化が激しい場面で AR 表示による支援を行う場合が例として考えられる。ユーザの自動車搭乗時に危険方向を AR 提示する効果について検証した研究としては Tönnis らの研究がある [26]。上記に示したような場面の内、スポーツにおける利用に近い場面を本実験では想定している。この設定場面ではユーザ自身が継続して移動する必要が無いため、頭部から観測されうる周辺環境の映像が自身の運動によってのみ変化し、提示や目標とするオブジェクトを視認しやすい。このような理由から提示による効果の検証がしやすいと考え、本実験の場面設定とした。これをみたす具体的なある競技を対象とするのではなく、一般性を高めたものとして、ボールとラケットを用いた仮想の競技を設定した。また、この仮想の競技では、球の動きから打点である視野外オブジェクトへ視線を誘導させるだけの作業を行う。打点の認識に集中するように、通常の競技に存在する球の打ち返しや移動などは発生せず、それに必要となる認知負荷や運動負荷は小さくなるように設定している。

4.2 使用した機器

本研究では光学シースルー方式の AR ヘッドマウントディスプレイを用いて、視野外オブジェクトへ迅速に視線を誘導させるための提示方法の研究を想定しているが、ユーザ位置や飛来する実物体のトラッキング誤差、及びシステムの遅れが支配

的となることが前述の実験より確認されたため、VR ヘッドマウントディスプレイを用いて擬似的に AR ヘッドマウントディスプレイを再現することにした。この環境の再現のために Lee らの研究 [27] を参考にした。Lee らは VR ヘッドマウントディスプレイの表示領域の中央部分に仮想 AR ディスプレイ領域を作成し、ディスプレイ全体で描画される擬似的な実物体と、設定した仮想 AR ディスプレイ領域内のみで表示される擬似的な仮想物体を共に VR 上の CG として仮想表示することで擬似的な AR ヘッドマウントディスプレイの利用状態を再現した。この結果に従って、本研究でも VR ヘッドマウントディスプレイを用いて擬似的に AR ヘッドマウントディスプレイを再現した状態で実験を行う。本研究ではユーザが用いる VR ヘッドマウントディスプレイとして HTC VIVE (図 4.1 [28]) を用いた。HTC VIVE の仕様を以下の表 4.1 に示す。また、実験で用いた HTC VIVE コントローラ (図 4.2 [28]) の仕様を表 4.2 に示す。HTC VIVE のトラッキングベースステーションを、およそ 3.5×5.0 [m] の長方形の対角上に設置し、VIVE を装着したユーザが移動可能なルームスケールエリアとして設定した。実験用アプリケーションは Unity 2018.2.7f1 Personal (64bit) を用いて作成し、表 4.3 に示した仕様のデスクトップ PC 上で実行した。

4.3 実験用アプリケーションの実装

実験用アプリケーションは Unity を用いて、4.2 節で挙げた機器上で実装している。今回の実験ではユーザの視線移動が頻繁に行われる例としてスポーツを行う場面を想定し、図 4.3 に示すようなシーンを VR 環境上で作成した。VR ヘッドマウントディスプレイを装着したユーザは仮想コート (13400×6100 [mm]) 上を移動し周囲を見渡すことが可能だが、実験では基本位置付近でタスクを行う。このシーンでは一定時間ごとに複数パターンのあらかじめ設定された方向と初速を持った円錐状のオブジェクト (高さ : 約 200 [mm]) が生成され、重力加速度に従って放物線を描きながらユーザ側に飛来する。この飛来オブジェクトをラケット (長さ : 約 680 [mm]) で打ち返す場合の打点の一例をあらかじめ設定しておき、ユーザの視線を誘導する目標地点として球状のオブジェクト (直径 : 約 300 [mm]) を表示する。



図 4.1 HTC VIVE ヘッドセット

表 4.1 HTC VIVE ヘッドセットの仕様 [28]

項目	詳細
スクリーン	デュアル AMOLED 3.6 インチ Diagonal
解像度	片目 : 1080×1200 ピクセル (合計 : 2160×1200)
リフレッシュレート	90Hz
視野角	110 度
安全性能	シャペロンシステムによるプレイエリア限界アラート およびフロントカメラ
センサ	SteamVR トラッキング, G センサ, ジャイロスコープ, 近接センサ
接続	HDMI, USB 2.0, 3.5 mm ステレオヘッドフォン端子, 電源, Bluetooth
入力	内臓マイク
接眼部	瞳孔間距離およびレンズ距離の調節機能
ルームスケール	最小ルームサイズ : 2m × 1.5m, ベースステーション間最大距離 : 5m



図 4.2 HTC VIVE コントローラ

表 4.2 HTC VIVE コントローラの仕様 [28]

項目	詳細
センサ	SteamVR トラッキング
入力	多機能トラックパッド, グリップボタン, 2 段トリガー, システムボタン, メニューボタン
バッテリー持続時間	約 6 時間
接続	マイクロ USB 充電端子

表 4.3 実験に用いた PC の仕様

項目	詳細
CPU	Intel Corei5-8400 2.80GHz-4.00GHz
Memory	DDR4 2133MHz 32.0GB
GPU	NVIDIA GeForce GTX 980
OS	Windows 10 Enterprise
Storage	SSD 500GB

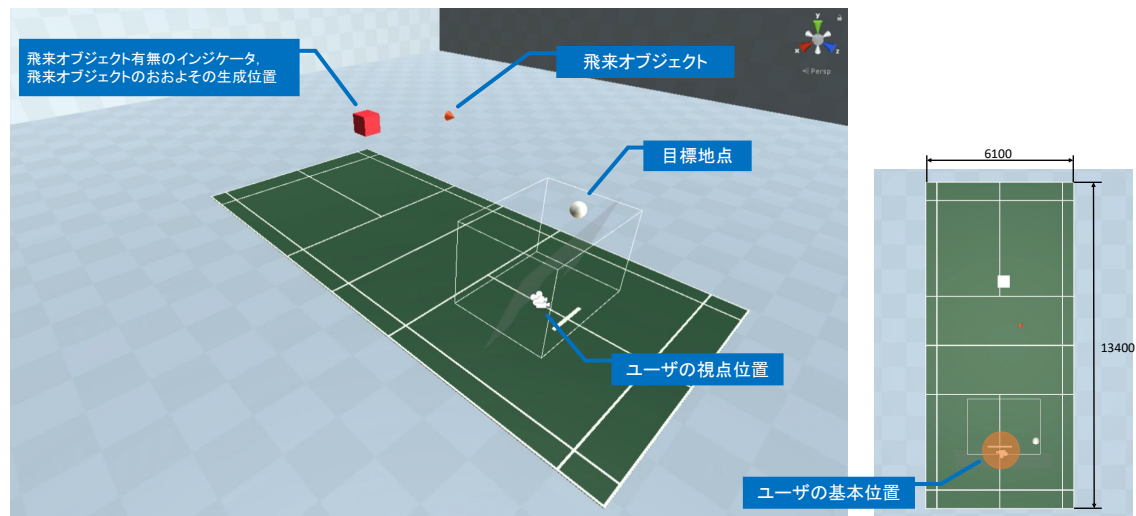


図 4.3 作成した実験用アプリケーションのシーン俯瞰画面

ただし、ラケットは VR 空間内に表示するが、打ち返す動作は実際に行わない。飛来オブジェクトの生成タイミングとおおよその生成位置をユーザが把握しやすくするためのインジケータとして立方体形状のオブジェクト（一辺：約 500 [mm]）を配置した。飛来オブジェクトはインジケータ周辺から生成され、インジケータの色が変化することで生成されるタイミングを被験者に知らせる。

4.1 章で述べたように実際のスポーツ実行場面で AR による支援を行うタスクを想定しているため、VR 上で、現実空間に存在する物体を模して作成した擬似的な実物体と、AR ヘッドマウントディスプレイ上に表示された CG を模した擬似的な仮想物体を作成し、両者の表示方法を選択的に変化させる機能を作成した。表示例を図 4.4 に示す。画面中央から一定範囲の矩形領域で、色が濃く表示されている部分が光学シースルー方式の AR ヘッドマウントディスプレイを模して作成した仮想 AR ディスプレイ領域である。この領域のサイズは可変であるが、HoloLens のおおよその視野角を模して水平 35 度、垂直 20 度と設定している。実装には Shader を用い、オブジェクトの仮想 AR ディスプレイ領域内と領域外部分で分割して描画処理を行っている。実物体と設定されたオブジェクトは仮想 AR ディスプレイ領域内部分と領域外部分で同様の描画処理を行い、どちらの領域でも表示される。仮想

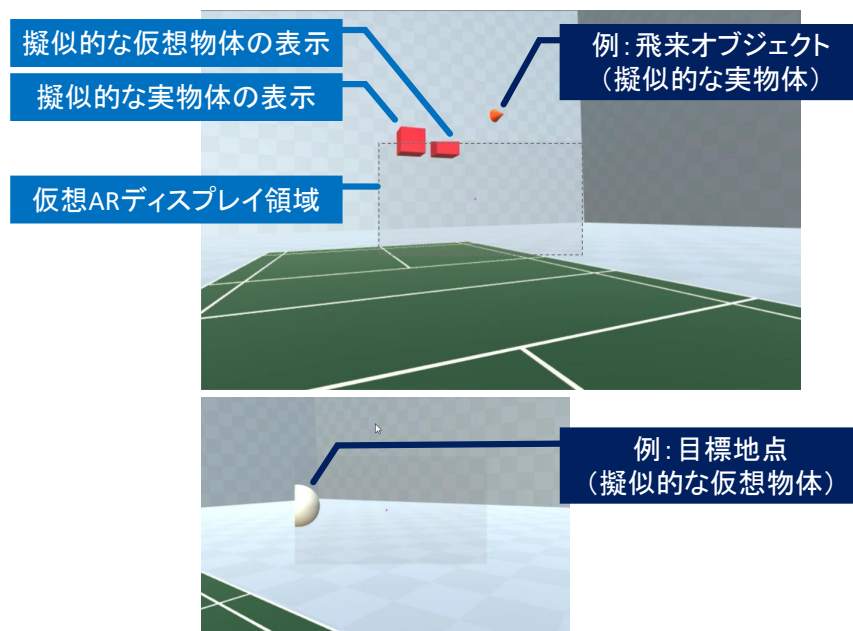


図 4.4 作成した VR アプリケーション上での仮想 AR ディスプレイによるオブジェクトの表示例

物体と設定されたオブジェクトは領域内部分のみで描画処理を行い，領域外部分の描画処理は省略している．本実験の場面設定ではコートなどの環境や飛来オブジェクト，飛来オブジェクトの有無を示すインジケータは実物体，ユーザの視線誘導先である目標地点は仮想物体と設定した．

ユーザの視線を目標地点へと誘導するために実装した提示手法を以下に示す．

4.3.1 2D Arrow (Center)

仮想 AR ディスプレイの画面中央に画面に平行に表示され，ユーザの視線方向（実際には頭部方向）を軸とした 1 軸のみで回転を行う矢印状の提示方法を 2D Arrow (Center) として実装した．提示を行った場合のアプリケーション画面を図 4.5 に示す．この提示では目標地点をユーザの視線方向に垂直な平面に投影し，同平面上で矢印を回転させて目標方向に向ける．目標地点が仮想 AR ディスプレイの視野外にある場合，2D Arrow (Center) のサイズは変化せず一定である．した

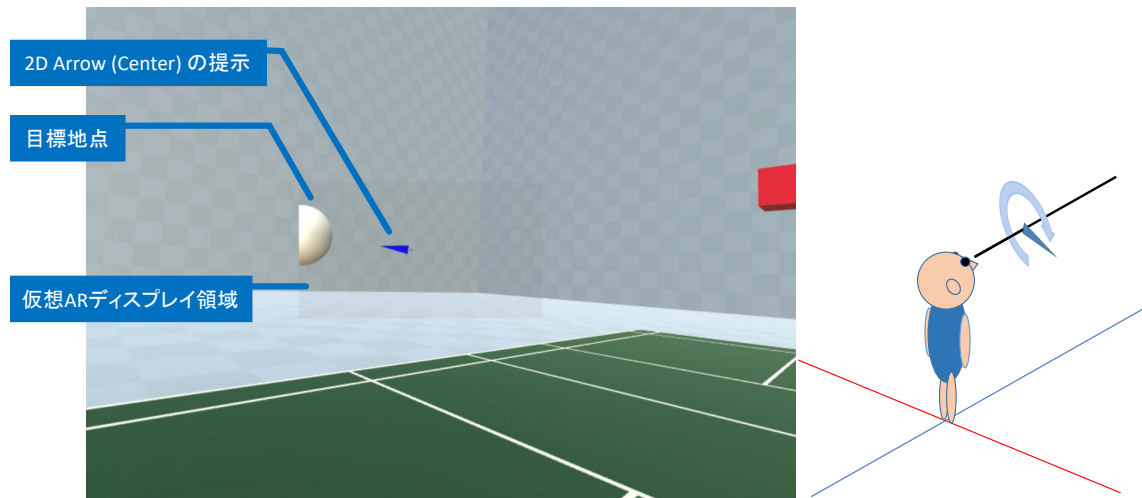


図 4.5 (左) 2D Arrow (Center) での提示画面, (右) 提示手法の概略図

がって、この提示は目標地点の正確な方向ではなく、奥行き方向を除いた大まかな方向のみを示しており、正確な注視に必要な視線の移動角度や距離は示していない。ただし、仮想 AR ディスプレイ内に目標が表示される場合は目標地点を直接観察すると考えられるので、この場合の 2D Arrow はあまり意味がない。よって、目標地点を示すオブジェクトと重なって見づらくなるのを避けるため、目標地点が仮想 AR ディスプレイ内にある場合、2D Arrow (Center) の提示は目標地点が視界中心に近づくにつれて徐々に小さくなり、中心部では提示は消える。

4.3.2 2D Arrow (End)

仮想 AR ディスプレイの画面端部に沿って移動し、ユーザの視線方向を軸として回転を行う矢印状の提示方法を 2D Arrow (End) として実装した。提示を行った場合のアプリケーション画面および、視線方向の変化に応じた提示の変化の様子を図 4.6 に示す。この提示では目標地点をユーザの視線方向に垂直な平面に投影し、視界中心部から投影された目標地点に引いた直線上に、仮想 AR ディスプレイ領域の画面端と交差する点に先端部が配置されるよう矢印を移動する。同平面上で矢印を回転させて目標方向に向ける。目標地点が仮想 AR ディスプレイの視野外にある

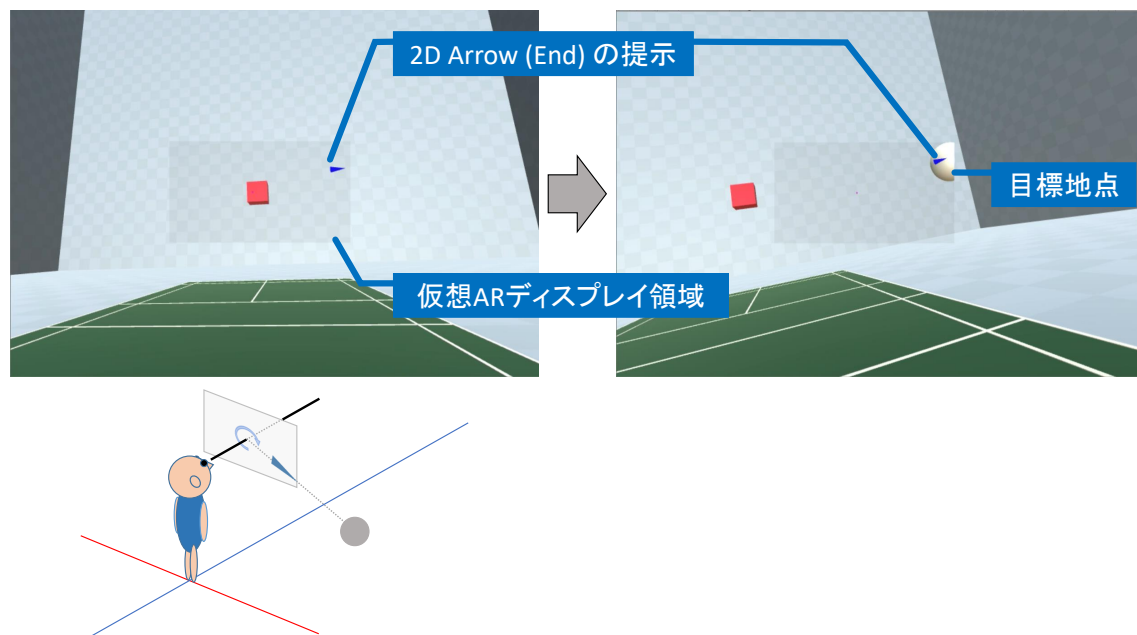


図 4.6 2D Arrow (End) による提示画面と視線の移動による動作および概略図

場合，2D Arrow (End) のサイズは変化せず一定である．したがって，この提示は目標地点の正確な方向ではなく，奥行き方向を除いた大まかな方向のみを示しており，正確な注視に必要となる視線の移動角度や距離は示していない．目標地点が仮想 AR ディスプレイ内にある場合，2D Arrow (End) の提示は画面端ではなく目標地点の中心位置に配置され，視界中心に近づくにつれて設定された大きさまで徐々に小さくなる．

4.3.3 3D Arrow

仮想 AR ディスプレイの画面中央に表示され，目標地点の奥行きも考慮した回転を行う矢印状の提示方法を 3D Arrow として実装した．提示を行った場合のアプリケーション画面および，視線の移動に応じた提示の変化の様子を図 4.7 に示す．この提示ではユーザ眼前一定距離の視界中心部に固定されたある点を矢印の原点に設定し，原点から目標地点に向けたベクトル方向に従って三次元形状の矢印を回転さ

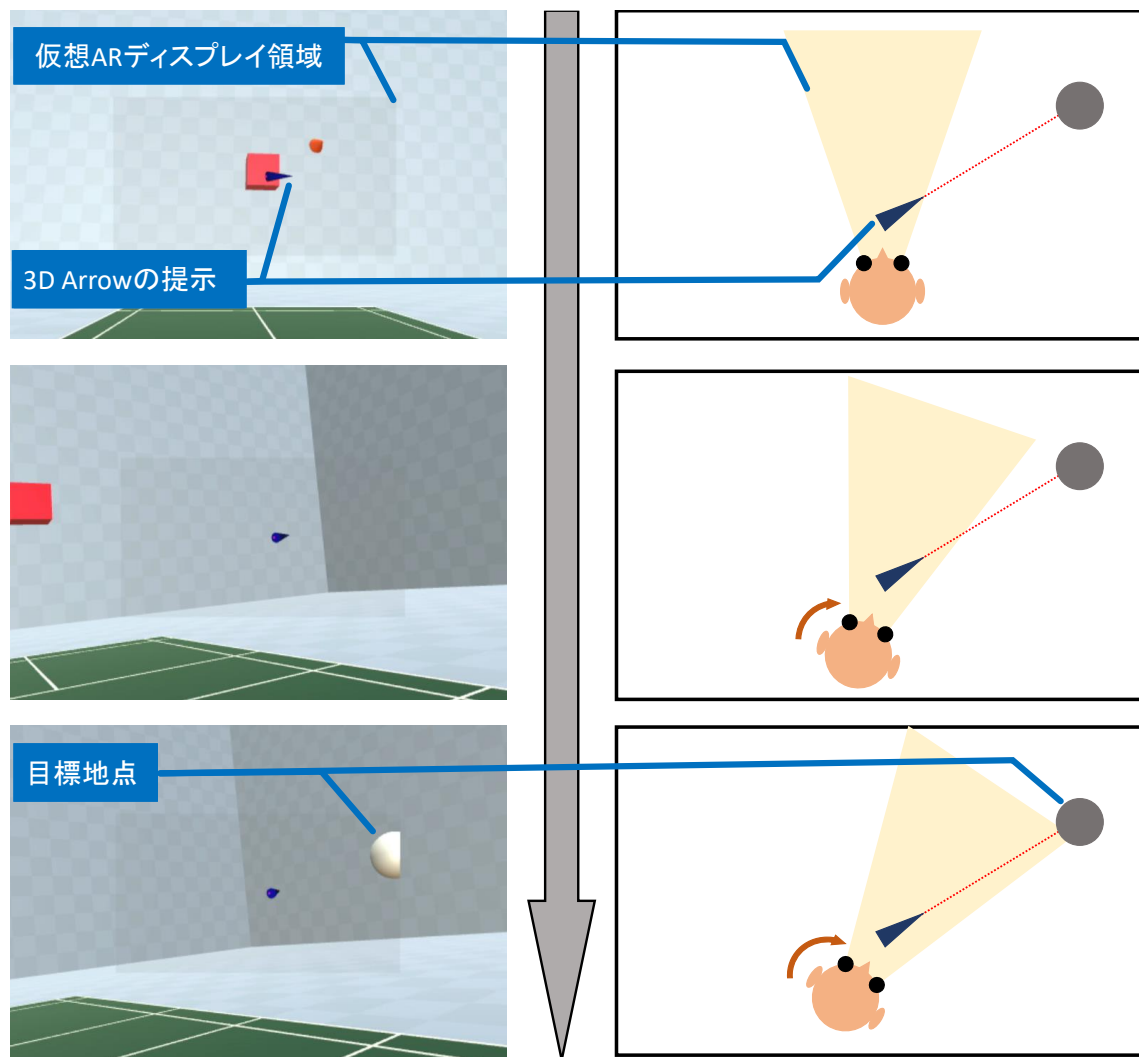


図 4.7 3D Arrow による提示画面と視線の移動による動作

せている．目標地点が仮想 AR ディスプレイの視野内外のどちらに存在する場合でも，三次元形状の矢印のサイズは変化せず一定である．したがって，この提示では目標地点の奥行きも考慮した正確な方向のみを示しており，必要な視線の移動角度や距離は示していない．

4.3.4 Halo

仮想 AR ディスプレイ画面の画面端に表示された円弧による目標地点の提示を Halo として実装した。提示を行った場合のアプリケーション画面および、視線移動に応じた提示の変化の様子を図 4.8 に示す。Baudisch らの研究 [10] をもとにした提示であるが、本来二次元のマップ上を対象とした提示のため、本研究の場面設定に合わせて三次元の VR 空間での提示へと拡張を行った。この提示は仮想 AR ディスプレイ面に投影した目標地点を中心に円を作成、円弧が仮想 AR ディスプレイの画面端一定の距離に表示されるよう円の半径を設定している。ただし、投影面は提示された Halo をユーザが視認できるよう視界前方方向かつ、目標地点までの距離に合わせた位置としている。したがって、この提示では奥行き方向を除いた大まかな方向の提示と、目標地点を視野内にとらえるために正確な注視に必要な視線の移動角度、距離を提示している。目標地点が仮想 AR ディスプレイ内にある場合、円弧の大きさは固定値となり円の中心位置は目標地点に追従する。

4.3.5 Tunnel

目標地点へと至る経路を複数の連なるワイヤフレーム状の円によって描画する提示方法を Tunnel として実装した。提示を行った場合のアプリケーション画面および、視線移動に応じた提示の変化の様子を図 4.9 に示す。Biocca らの研究 [16] および Schwerdtfeger らの研究 [17] をもとにした提示であり、ユーザの視界前方方向のあらかじめ設定された距離における点を原点とし、原点より目標地点に至る経路に一定間隔ごとに円弧を配置している。円弧はすべて同一サイズであるが、原点位置より遠ざかるにつれて見かけの大きさが小さくなっている。この提示では目標の正確な方向の提示を行っており、目標地点を視野内にとらえるために必要な視線の移動角度、距離は提示していない。

4.4 実験

被験者は VR ヘッドマウントディスプレイ HTC VIVE を装着し、仮想コート上の設定された基本位置に直立して実験を行った。実験では以下の 2 つのタスクを

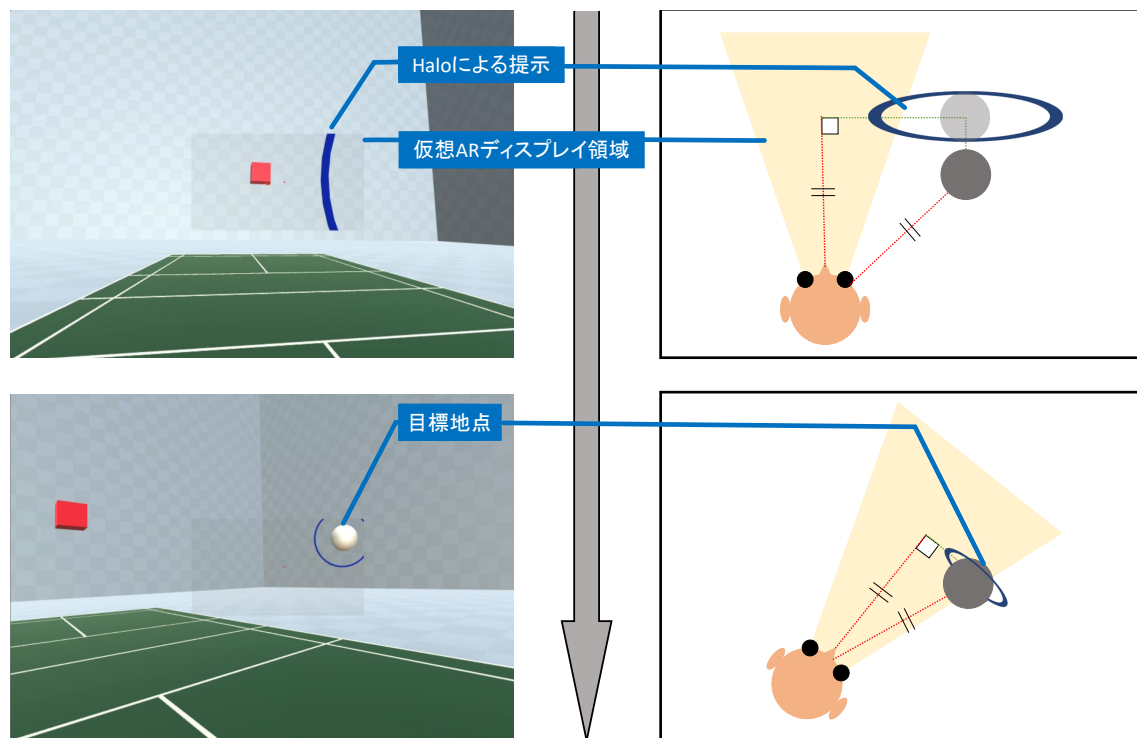


図 4.8 Halo による提示画面と視線の移動による動作

行った。

視線移動タスク: 提示された視野外の目標地点に視線を移動させるタスク

ポインティングタスク: 提示された視野外の目標地点に視線を移動させずに目標地点の方向にコントローラを向けるタスク

視線移動タスクでは実際に視線誘導を行う場合の反応速度を検証することを目的としており、提示ごとの視線移動動作の違いを検証する。また、ポインティングタスクでは視線誘導の提示が目標位置の認識にどれほど効果的であるかを検証するため、視線の移動を行わず、提示を手掛かりとして目標位置を推測させた。各タスクでは、それぞれ提示された目標地点と被験者の視線方向、コントローラのポインタ方向の角度差を計測した。各タスクの流れを図 4.10 とともに以下に示す。仮想 AR ディスプレイ領域は HoloLens のおおよその視野角を参考にし、水平 35 度、垂直

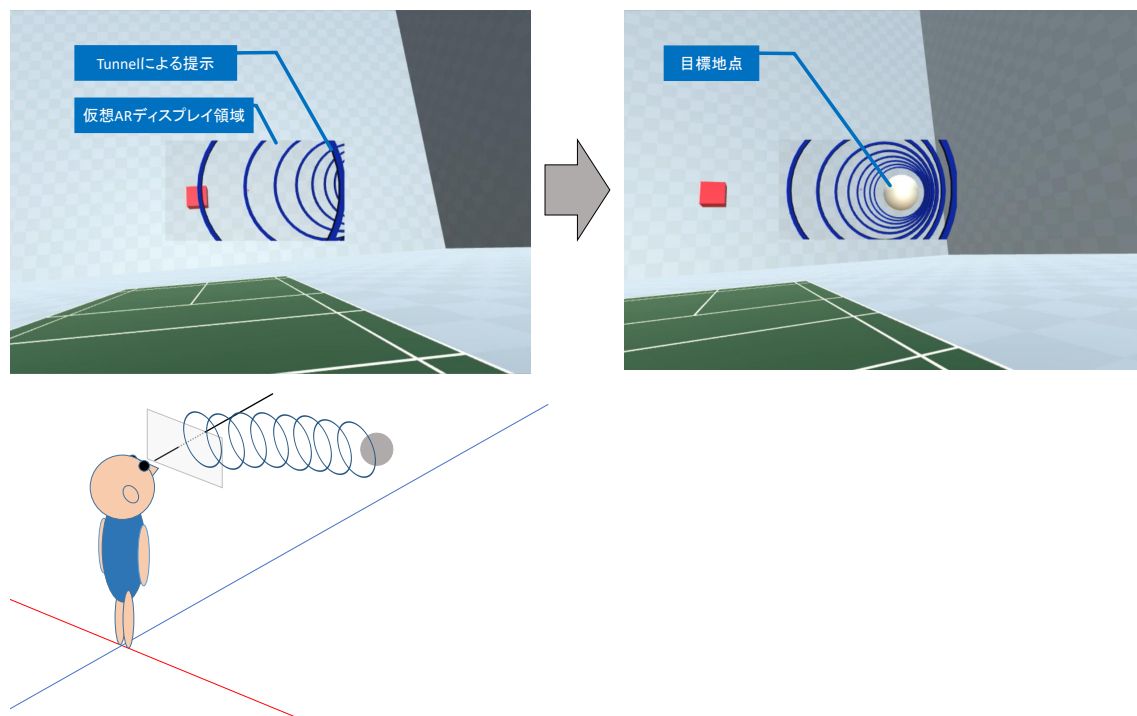


図 4.9 Tunnel による提示画面と視線の移動による動作および概略図

20 度と設定した。

視線移動タスク：提示された視野外の目標地点に視線を移動させるタスク

- (1) 被験者は HTC VIVE を装着して VR 環境内で基本位置からインジケータ方向を注視する。インジケータは 4 秒間隔で青 → 赤 → 青と交互に変化する。
- (2) インジケータが青 → 赤と変化すると同時に飛来オブジェクトと目標地点、視線誘導提示が表示される。飛来オブジェクトは放物線を描きながら移動し、0.4 秒後に消える。飛来オブジェクトを長時間表示しないことで、それぞれの視線誘導提示手法による影響が際立つことを期待している。目標地点は飛来オブジェクトの軌道上に生成され、4 秒間表示される。視線誘導提示は第 4.3 章で実装したものの内、

* 2D Arrow (Center)

* 3D Arrow

* 2D Arrow (End)

* Halo

及び何も提示しない 5 パターンの提示手法で行う。Tunnel による経路の提示は被験者が移動しない条件では不要のため、使用しないこととした。5 つの提示条件は被験者ごとに変更した。

- (3) 被験者はインジケータが青 → 赤と変化すると同時に視線方向を目標地点へと移動させ、目標地点が消えるまで視界の中心で注視する。この視線方向の移動はできる限り速い動作で行う。
- (4) 被験者は目標地点が消えた後、視線をインジケータ方向に戻す。この時インジケータは赤 → 青と変化している。
- (5) (2) - (4) を各提示手法ごと 10 回行う。飛来オブジェクトはあらかじめ用意された初速と生成位置パターン (表 4.4) の順番を入れ替えて表示する。

ポインティングタスク: 提示された視野外の目標地点の方向にコントローラを操作するタスク

- (1) 被験者は VIVE コントローラを持ち、HTC VIVE を装着して VR 環境内で基本位置からインジケータ方向を注視する。また VIVE コントローラに表示されているポインタをインジケータ方向に向ける。インジケータは 4 秒間隔で青 → 赤 → 青と交互に変化する。
- (2) インジケータが青 → 赤と変化すると同時に飛来オブジェクトと目標地点、視線誘導提示が表示される。飛来オブジェクトは放物線を描きながら移動し、0.4 秒後に消える。飛来オブジェクトを長時間表示しないことで、それぞれの視線誘導提示手法による影響が際立つことを期待している。目標地点は飛来オブジェクトの軌道上に生成され、4 秒間表示される。視線誘導提示は一つ目のタスクと同じ 5 パターンを行う。
- (3) 被験者はインジケータが青 → 赤と変化すると同時に視線を移動させずに目標地点を予測し、VIVE コントローラに表示されたポインタでポインティングを行う。インジケータが赤 → 青に変化するまでポインティングは継続する。このポインティング動作はできる限り早い動作で

表 4.4 実験に用いた飛来オブジェクト生成位置と初速データ (順番はこの通りでない)

初期生成位置			初速		
x	y	z	$\dot{x}$	$\dot{y}$	$\dot{z}$
0.102	2.13	-3.01	1.08	3.50	7.30
-0.376	2.38	-2.48	1.25	2.57	7.12
0.190	2.43	-2.16	-0.76	1.48	6.17
-0.455	2.41	-2.50	-0.85	4.00	6.75
0.110	2.15	-2.98	2.09	3.13	7.38
-0.341	2.22	-2.67	0.59	2.28	6.92
0.122	2.08	-3.01	-2.60	2.91	7.48
-0.391	2.28	-2.49	-0.63	4.23	6.62
0.169	2.58	-2.13	0.12	4.02	7.18
-0.303	2.43	-2.43	-0.35	2.33	6.13

行う。

- (4) 被験者はインジケータが赤 → 青と変化すると同時に, VIVE コントローラのポイントをインジケータ方向に戻す。
- (5) (2) - (4) を各提示手法ごと 10 回行う。飛来オブジェクトはあらかじめ用意された初速と生成位置パターン (表 4.4) で順番を入れ替えて表示する。

4.5 結果と考察

22-24 歳の大学院生 12 人で 2 つのタスクについて実験を行った。以下にそれぞれのタスクでの結果と考察を示していく。

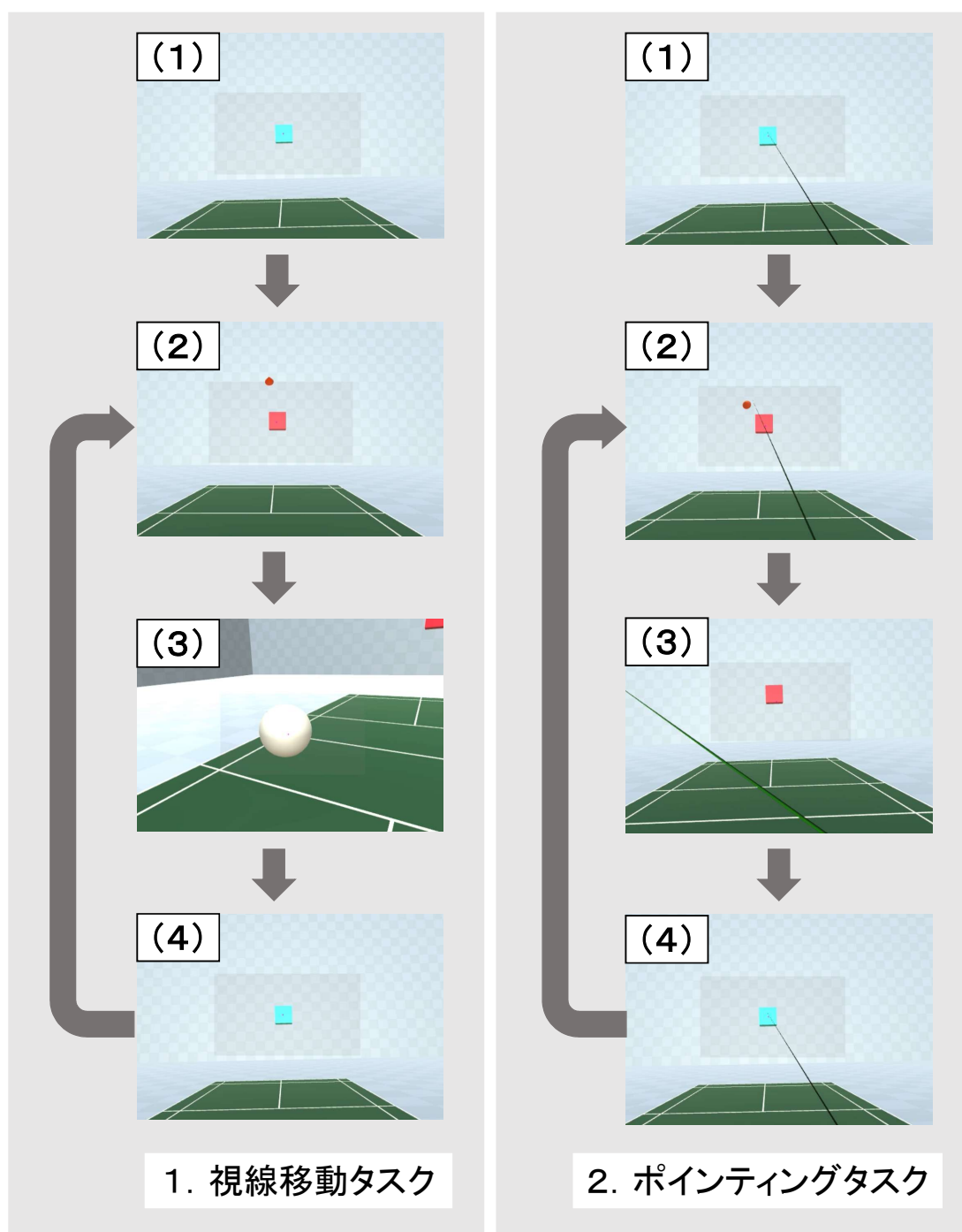


図 4.10 各実験タスクの実行画面流れ図

4.5.1 視線移動タスク

視線移動タスクでは，視線方向と目標地点との角度差を誤差として計測した．各提示手法ごと 10 回の試行を行い，その一連の動作の様子を図 4.11 (a) に，1 試行の動作の様子を拡大したもの図 4.11 (b) に一例として示している．グラフの縦軸は目標地点との角度差 ([deg])，横軸は時間 ([秒]) を示している．飛来オブジェクトと目標地点が提示されると同時に目標地点との角度差が発生しグラフ y 軸が急激に立ち上がる．被験者が目標地点に視線方向を向けるにつれ， y 軸の値が 0 に近づく様子が確認できる．グラフがマイナス方向に大きく振れている部分は，被験者が視線を基準方向に戻している部分であり，本実験では計測対象としていない．グラフ立ち上がり時の目標地点との角度差が提示手法ごとに異なるのは，目標地点生成時の被験者の視線方向に若干の違いがあるためである．

ここで，図 4.12 のグラフにおける変曲点から接線を引き，正規化された初期位置での角度 1.0 地点と接線の交点より各手法の平均をとり，目標地点の生成後 0.4 秒の時点を実験開始直後の目安とした．この時点での角度を計測することで実験開始直後の動作を比較し，実験開始時間に影響を与える提示を検証した．被験者の全試行中の 0.4 秒時点のデータをまとめたものを図 4.13 に示す．データ中の中央値で比較すると Halo が最も早く，2D Arrow End，3D Arrow と続く．提示無しの条件が最も実験開始時間が遅く分散も小さい．同様の傾向を 2D Arrow Center も示している．最初にこの 5 群が違いがあるという統計的な有意差を確認するため，一元配置分散分析を行った．その結果， $p \ll 0.01$ となり有意水準 1 % でこの 5 群は等しくないという統計的有意差が観測された ($F(4, 495) = 10.583$, $p = 3.101e - 08$)．次に，提示手法ごとの比較を行うため Holm の手法による多重検定を行った (表 4.5)．Halo 及び 2D Arrow End はその他の手法及び提示無しの条件すべてに対し， $p < 0.05$ となり統計的有意差があることが示されている．また提示無しの条件と比較して有意差は見られなかったが，2D Arrow Center と 3D Arrow の比較でも有意差が示された．

また，同様に接線と目標との角度差がなくなる角度 0.0 地点との交点から，目標地点の生成後 0.91 秒時点を実験終了時間の目安とした．この時点での角度を計測することで実験終了時の動作を比較し，実験終了時間に影響を与える提示を検証した．被験者の全試行中の 0.91 秒時点のデータをまとめたものを図 4.14 に示す．反応終

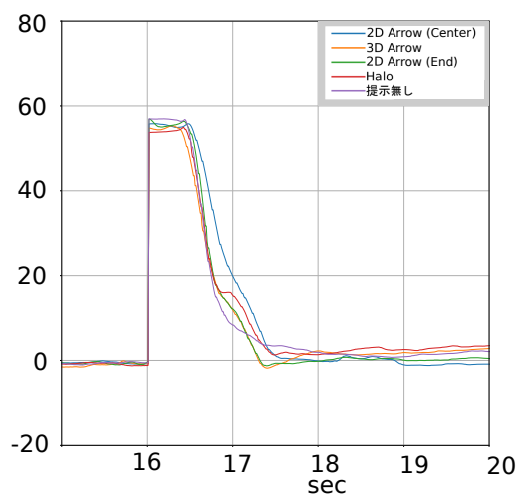
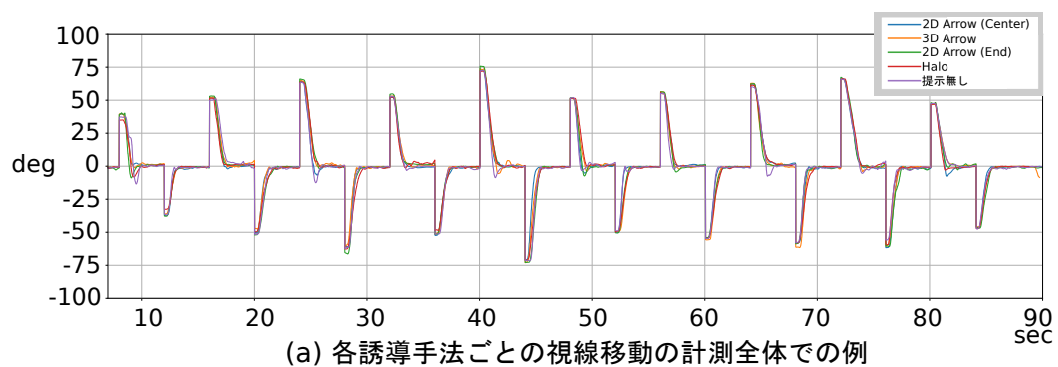


図 4.11 タスク実行中の被験者の視線方向誤差

表 4.5 多重検定結果

	2DArrowCenter	2DArrowEnd	3DArrow	Halo
2DArrowEnd	$p < 0.001$	-	-	-
3DArrow	$p < 0.05$	$p < 0.05$	-	-
Halo	$p < 0.001$	$p < 0.05$	$p < 0.001$	-
提示無し	0.30681	$p < 0.05$	0.35322	$p < 0.001$

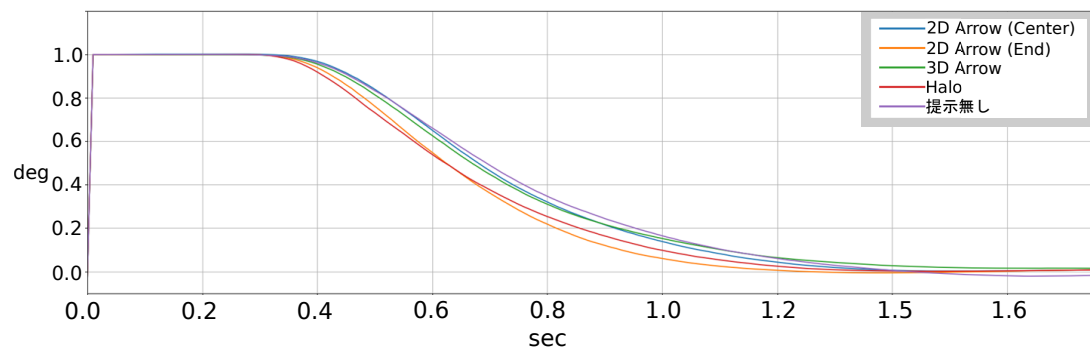


図 4.12 全被験者の視線方向誤差の平均 (角度方向正規化)

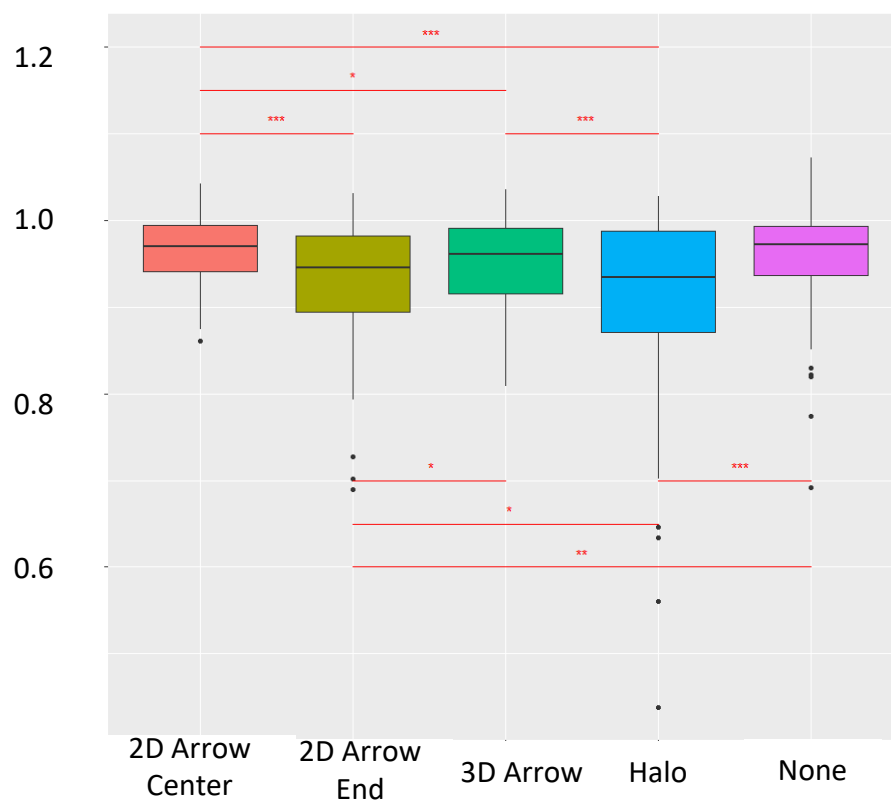


図 4.13 0.4 秒時点での角度 (正規化) の比較

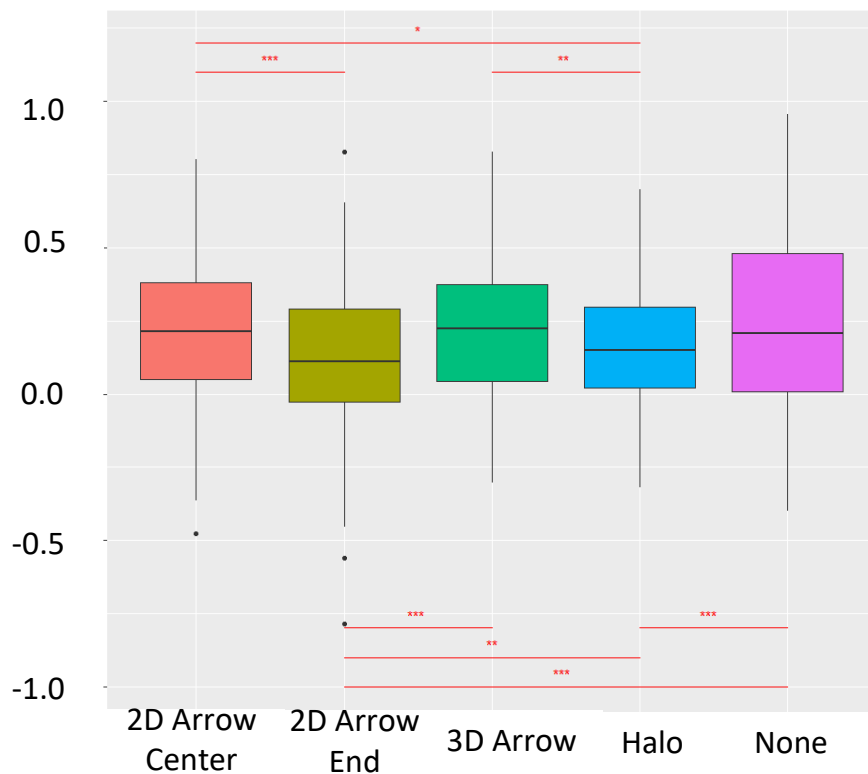


図 4.14 0.91 秒時点での角度（正規化）の比較

了時点においても一元配置分散分析で $p \leq 0.01$ となり有意水準 1 % でこの 5 群は等しくないという統計的有意差が観測された ($F(4, 595) = 4.9708, p = 0.0006013$) ため, Holm の手法による多重検定を行っている. 反応開始時点と同様に, Halo 及び 2D Arrow End が反応終了においても早く, 提示無し条件も含めたその他の手法と比較して有意差を示している. また, この時点では 2D Arrow End が Halo よりも速い収束速度を示している.

提示無しの条件が反応開始時点で最も遅かった理由としては, 被験者が飛来オブジェクトのみを手がかりにして目標位置を予測するため, 飛来方向を判断するまでに時間がかかっていると考えられる. Halo 及び 2D Arrow End の反応が開始及び終了時点でともに早かった理由としては, 人が頭部回転を行う際の眼球の動きが関係していると考えられる. 人の頭部回転では, 目標の方向にまず眼球が先行して移

表 4.6 多重検定結果

	2DArrowCenter	2DArrowEnd	3DArrow	Halo
2DArrowEnd	$p < 0.001$	-	-	-
3DArrow	0.83618	$p < 0.001$	-	-
Halo	$p < 0.05$	$p < 0.05$	$p < 0.05$	-
提示無し	0.44376	$p < 0.001$	0.49827	$p < 0.001$

動し、その後頭部が追従する形で移動する。その際に、画面端へ表示される Halo や 2D Arrow End の提示では目標方向へ眼球が移動する動作と提示の認識が同時に行われるため、反応が早かったものと考えられる。その他の提示では、画面中央部分での矢印形状を認識したのちに眼球が移動、その後頭部が回転するという動作となり反応が遅くなっていた可能性がある。2D Arrow End と Halo の比較で反応開始時点での有意差が見られた。Halo では距離の情報が大きさとして提示されているため、初期位置での Halo の提示サイズがその他の提示と比較して大きく、認識の速度に影響を与えたと考えられる。しかし、反応終了時点では 2D Arrow End が Halo よりも収束が早く、有意差を示していた。Halo では提示の形状から方向の提示が 2D Arrow End と比較して正確ではないため、最終的な収束地点の認識において 2D Arrow End がより有効であったのではないかと考えられる。2D Arrow Center と比較して 3D Arrow が反応開始時点においてより反応が早いという結果が示されている。3D Arrow では正確な方向が情報として追加されている。これによって提示される情報量が増加するため認識速度が低下する ([29]) と考えられたが、この結果から正確な方向の情報が反応速度増加に影響していると言える。図 4.15 で表されるように視野の中心付近では形状及び文字の認識能力が高いとされており、視野中心領域に表示された双方の提示に対して、文字認識に値する同様の認識負荷がかかったために、情報量の多い 3D Arrow の提示が視線誘導に効果的であったことが考えられる。

以上の結果から、本実験での設定では、中心領域より周辺領域への表示が反応速度向上に有効であること、中心領域では 3D Arrow のような方向提示程度の情報増加であれば反応の速度が増加すること、距離と方向の情報は適切に表示することで

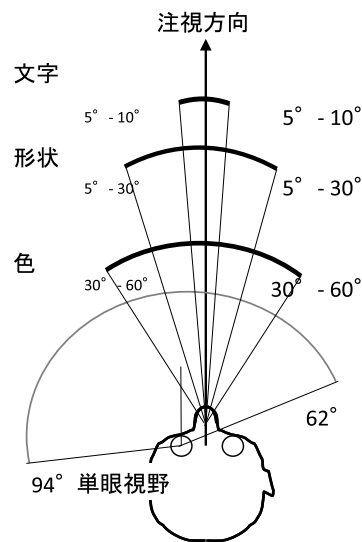


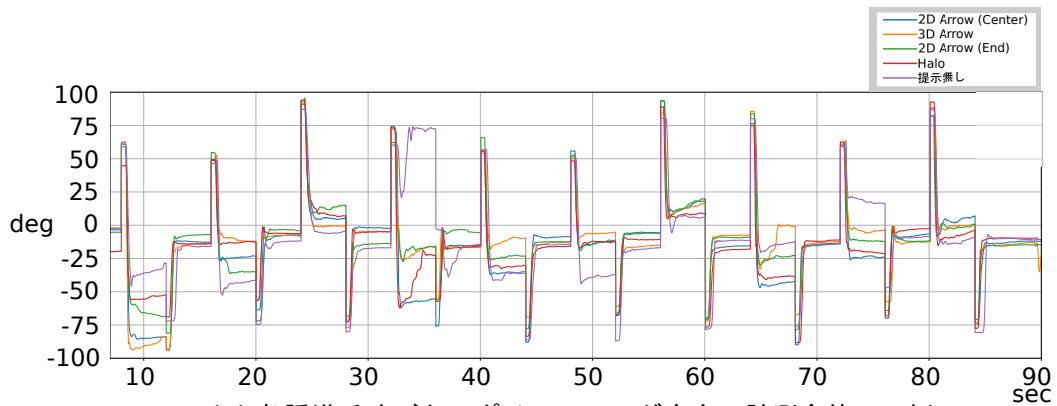
図 4.15 視野角による認識領域の違い [15]

提示を行わない場合と比較して反応速度が増加する．また，反応終了時点ではある程度正確な方向提示が必要であるという結論を得られる．

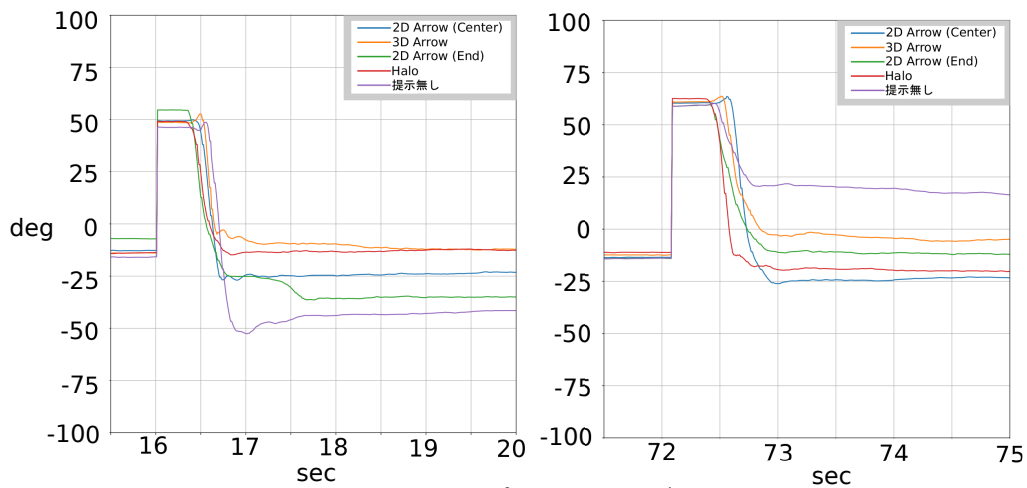
4.5.2 ポインティングタスク

提示された目標地点をポインティングするタスクでは，ポインティング方向と目標地点との角度差を誤差として計測した．上記のタスクと同様に各提示手法ごと 10 回の試行を行い，その一連の動作の様子を図 4.16 (a) に，1 試行の動作の様子を拡大したものを 4.16 (b) に一例として示す．また被験者全体の全試行における誤差の平均したものを図 4.17 に，ポインティングがマイナス方向に大きく振れることがあったため，誤差の絶対値を平均したグラフを図 4.18 に示す．縦軸は角度差の成分であり，目標地点生成時のポインティング方向と目標地点との角度差を 1 として正規化している．

このタスクでは視線の移動は行わず，提示のみを手掛かりとしてオブジェクトの方向をどの程度正確に判断可能かを検証している．したがって，重要となるのは



(a) 各誘導手法ごとのポインティング方向の計測全体での例



(b) 1試行でのポインティング方向例抜粋

図 4.16 タスク実行中の被験者のポインティング方向誤差

図 4.18 で表されるグラフの内 0.7-0.8 秒付近以降で収束した後の角度誤差の値である。参考までに反応開始直後の動作を 0.4 秒時点での角度差で比較すると、視線移動を行った前タスクと同様に Halo が最も早い状態を示している。提示無しの条件については、ポインティングのみを行うため、視線は飛来オブジェクトを捉えつつ手先動作を行うことが出来、反応速度が前タスクと比較して早くなったものと考えられる。2D Arrow Center の提示と 2D Arrow End の提示による反応速度はおおよそ前タスクと同様の傾向を示しているが、3D Arrow がやや遅い反応速度を示している。これは、前タスクにおいては 3D Arrow の提示に従って移動しながら、提

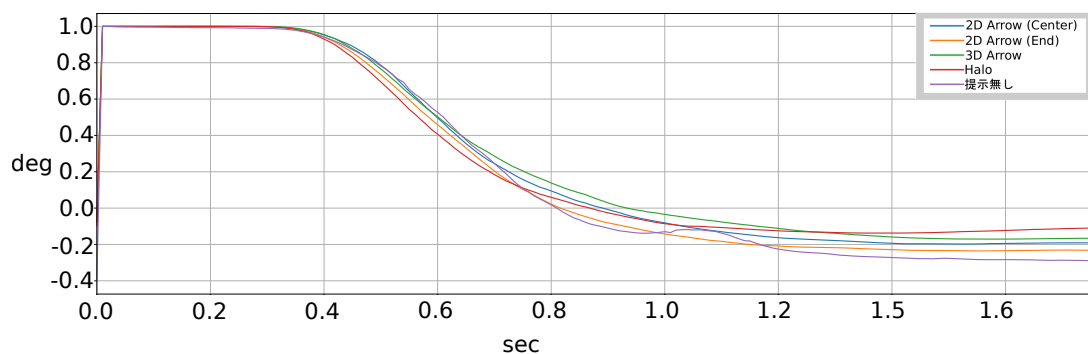


図 4.17 全被験者のポインティング方向誤差の平均 (角度方向正規化)

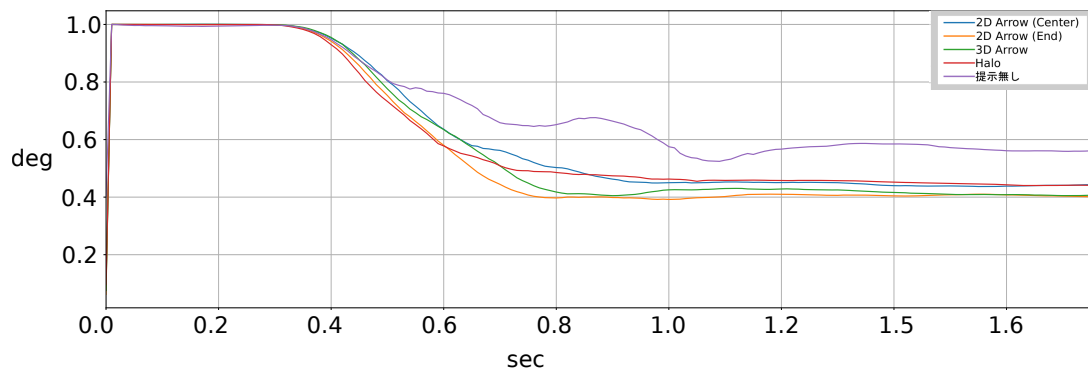


図 4.18 全被験者のポインティング方向誤差絶対値の平均 (角度方向正規化)

示の方向の変化を認識し移動方向を修正するという動作が可能であったが、今回のポインティングタスクでは、目標地点を視認できない状態でポインティングを行うため、正確な方向を提示から認識するのに時間を要したためであると考えられる。

グラフでは 0.7 秒付近から、ポインティング方向が一定の誤差値を持って収束している様子が確認できる。提示によって認識される目標時点の正確さを比較するため、図 4.17 よりポインティング位置が収束したと考えられる 1.0 秒時点での角度差について検証を行った。1.0 秒時点で計測された全試行データについてまとめた図を図 4.19 に示す。中央値ではどの提示手法においても 0 付近の値を示しており、被験者による予測の正確さが確認できる。この 5 群について統計的な有意差を確

認するため一元配置分散分析を行ったところ、データ間での有意差が見受けられなかった ($F(4, 595) = 0.2265$, $p = 0.9236$). 今回、提示の無い場合も比較要素として含めるため、誘導の提示を行った際にも 0.4 秒間飛来オブジェクトを表示していた. この表示時間が人間にとって飛来する軌道を予測するのに十分な時間であったため、今回の実験条件下では提示による差がみられなかったものと考えられる. 提示の効果を検証するためには、目標位置への手掛かりがない状態での実験が必要である. しかし、今回提示の有無にかかわらず被験者の予測位置に差がみられなかったことから、検証した提示手法が目標位置の手掛かりとなる実物体の認識を阻害していないと言える. よって、前タスクの結果も合わせ、提示によって被験者の注意を向ける方向を誘導しつつ、実世界の認識を妨げない提示が可能であることが示唆された.

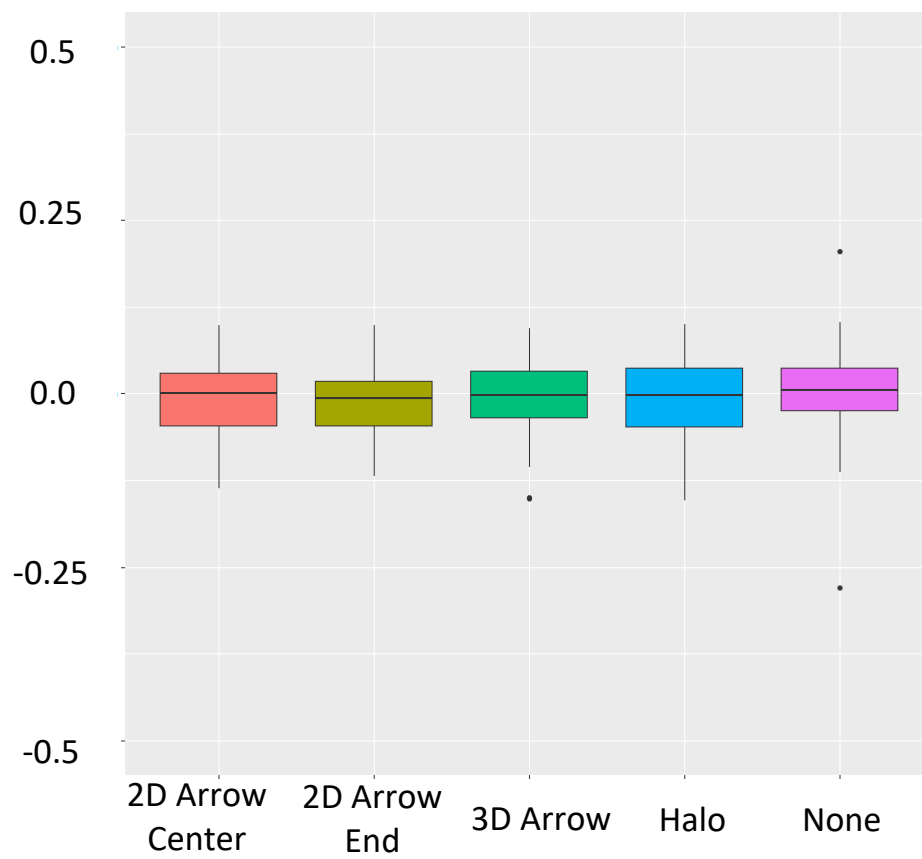


図 4.19 1.0 秒時点での角度（正規化）の比較

第 5 章 おわりに

本論文では、表示領域が狭い光学シースルー型の AR ヘッドマウントディスプレイを用いて視野外のオブジェクトに対して迅速に視線誘導を行うための効果的な要素の検証を行った。画面中央に表示する場合、画面端に表示する場合、簡易的な方向を表示、または正確な方向を表示する場合、及び距離の情報を表示をする場合を要素として提示手法を選定した。実際の AR ヘッドマウントディスプレイではユーザ位置や飛来する実物体のトラッキング誤差、及びシステムの遅れが支配的であったため、VR 環境で仮想的な AR 環境を作成して検証を行った。

実験では上記の検証要素を含んだ 2D Arrow Center, 3D Arrow, 2D Arrow End, Halo という 4 つの提示手法を実装し、提示無し条件も含めた 5 条件について検証を行った。実験では視線誘導の迅速さを検証するために、実際に視線を移動して目標地点を視認する視線誘導タスクと、提示からの目標地点予測の正確さを検証するためのポインティングタスクを行った。

視線誘導タスクでは Halo が提示無し条件と比較して速く誘導可能であるという結果を示しており、2D Arrow End の提示結果も含め画面端の提示及び距離の提示が迅速な視線誘導に効果的な要素であるという結論を得た。また、3D Arrow 及び 2D Arrow Center の比較結果より、画面中央領域における提示である程度までの情報増加は認知負荷とはならず、むしろ迅速な視線誘導に効果的に働くことが示唆された。

ポインティングタスクでは、飛来オブジェクトを手掛かりとした位置予測が十分正確であり、提示の効果を検証することが出来なかった。しかし、提示の有無にかかわらず実物体の認識精度に差がないことが示され、実環境の認識を阻害せずに迅速な視線誘導を行えることが示唆された。

今後の課題として、当初のポインティングタスクで検証が出来なかった、提示ごとの目標位置予測精度の比較を行う必要がある。また、ユーザの顔面前方方向を視線として検証をしていたが、眼球運動も考慮した方向での検証を行うことでより正確な視野外オブジェクト認識までの時間を計測することが考えられる。

謝辞

本研究を進めるにあたり，多大なるご迷惑をおかけしながらも終始温かく御指導，御鞭撻を頂いたサイバネティクス・リアリティ工学研究室 清川清 教授に心より感謝申し上げます．また副指導教員として有益な御助言を頂きましたインタラクティブメディア設計学研究室 加藤博一 教授に厚く御礼申し上げます．本研究を進めるにあたり細やかな御指導，御助言を頂いたサイバネティクス・リアリティ工学研究室 酒田信親 准教授に厚く御礼申し上げます．また，研究室生活において様々な支援をして頂いた，サイバネティクス・リアリティ工学研究室秘書 中村美奈氏に厚く御礼申し上げます．そして，互いに切磋琢磨し合い，有意義な学生生活を送るうえで世話になりましたサイバネティクス・リアリティ工学研究室の皆様へ深く感謝致します．最後に，長い学生生活を温かく見守り，支えてくださった家族に心より感謝の意を表します．

参考文献

- [1] 神原誠之ほか. 拡張現実感 (AR): 1. 基礎 1: 拡張現実感 (Augmented Reality: AR) 概論. 情報処理, Vol. 51, No. 4, pp. 367–372, 2010.
- [2] 清川清ほか. 拡張現実感 (AR): 9. 展望 1: AR のハードウェア AR 用ヘッドマウントディスプレイ技術の動向と展望. 情報処理, Vol. 51, No. 4, pp. 414–418, 2010.
- [3] 山崎章市. ヘッドマウントディスプレイ光学系. 光学, Vol. 31, No. 9, pp. 690–692, 2002.
- [4] 清川清. バーチャルリアリティにおける視覚提示技術. 知能と情報, Vol. 19, No. 4, pp. 318–325, 2007.
- [5] NASA is using HoloLens AR headsets to build its new spacecraft faster MIT Technology Review. <https://www.technologyreview.com/s/612247/nasa-is-using-hololens-ar-headsets-to-build-its-new-spacecraft-faster/>.
- [6] Steven Feiner, Blair MacIntyre, Tobias Höllerer, and Anthony Webster. A touring machine: Prototyping 3d mobile augmented reality systems for exploring the urban environment. *Personal Technologies*, Vol. 1, No. 4, pp. 208–217, 1997.
- [7] Daniel Wagner and Dieter Schmalstieg. *First steps towards handheld augmented reality*. IEEE, 2003.
- [8] Torben Schinke, Niels Henze, and Susanne Boll. Visualization of off-screen objects in mobile augmented reality. In *Proceedings of the 12th international conference on Human computer interaction with mobile devices and services*, pp. 313–316. ACM, 2010.
- [9] Bruce Thomas, Victor Demczuk, Wayne Piekarski, David Hepworth, and Bernard Gunther. A wearable computer system with augmented reality to support terrestrial navigation. In *Wearable Computers, 1998. Digest of Papers. Second International Symposium on*, pp. 168–171. IEEE, 1998.
- [10] Patrick Baudisch and Ruth Rosenholtz. Halo: a technique for visualizing off-screen objects. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human*

- factors in computing systems*, pp. 481–488. ACM, 2003.
- [11] Sean Gustafson, Patrick Baudisch, Carl Gutwin, and Pourang Irani. Wedge: clutter-free visualization of off-screen locations. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 787–796. ACM, 2008.
 - [12] Hyungeun Jo, Sungjae Hwang, Hyunwoo Park, and Jung-hee Ryu. Around-plot: Focus+ context interface for off-screen objects in 3d environments. *Computers & Graphics*, Vol. 35, No. 4, pp. 841–853, 2011.
 - [13] Alessandro Mulloni, Hartmut Seichter, and Dieter Schmalstieg. Enhancing handheld navigation systems with augmented reality. In *Proceedings for MobileHCI 2011*, pp. 7–10. ., 2011.
 - [14] Jason Wither and Tobias Höllerer. Pictorial depth cues for outdoor augmented reality. In *Wearable Computers, 2005. Proceedings. Ninth IEEE International Symposium on*, pp. 92–99. IEEE, 2005.
 - [15] 石黒祥生, 暦本純一ほか. Peripheral vision annotation: 拡張現実感環境のための視線計測による周辺視野領域情報提示手法. 情報処理学会論文誌, Vol. 53, No. 4, pp. 1328–1337, 2012.
 - [16] Frank Biocca, Arthur Tang, Charles Owen, and Fan Xiao. Attention funnel: omnidirectional 3d cursor for mobile augmented reality platforms. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human Factors in computing systems*, pp. 1115–1122. ACM, 2006.
 - [17] Bjorn Schwerdtfeger and Gudrun Klinker. Supporting order picking with augmented reality. In *Proceedings of the 7th IEEE/ACM international Symposium on Mixed and Augmented Reality*, pp. 91–94. IEEE Computer Society, 2008.
 - [18] Teresa Siu and Valeria Herskovic. Sidebars: improving awareness of off-screen elements in mobile augmented reality. In *Proceedings of the 2013 Chilean Conference on Human-Computer Interaction*, pp. 36–41. ACM, 2013.
 - [19] Firoz Alam, Harun Chowdhury, Chavaporn Theppadungporn, and Alek-

- sandar Subic. Measurements of aerodynamic properties of badminton shuttlecocks. *Procedia Engineering*, Vol. 2, No. 2, pp. 2487–2492, 2010.
- [20] 長谷川, 和田, 謙治, 村上, 正秀, 大林ほか. バドミントンシャトルコックの有する高い減速メカニズム. *ながれ: 日本流体力学会誌* = Journal of Japan Society of Fluid Mechanics, Vol. 32, No. 2, pp. 153–162, 2013.
- [21] Chak Man Chan and Jenn Stroud Rossmann. Badminton shuttlecock aerodynamics: synthesizing experiment and theory. *Sports Engineering*, Vol. 15, No. 2, pp. 61–71, 2012.
- [22] Yuta Itoh, Jason Orlosky, Kiyoshi Kiyokawa, and Gudrun Klinker. Laplacian vision: Augmenting motion prediction via optical see-through head-mounted displays. In *Proceedings of the 7th Augmented Human International Conference 2016*, p. 16. ACM, 2016.
- [23] Hidehiko Shishido, Itaru Kitahara, Yoshinari Kameda, and Yuichi Ohta. A trajectory estimation method for badminton shuttlecock utilizing motion blur. In *Pacific-Rim Symposium on Image and Video Technology*, pp. 325–336. Springer, 2013.
- [24] 宍戸英彦, 北原格, 亀田能成, 大田友一. パーティクルフィルタとカルマンフィルタを補完的に利用したバドミントン映像からのシャトル軌道推定, 動的画像処理実用化ワークショップ dia2012. 2012.
- [25] ステップワイズ回帰 - MATLAB stepwisefit - MathWorks 日本. <https://jp.mathworks.com/help/stats/stepwisefit.html>.
- [26] Marcus Tönnis and Gudrun Klinker. Effective control of a car driver’s attention for visual and acoustic guidance towards the direction of imminent dangers. In *Mixed and Augmented Reality, 2006. ISMAR 2006. IEEE/ACM International Symposium on*, pp. 13–22. IEEE, 2006.
- [27] Cha Lee, Scott Bonebrake, Tobias Hollerer, and Doug A Bowman. A replication study testing the validity of ar simulation in vr for controlled experiments. In *Mixed and Augmented Reality, 2009. ISMAR 2009. 8th IEEE International Symposium on*, pp. 203–204. IEEE, 2009.
- [28] VIVE™ 日本 | VIVE ハードウェアの購入. <https://www.vive.com/jp/>

product/.

- [29] 大山正. 反応時間研究の歴史と現状. 人間工学, Vol. 21, No. 2, pp. 57–64, 1985.