

筑波大学大学院博士課程

システム情報工学研究科修士論文

頭部表面でのジェスチャによる
全天球動画像の視点操作手法

北川 巧

修士（工学）

（コンピュータサイエンス専攻）

指導教員 高橋 伸

2020年3月

概要

Head Mounted Display を用いた全天球動画像の視聴において、ヘッドトラッキングによる視点操作手法が一般的に利用される。ヘッドトラッキングは頭部の位置や向きに基づいて視点操作が行われる。そのため、周囲に障害物のない一定の空間が必要となる。また、頭部運動による疲労感や 3D 酔いの生起も問題視されている。

本研究ではまず、上記の問題点を解決するための、頭部表面でのジェスチャによる視点操作手法を提案した。この手法は、ユーザの頭部をカメラに見立てた上で、これを直接手で触って視点を操作するイメージに基づいている。

本研究の目的は、この操作イメージに基づく視点操作手法の設計と開発を行うことと、その視点操作手法を実装するための頭部装着型インタフェースの開発である。

我々はまず、頭部装着型インタフェースの試作として、ヘルメット型タッチインタフェースを製作した。このインタフェースでは、ユーザのタッチ取得に静電容量式タッチセンサを複数個用いていた。また、試用後のフィードバックとして、より連続的なタッチ取得による滑らかな視点操作を実現することと、より軽量で装着しやすいインタフェースが望ましいということがわかった。

この知見を基に、まず頭部表面でのジェスチャによる視点操作手法の設計と開発から行うこととした。そのために、ユーザの両手及び頭部の位置をリアルタイムに計測、トラッキングできるシステムを用い、これによる視点操作を実現する必要があった。そこで、本研究では、モーションキャプチャを用いた視点操作システムを構築した。その結果、ヘルメット型タッチインタフェースでは不可能であった、ユーザの両手と頭の連続的な位置の取得や、手のホバー動作、角度の検出が可能となった。また、この視点操作システムを用いた VR アプリケーションの詳細と簡単な実験の内容、結果についても示した。

その後、頭部をカメラと見立てた視点操作手法と、ユーザの入力・動作を取得するセンシング手法およびそのインタフェースについて議論し、これらの問題点と、視点操作手法を実行する位置やインタフェースの形状などに対する研究の方向性を示した。

結果として、頭部運動を必要としない全天球動画像における視点操作手法を実現し、簡単な評価まで行なうことができた。頭部をカメラと見立てた視点操作手法は、両手と頭部のトラッキングに問題がなければ違和感なく操作できることもわかった。さらに、座ったまま体の向きを変えずに全天球動画像を問題なく視聴できるという既存手法に対する優位性も確認できた。今後、さらなる評価実験を行うことで、ユーザにとってより自然で使いやすく、酔いづらい視点操作手法を設計する必要性がある。

目次

| | |
|--|-----------|
| 第1章 序論 | 1 |
| 1.1 背景 | 1 |
| 1.2 頭部表面でのジェスチャによる視点操作手法 | 3 |
| 1.3 本研究の目的 | 3 |
| 1.3.1 視点操作手法の設計と開発 | 3 |
| 1.3.2 頭部装着型インタフェースの開発 | 3 |
| 1.4 本論文の貢献 | 4 |
| 1.5 本論文の構成 | 4 |
| 第2章 関連研究 | 5 |
| 2.1 映像出力装置に関する研究 | 5 |
| 2.2 視点操作インタフェースに関する研究 | 5 |
| 2.3 3D酔いに関する研究 | 6 |
| 2.4 本研究の位置付け | 6 |
| 第3章 ヘルメット型タッチインタフェースによる視点操作 | 7 |
| 3.1 概要 | 7 |
| 3.2 システム構成 | 7 |
| 3.3 ハードウェア | 8 |
| 3.3.1 ヘルメット型タッチインタフェース部 | 8 |
| 3.3.2 タッチ検出部 | 11 |
| 3.3.3 PCへ送信するタッチ情報について | 12 |
| 3.4 ソフトウェア | 12 |
| 3.4.1 タッチ位置に基づく視点操作 | 16 |
| 3.4.2 タッチジェスチャによる視点操作 | 16 |
| 3.5 本インタフェースの利用に際する調査 | 19 |
| 3.5.1 体験者の意見や指摘 | 20 |
| 3.6 ヘルメット型タッチインタフェースの今後の課題 | 21 |
| 第4章 モーションキャプチャを用いた視点操作システムによる視点操作 | 22 |
| 4.1 概要 | 22 |
| 4.2 視点操作システム構成 | 22 |

| | | |
|--------------|--------------------------------------|-----------|
| 4.2.1 | OptiTrack | 23 |
| 4.3 | 頭部表面でのジェスチャによる視点操作手法 | 26 |
| 4.3.1 | 視点操作手法の概要 | 26 |
| 4.3.2 | 片手スライド操作 | 28 |
| 4.3.3 | 両手スライド操作 | 28 |
| 4.3.4 | 回転操作 | 29 |
| 4.3.5 | 反転処理 | 29 |
| 4.4 | 視点操作用 VR アプリケーション | 30 |
| 4.5 | 評価実験 | 31 |
| 4.5.1 | 実験目的 | 34 |
| 4.5.2 | 被験者 | 34 |
| 4.5.3 | 実験内容 | 34 |
| | 実験前アンケート | 35 |
| | 実験後アンケート | 35 |
| 4.5.4 | 実験結果 | 35 |
| 4.5.5 | 本実験に対する考察 | 38 |
| | 被験者 A に対する考察 | 39 |
| 4.5.6 | 本実験に対する結論 | 39 |
| 第 5 章 | 議論 | 41 |
| 5.1 | 頭部をカメラと見立てた視点操作手法に対する議論 | 41 |
| 5.2 | ユーザの入力やその動作を取得する頭部装着型インタフェースに対する議論 . | 41 |
| 第 6 章 | 結論 | 43 |
| | 謝辞 | 44 |
| | 参考文献 | 45 |
| 付録 A | | 47 |
| A.1 | SSQ アンケート | 47 |
| A.2 | SUS アンケート | 50 |

目次

| | | |
|------|---|----|
| 1.1 | PC や外部センサとの接続が必要な HMD の例 (HTC VIVE, https://www.vive.com/jp/product/) | 2 |
| 1.2 | 単一で動作可能な HMD の例 (Oculus Quest, https://www.oculus.com/quest/) | 2 |
| 3.1 | ヘルメット型タッチインタフェースの利用イメージ | 8 |
| 3.2 | ヘルメット型タッチインタフェースによるシステム構成図 | 9 |
| 3.3 | リード線の配線および固定 | 9 |
| 3.4 | 配線を行なったヘルメットの外観図 | 10 |
| 3.5 | タッチセンサの構造 | 10 |
| 3.6 | 54 点のタッチセンサを実装したヘルメットの外観 | 11 |
| 3.7 | 1 点のタッチ検出を行う回路 | 12 |
| 3.8 | 27 点のタッチ検出を行う Arduino 用 HAT 基盤の回路図 | 13 |
| 3.9 | 27 点のタッチ検出を行う Arduino 用 HAT 基盤の配線図 | 14 |
| 3.10 | HAT 基盤を装着した 2 台の Arduino Mega 2560, (a) : 正面, (b) : 側面 | 15 |
| 3.11 | タッチ位置に基づく視点操作のイメージ図, (a) : 頭頂部へのタッチ, (b) : 後頭部へのタッチ, (c) : 左側頭部へのタッチ, (d) : 右側頭部へのタッチ | 16 |
| 3.12 | ヘルメット型タッチインタフェースにおけるジェスチャによる視点操作, (a) : 側頭部における片手スライド操作, (b) : 頭頂部における片手スライド操作, (c) : 側頭部における両手スライド操作, (d) : 前頭部における両手ピンチ操作 | 17 |
| 3.13 | 各視点操作と手の動作方向に基づく 12 種類の MHI の例 | 18 |
| 3.14 | MHI の作成イメージ | 19 |
| 3.15 | ジェスチャの登録, 学習, 識別を行うアプリケーション | 20 |
| 4.1 | 視点操作システム構成図 | 23 |
| 4.2 | 視点操作システムの構築風景 | 24 |
| 4.3 | HMD と両手に装着するマーカプレート | 25 |
| 4.4 | マーカを取り付けた HMD | 25 |
| 4.5 | マーカが取り付けられたマーカプレートを手に装着した状態 | 26 |
| 4.6 | 頭部表面でのジェスチャによる視点操作のイメージ | 27 |
| 4.7 | (a):片手スライド操作による視点操作, (b):反転処理を有効にした時の視点操作結果 | 28 |

| | | |
|------|--|----|
| 4.8 | (a):両手スライド操作による視点操作, (b):反転処理を有効にした時の視点操作結果 | 29 |
| 4.9 | (a):回転操作による視点操作, (b):反転処理を有効にした時の視点操作結果 | 30 |
| 4.10 | 反転された頭部表面でのジェスチャによる視点操作のイメージ | 31 |
| 4.11 | 視点操作 VR アプリケーションの利用図, (a):ターゲット未選択状態, (b):ターゲット選択状態 | 32 |
| 4.12 | 視点カメラとターゲットのなす角による選択判定図, (a):8度未満, (b):8度以上 | 33 |
| 4.13 | 1つのターゲット探索にかかる所要時間の平均 (5つ選択の場合と10個選択の場合) | 36 |
| 4.14 | 各被験者の実験前後のSSQスコア, グラフ1:N (気持ち悪さ)スコアの変化, D (ふらつき感)スコアの変化, O (眼の疲労感)スコアの変化, TS (トータルスコア) の変化 | 37 |

表 目 次

| | |
|-------------------------------------|----|
| 4.1 各被験者の SUS スコアおよび平均スコア | 38 |
|-------------------------------------|----|

第1章 序論

本論文では、頭部表面で行うジェスチャを用いた全天球動画像における視点操作手法について述べる。本章では、まず背景として従来の全天球動画像における視点操作手法およびインタフェース研究の概要を示し、それらの問題点について述べる。次に、それらの問題点を解決するための提案手法として、頭部表面でのジェスチャによる視点操作手法について述べる。次に、本研究の目的と検討事項を示す。最後に、本論文の構成について述べる。

1.1 背景

今日、視覚的な表現手法として全天球動画像がしばしば利用されている。全天球動画像とは、ユーザがある一点から上下左右全方位の動画像を視聴できる動画像のことを指す。特に今、Head Mounted Display (以下、HMD) を用いた Virtual Reality (以下、VR) メディアが黎明期にある。

HMDとは、頭部に装着するディスプレイである。利用に際して、演算処理装置やオペレーティングシステムを備えておらず、PCと接続が必要なもの(図1.1)と、HMD単体で動作可能なもの(図1.2)がある。HMDによる全天球動画像コンテンツの特徴として、ヘッドトラッキングに基づく映像の視点操作による高い没入感が挙げられる。ヘッドトラッキングとは、HMDの内蔵センサや外部に設置したセンサを用いて、ユーザの頭部の位置や向き、角度をリアルタイムに計測する技術である。これにより、ユーザはVR内の視点を実世界と同じように操作できるため、高い没入感を得ることができる。

ヘッドトラッキングを用いて、VRゲームなどのインタラクティブな全天球動画像コンテンツを利用する際、ハンドヘルドコントローラやユーザ自身の移動による操作が伴うため、ユーザの周囲に障害物が存在しない一定のスペースが要求される。しかし、一部のHMDはPCと接続する必要があることや、特に日本においては狭小な住宅が多く、このようなスペースを確保して利用できるユーザは限られてしまうという問題がある。また、ヘッドトラッキングによる操作には能動的な頭部運動および身体的動作が必要となるため、ユーザの疲労や3D酔いが生じられやすいという問題もある。

先行研究として、ドーム型VR装置に関する研究であるCyberDome[1]やCompoundDome[2]がある。これらのVR装置の特徴は、大型ドームへの映像投影による高い没入感と、映像外の視野が解放されていることで3D酔いの軽減を実現した所にある。特に、CompoundDomeはユーザの身体に装着するタイプの半透明ドームを用いており、3D酔いを軽減するとともにCyberDomeの課題であった可搬性の低さを解消している。一方で、映像の表示域が身体の正



図 1.1: PC や外部センサとの接続が必要な HMD の例 (HTC VIVE, <https://www.vive.com/jp/product/>)



図 1.2: 単一で動作可能な HMD の例 (Oculus Quest, <https://www.oculus.com/quest/>)

面方向に固定されるため、頭部の方向も前方方向に固定されてしまうという問題がある。これは、3D酔いの軽減においてはメリットであるが、没入感においては頭部方向が制限されてしまうためにデメリットとなる。

1.2 頭部表面でのジェスチャによる視点操作手法

上述した問題を解決するため、一般的な HMD を用いた全天球動画像の利用において、頭部運動を必要とせず、自然な操作感を実現する新たな視点操作手法が求められている。そこで、頭部表面でのジェスチャによる視点操作手法を提案する。提案手法は、ユーザの頭部をカメラに見立て、これを直接手で触って操作するイメージに着目した頭部表面において片手ないし両手で行うジェスチャに基づく視点操作手法である。

頭部をカメラに見立てたイメージによる視点操作に着目した理由を次に示す。まず、基本的に VR において視点カメラの位置はユーザの頭部と一致するため、このイメージに基づく操作であれば没入感を損ないにくいことが考えられる。次に、手でカメラを動かすイメージは、自動車を運転する際の運転手のように、3D酔いを生起しづらいことが考えられる。最後に、操作を行わないときは両手がフリーになるという点が挙げられる。

1.3 本研究の目的

本研究の目的は、視点操作手法の設計と開発を行うことと、その操作手法を実現するための頭部装着型インタフェースの開発を行うことである。それぞれ 1.3.1 と 1.3.2 にて詳しく説明する。この研究の流れとしては、まず視点操作手法の設計と開発を行なった後に、それを実装できる頭部装着型インタフェースの設計と開発を行うことで、提案手法を実利用できるシステムとしての実現を目指すこととなる。

1.3.1 視点操作手法の設計と開発

まず、一般的な HMD による全天球動画像の利用において、簡単かつ自然な操作感の視点操作手法の設計と開発を行う必要がある。

この研究目的における検討事項としては、ユーザが頭部表面で行う手の動き方であるジェスチャ自体の動作や、そのジェスチャに対するコンテンツ内における視点の変化速度、視点の変化方向などが挙げられる。

1.3.2 頭部装着型インタフェースの開発

HMD と一体化された、頭部表面でのジェスチャによる視点操作を可能にする頭部装着型インタフェースの開発を行う必要がある。

この研究目的における検討事項としては、ユーザの手のタッチや動きを認識するためのセンシング手法や、頭部に装着するためのインタフェースの形質や形状、装着方法などが挙げられる。

1.4 本論文の貢献

本論文の貢献を以下に示す。

- Arduino Mega 2560 用の 27 点の静電容量式タッチを取得できる HAT 基盤の設計と開発
- HAT 基盤を用いたヘルメット型タッチインタフェースの設計と開発
- ヘルメット型タッチインタフェースを用いた視点操作手法の設計と実装
- モーションキャプチャを用いた頭部と両手のトラッキングが可能な視点操作システムの構築
- 視点操作システムを用いた視点操作手法の設計と開発
- 視点操作システムを用いた視点操作 VR アプリケーションの開発
- 視点操作システムを用いた視点操作手法の評価実験を実施
- 視点操作システムを利用する際の最適なセッティング環境の検討
- 頭部をカメラに見立てた視点操作手法の有用性の検討
- 視点操作システムにおけるトラッキング精度の課題に対する改善策の検討

1.5 本論文の構成

本論文の構成を述べる。本章では本論文の背景、目的およびアプローチについて述べた。第 2 章では関連研究と本研究の位置付けを述べる。第 3 章では頭部周辺でのジェスチャによる視点操作を実現する頭部装着型インタフェースの試作である、ヘルメット型タッチインタフェースについて述べる。第 4 章ではモーションキャプチャを用いた頭部周辺でのジェスチャによる視点操作を実現する視点操作システムの構築と、利用できる視点操作手法、実験とその評価について述べる。第 5 章では本研究における議論点を述べる。最後に第 6 章にて結論を述べる。

第2章 関連研究

本章では、本研究に関連する研究とその立ち位置について述べる。2.1では、全天球動画像を表示するための装置に関する研究の特徴と問題点について述べる。2.2では、全天球動画像においてユーザが操作を行うためのインタフェースに関する研究の特徴とその問題点について述べる。2.3では、3D酔いに関する研究について述べる。2.4では、本研究の立ち位置について述べる。

2.1 映像出力装置に関する研究

ドーム型 VR 表示装置である CyberDome[1]、比較的小型で装着できるタイプのドーム型 VR 表示装置 [3] などがある。これらのドーム型 VR 表示装置の特徴として、プロジェクタを用いたドーム内側表面への映像投影による広い映像視野に伴う高い没入感があげられる。一方で、比較的大型なドーム装置とプロジェクタを用いるため、大規模なシステム構築が必要となるため、可搬性が芳しくないという問題がある。ここで、CyberDome[1]においてはドームとユーザの身体が向き合っている必要があるため、後ろを振り向いた上で映像を視認できず、ヘッドトラッキングによる視点操作を利用できないという問題がある。また、暦本らの CompoundDome[2]では、半透明ドームを使用しており、ドーム外の観測者とコミュニケーションが取れること、酔いづらいことが特徴である。一方で、半透明ドームへの映像投影のため、没入感が低下してしまうことが問題である。

2.2 視点操作作用インタフェースに関する研究

GloveFish, GloveMouse[4]は6-Degrees of Freedom (以下, DoF) の入力インタフェースである。これらは、上下左右前後の3DoFで移動でき、かつヨー、ロール、ピッチの3DoFで回転できるという特徴を持つインタフェースを示している。

棒状のタンジブルインタフェースに関する研究 [5] では、棒状インタフェースを傾けたり、回転させたり、表面をタッチすることで、仮想空間内の3DCGオブジェクトの向きやスライス表示面を制御できるという特徴を持つインタフェースを示している。

CubicMouse[6]では、キューブの中央を通過する、X,Y,Z軸を制御できる3本のロッドと、キューブ上面に配置されたボタンを用いて、仮想空間(3DCG)内に存在するオブジェクトの位置や方向、スライス面の制御が可能という特徴を持つインタフェースを示している。

これらのインタフェースは、実際に目視するか、手によって形状を確認しながら操作しなければならない。特に、GloveFish, GloveMouse[4], その他のVR環境における操作、制御を行うインタフェースや手法の研究[7, 8]においては、基本的に机上や床面などの特定の場所に設置されたインタフェースであることから、ユーザの姿勢が制限されるという問題がある。

2.3 3D酔いに関する研究

HMDを用いて仮想環境を利用した際の調査を行なった研究[9, 10]では、ユーザが副作用を感じたことが報告されている。特に、この副作用を調査した研究[3, 11]では、HMDを利用して激しい動きの映像や立体映像を視聴した後、およそ20～30分の間、姿勢の動揺や3D酔いの症状が悪化することが示されている。その一方で、HMDを利用した映画鑑賞では、吐き気や姿勢の動揺を引き起こすことなく、リラックス出来たということも報告されている。

HMDの性能が3D酔いに及ぼす影響を調査した研究[12]では、HMDのフレームレート性能が3D酔いに関する悪影響を与えることを示している。また、そもそもユーザが能動的な頭部運動を行うこと自体が3D酔いの一因となることも示されている。

2.4 本研究の位置付け

2.1で述べた表示装置に対し、本研究の表示装置には市販されているHMDを利用する。これにより、HMDが持つ本来の高い可搬性と高精細な映像表示を維持しつつ、頭部の動きが制限されないことでヘッドトラッキングも併用できる操作手法を提案する。

2.2で述べた視点操作を行うインタフェースに対し、本提案手法ではカメラに見立てた頭部表面でのジェスチャによる視点操作を実現することで、直接カメラを触って操作するような直感的な視点操作手法を提供することができる。また、視点を操作しない際は、ユーザの姿勢や手の位置が制限されないことから、上述した常に把持する必要がある操作インタフェースに比べて、比較的疲労が溜まりにくいことが考えられる。

2.3で述べた3D酔いに対して、本提案手法は頭部運動を伴わないことから3D酔いを引き起こしにくい操作手法であると考えられる。

第3章 ヘルメット型タッチインタフェースによる視点操作

本章では、頭部表面でのジェスチャによる視点操作を実現するための、ヘルメット型タッチインタフェースについて説明する。まず、3.1にて本インタフェースの概要を述べる。次に、3.2にて本インタフェースを用いたシステム構成を述べる。その後、3.3でハードウェア構成について説明し、3.4で視点操作を行うためのソフトウェアについて説明する。また、3.5で本インタフェースの使用感についての調査結果を紹介し、3.6にて本インタフェースの今後について述べる。

3.1 概要

本インタフェースは、市販されているオートバイ用ヘルメットの表面に、銅箔テープと Arduino Mega 2560 を用いたタッチセンサを 54 点実装したものである。ユーザは、PC を用いて全天球動画像メディアを利用する際に、HMD と合わせて本インタフェースを装着することによって頭部周辺でのタッチジェスチャを用いた視点操作を行うことができる。本インタフェースの利用イメージを図 3.1 に示す。

本研究でこのインタフェースに実装した視点操作手法は、3.4.1 タッチ位置に基づく視点操作と、3.4.2 タッチジェスチャによる視点操作の二種類である。視点操作は作成した Unity アプリケーション上にて利用することができる。また、3.4.2 タッチジェスチャによる視点操作においては、Unity アプリケーションに加えてジェスチャ認識用の C# アプリケーションを必要とする。

3.2 システム構成

本インタフェースを用いたシステム構成図を図 3.2 に示す。本システムは、大きく分けてソフトウェア部、タッチ検出部、ヘルメット型タッチインタフェース部により構成される。

ヘルメット型タッチインタフェース部は、オートバイ用のヘルメットの表面にタッチセンサを配置したものである。ヘルメット後方から束ねられた 54 本のリード線が伸びており、これをタッチ検出部に接続して利用する。

タッチ検出部は、ヘルメット型タッチインタフェースのタッチセンサを用いてタッチを検出する。主にタッチ検出回路を搭載した 2 台のマイクロコンピュータ Arduino Mega 2560 に

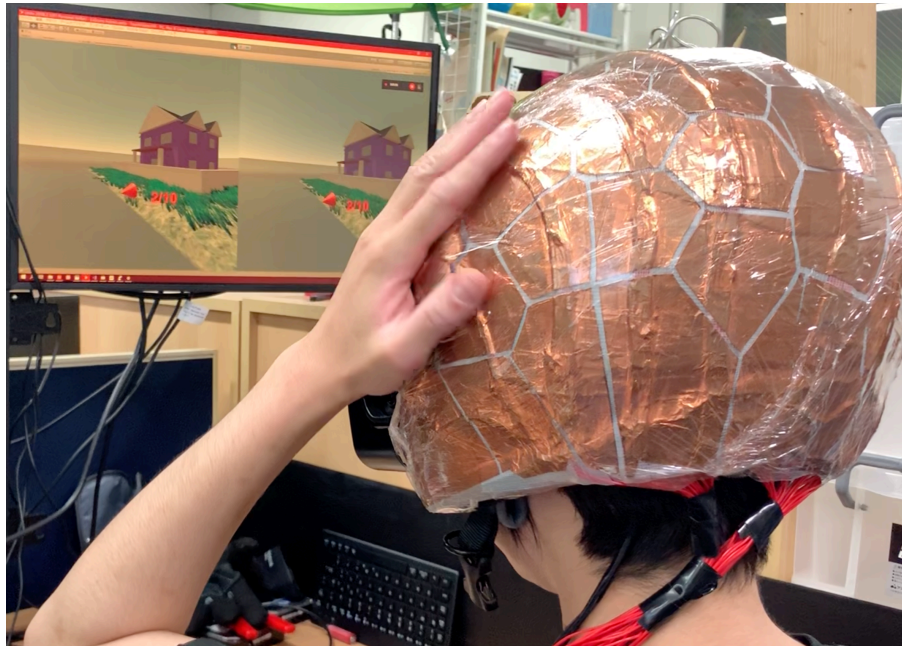


図 3.1: ヘルメット型タッチインタフェースの利用イメージ

よって構成されている。このマイコンを USB ケーブルにて PC に接続して利用する。

ソフトウェア部は、タッチ検出部から取得できる 54 点のタッチ情報を用いて、タッチ状態の判定やジェスチャの識別、Unity で作成された VR アプリケーションの視点操作などを行う。ここで、映像の出力装置として HMD を接続する。

3.3 ハードウェア

図 3.2 に示したとおり、本システムのハードウェアは主にヘルメット型タッチインタフェース部とタッチ検出部により構成される。3.3.1 ヘルメット型タッチインタフェース部では、利用したヘルメットやタッチセンサの作成、配線およびその固定方法について説明する。3.3.2 タッチ検出部では、Arduino Mega 2560 に接続した回路の作成、およびマイコンに書き込むタッチ検出プログラムについて説明する。

3.3.1 ヘルメット型タッチインタフェース部

本インタフェースは、市販のヘルメットの表面に 54 本のリード線を配線、これを養生テープで固定し、端部のみを養生テープ内側から引き出している。図 3.3 に示すようにヘルメット表面側からリード線、養生テープ、皮膜を剥いたリード線端部となっている。この引き出

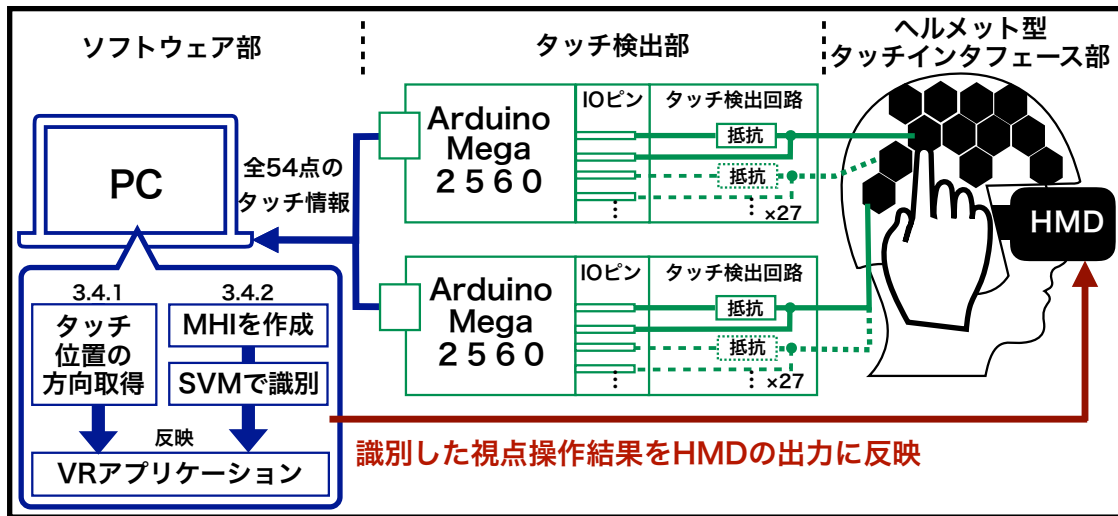


図 3.2: ヘルメット型タッチインタフェースによるシステム構成図

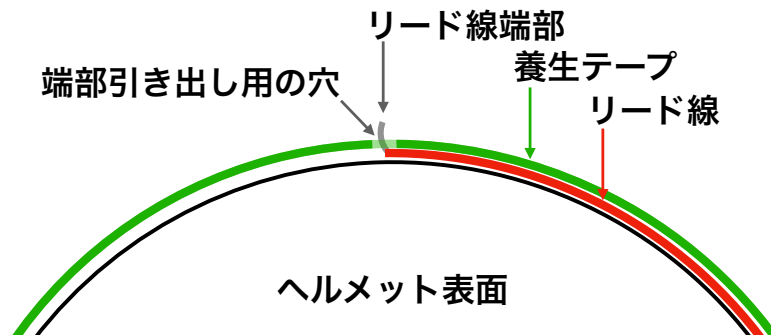


図 3.3: リード線の配線および固定

されたリード線端部はヘルメット表面に54点存在し、お互いの端部間の距離が約5cm程度となるように配置している。この配線を完了した状態のヘルメットの外観を図3.4に示す。

各タッチセンサは、引き出したリード線端部を銅箔テープに開けた穴に通し、銅箔テープ表面に半田付けすることで形成される。この時、半田付け部分にユーザが触れないように、上から両面導通タイプの銅箔テープを貼ることで保護している。この構造を図3.5に示す。タッチセンサの形状は、ボロノイ図¹を参考に、隣接するリード線端部同士で形成される垂直二等分線を元に銅箔テープを切り分けることで決定される。以上により作成されたヘルメット型タッチインタフェースの外観を図3.6に示す。

54本のリード線の非半田付け側は、ヘルメット後方から取り出され、27本ずつPHDR-28VS²

¹Voronoi Diagram:<http://mathworld.wolfram.com/VoronoiDiagram.html> [2020/01/08 閲覧]

²<https://www.monotaro.com/p/0071/5365/>



図 3.4: 配線を行なったヘルメットの外観図

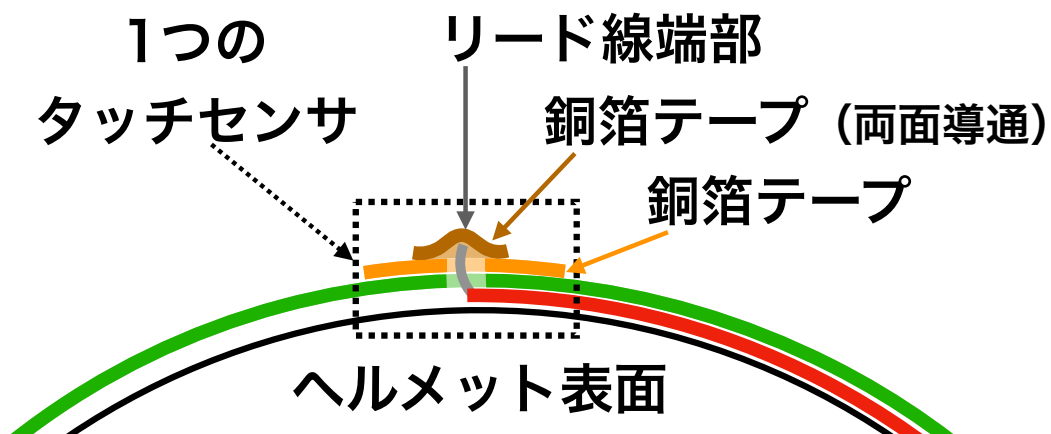


図 3.5: タッチセンサの構造



図 3.6: 54 点のタッチセンサを実装したヘルメットの外観

コネクタに圧着端子 BPHD-001T-P0.5³を用いて接続し、2つの接続用コネクタとなっている。

ヘルメット自体には、市販されているマルシン工業製のセミジェットヘルメット M-520⁴の XL サイズを利用した。ここで、HMD を装着する際にこのヘルメット前面にあるシールド部分が干渉するため、これを取り外して⁵利用する。

3.3.2 タッチ検出部

タッチ検出部では、27 点のタッチを検出できる回路を Arduino Mega 2560 用の Hardware Attached on Top (以下、HAT) 基盤⁶として設計、開発して利用している。

1 点のタッチ検出を行う回路図を図 3.7 に示す。これは、2つのデジタル I/O ピンを 1kΩ の抵抗を介して接続したものに、タッチセンサとなる銅箔部分を抵抗の片側に接続したものとなる。したがって、1 枚の HAT 基盤には 27 本の抵抗と、ヘルメット型タッチインタフェース部のコネクタ (オス) と接続するための S28B-PHDSS(LF)(SN)⁷コネクタ (メス) が実装されている。また、本研究では Arduino Mega 2560 のアナログピンをデジタルピンとして利用している。

本 HAT 基盤の回路図を図 3.8 に、配線図を図 3.9 に示す。配線図では、青色の配線が表側、赤色の配線が裏側配線となっている。各 I/O ピンと抵抗が接続されており、その一端が基盤上部に配置されたコネクタピンにも接続されている。また、2 台の Arduino Mega 2560 に完成

³<https://www.monotaro.com/p/0071/4367/>

⁴M-520 : <http://www.marushin-helmet.co.jp/helmets/semi.html#m520> [2020/01/08 閲覧]

⁵シールド着脱方法 : http://www.marushin-helmet.co.jp/pdf/shield/m_520_s.pdf [2020/01/08 閲覧]

⁶HAT 基盤とは、装着対象となるマイコンボードなどを簡単に拡張することができる基盤のことである

⁷<https://www.monotaro.com/p/0071/6038/>

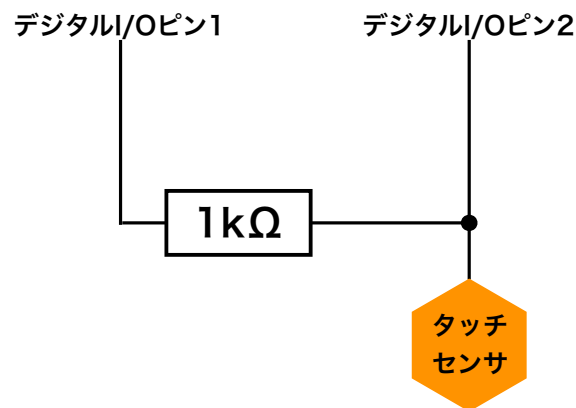


図 3.7: 1 点のタッチ検出を行う回路

した HAT 基盤を装着した写真を図 3.10(a),(b) に示す。ここで，Arduino Mega 2560 と HAT 基盤は，HAT 基盤に実装されたピンヘッドと Arduino Mega 2560 側のピンソケットにて接続されている。

3.3.3 PC へ送信するタッチ情報について

Arduino Mega 2560 から PC へ送信されるタッチ情報の形式について説明する。タッチの検出については，Capacitive Sensing Library⁸を用いている。このライブラリによって取得できるデータは，タッチセンサにタッチした際に，2つの I/O ピンの状態が一致するまでの時間である。この時間によるタッチ検出について詳しく説明すると，片方の I/O ピン（出力）を HIGH にしてタッチセンサに指でタッチした際に，指とセンサ間に生成されるコンデンサによって，もう一方の I/O ピン（入力）の状態が HIGH に一致するまでの時間が増加する。この時間変化を基にタッチの有無を検出できる。

これらの時間データ群は，タッチセンサの数だけカンマ区切りで送信される。本研究では 2 台の Arduino Mega 2560 を用いるため，カンマ区切りされた 27 個のデータセットを改行区切りで 2 つずつ PC 側で取得することができる。

3.4 ソフトウェア

図 3.2 に示したとおり，本システムのソフトウェアは，単一のタッチ位置に基づく視点操作を行うことができる VR アプリケーションと，全てのタッチ点のデータを解析してジェスチャを識別し，対応した視点操作を行うことができる VR アプリケーションによって構成されている。

⁸<https://playground.arduino.cc/Main/CapacitiveSensor/>

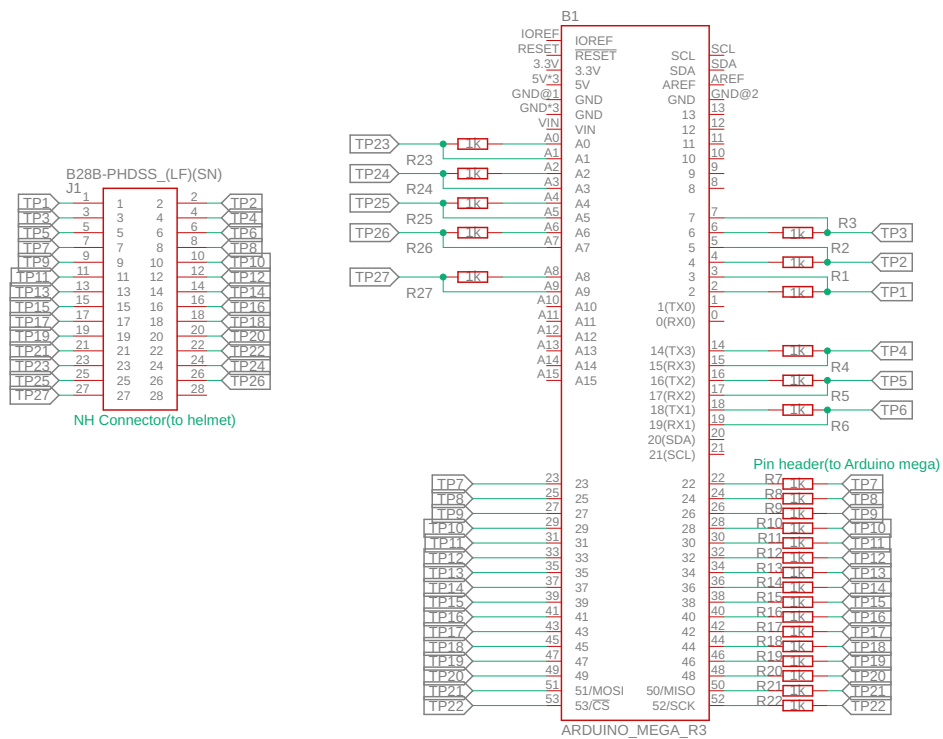


図 3.8: 27 点のタッチ検出を行う Arduino 用 HAT 基盤の回路図

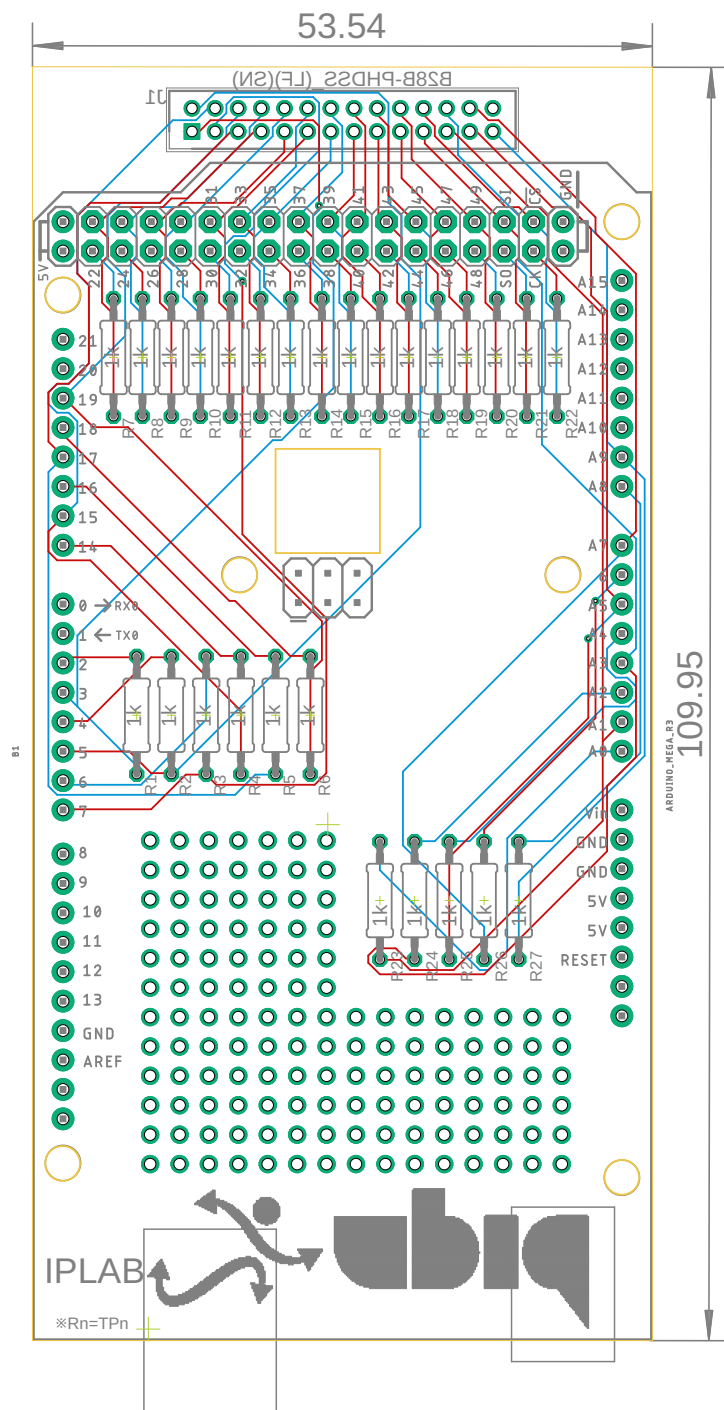


図 3.9: 27 点のタッチ検出を行う Arduino 用 HAT 基盤の配線図

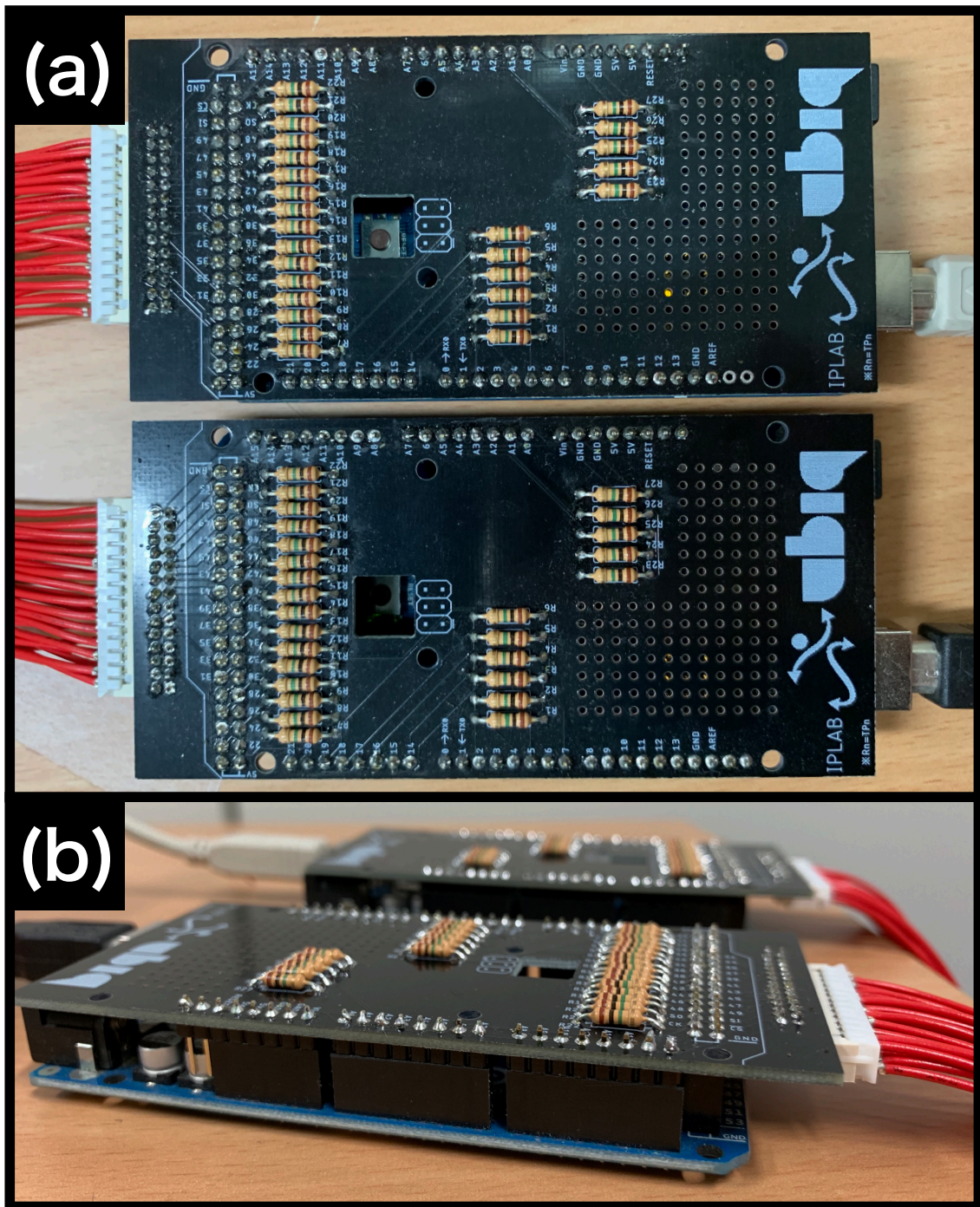


図 3.10: HAT 基盤を装着した 2 台の Arduino Mega 2560, (a) : 正面,(b) : 側面

3.4.1 タッチ位置に基づく視点操作

タッチ位置に基づく視点操作とは、本インタフェースを装着したユーザが、ヘルメット表面をタッチした際に、頭部から見たタッチ点への方向を向くように視点が変わる操作手法である。具体的には、本インタフェースを装着したユーザがヘルメット頭頂部をタッチすると、VRアプリケーション内の視点カメラが上方を向くような手法である。このイメージ図を図 3.11(a) に示す。頭頂部だけでなく、後頭部をタッチすると後方（図 3.11(b)）に、左側頭部をタッチすると左方向（図 3.11(c)）、右側頭部をタッチすると右方向（図 3.11(d)）に視点が変わる。

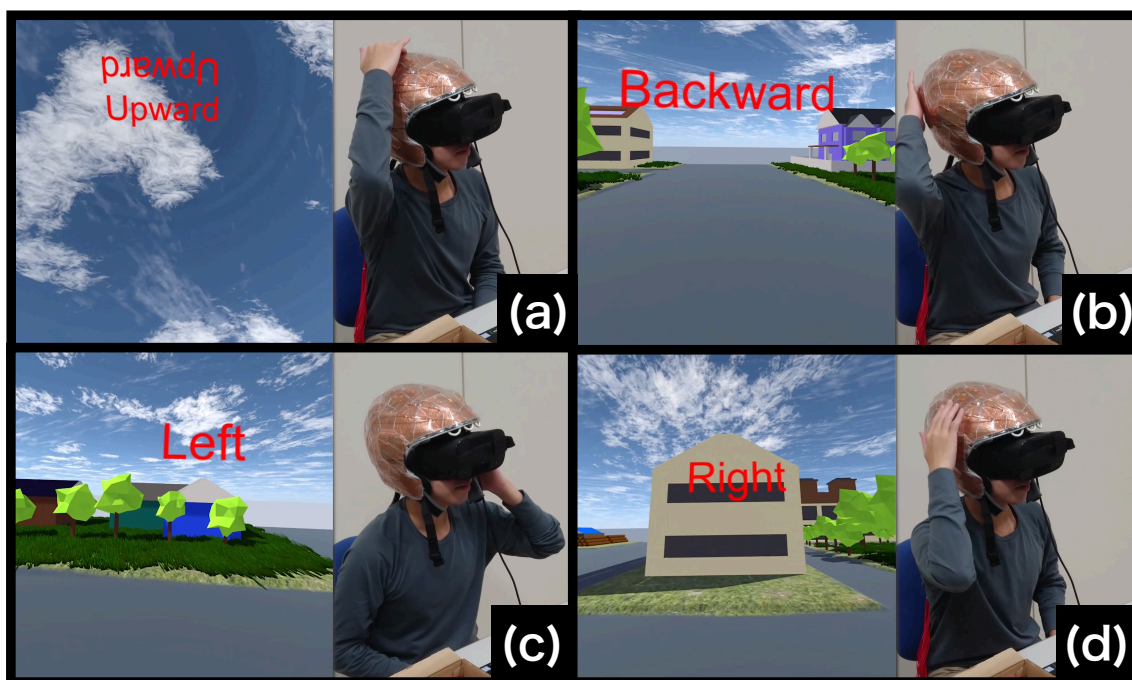


図 3.11: タッチ位置に基づく視点操作のイメージ図, (a)：頭頂部へのタッチ, (b)：後頭部へのタッチ, (c)：左側頭部へのタッチ, (d)：右側頭部へのタッチ

タッチ位置に基づく視点操作のアルゴリズムについて、全 54 点のタッチセンサの三次元的な位置を事前に定義しておくことによって、一つのセンサがタッチされた時、その対応する位置を視点の中心とするようにカメラの視点を変化させることで実現している。これには Unity アプリケーションの LookAt 関数を用いている。

3.4.2 タッチジェスチャによる視点操作

タッチジェスチャによる視点操作とは、54 点のタッチ状態の時系列的な変化を基にジェスチャを識別し、対応した視点操作を行うものである。本ヘルメット型タッチインタフェースを

用いて識別できる視点操作手法として、図 3.12 に示すような 4 種の操作を実装している。各操作は順に、カメラのヨー、ロールを制御する側頭部における前後上下への片手スライド操作（図 3.12(a)）、カメラのピッチを制御する頭頂部における前後への片手スライド操作（図 3.12(b)）、カメラの位置を制御する側頭部における前後上下への両手スライド操作（図 3.12(c)）、視野の広さを制御する前頭部における両手ピンチ操作（図 3.12(d)）である。

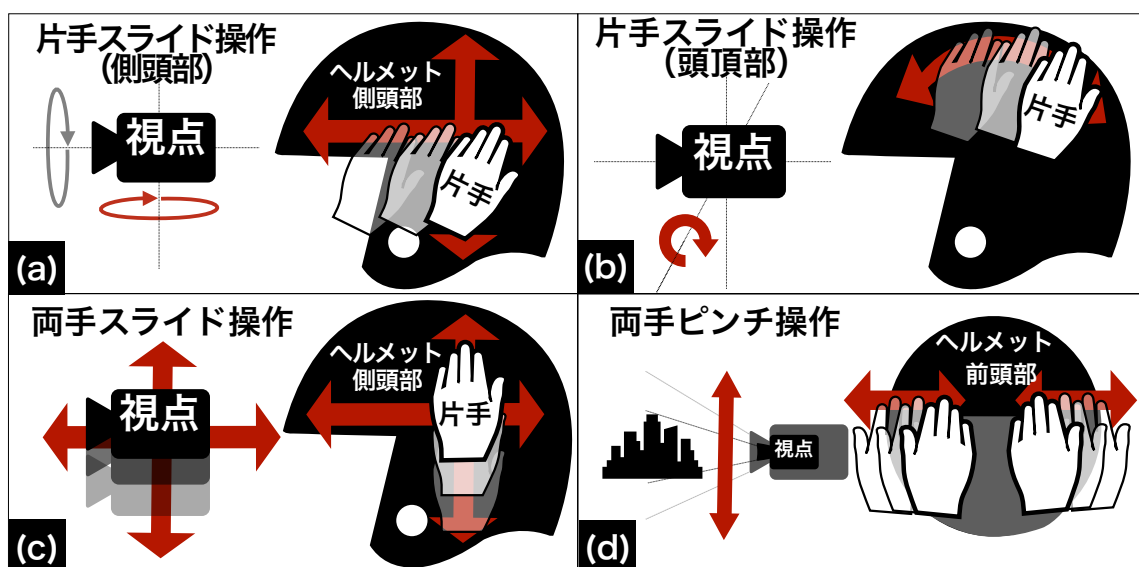


図 3.12: ヘルメット型タッチインタフェースにおけるジェスチャによる視点操作, (a): 側頭部における片手スライド操作, (b): 頭頂部における片手スライド操作, (c): 側頭部における両手スライド操作, (d): 前頭部における両手ピンチ操作

各ジェスチャの識別には、識別器として Support Vector Machine (以下, SVM), データとして 54 点のタッチ状態の時系列的な変化を基に作成する Motion History Image (以下, MHI) [13] を用いる。MHI の詳細については後述する。

SVM には、4 種のジェスチャと手の動作方向毎に作成された MHI を学習させ、ジェスチャを行なった際に生成される MHI を識別することによってジェスチャと方向の判定して対応する視点操作を行う。ここで、学習させる MHI の種類は 12 種類である。この MHI の内訳は、片手スライド操作 (側頭部) の 4 種 (前後上下)、片手スライド操作 (頭頂部) の 2 種 (前後)、両手スライド操作 (前後上下) の 2 種、両手ピンチの 2 種 (拡大・縮小) となっている。学習においては、1 種類につき 20 枚の MHI を学習させる。各ジェスチャの MHI の例を図 3.13 に示す。

MHI とは、元々人間の体を動きをその影の画像を基に識別するための技術で、一定時間の複数の影画像に対してそれぞれに重みづけを行って足し合わせることで、1 枚の画像を生成するものである。ここで、時間 t における MHI_t は式 3.1 にて計算できる。式 3.1 における K は MHI の作成に使う画像の枚数である。 I_t は時刻 t における画像データである。 w_t は重み

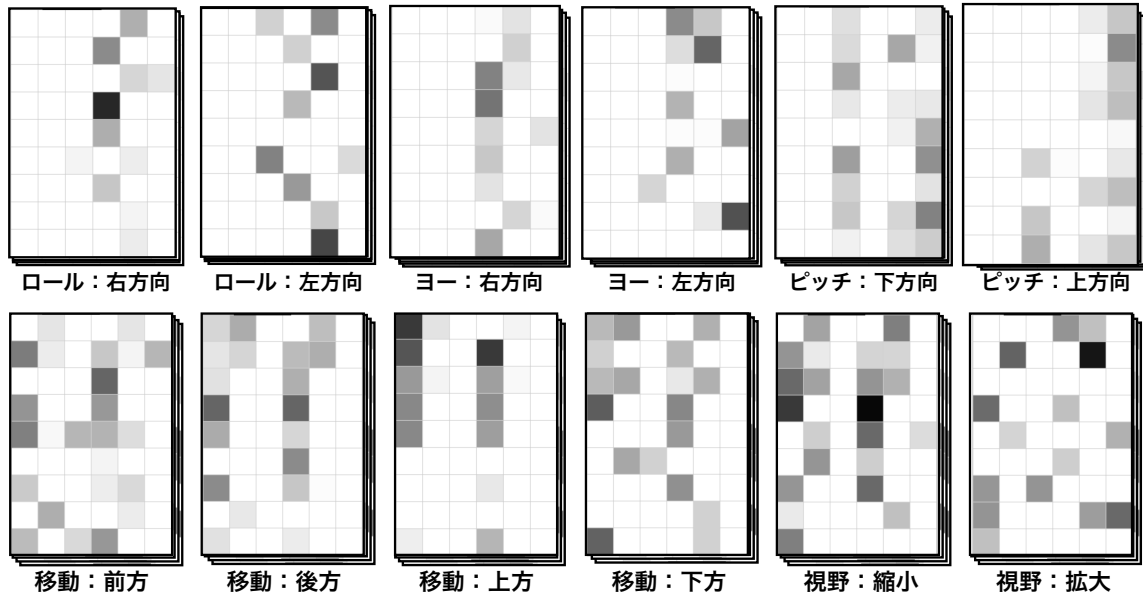


図 3.13: 各視点操作と手の動作方向に基づく 12 種類の MHI の例

であり、式 3.2 にて計算できる。

MHI の作成イメージを図 3.14 に示す。ここで、画像 t_1 , t_2 , t_3 はそれぞれのタッチの状態を 2 値で表したものであり、黒がタッチ時、白が非タッチである。 t_1 が最も古いデータであり、 t_3 が最も新しいデータである。この 3 枚の画像を基に MHI を生成すると、左上から右下にかけて徐々にドットが濃くなっている画像が出力される。このように、時系列的なデータの変化を画像の濃淡で表現することによって 1 枚の画像にでき、SVM によって学習や識別をしやすい形になる。

$$MHI_t = \sum_{i=0}^{K-1} w_{t-i} I_{t-i} \quad (3.1)$$

$$w_i = \frac{2(K-i-1)}{K(K-1)} \quad (3.2)$$

本研究では、ジェスチャの登録と SVM への学習、識別を行うことができるアプリケーションを作成した。これを図 3.15 に示す。このアプリケーションの主な機能として、キャリブレーションとジェスチャの登録、ジェスチャの識別、登録ジェスチャの MHI セットの保存・読み込みがある。

キャリブレーション機能は、ヘルメットを被り表面を触っていない状態で実行する。これにより、非タッチ状態での各タッチセンサの値を保持し、各値の変化量のみで MHI を生成することができる。

ジェスチャの登録機能は、事前にジェスチャを登録しておく機能である。まず、ジェスチャ

3×3グリッド画像

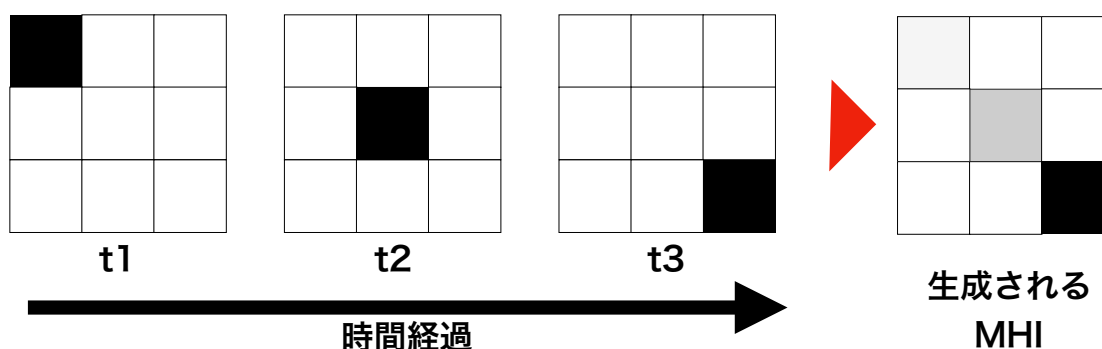


図 3.14: MHI の作成イメージ

名を入力して Add Gesture ボタンを押下した後、ヘルメット表面で任意のジェスチャを行うことで、そのジェスチャの MHI を登録できる。同じジェスチャ名の MHI は SVM の学習時に同じクラスとして学習される。

ジェスチャの識別機能は、Start ボタンを押下することで、MHI リストに登録されている MHI を学習し、現在のタッチ状況を基にリアルタイムなジェスチャの識別を行うものである。具体的な処理としては、1 点以上のタッチセンサがタッチされた時点から、全てのタッチ点から指が離れた時点までの時系列データから MHI を生成し、これを学習済みの SVM で識別している。その後、識別結果のジェスチャ名をプロセス間通信を用いて VR アプリケーションに送信し、対応した視点操作を実行している。

登録ジェスチャの MHI セットの保存・読み込み機能では、MHI リストに登録されている MHI データセットを指定フォルダへ保存したり、指定フォルダに保存された MHI データセットを MHI リストに読み込むことができる。

3.5 本インタフェースの利用に際する調査

本ヘルメット型タッチインタフェースによる視点操作手法に関して、Spatial User Interaction (SUI) 2019 と、User Interface Software Technology (UIST) 2019 にてデモンストレーション発表 [14] を行った。UIST2019 については、SUI でのデモ発表者に対する招待という形で発表⁹である。

両学会で行ったデモンストレーション内容として、3.4.1 にて述べたタッチ位置に基づく操作手法を、実際にヘルメットを被った状態で観衆の人々に試してもらおうというものである。SUI では 15 人、UIST では 30 人に使用してもらった。

⁹UIST2019 program: <http://uist.acm.org/uist2019/program/> [2020/01/12 閲覧]

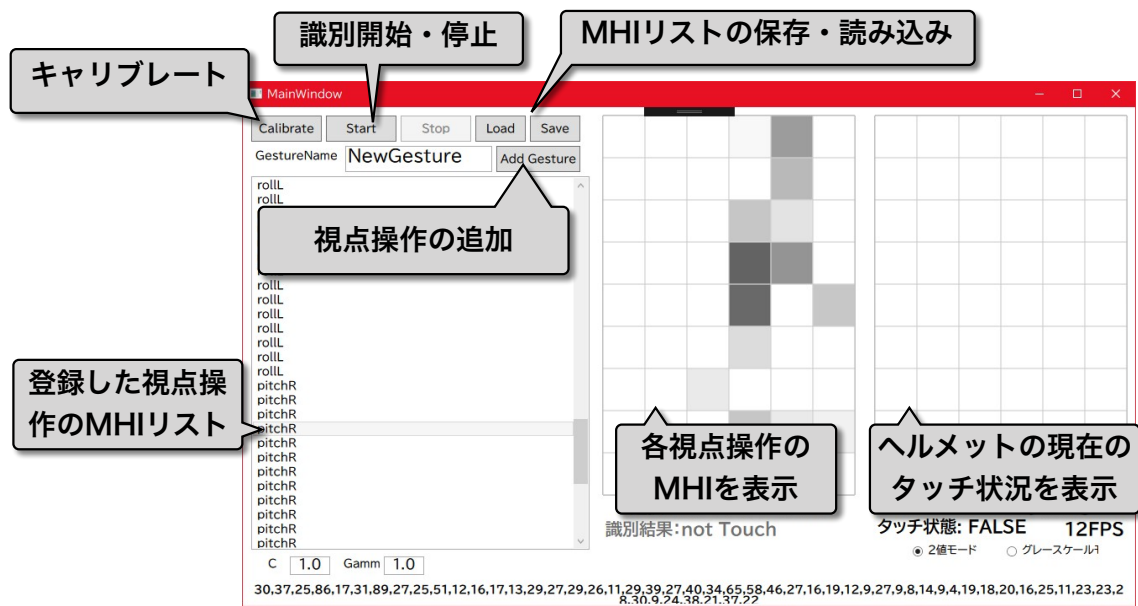


図 3.15: ジェスチャの登録, 学習, 識別を行うアプリケーション

3.5.1 体験者の意見や指摘

デモンストレーションを試してもらった人および, 説明のみを聞いた人達から幾つかのフィードバックを得たので, 主要なものを以下に示す.

- VR だけじゃなくて, バイクの運転中とかのインターフェースとしても有効
- 動きが早すぎるから酔いそう
- 自分の頭を正しく触れない
- 通気性難あり, 暑い
- 物々しいため, もっと軽くしてほしい
- HMD の上部をトラックパッドとして使ってる研究もある
- 車酔いするときも, 同乗者は酔うけど運転者は酔わない, この手法も操作を能動的に行っていたら酔わないのではないかな
- 斜め方向への視点移動は酔いやすい
- 酔いを抑えるためには, 視点変更時に視界を狭めると良い

さらに会話によって得られた意見とまとめると、本ヘルメット型タッチインタフェースは、ある程度意図した通りの操作ができるが、インタフェース自体が重いことが大きな問題であった。また、動きの速度による酔いやすさについてはユーザによる差があり、現在の速度で酔わないと思う、という人も確認できた。利用時には、頭部に対して自分の手がどの位置に存在するかを示す視覚的フィードバックがあると良いこともわかる。一方、斜め方向への視点移動については酔いやすいという意見が多く得られた。

3.6 ヘルメット型タッチインタフェースの今後の課題

我々は視点操作の速度パラメータや、その移動する過程、およびヘルメット自体の大きさなどについて、最適なものを調査する必要がある。しかし、現状の本ヘルメット型タッチインタフェースでは、54点の離散的なタッチしか取得できず、実現できる視点操作手法やその性能に制限が生まれてしまう。さらに、3.4.2で説明したタッチジェスチャでは、ジェスチャが終了しなければ操作が実行されず、タイムラグを感じるという問題もある。

そこで我々は、ユーザに頭と手の位置を即時的にトラッキングすることができるモーショントラッキングシステムを用いて、直接カメラを触るイメージに基づく視点操作手法を評価できるようにする。評価するためのシステムを第4章にて述べる。

このシステムを用いた視点操作手法の設計と評価を行い、ユーザの意図した通りの操作が可能で、かつ酔いにくい操作手法を設計し、これを実行できる新たな頭部装着型インタフェースの作成を目指すことも考えられる。形状としては、HMDと一体化でき、軽量な物が好ましい。この新たなインタフェースの作成については今後の課題としたい。

第4章 モーションキャプチャを用いた視点操作システムによる視点操作

4.1では、モーションキャプチャシステムを用いた頭部周辺でのジェスチャによる視点操作手法を用いた視点操作システムの概要について述べる。4.2では、モーションキャプチャシステムを用いた視点操作を実現するためのシステム構成について述べる。4.3では、本システムを用いて利用することができる視点操作手法について説明する。4.4では、実験を行うためのアプリケーションについて述べる。4.5では、本システムを用いて行なった評価実験について述べる。

4.1 概要

OptiTrackを用いた視点操作システムを構築し、より高精度な頭部周辺でのジェスチャによる視点操作を可能とする。提案する視点操作手法と視点操作VRアプリケーションと合わせて、ターゲット探索を行う評価実験を行なった。この実験結果から、ターゲットの選択におよそ15秒～28秒かかること、3D酔いは体調の状態によって大きく生起されてしまうこと、平均よりわずかに劣るユーザビリティ性能が確認された。

4.2 視点操作システム構成

本評価実験に用いた視点操作システムの構成について説明する。本システムの構成図を図4.1に、実際に構築した写真を図4.2に示す。このシステムは、ユーザの両手、頭部の位置をトラッキングするカメラのFlex3、Flex3を接続するOptiHub、OptiTrackと、OptiTrackを動作させるPC、ユーザが装着するHMD、HMDに映像を表示するVRアプリケーションを動作させるPCによって構成される。二つのPCは有線LANによってルータを介してローカル接続されている。また、ユーザは、OptiTrackによるトラッキングのために、再帰性反射材によるマーカを設置したマーカプレートとHMDを装着する。図4.2中の赤丸内にFlex3、青丸内にHMDとマーカプレートが配置されている。これを図4.3に示す。HMDには図4.4のようにマーカを設置している。マーカプレートは図4.5のように装着する。マーカプレートはダンボール紙を養生テープで多い、表面にマーカを両面テープで貼り付け、手に装着するための布ゴムベルトを巻いたものである。OptiTrack上でHMDと両手をそれぞれ区別する

ため、各マーカの位置関係に基づく設置パターンは、全て異なるようにした。ユーザは、図 4.2 中央に位置する椅子に座って操作を行う。

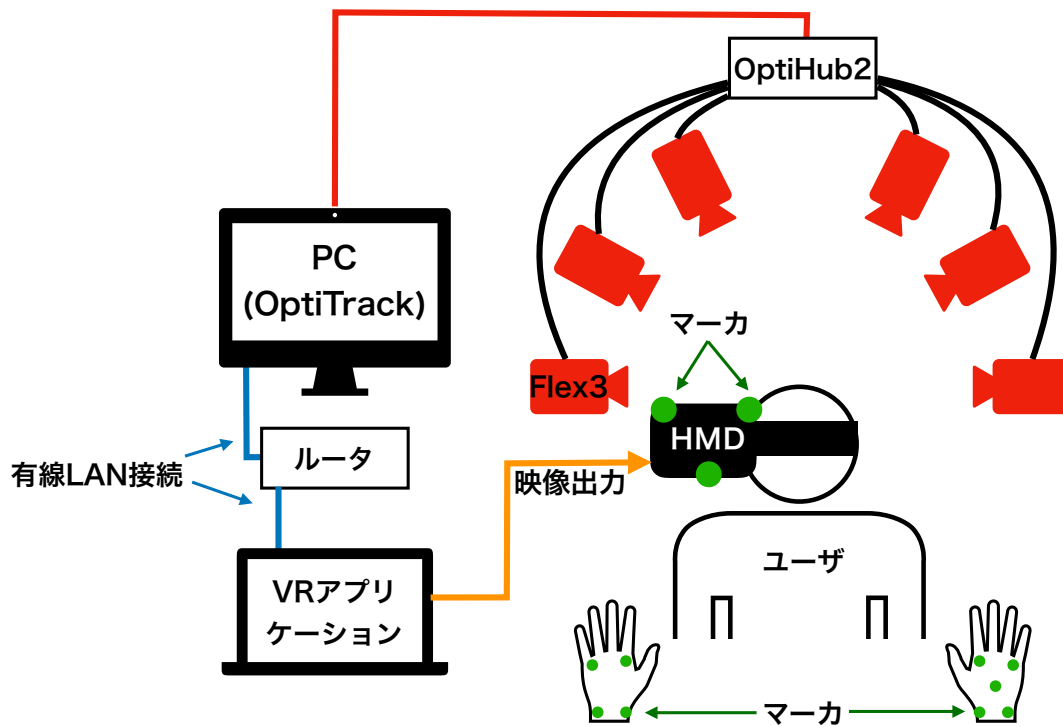


図 4.1: 視点操作システム構成図

4.2.1 OptiTrack

OptiTrackとは、Acuity社によって提供されているモーションキャプチャシステム¹である。このシステムを用いることで、一定のエリア内に存在する再帰性反射材を用いたマーカ群の三次元的な位置をリアルタイムに計測することができる。

本研究では、OptiTrackカメラとしてFlex 3²を6台、制御用ソフトウェアのMotive (バージョン1.9)、NatNet SDK (バージョン2.7.0.0)を利用する。実験時には、各Flex3カメラをユーザを取り囲むようにして設置する。また、HMDにはOculus Rift Sを利用する。

¹<https://www.optitrack.jp>

²<https://www.optitrack.jp/products/camera/flex3.html>



図 4.2: 視点操作システムの構築風景

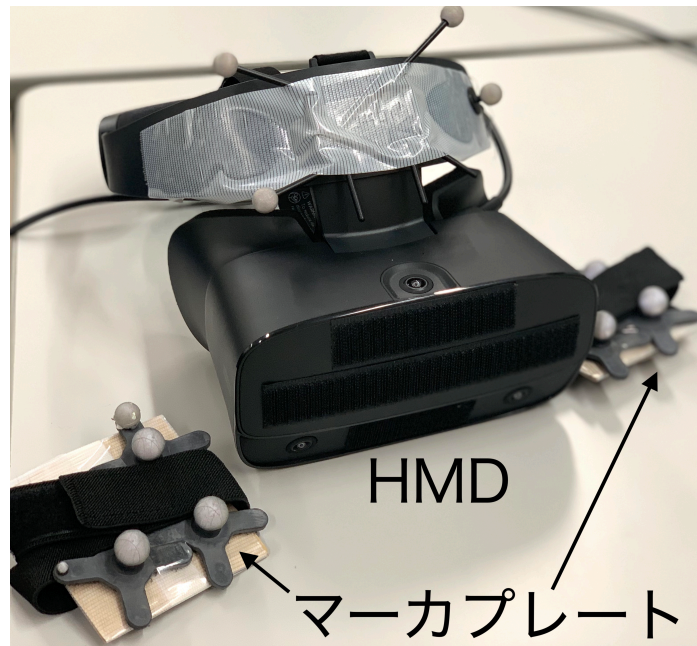


図 4.3: HMD と両手に装着するマーカプレート

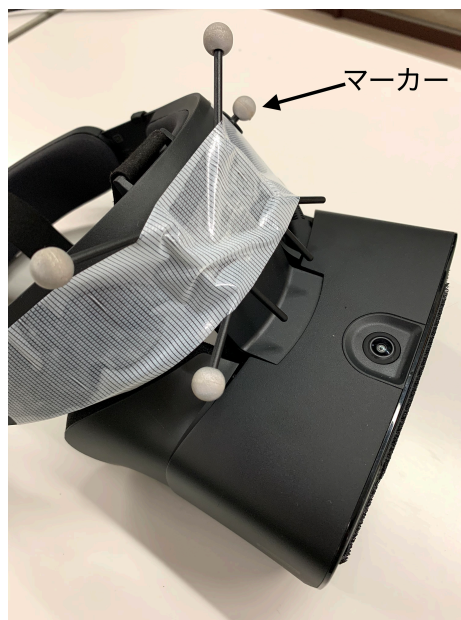


図 4.4: マーカを取り付けた HMD

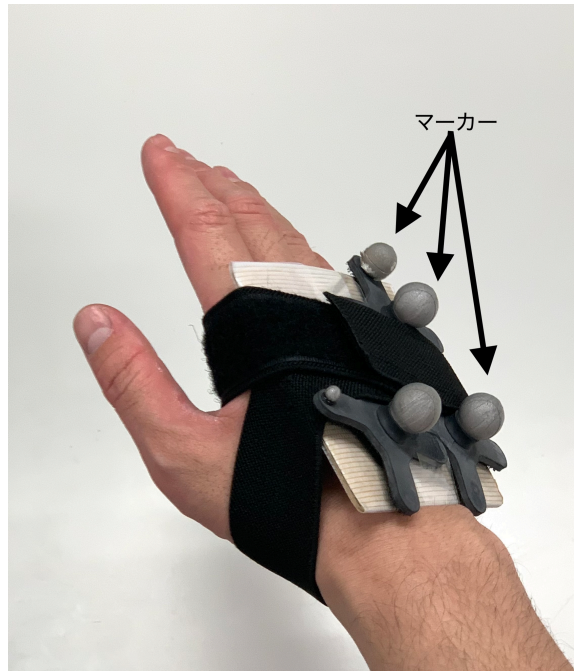


図 4.5: マーカが取り付けられたマーカプレートを手装着した状態

4.3 頭部表面でのジェスチャによる視点操作手法

本システムを用いて、全天球動画の視聴を想定した頭部表面でのジェスチャによる視点操作手法について述べる。4.3.1では本提案手法の概要について述べる。4.3.2では、片手スライド操作による視点操作について述べる。4.3.3では、両手スライド操作による視点操作について述べる。4.3.4では、手の回転による視点操作について述べる。4.3.5では、各種視点操作の操作方向を反転させる処理について述べる。

4.3.1 視点操作手法の概要

本提案手法は、頭部表面でジェスチャを行うことによって全天球動画の視点を操作できる手法である。このイメージ図を図4.6に示す。ここでは、ユーザが頭部をカメラと見立てつつ、頭部表面を直接触ってジェスチャを行うことによって、カメラを手で直接操作することができるようなイメージでデザインされている。

このデザインによる具体的な視点操作を行うためのジェスチャ操作は3種類ある。それぞれ順番に片手スライド操作、両手スライド操作、回転操作である。

それぞれの操作において、視点操作方向を逆転させる処理も実装する。これは、トラックパッドやマウスホイールなどのスクロール方向を反転させる処理の存在に倣ったもので、ユーザにとって最適な操作方向を判断するためのものである。

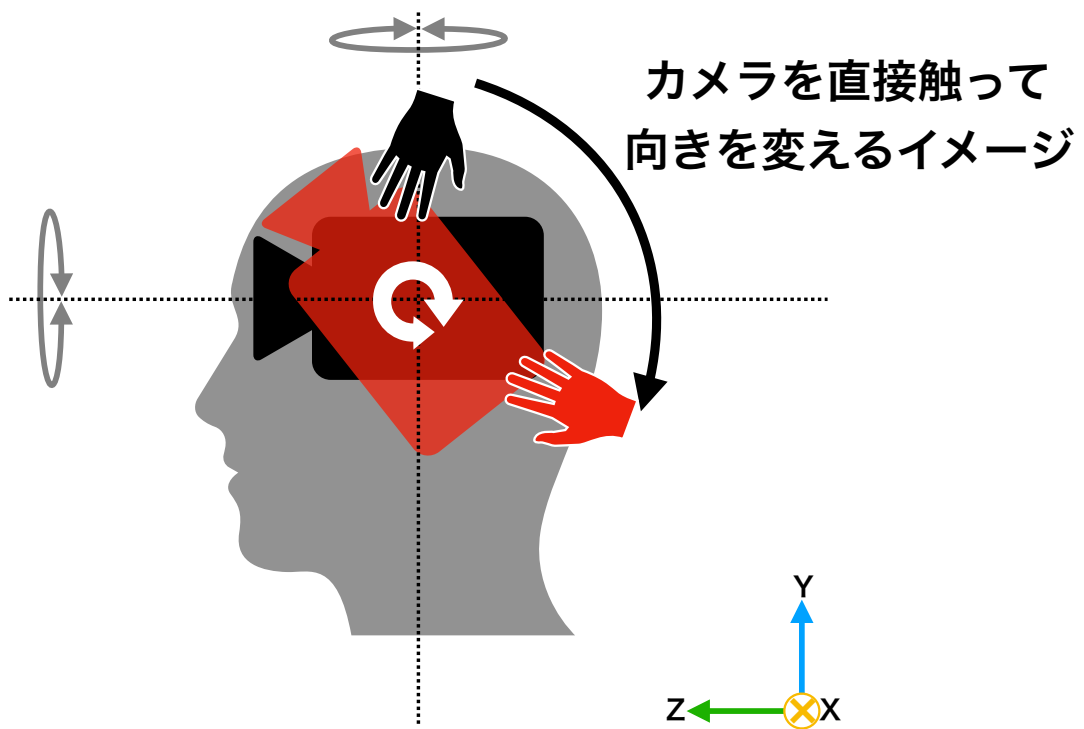


図 4.6: 頭部表面でのジェスチャによる視点操作のイメージ

4.3.2 片手スライド操作

片手スライド操作とは、頭部表面上を片手でタッチしたまま、任意の方向へスライドする操作である。図 4.7(a) に示すように、タッチ開始位置から微小移動後のタッチ位置までの回転量と回転軸を基にカメラを回転させることで視点操作を行う。

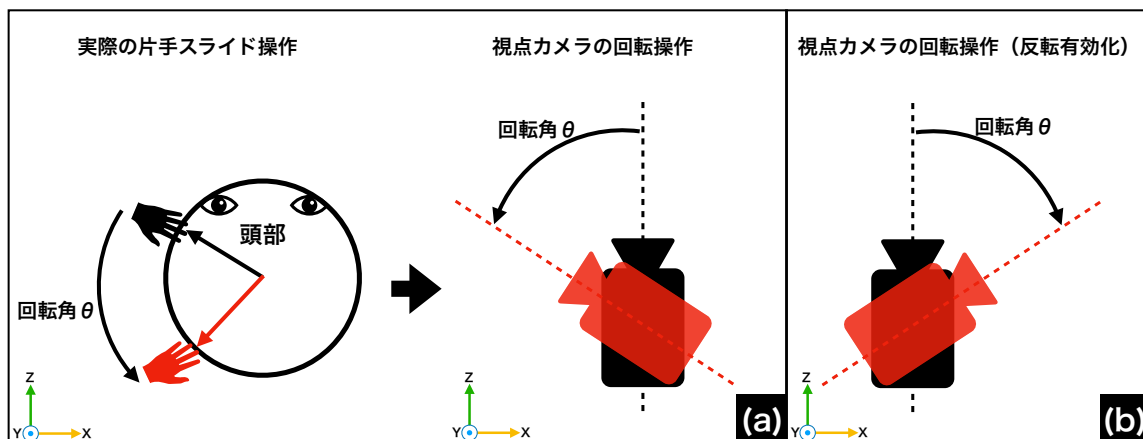


図 4.7: (a):片手スライド操作による視点操作, (b):反転処理を有効にした時の視点操作結果

片手スライド操作のアルゴリズムについて詳細に述べる。まず、頭部の中心から、頭部表面へのタッチが開始された点へのベクトル P_1 を取得する。次に、頭部の中心から、スライドによる微小移動後のタッチ点へのベクトル P_2 を取得する。その後、 P_1, P_2 の外積を求め、両ベクトルに直交するベクトル C を算出する。次に、 P_1, P_2 のなす角 θ を式 4.1 を用いて求める。以上の処理を行った後、頭部の中心にある視点カメラをベクトル C を回転軸として角度 θ だけ回転させる。

$$\theta = \arccos(P_1 \cdot P_2 / |P_1| |P_2|) \quad (4.1)$$

4.3.3 両手スライド操作

両手スライド操作とは、頭部表面上を両手でタッチしたまま、任意の方向へスライドする操作である。片手スライド操作との違いは、主に両手それぞれの移動量の平均に基づき視点操作処理を行うところにある。これを図 4.8(a) に示す。回転処理自体は、4.3.2 片手スライド操作と同様に、タッチ開始位置から微小移動後のタッチ位置までの回転量と回転軸を基にカメラを回転させることで視点操作を行う。

両手スライド操作のアルゴリズムについて詳細に述べる。まず、頭部の中心から、頭部表面へのタッチが開始された点への左手へのベクトル L_1 を取得する。次に、頭部の中心から、スライドによる微小移動後のタッチ点へのベクトル L_2 を取得する。その後、 L_1, L_2 の外積を求め、両ベクトルに直交するベクトル C_1 を算出する。次に、 L_1, L_2 のなす角 θ_1 を式 4.1

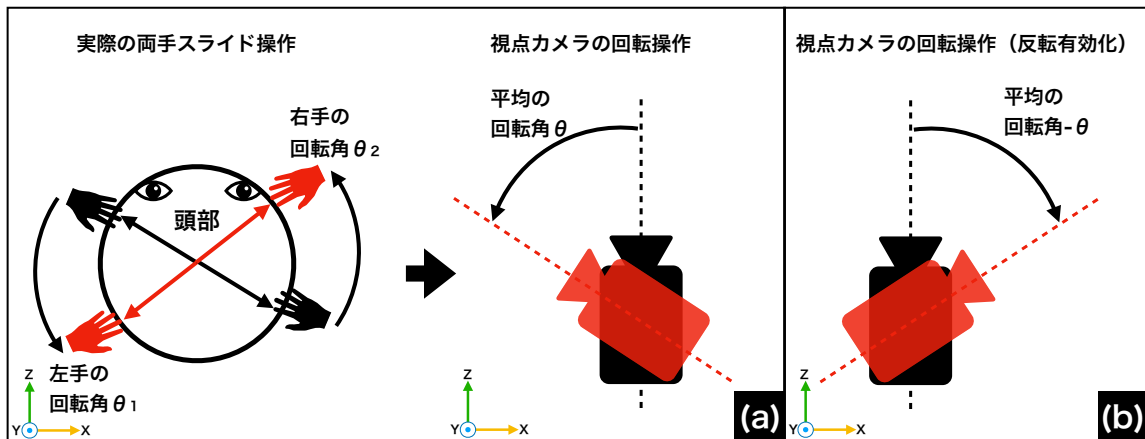


図 4.8: (a):両手スライド操作による視点操作, (b):反転処理を有効にした時の視点操作結果

を用いて求める。以上の処理を行った後、頭部の中心にある視点カメラをベクトル C_1 を回転軸として角度 $\frac{\theta}{2}$ だけ回転させる。このとき、各回転角度は平均するために半分にしている。右手においても、左手と同様にして、右手のタッチ開始位置へのベクトル R_1 、微小移動後のタッチ位置へのベクトル R_2 、回転軸 C_2 、なす角 θ_2 を求め、視点カメラを C_2 を軸に $\frac{\theta}{2}$ だけ回転させる。

4.3.4 回転操作

回転操作とは、頭部表面上を片手もしくは両手でタッチしたまま、位置はそのままに手だけを回転させることで、視点カメラを回転することができる操作である。これを図 4.9(a) に示す。このとき、片手の場合は手の回転量に基づき視点カメラを回転させるが、両手の場合は両手の回転量の平均に基づき視点カメラの回転を行う。

回転操作のアルゴリズムについて詳細に述べる。まず、タッチを開始した手の中心から指先方向へのベクトル P_1 を取得する。次に微小回転後の手の中心から指先方向へのベクトル P_2 を取得する。その後、 P_1 、 P_2 の外積を求め、直交ベクトル C を算出する。また、両ベクトルのなす角 θ を式 4.1 により求める。以上の処理を行った後、頭部の中心にある視点カメラを C を回転軸として角度 θ だけ回転させる。両手の場合は、上述したアルゴリズムおよび 4.3.3 両手スライド操作における処理と同様に、左手と右手それぞれの回転軸 C_1, C_2 と、回転角度 $\frac{\theta_1}{2}, \frac{\theta_2}{2}$ を求め、視点カメラを回転させる。ここで、各回転角度は平均するために半分にしている。

4.3.5 反転処理

上述した各種操作には、反転処理を実装する。これは、マウスのホイールを用いたスクロール操作や、トラックパッドの二本指でのスクロールでも実装されているものである。

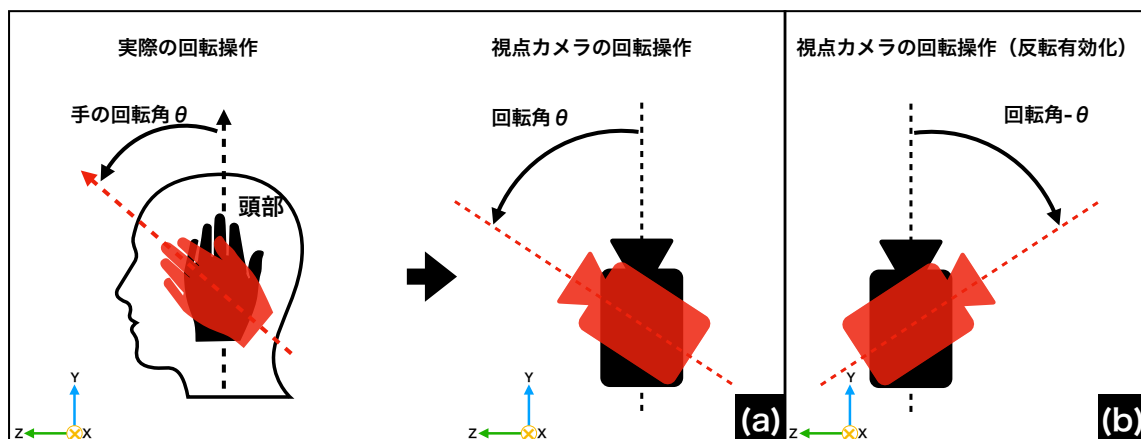


図 4.9: (a):回転操作による視点操作, (b):反転処理を有効にした時の視点操作結果

例えば、トラックパッドにおいて、上方向に二本指スライドを行うと、通常は上方向にスクロールが実行されるが、反転処理を有効にすると下方向にスクロールが実行される。特に、トラックパッドにおいては反転処理を有効にした場合の方が、スマートフォンにおけるスクロール動作と一致していることから、より自然な動作に感じられることが多い。しかし、マウスホイールの場合は通常処理の方が自然であると考えられる。

本提案手法においても反転処理の有無による効果を検証するためにこれを実装する。各種操作における回転操作をそれぞれ図 4.7(b), 図 4.8(b), 図 4.9(b) に示す。ここで、図 4.6 に示した通り、通常時の視点操作は頭部をカメラに見立てて直接操作するイメージであるが、反転処理を有効にした場合の操作は、ユーザの周囲のオブジェクトを直接触って操作するイメージとなる。これを図 4.10 に示す。処理としては、各種操作における回転角度の符号を逆にすることで対応する。

4.4 視点操作用 VR アプリケーション

本システムを用いて視点操作を行う VR アプリケーションを Unity を用いて作成した。本アプリケーションでは前節の視点操作手法を評価するために、ターゲット探索機能を実装した。この利用イメージを図 4.11 に示す。

画面中央下部に表示されている 3 つの球体は、それぞれ頭部と右手、左手の位置関係を表す球体である。大きな球体が頭部であり、小さな球体が両手である。手を表す球体は通常白色であるが、頭部の球体に接触している間は赤色に変化する。この機能により、ユーザは自分の手が頭部に接触しているかどうか、視点を操作している状態にあるかどうかを確認することができる。

ターゲット探索機能では、ユーザから一定距離離れた周囲に、円形ターゲットが表示される。表示する座標はあらかじめ設定しておく。ユーザはこのターゲットを指定された視点操

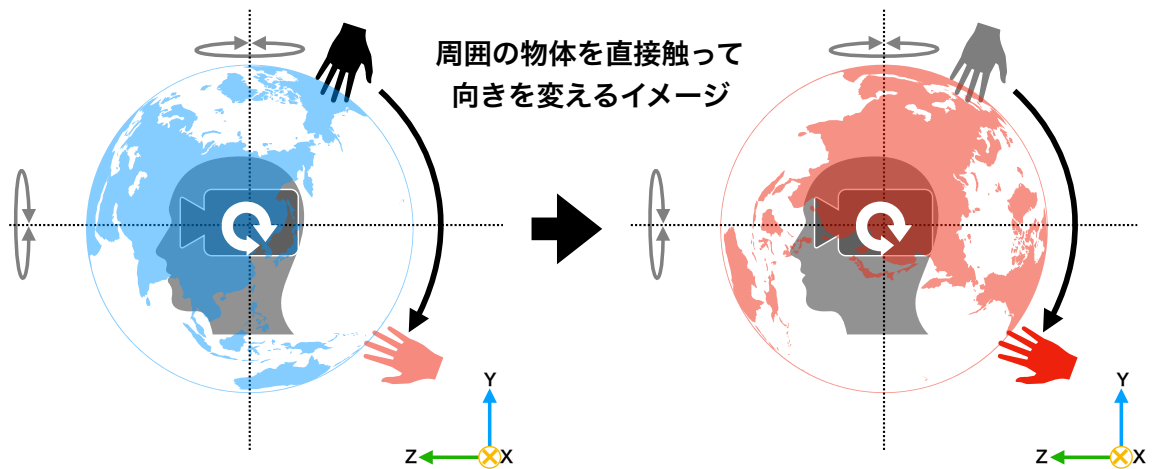


図 4.10: 反転された頭部表面でのジェスチャによる視点操作のイメージ

作手法を用いて探索する。ターゲットの発見は、ターゲットを約1秒間視界の中央に保持(図4.11(b))すること達成される。現在の探索ターゲットを発見すると、そのターゲットは消え、次の座標に新たに表示される。ユーザは、あらかじめ設定した探索個数に達するまでこの操作を繰り返す。

ターゲットが視点の中央にあるかどうかの判定について述べる。まず、ターゲットボタンが選択されている状態を図4.12(a)、未選択の状態を図4.12(b)に示す。具体的には、視点カメラの正面方向ベクトルと、視点カメラの中央から球体の中央へのベクトルのなす角が8度未満の時には視点中央に有ると判定され、8度以上の際には視点中央に無いと判定される。この中央判定のための角度について、本研究では、著者による試行を基に誤操作が起きづらい角度として暫定的に8度としている。

本アプリケーション上で利用できる視点操作は、4.3にて述べた頭部表面におけるジェスチャによる視点操作手法と、一般的なヘッドトラッキングによる視点操作の2種類である。アプリケーション起動前にプログラムのフラグを変更することで、この操作手法のどちらを使用するか、もしくは両者を併用するかを変更することができる。

4.5 評価実験

本システムと、視点操作アプリケーションのターゲット探索機能を用いて、提案した視点操作手法のユーザビリティを評価するための実験を行う。

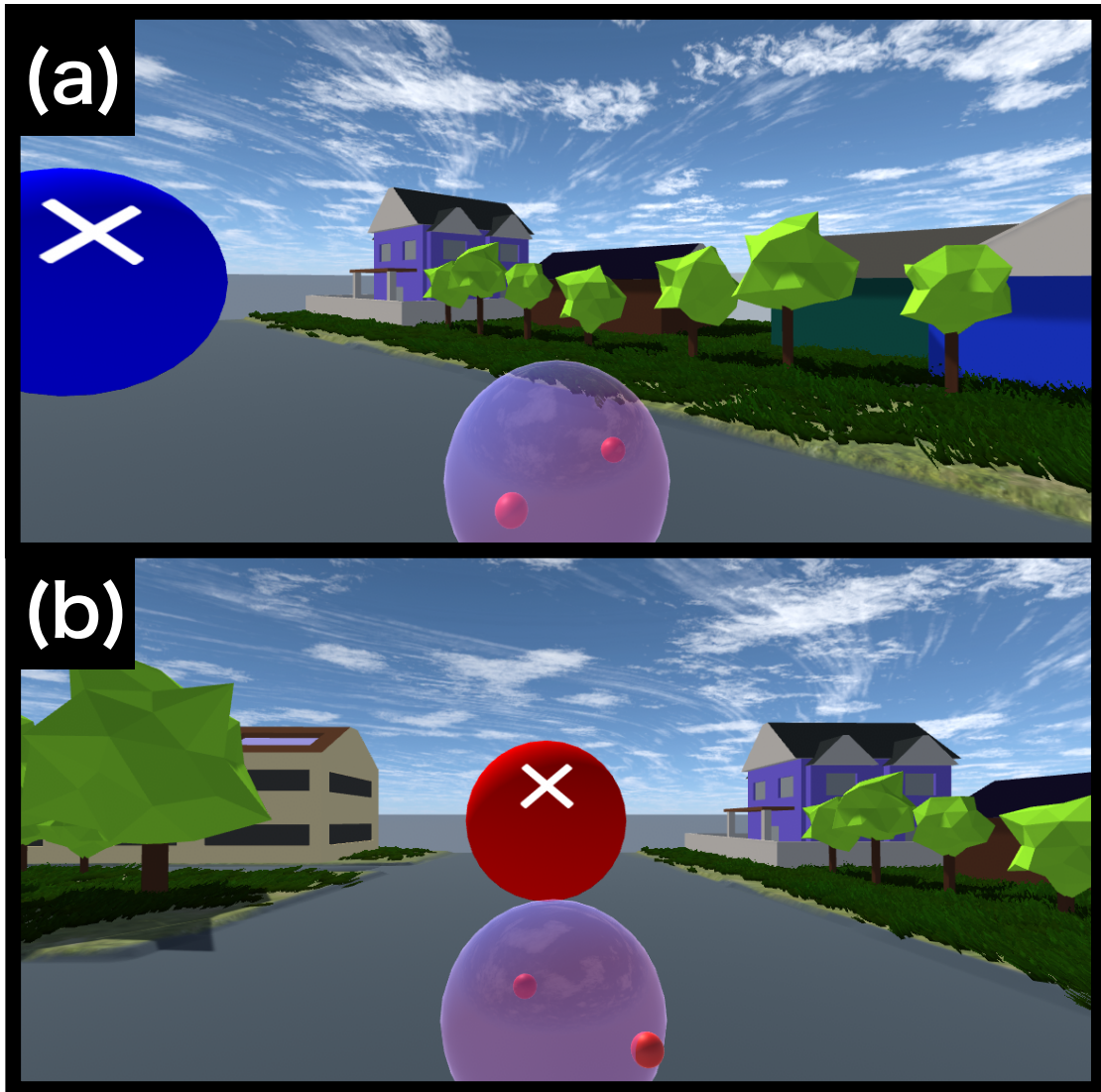


図 4.11: 視点操作 VR アプリケーションの利用図, (a):ターゲット未選択状態, (b):ターゲット選択状態

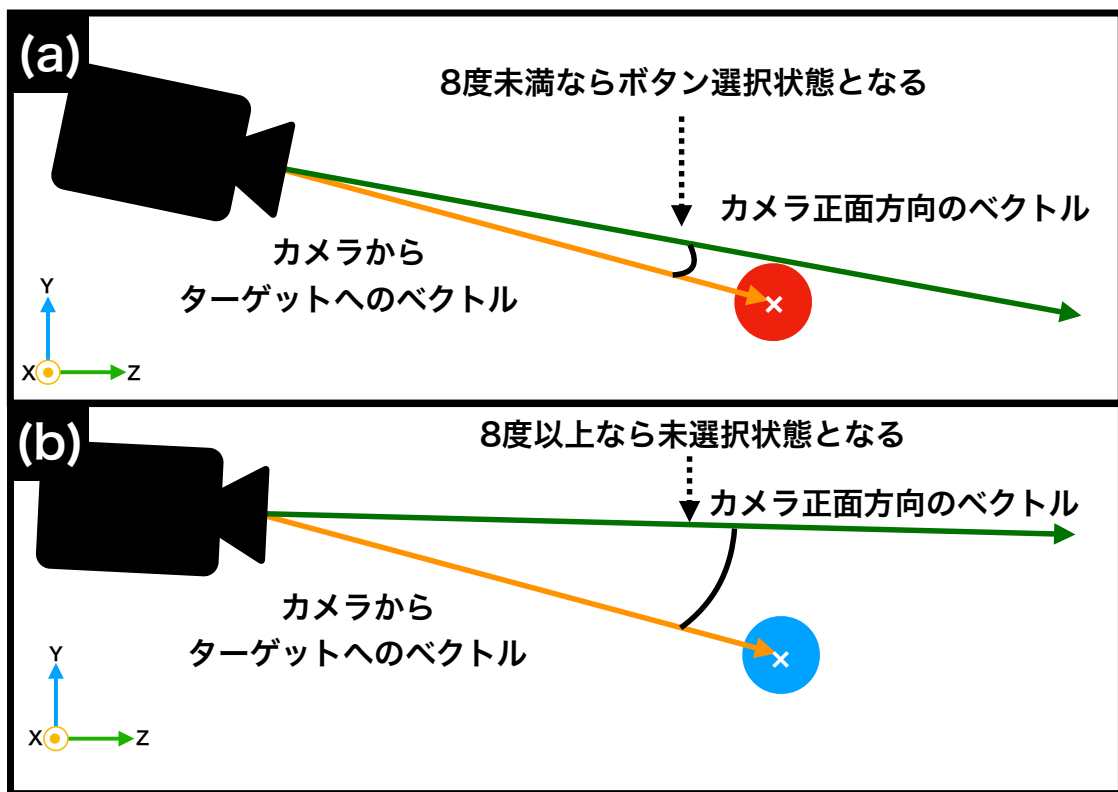


図 4.12: 視点カメラとターゲットのなす角による選択判定図, (a):8 度未満, (b):8 度以上

4.5.1 実験目的

本実験の目的は、被験者に 4.3 で述べた提案手法を使って VR アプリケーション内における視点操作を行なってもらい、提案手法のユーザビリティおよび 3D 酔いの程度を評価することである。また、本視点操作システムが、頭部表面でのタッチジェスチャによる視点操作手法を設計するためのシステムとして十分であるかどうか、狭小なスペースでも視点操作を行えるかどうかを本実験を通して検討する。

4.5.2 被験者

本実験の被験者は、著者を含む大学生 4 人である。平均年齢は 24.25 歳、男性 4 人である。著者を除いた 3 人は、本システムによる視点操作を利用した経験が無かった。この内 2 人は第 3 章で述べたヘルメット型タッチインタフェースを利用した経験があった。

4.5.3 実験内容

まず、本実験で利用できる視点操作手法は、HMD のヘッドトラッキングによる視点操作と、4.3 で示した視点操作手法の内、片手スライド操作と両手スライド操作とした。回転操作を実装しなかった理由については、OptiTrack の解像度、トラッキング性能に起因した誤操作がしばしば発生するため、円滑な実験遂行が不可能であると判断したためである。また、本実験では 4.12 に示した 3 つの球体による視覚的フィードバックを表示しない。さらに、ターゲット探索時は、極力椅子を回転させないようにして視点の操作を行うことを要求した。

今回、全ての被験者に対して共通の実験室³で実験を行なった。被験者毎に同一に構築したシステムを使用し、各機器の配置も常に一定である。つまり、全ての被験者の実験が終わるまでシステムの分解をしていない。

具体的な実験の手順を以下に示す。被験者はまず実験前にアンケートに答える。次に、監督者から視点操作手法の使い方の説明を受ける。3 分間の操作練習を行った後、5 個のターゲットを探索する実験を行う。10 分間休憩し、先ほどと同様に 10 個のターゲットを探索する実験を行う。その後、実験後アンケートに答えることで終了となる。

1. 実験開始
2. 実験前アンケートの実施
3. 視点操作手法の使い方の説明
4. 3 分間の操作練習の実施
5. ターゲット探索 (5 個) の実施

³筑波大学 総合研究棟 B 911-2 を使用

6. 10 分間の休憩
7. ターゲット探索（10 個）の実施
8. 実験後アンケートの実施
9. 実験終了

実験前アンケート

実験前アンケートは、実験日、氏名、年齢、性別および Simulator Sickness Questionnaire（以下、SSQ）[15] のための質問項目に回答するものである。

SSQ とは、主観評価に基づく心理学的計測手法である。本実験では、SSQ の質問紙に和訳 [16] を併記したものを提示した。SSQ では、16 個の質問に対して 4 段階（0-3）の回答を選択するによって、N(気持ち悪さ)、O(ふらつき感)、D（眼の疲労感）、TS（トータルスコア）の 4 指標を算出することで評価を行う。各質問項目は 4 指標のいずれかか、複数の指標に対応しており、各指標は次のような計算式で算出できる。

$$\begin{aligned} N &= \text{素点} \times 9.54 \\ O &= \text{素点} \times 7.58 \\ D &= \text{素点} \times 13.92 \\ TS &= (N + O + D) \times 3.74 \end{aligned}$$

実験後アンケート

実験後には、前述した SSQ の質問紙に再度回答してもらった後、System Usability Scale (SUS)[17, 18] のアンケートに回答してもらう。

SUS とは、調査対象のシステムとなったユーザビリティ性能を、0-100 の範囲でスコアリングできるものである。本実験では和訳 [19] が併記された質問紙を提示した。

4.5.4 実験結果

4 人の被験者が、ターゲット探索（5 個）とターゲット探索（10 個）において、次のターゲットを選択するまでの所要時間の平均を図 4.13 に示す。おおよそ 15 秒～28 秒の間隔でターゲットの探索から選択が実行できていることがわかる。ただし、データのばらつきが大きいことに留意して考察する必要がある。

SSQ のアンケート結果から算出した実験前後の各スコアを図 4.14 に示す。グラフ 1 は N（気持ち悪さ）スコアの変化、グラフ 2 は D（ふらつき感）スコアの変化、グラフ 3 は O（眼の疲労感）スコアの変化、グラフ 4 は TS（トータルスコア）の変化を示している。

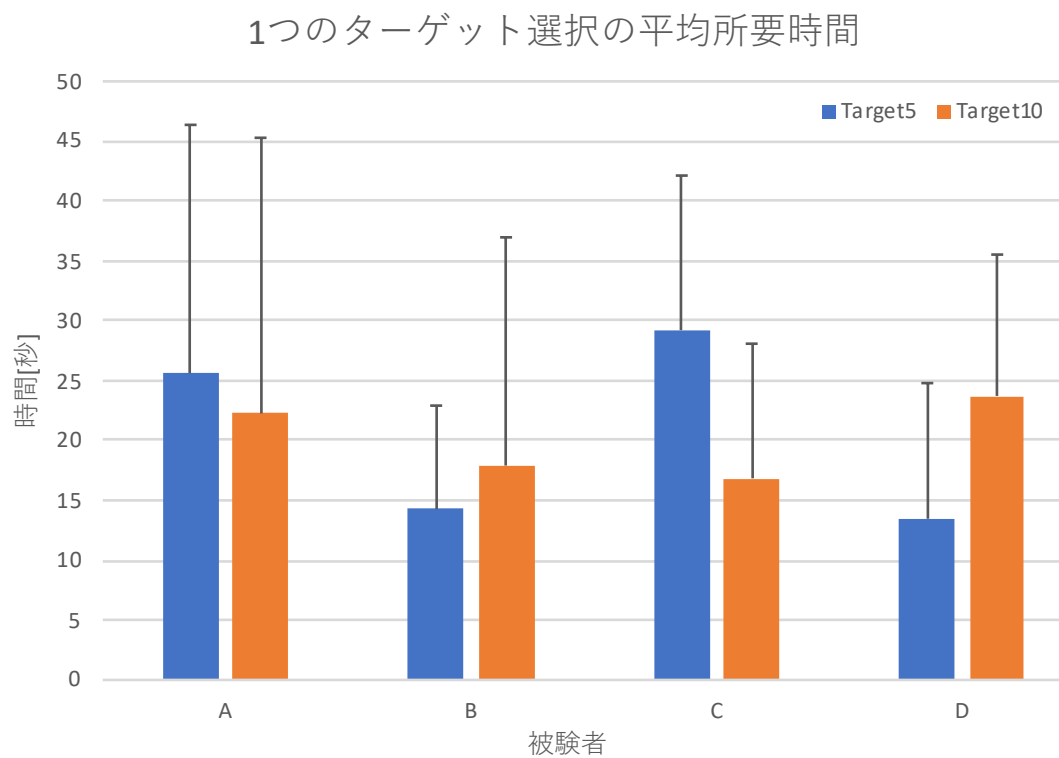


図 4.13: 1つのターゲット探索にかかる所要時間の平均 (5つ選択の場合と10個選択の場合)

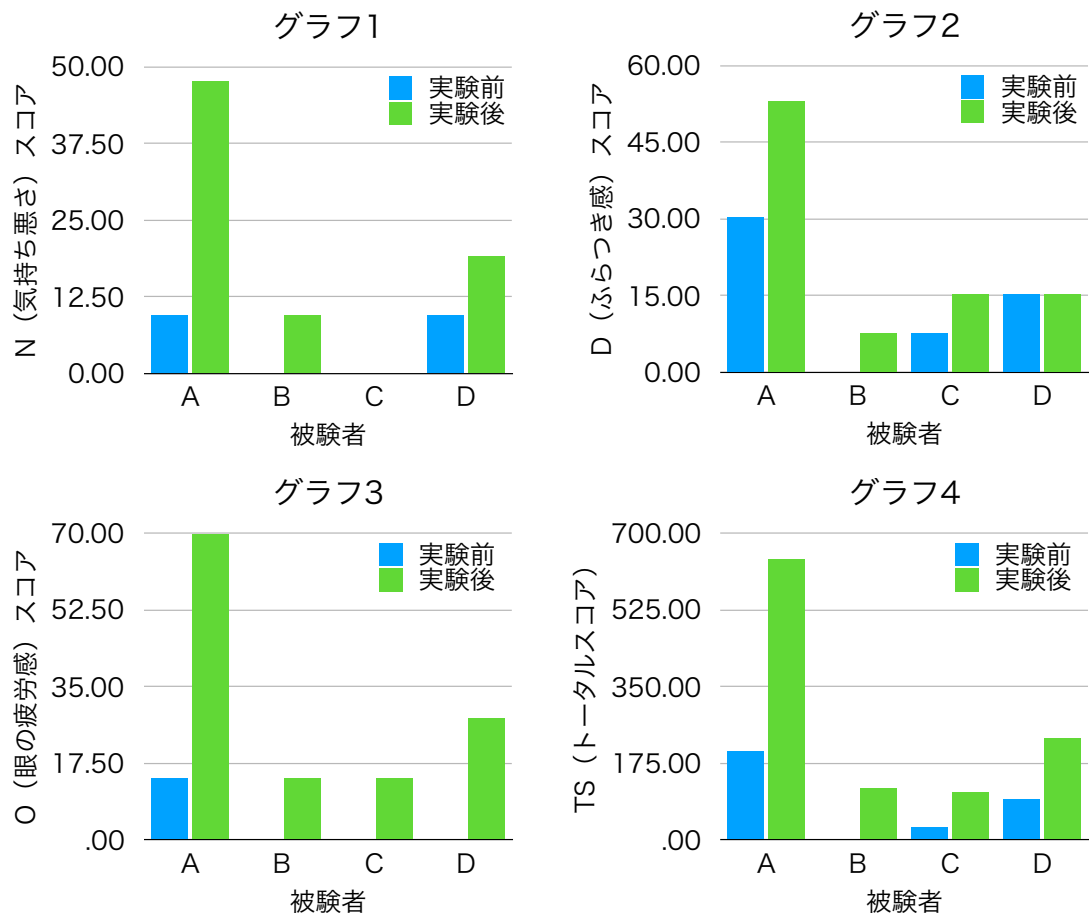


図 4.14: 各被験者の実験前後の SSQ スコア, グラフ 1: N (気持ち悪さ) スコアの変化, D (ふらつき感) スコアの変化, O (眼の疲労感) スコアの変化, TS (トータルスコア) の変化

SUS のアンケート結果から算出したスコアを表 4.1 に示す。本実験の平均 SUS スコアは 64 となっている。一方、SUS スコアの標準平均は 68 である⁴とされている。そのため、本実験で用いたシステムによる視点操作手法のユーザビリティ性能は、標準的な SUS スコアに僅かに劣る結果であった。

表 4.1: 各被験者の SUS スコアおよび平均スコア

| 被験者 | SUS スコア (0-100) |
|-----|-----------------|
| A | 63 |
| B | 65 |
| C | 68 |
| D | 60 |
| 平均 | 64 |

被験者がアンケートの自由記述欄に書いた意見、コメントを以下に記す。

- 手の認識が OFF になる領域を把握するのに多少の時間がかかった。
- 両手を認識しているときに思いがけない動きをすることがあった。
- 常に下方向が重力方向になってほしい。(固定してほしい)
- 手の動きに対する視点の動く向きは個人差があると感じた。
- 多少の慣れが必要であると感じた
- HMD をつけた状態では後ろを向くなどの動作に不安があったが、このインタフェースでは座ったまま視点を変更できるため、その不安がなかった
- 手が浮いた状態で操作されてしまうと難しいと感じた
- スクロールが上手にできなかった
- 左右の手の使い方がよくわからない
- 片手だけの回転で、ズームができると良い

4.5.5 本実験に対する考察

まず、全体的にターゲット探索における平均所要時間のばらつきが大きかったが、これはまず、ターゲットの表示をランダムとしたことに大きな要因である。何故ならば、ユーザに

⁴How to Measure Product Usability with the System Usability Scale (SUS) Score:<https://uxplanet.org/how-to-measure-product-usability-with-the-system-usability-scale-sus-score-69f3875b858f>[2020/01/13 閲覧]

よって前ターゲットと次ターゲットの距離が近いものが多い組み合わせになることがあるからである。ターゲットの座標をランダムにするのであれば、さらにターゲット数を多くする必要もある。そうでなければ、被験者間でターゲットの表示場所とその順序を一定にすることが適当である。

実験中、手のトラッキングが瞬断する場面がしばしば見られた。これは、そもそも OptiTrack の台数が少なく、トラッキングカメラの解像度も低いことが原因で、高精度にトラッキングできる領域が 1m 立方程度であることが考えられる。より広範囲をトラッキングしようとカメラの距離を遠ざけても、トラッキングをかける画像に対するマーカのサイズが相対的に低下してしまい、認識精度も低下するため、改善策とはならない。極力、外乱の原因となる太陽光や光沢面を持つ物体、反射材を排除し、トラッキングカメラを向き合わないよう配置し、全ての被験者は黒い服を着用することを推奨する。

被験者 A に対する考察

特に、被験者 A の TS スコアが非常に大きく、さらにターゲット探索にかかった所要時間、およびそのばらつきも比較的大きいことがわかる。また、SUS スコアについても 63 と平均値を下回っている。これについて、実験時の状況を踏まえて考察すると、この原因は 3 つ考えられる。

1 つ目は、被験者 A の座高が他の被験者と比べて高かったことにある。これにより、OptiTrack で高い精度でトラッキング可能なエリアから外れてしまったと考える。これは、筆者（被験者 B）と座高がほぼ同じである被験者 C の実験結果を比べて、同様に SUS スコアが高く TS スコア、10 ターゲット探索の平均所要時間もほぼ同等に落ち着いていることから確かめられる。

2 つ目は、被験者 A は実験時に白い洋服を着用していたということである。通常、モーションキャプチャシステムを利用する際、全身を覆う黒い洋服を着用する場面が多い。白い服を着用していると、トラッキングカメラから発せられた赤外線光が一部反射してしまい、トラッキング精度が落ちてしまう。これにより、意図した操作を行うことができなかったと考える。

3 つ目は、被験者 A の SSQ における D（ふらつき感）スコア、O（目の疲労感）スコアが実験前から高く、疲労していたことが、実験パフォーマンスに悪影響を与えたと考えられる。

4.5.6 本実験に対する結論

本実験では、モーションキャプチャシステムを用いた実験システムと、提案手法による視点操作によって、ターゲットの探索と選択を行う実験を実施した。その結果、一つのターゲット探索に約 15 秒～28 秒かかり、ユーザビリティ性能は平均より少し劣ることと、実験前に疲労が溜まっているユーザの酔いが大きく生起されてしまうことがわかった。一方で、椅子を回転させなくても全方位に対して視点操作を行うことができおり、狭小なスペースのための、身体方向を固定した状態での自由な視点操作が可能となったことを確認した。

本実験システムのトラッキングの精度、安定性はそれほど高くなく、ユーザの背丈や格好によってトラッキングカメラのセッティングを変更する必要があることもわかった。その為、

4.3で示した視点操作手法を設計するためのシステムとして不十分であるが，第3章で述べたヘルメット型タッチインタフェースよりは適している．可能であれば，より良い性能のモーションキャプチャシステム，外乱の少ない実験環境の構築，全被験者に羽織らせる黒い上着の準備などを行うことが望ましい．

第5章 議論

本章では、まず頭部をカメラと見立てた、頭部表面でのジェスチャに基づく視点操作手法に対する議論を行う。次に、ユーザの入力やその動作を取得するための頭部装着型インタフェースについての議論を行う。

5.1 頭部をカメラと見立てた視点操作手法に対する議論

本研究では、頭部をカメラと見立て、頭部に対する動作による視点操作手法を提案したが、頭部表面だけでなく、頭部周囲における動作による視点操作手法も考えられる。つまり、頭部から少し浮かせたまま視点を操作するような手法である。これによって、マウスにおけるホバーとクリックのような複数の操作を割り当てることが可能となる。また、ホバー範囲を変更することで、さらに多種多様な操作を実現できることが考えられる。

例えば、頭部からのホバー距離を伸ばし、全身を覆うような球体を想定し、これに触るようなイメージの操作を実現すれば、自分（プレイヤー）を直接接触して回転させるような操作を実現することができる。また、必ずしも自身を中心とした操作でなくても良い。例えば、両手を伸ばした位置に視点カメラを内包した球体を表示し、それを回すような操作も考えられる。もちろん、これらの動作をユーザが選択できるようにし、複数実装したシステムも有用性があると考えられる。

他にも、ユーザ自身の視点操作だけでなく、VRアプリケーションを利用している人が、現実世界から観測している外部の人間や、VRアプリケーション内で相対した他のプレイヤーによる操作によって、自身の視点が動かされるという手法に利用することも考えられる。これは、VRを用いた教育用アプリケーションで活用できると考える。というのも、教育用アプリケーションなどではプレイヤーの注視方向を誘導するための視覚的支持手法の研究 [20] が行われており、かつ頭部（球体）を動かすというイメージである本提案手法は、自身から見ても他人から見ても直感的に操作できるという大きな利点があるからである。

5.2 ユーザの入力やその動作を取得する頭部装着型インタフェースに対する議論

本研究では、ユーザの入力やその動作を取得する頭部装着型インタフェースとして、ヘルメット型タッチインタフェースと、モーションキャプチャを用いた視点操作システムを作成した。

ヘルメット型タッチインタフェースの利点として、実際にヘルメットの表面に触ることで操作が実行されるため、触覚的なフィードバックがあることが挙げられる。しかし、連続的なタッチを取得することができないため、多くの制限が生まれてしまう。モーションキャプチャを用いた操作システムでは、ヘルメット型タッチインタフェースに比べ自由度の高い操作を容易に実現できるが、より高いトラッキング性能を持つシステムを利用することが望ましい。

ヘルメット型タッチインタフェースにおけるタッチ取得には静電容量式タッチセンサを複数利用したが、将来的には電界センシングや音響センシングを活用したタッチ検出を実装し、より連続的なタッチを検出できるようにすべきである。特に音響センシングでは、ヘルメットの硬質さによって安定した音響信号の伝播が見込まれるため、有力なセンシング手法である。

ユーザの手の位置のセンシングは、現在 HMD に内蔵された複数のカメラによって行うものがある。具体的には、Oculus Quest が挙げられる。現状、この Oculus Quest による手のセンシングは HMD 前方でしか利用できない。このセンシング手法をベースにした場合、将来的には HMD 全方位にカメラを設置することで頭部周囲における手のセンシングを行ったり、同一の場所で複数のユーザが Oculus Quest を利用すると想定して、各 Oculus Quest が自身だけでなく他人の手のセンシングも行なったりするような改善策が考えられる。

将来的に、頭部表面や先述した頭部周囲でのジェスチャを取得するための頭部装着型インタフェースは、HMD と統合されることが望ましい。さらに、頭部の大きさを肥大化しないよう薄型かつ疲労しないような軽量化を行うべきである。また、このインタフェースは HMD を含め PC 等のプレイヤーの身体外に設置されるような機器を必要としないことが望ましい。

第6章 結論

本論文では、頭部表面で行うジェスチャを用いた全天球動画像における視点操作手法について述べた。

本研究では、一般的な HMD を用いた全天球動画像の利用において、頭部運動を必要としない新たな視点操作手法の設計と開発、またその視点操作手法を実装するための頭部装着型インタフェースの設計と開発を目的とした。視点操作手法の設計イメージとして、頭部をカメラに見立てた操作を提案した。

まず、頭部装着型インタフェースの試作として、ヘルメット型タッチインタフェースを製作した。加えて、このインタフェースを用いたタッチ操作による全天球動画像の視点操作を実装し、国際学会でのデモンストレーションを経てフィードバックを得た。その結果、連続的なタッチを取得できて滑らかな操作を実現できることと、より軽量で装着しやすいインタフェースが必要であることがわかった。

このフィードバックに基づき、まずは視点操作手法の設計と開発を行うために、OptiTrack による視点操作システムの構築と VR アプリケーションの作成を行なった。また、これを利用したユーザビリティ性能、3D 酔いの程度などを簡単な実験を通して評価した。その結果、頭部を動かさなくても全方向の視点を確認できることと、さらに高精度なモーションキャプチャシステムが必要であることが示された。

最後に、本研究で述べた視点操作手法やセンシング用の入力インタフェース、システムに対する議論を行ない、本研究で提案した手法やインタフェースの課題、今後の方向性を示した。具体的には、身体に対する様々な位置でのジェスチャによる視点操作の可能性や、頭部装着型インタフェースに求められる要素を示した。

謝辞

本論文を執筆するにあたり，高橋伸准教授，志築文太郎准教授には多大なご助力を賜り，感謝致します。特に高橋伸准教授には論文の執筆方法だけでなく，研究生生活においても丁寧かつ熱心なご指導を賜りました。ここに深い感謝の意を表します。また，高橋研究室の皆様には，研究における様々なご支援を頂きました。特に UBIQUITOUS チームの皆様にはチームゼミをはじめ，論文執筆を行った際には多くのご助言や添削など，多くのこご支援を頂きました。深く感謝いたします。さらに，研究生生活においてメンターとして指導して頂けた，昨年度の修了生である小原田 和也さんと，SUI 2019，UIST2019 におけるデモ発表において多大なるご助力を頂いた，大和 優輝さんに深く感謝いたします。

最後に，私の生活を支えてくださった家族や友人，研究においてお世話になった全ての方々と猫に深く感謝いたします。

参考文献

- [1] Nobuyuki Shibano, Prakruthi Hareesh, Hiroshi Hoshino, Kawamura Ryo, Atsuyuki Yamamoto, Masanori Kahiwagi, and Kazuya Sawada. CyberDome: PC Clustered Hemi Spherical Immersive Projection Display. In *ICAT2003*, pp. 1–7. The Virtual Reality Society of Japan, 2003.
- [2] 丸山英梨子, 曆本純一. CompoundDome: スクリーンを部分的に透過することにより現実世界とインタラクションを可能にする装着型ドーム装置,. インタラクティブシステムとソフトウェアに関する研究会論文集, pp. 49–54, 2018.
- [3] Haruhiko Okumura, Takashi Sasaki, Aira Hotta, and Kazumitsu Shinohara. Monocular hyper-realistic AR head-up display. *Journal of the Society for Information Display*, Vol. 25, No. 1, pp. 34–43, 2017.
- [4] Bernd Froehlich, Jan Hochstrate, Verena Skuk, and Anke Huckauf. The GlobeFish and the GlobeMouse: Two New Six Degree of Freedom Input Devices for Graphics Applications. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '06, pp. 191–199, New York, NY, USA, 2006. ACM.
- [5] B Jackson, T Y Lau, D Schroeder, K C Toussaint, and D F Keefe. A Lightweight Tangible 3D Interface for Interactive Visualization of Thin Fiber Structures. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 19, No. 12, pp. 2802–2809, dec 2013.
- [6] Bernd Fröhlich and John Plate. The Cubic Mouse: A New Device for Three-Dimensional Input. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '00, pp. 526–531, New York, NY, USA, 2000. Association for Computing Machinery.
- [7] Dane Coffey, Nicholas Malbraaten, Trung Le, Iman Borazjani, Fotis Sotiropoulos, Arthur Erdman, and Daniel Keefe. Interactive Slice WIM: Navigating and Interrogating Volume Datasets Using a Multi-Surface, Multi-Touch VR Interface. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, Vol. 18, , 2011.
- [8] Ravin Balakrishnan, Thomas Baudel, Gordon Kurtenbach, and George Fitzmaurice. The Rockin'Mouse: Integral 3D Manipulation on a Plane. In *Proceedings of the ACM*

- SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '97*, pp. 311–318, New York, NY, USA, 1997. Association for Computing Machinery.
- [9] Eugenia M Kolasinski. Prediction of simulator sickness in a virtual environment. 1996.
- [10] P A Howarth and M Finch. The nauseogenicity of two methods of navigating within a virtual environment. *Applied Ergonomics*, Vol. 30, No. 1, pp. 39–45, 1999.
- [11] S V G Cobb, S Nichols, A Ramsey, and J R Wilson. Virtual Reality-Induced Symptoms and Effects (VRISE). *Presence*, Vol. 8, No. 2, pp. 169–186, apr 1999.
- [12] Jason D. Moss, Jon Austin, James Salley, Julie Coats, Krysten Williams, and Eric R. Muth. The effects of display delay on simulator sickness. *Displays*, Vol. 32, No. 4, pp. 159–168, oct 2011.
- [13] Aaron F. Bobick and James W. Davis. The Recognition of Human Movement Using Temporal Templates. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 23, No. 3, pp. 257–267, 2001.
- [14] Takumi Kitagawa, Yuki Yamato, Buntarou Shizuki, and Shin Takahashi. A Viewpoint Control Method for 360° Media Using Helmet Touch Interface. In *Symposium on Spatial User Interaction, SUI '19*, New York, NY, USA, 2019. Association for Computing Machinery.
- [15] Robert S. Kennedy, Norman E. Lane, Kevin S. Berbaum, and Michael G. Lilienthal. Simulator Sickness Questionnaire: An Enhanced Method for Quantifying Simulator Sickness. *The International Journal of Aviation Psychology*, Vol. 3, No. 3, pp. 203–220, jul 1993.
- [16] 氏家弘裕. 映像酔い. 映像情報メディア学会誌, Vol. 61, No. 8, pp. 1122–1124, 2007.
- [17] John Brooke and Others. SUS-A quick and dirty usability scale. *Usability evaluation in industry*, Vol. 189, No. 194, pp. 4–7, 1996.
- [18] John Brooke. SUS: a retrospective. *Journal of usability studies*, Vol. 8, No. 2, pp. 29–40, 2013.
- [19] 古井陽之助, 前田環貴, 松本誠義. 講義画面の自動連続キャプチャを行う講義・学習支援システムとその評価実験, 火の国情報シンポジウム 2014. 情報処理学会, Vol. 8, .
- [20] Yuan Li, Feiyu Lu, Wallace S Lages, and Doug Bowman. Gaze Direction Visualization Techniques for Collaborative Wide-Area Model-Free Augmented Reality. In *Symposium on Spatial User Interaction, SUI '19*, New York, NY, USA, 2019. Association for Computing Machinery.

付 録 A

A.1 SSQ アンケート

実験日：
 実験者氏名：
 年齢：
 性別： 男・女

実験前評価アンケート

| 主観的評価項目 | | | 段階※ |
|---------|--------------------------|--------------------------|---------|
| 項目 | English | 日本語 | |
| 1 | General Discomfort | 一般的な不快感がある | 0・1・2・3 |
| 2 | Fatigue | 疲労感がある | 0・1・2・3 |
| 3 | Headache | 頭痛がする | 0・1・2・3 |
| 4 | Eyestrain | 目が疲れている | 0・1・2・3 |
| 5 | Difficulty Focusing | 目の焦点がぼける | 0・1・2・3 |
| 6 | Increased Salivation | 唾液が増えている | 0・1・2・3 |
| 7 | Seating | 発汗している | 0・1・2・3 |
| 8 | Nausea | 吐き気がする | 0・1・2・3 |
| 9 | Difficulty Concentrating | 集中できない | 0・1・2・3 |
| 10 | Fullness of Head | 頭が重い | 0・1・2・3 |
| 11 | Blurred Vision | 目がかすむ | 0・1・2・3 |
| 12 | Dizzy (Eyes Open) | 目を開けた状態でふらっとするようなめまい感がある | 0・1・2・3 |
| 13 | Dizzy (Eyes Closed) | 目を閉じた状態でふらっとするようなめまい感がある | 0・1・2・3 |
| 14 | Vertigo | 自分や周囲が回転するようなめまい感がある | 0・1・2・3 |
| 15 | Stomach Awareness | 胃の存在感がある | 0・1・2・3 |
| 16 | Burping | げっぷがでる | 0・1・2・3 |

※0=なし, 1=わずかに, 2=中程度, 3=激しい

監督者記入欄：ステージ 天地 (有・無)

：入力装置 ヘルメット

ヘッドトラッキング

OptiTrack

実験後評価アンケート

| 主観的評価項目 | | | 段階※ |
|---------|--------------------------|--------------------------|---------|
| 項目 | English | 日本語 | |
| 1 | General Discomfort | 一般的な不快感がある | 0・1・2・3 |
| 2 | Fatigue | 疲労感がある | 0・1・2・3 |
| 3 | Headache | 頭痛がする | 0・1・2・3 |
| 4 | Eyestrain | 目が疲れている | 0・1・2・3 |
| 5 | Difficulty Focusing | 目の焦点がぼける | 0・1・2・3 |
| 6 | Increased Salivation | 唾液が増えている | 0・1・2・3 |
| 7 | Seating | 発汗している | 0・1・2・3 |
| 8 | Nausea | 吐き気がする | 0・1・2・3 |
| 9 | Difficulty Concentrating | 集中できない | 0・1・2・3 |
| 10 | Fullness of Head | 頭が重い | 0・1・2・3 |
| 11 | Blurred Vision | 目がかすむ | 0・1・2・3 |
| 12 | Dizzy (Eyes Open) | 目を開けた状態でふらっとするようなめまい感がある | 0・1・2・3 |
| 13 | Dizzy (Eyes Closed) | 目を閉じた状態でふらっとするようなめまい感がある | 0・1・2・3 |
| 14 | Vertigo | 自分や周囲が回転するようなめまい感がある | 0・1・2・3 |
| 15 | Stomach Awareness | 胃の存在感がある | 0・1・2・3 |
| 16 | Burping | げっぷがでる | 0・1・2・3 |

※0=なし, 1=わずかに, 2=中程度, 3=激しい

A.2 SUS アンケート

実験後アンケートその2 (SUS)

| 質問内容 | Strongly Disagree | | | Strongly Agree | |
|---|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | ⇐強く反対する | | | 強く賛成する⇨ | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 1.このシステムをしばしば使いたいと思う I think that I would like to use this system frequently. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 2.このシステムは不必要なほど複雑であると感じた I found the system unnecessarily complex. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 3.このシステムは容易に使えと思った I thought the system was easy to use. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 4.このシステムを使うのに技術専門家のサポートが必要とするかもしれない I think that I would need the support of a technical person to be able to use this system. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 5.このシステムにあるさまざまな機能がよくまとまっていると感じた I found the various functions in this system were well integrated. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 6.このシステムでは、一貫性のないところが多くあったとおもった I thought there was too much inconsistency in this system. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 7.たいていのユーザは、このシステムの使用方法について、素早く学べるだろう I would imagine that most people would learn to use this system very quickly. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 8.このシステムはとても扱いにくいと思った I found the system very cumbersome to use. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 9.このシステムを使うのに自信があると感じた I felt very confident using the system. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 10.このシステムを使い始める前に多くのことを学ぶ必要があった I needed to learn a lot of things before I could get going with this system. | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |