

筑波大学大学院博士課程
理工情報生命学院
システム情報工学研究群修士論文

帽子型タッチインタフェースにおける
ジェスチャ入力手法

坂田 和輝
修士（工学）
（情報理工学位プログラム）

指導教員 高橋 伸

2023年3月

概要

Virtual Reality (VR) における視点操作はヘッドトラッキングによる操作が一般的である。しかし、頭部を能動的に動かすことによる疲労感が発生するため、頭部を動かさない新たな VR 視点操作手法として頭部表面ジェスチャが考えられた。頭部表面ジェスチャは頭部表面をなぞるような操作である。本研究ではまず頭部表面ジェスチャを行うため、2種類の帽子型タッチインタフェースを作成し、頭部表面操作を可能とした。1つ目は、指に装着された電極から電圧を印加することによってタッチを検出するものである。2つ目は、身体に高周波を流すことによって指で直接触れ、タッチを検出するものである。そして頭部表面ジェスチャを用いた VR 回転操作について調査が未実施であるため、帽子型タッチインタフェースを用いて調査を実施した。VR 回転操作の中でも、視点操作、全天球操作、オブジェクト操作に対して操作方法を検討し調査した。視点操作についての調査では、頭部表面ジェスチャとコントローラ操作の比較を行った。実験において、4人中3人の参加者から標準平均以上のユーザビリティスコアが得られ、より少ない VR 酔いで操作できた結果となった。また、全天球操作とオブジェクト操作に対する調査では、頭部表面ジェスチャと卓上に設置した半球デバイスに同じジェスチャを行った場合で比較を行った。結果では、頭部表面ジェスチャと卓上ジェスチャの操作時間にウィルコクソンの符号順位検定を実施した結果、角度が中 ($p = 1.68 \times 10^{-3}$) と大 ($p = 7.50 \times 10^{-3}$) の条件において有意差があった。また、オブジェクト回転操作においても、同様に角度が中 ($p = 8.70 \times 10^{-3}$) と大 ($p = 3.52 \times 10^{-2}$) の条件において有意差があった。従って、全天球操作とオブジェクト操作の両方で頭部表面ジェスチャの方が早い操作が可能であることが示された。しかし、ユーザビリティ評価と VR 酔い発生度に有意差は見られなかった。そして、頭部表面ジェスチャによる VR 以外のデバイス操作が実現されていないため、帽子型タッチインタフェースを使用しモバイルデバイス操作を行うためのアプリケーションを作成した。本インタフェースにおける5つのジェスチャを考案し、その後ジェスチャ認識ソフトウェアと音楽アプリ、ワークアウトアプリ、地図アプリを実装し、頭部表面ジェスチャによる操作を実現した。

目次

第1章 序論	1
1.1 背景	1
1.2 本研究の目的	2
1.3 本研究の貢献	2
1.4 本論文の構成	3
第2章 関連研究	4
2.1 平面タッチ検出手法に関する研究	4
2.2 導電繊維を用いたタッチセンサに関する研究	4
2.3 回転操作インタフェースに関する研究	5
2.4 本研究の位置づけ	5
第3章 帽子型タッチインタフェースの実現	6
3.1 頭部表面ジェスチャ操作のためのデバイスにおける問題	6
3.2 指に装着した電極からの電圧印加によるタッチ検出	6
3.2.1 ハードウェア構成	6
3.2.2 タッチ位置の計算	7
3.3 身体への電圧印加による指の直接タッチの検出	11
3.3.1 ハードウェア構成	11
3.3.2 タッチ精度調査	12
3.4 議論	18
第4章 頭部表面ジェスチャによるVR回転操作	19
4.1 概要	19
4.2 帽子型タッチインタフェースによるVR回転操作手法	19
4.2.1 システム構成	20
4.2.2 回転量の計算	20
4.3 頭部表面ジェスチャによるVR視点回転操作	20
4.3.1 視点回転操作手法	22
4.3.2 視点回転操作におけるユーザビリティと酔いの調査	22
実験参加者と実験手順	23
実験結果	23

議論	25
4.4 全天球回転操作とオブジェクト回転操作の調査	27
4.4.1 全天球回転操作	27
4.4.2 オブジェクト回転操作	27
4.4.3 ユーザビリティ調査	29
実験タスクと実験環境	29
実験参加者と実験手順	32
操作時間の結果	32
SUSとSSQの結果	32
4.4.4 議論	35
回転操作に対する仮説について	35
操作の早さ	36
ユーザビリティ	36
VR酔いの発生	37
第5章 頭部表面ジェスチャによるモバイルデバイス操作	38
5.1 概要	38
5.2 ジェスチャ操作の種類	38
5.3 ジェスチャ認識	39
5.4 モバイルデバイス用アプリケーション	40
5.4.1 音楽アプリ	41
5.4.2 ワークアウトアプリ	41
5.4.3 地図アプリ	42
5.4.4 2つのアプリの並行操作	42
5.5 議論と今後の課題	44
第6章 結論	46
謝辞	47
参考文献	48

目次

3.1 指に装着した電極からの電圧印加によるタッチ検出を行うハードウェア構成	8
3.2 導電布帽子と指サック	8
3.3 電極の取付箇所	9
3.4 帽子上の測定時の様子とその等価回路	10
3.5 指に装着した電極からの電圧印加によるタッチ検出を行う帽子型タッチインタフェース	11
3.6 身体に電圧を印加しタッチ検出を行うハードウェア構成と電極取付箇所	13
3.7 帽子とリストバンド電極を装着し、帽子に触れる様子	14
3.8 非反転増幅回路（左）と半波整流回路（右）	14
3.9 身体に電圧を印加しタッチ検出を行う帽子型タッチインタフェースの回路図	15
3.10 身体に電圧を印加しタッチ検出を行う帽子型タッチインタフェースの配線図	16
3.11 部品実装済みの基盤（左）と腕に装着するリストバンド（右）	17
3.12 タッチ用ガイドを取り付けた帽子	17
3.13 帽子上9点を10回タッチした時の散布図	18
4.1 帽子型タッチインタフェースのシステム構成	21
4.2 視点回転操作時の帽子上のタッチ位置と視点の回転方向の対応。赤：左右方向、青：上下方向	22
4.3 実験用 VR 空間の様子	24
4.4 各参加者の帽子とコントローラ使用時の操作時間	25
4.5 SSQスコア。左上：N（気持ち悪さ）、右上：O（ふらつき感）、右下：D（目の疲労感）、左下：TS（トータルスコア）	26
4.6 頭部表面ジェスチャによる操作の回転イメージ	28
4.7 回転操作対象による視点位置の違い	28
4.8 実験に用いた Unity シーンと操作時の様子。上：全天球回転操作、下：オブジェクト回転操作	30
4.9 全天球回転時の視界変化の様子	30
4.10 使用した全天球画像	31
4.11 卓上操作条件で使用する卓上に球形発泡スチロールに導電布帽子を被せたもの	31
4.12 ターゲットへのタスク別操作時間。上：全天球操作タスク、下：オブジェクト操作タスク	33
4.13 各参加者の SUS の結果	34

4.14 各参加者のSSQの結果. 左から順にNスコア, Oスコア, Dスコア, TSスコア	35
5.1 モバイルデバイス操作に用いるドラッグジェスチャの4方向	39
5.2 通常のタップ(左)と手のひらタッチ(右)	40
5.3 モバイルデバイス操作時ジェスチャ認識の状態遷移図	41
5.4 音楽アプリのスクリーンショットと操作方法	42
5.5 ワークアウトアプリのスクリーンショットと操作方法	43
5.6 地図アプリのスクリーンショットと操作方法	43
5.7 同時操作アプリケーションのスクリーンショットと帽子上の操作のための タッチ位置の分け方	45

表目次

4.1 各参加者の SUS スコア	24
5.1 ジェスチャと各操作の対応表	42

第1章 序論

1.1 背景

Virtual Reality (VR) における視点操作はヘッドトラッキング入力によって操作することが一般的である。ヘッドトラッキング入力は、頭部に装着したヘッドマウントディスプレイ (HMD) の動きをトラッキングし、その動きに合わせて視点が動く。従って、現実世界と同じように VR 空間で周りを見回すことができる。しかし、この操作では頭部を動かすことによる疲労感が発生する。そのため、頭部を動かさない新たな VR 視点操作手法として頭部表面ジェスチャが考えられた [1], [2]。

頭部表面ジェスチャは頭部表面をなぞるような操作である。この操作によって VR の視点を回転させる。人間の頭部を半球表面と見立て、頭部 (半球) 表面上において指を動かす操作により視点の回転操作を自然に行えるのではないかと考えられた。ヘルメット型タッチインタフェースの研究 [1] では、ヘルメット表面にタッチセンサを取り付け、ヘルメット表面をなぞることによる視点操作を可能とした。頭部表面ジェスチャによって視点の操作を行ったが、タッチセンサには自己静電容量センサが用いられていたため、連続的なタッチ検出が難しい問題があった。また、ヘルメットの重量によって使用者に負担がかかるという問題があった。そこで、卒業研究において導電布を用いることで軽量化した帽子型タッチインタフェースの研究を行った [2]。帽子型タッチインタフェースとは頭部装着可能なタッチ検出を行う帽子であり、頭部表面ジェスチャはその表面をなぞることで行う。デバイスに導電布を用いることで重量を軽量化しただけでなく、電圧印加とその電圧値を測定することにより連続的なタッチ点検出を可能にした。しかし帽子型において、触れる強さによってタッチ検出位置がずれてしまう問題と、指サックを装着して使用しなければならないという問題があった。また、帽子型タッチインタフェースによる視点操作のユーザビリティ等の調査は実施されなかった。これら2つの研究はいずれも頭部表面ジェスチャを VR 視点操作に用いている。しかし、頭部表面ジェスチャは VR 視点操作以外への使用は研究されていない。

従って、頭部表面ジェスチャに関する課題が4つ判明した。1つ目は、帽子型タッチインタフェースにはタッチ点検出と指サック装着の問題がある点である。2つ目は、帽子型タッチインタフェースを使用した視点操作のユーザビリティ調査が未実施である点である。3つ目は、頭部表面ジェスチャが視点操作以外の VR 向け操作についての調査が未実施である点である。4つ目は、頭部表面ジェスチャが VR 以外のデバイスへの操作が実現されていない点である。

1.2 本研究の目的

頭部表面ジェスチャに関する課題を解決するため、本研究の目的を4つ定めた。

1つ目は、卒業研究における帽子型タッチインタフェース [2] の問題を解決した新たな帽子型タッチインタフェースを作成することである、指から電圧印加を行い、帽子上における電圧を測定、電圧比をタッチ位置とすることでタッチ位置がずれてしまう問題を解決する。また、身体へ電流を流すことによって指サックを使用せず指で直接タッチすることを可能とする。

2つ目は、帽子型タッチインタフェースを使用したVR視点操作のユーザビリティを調査することである。卒業研究においては帽子型タッチインタフェースによる視点操作を行ったが、ユーザビリティ等の調査まで実施されなかったため、本研究で調査を実施する。

3つ目は、頭部表面ジェスチャを使用したVRの全天球操作とオブジェクト操作におけるユーザビリティを調査することである。先行研究においてはVR視点操作にのみ頭部表面ジェスチャを適用していたが、頭部表面ジェスチャは頭部表面を球体表面と見立てその上を撫でるような操作であるため、視点の回転に限らず3次元物体を自由に回転させる操作、VRの回転操作全般に使用することもできると考えられる。本研究では全天球とオブジェクトを頭部表面ジェスチャによって操作し、それらのユーザビリティを評価する。全天球とはVR空間内でユーザ周囲を取り囲むような球体であり、視点が球体の内部にある。頭部表面ジェスチャが球体をなぞるような操作であるため、全天球操作を直感的に操作できると考えられる。また、オブジェクト回転操作は全天球回転操作と異なり、視点が物体の外部にあるため、頭部表面ジェスチャよりも手元で回転させるような操作が操作しやすくなるのではないかと推測される。従って、これらの全天球操作とオブジェクト操作について、頭部表面と卓上にて操作した場合を比較してユーザビリティ調査を行う。

4つ目は、頭部表面ジェスチャにおけるモバイルデバイス操作を実現することである。帽子型タッチインタフェースを帽子として日常から装着して使用することを想定し、スマートフォンなど常用するモバイルデバイスに利用できるのではないかと考えた。頭部表面で行えるジェスチャ操作を検討し、ジェスチャ操作可能なモバイルデバイスアプリケーションを作成する。

1.3 本研究の貢献

本研究の貢献を以下に示す。

- 頭部表面ジェスチャ操作を可能にする帽子型タッチインタフェースの作成
- 頭部表面ジェスチャのVR視点回転操作における調査を実施
- 頭部表面ジェスチャのVR全天球回転操作とオブジェクト操作における調査を実施
- 頭部表面ジェスチャで操作可能なモバイルデバイスアプリケーションの作成

頭部表面ジェスチャを VR の回転操作やモバイルデバイス操作に使用するため、本研究ではまず2種類の頭部表面ジェスチャのための帽子型タッチインタフェースを作成した。1つ目の帽子型インタフェースは導電布で帽子を作成し、指に装着された電極から電圧を印加することによってタッチ位置を検出する。2つ目の帽子型インタフェースは身体に高周波を流すことによって指に電極を装着せず直接接触れることによるタッチ位置を検出する。また、2つ目の帽子型タッチインタフェースのタッチ検出精度を調査した。

そして、作成した1つ目の帽子型タッチインタフェースを使用して頭部表面ジェスチャを VR 視点操作について調査を実施する。また、VR 全天球操作、オブジェクト操作を対象にも調査を実施する。それぞれの操作について頭部表面ジェスチャによる操作方法を検討し、実験によって操作の速さ、ユーザビリティ、VR 酔いの発生などについて調査した。

また、2つ目の帽子型タッチインタフェースを使用して頭部表面ジェスチャをモバイルデバイスの操作に使用できるようにするためのアプリケーションを作成した。帽子型タッチインタフェースを使った5つのジェスチャを考え、その後、ジェスチャ認識アプリケーションとして音楽アプリ、ワークアウトアプリ、地図アプリを実装し、頭部表面ジェスチャによる操作を実現した。

1.4 本論文の構成

本章では、本論文の背景及び目的について述べた。第2章では、関連研究について説明し、本研究の位置づけを明らかにする。第3章では、帽子型タッチインタフェースの実装について述べる。第4章では、帽子型タッチインタフェースを用いた VR 回転操作についての調査、結議及び議論を述べる。第5章では、帽子型タッチインタフェースを用いたモバイルデバイス操作について述べる。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、まず平面におけるタッチ検出手法に関する研究について述べ、次に導電繊維を用いたウェアラブルデバイスに関する研究について述べる。その後、回転操作インタフェースに関する研究について述べる。最後に、本研究の位置づけを示す。

2.1 平面タッチ検出手法に関する研究

平面タッチセンサの検出手法は抵抗膜方式、または静電容量方式が一般的に用いられている。抵抗膜方式 [3] は3層構造であり、上下2層の導電層とその上下2層を接触しないようにする抵抗膜層からなる。簡単に実装可能であるが、マルチタッチ検出ができない特徴がある。静電容量方式 [4, 5, 6] は、自己静電容量方式と相互静電容量方式に分けられる。自己静電容量方式は導電物体に電流を流すことによって電界を発生させ、指が近づくことで静電容量が増加するため、タッチが検出できる。タッチ検出のみを行うため、タッチ位置などの情報は取得できない。相互静電容量方式はスマートフォンのタッチパネルなどに用いられている。送信電極と受信電極の2つが用いられ、送信電極に高周波を流すことで受信電極との間に擬似的なコンデンサが生じる。指が近づくことで静電容量が減少するため、タッチを検出できる。相互静電容量は自己静電容量と異なり、マトリクス状にセンサを配置することでタッチ位置とマルチタッチが検出が可能なタッチセンサとなる。

2.2 導電繊維を用いたタッチセンサに関する研究

導電繊維を用いることによってウェアラブルなタッチデバイスを作成した研究がいくつも存在する。導電布を用いた研究では、導電布と抵抗膜を重ね合わせて作成した抵抗膜方式タッチセンサ [3, 7] が存在し、布素材で平面のタッチセンサを実現した。これらの抵抗膜方式センサを基に靴下型センサ [8] や、袖に装着するセンサ [9] などの形を加工したものも存在する。これらの研究は、布センサを筒状に丸めることで靴下型や袖形状に加工し、装着可能とした。靴下型センサでは足裏にかかる圧力を測定する。袖装着のセンサではつまむ操作、なぞる操作を検出する。他にも体に装着するセンサとして導電布とピエゾ抵抗布を使用した研究 [10] では、ズボンの表面をタッチパッド上でのスワイプジェスチャの検出を可能とした。また、細長い電極を並べ、腕に巻き付け腕上ジェスチャを行う研究 [11] では、ジェスチャによるスマートウォッチアプリの操作性を向上させた。導電布だけでなく導電糸を用いてもタッチ検出を行う研究が存在し、衣類のタッチ検出を可能にする研究 [12] では、高い導電性を持つ新たな

導電糸を開発し、それを網目状に服へ縫い付けることでタッチやジェスチャの認識を可能とする。また、導電糸の縫い付けられた布に対するつまむ操作の研究 [13] では、複数本の導電糸を布へ並行に縫い付け、腕や肩、腿部分での服のつまむ操作を検出した。導電糸が縫い付けられた布への引っ張る操作の研究 [14] では、導電糸の様々な縫い付け方による引き伸ばしを検出するセンサへの影響を調査し、スマートフォンやスマートウォッチへのインタラクションも行った。

2.3 回転操作インタフェースに関する研究

回転操作インタフェースに関する研究として、GlobeFish, GlobeMouse [15] がある。卓上に設置されたデバイスの中央にあるトラックボールを回転、移動させることで 6DoF の回転を可能としている。また CubicMouse は [16] ではトラックキューブから XYZ 方向に出るロッドと上部に設置されたボタンを操作することで仮想オブジェクトの移動や回転を行う。

また、直感的な回転操作を行うために球体のタンジブルインタフェースを用いた研究がいくつも存在し、設置された球体を回転させる研究 [17] や球体を手に持って回転させる研究 [18, 19] が存在する。これらの研究では、透明な物理球の内部にトラックを設置し、回転を検出することで操作を行う。また、球型マウスの研究 [20] では、卓上に球体を置き、それをマウスのように手で保持しながらその球体を回すことで回転操作も操作するだけでなく、球体を卓上でスライドさせることで並行移動に使用することが可能である。

2.4 本研究の位置づけ

本研究では、導電布を用いた帽子型タッチインタフェースを用いることで頭部表面ジェスチャを様々な入力に使用する。2.1 節に挙げられたセンシング手法では、頭部のような半球形状に加工して用いることが困難である。まず、抵抗膜方式では平面でないことによって3つの層の接触が不安定になってしまう。また、自己静電容量方式ではセンサの数を数十個用いなければならず配線や装着が難しくなる。相互静電容量方式では半球表面へ電極のマトリクス状の配置が困難である問題がある。本研究では帽子と指に電極を装着することによって、これらの問題を解消しながら、頭部表面におけるタッチを実現する。2.2 節の研究は導電繊維を用いて様々な身体上のタッチインタラクションを可能としているが、頭部表面に対するインタラクションの研究は存在しない。本研究では帽子型タッチインタフェースによる VR やスマートフォンへの頭部表面操作を新たに提案する。また、2.3 節のデバイスを掴んで回転させることによる操作を行っているが、操作のためにインタフェースの形状を目視する、または VR などの環境であれば手に持ち続けて操作しなければならない問題がある。また、GlobeFish, GlobeMouse [15] はデバイスが卓上に設置されているため、ユーザは操作位置と場所を制限されてしまう問題がある。本研究はこれらとは異なり、頭部表面で行う操作であるため、デバイスを卓上へ設置する必要や常に手に持っている必要がなく、特定の場所や姿勢に大きな制限のない回転操作入力を可能とする。

第3章 帽子型タッチインタフェースの実現

本章では、頭部表面ジェスチャを実現するための帽子型タッチインタフェースについて述べる。初めに、先行研究で作成された頭部表面ジェスチャのための頭部装着デバイスの特徴とその問題点について述べる。次に、指に装着した電極からの電圧印加によるタッチ検出を行う帽子型タッチインタフェースについて述べる。その後、身体に高周波を流すことによって指で直接タッチ可能な帽子型タッチインタフェースについて述べる。最後に、指で直接タッチ可能な帽子型タッチインタフェースについてタッチ検出精度の調査について述べる。

3.1 頭部表面ジェスチャ操作のためのデバイスにおける問題

頭部表面ジェスチャ操作のためのデバイスとして、ヘルメット型タッチインタフェース [4] が存在する。ヘルメット上へ自己静電容量のタッチセンサを取り付けたこのインタフェースでは、ヘルメットの重量による負担と連続的なタッチ検出が困難である問題があった。この問題を解決するため、導電布を使用して軽量化し、導電布への電圧印加によって連続的なタッチ検出を可能とする帽子型タッチインタフェースの研究 [2] が行われた。しかし、このインタフェースでは導電布部分が左右で分割され、そこに大きな隙間ができていたため、タッチ領域が狭くなるという問題や、導電布への電圧印加によるタッチ検出であったため、ふれる強さによって検出されるタッチ位置のずれが発生してしまう問題があった。従って、本研究では、頭部表面を隙間なく導電布で覆う帽子型タッチインタフェースを作成することで、タッチ領域を広くする。また、指からの電圧印加によるタッチ検出を行うことによって触れる強さによってタッチ位置のずれが発生する問題を解決する。

3.2 指に装着した電極からの電圧印加によるタッチ検出

3.2.1 ハードウェア構成

頭部の半球面でのタッチ検出を可能とするため、指に電極を装着し、そこから頭に装着された帽子へ電圧を印加することによってタッチを検出する帽子型タッチインタフェースを作成した。本インタフェースはマイクロコンピュータ（マイコン）、導電布帽子と帽子に装着された電極、指サックから構成される。インタフェースの構成は図 3.1 のようになる。マイコンには ESP32-DevKitC-32E（以下、ESP32）を用いた。ESP32 は Arduino と同様に Arduino IDE を使用してプログラムすることで動作するマイコンである。しかし ESP32 は Arduino とは異

なり、Bluetooth 無線通信を行うことができるため、本インタフェースに使用することとした。導電布帽子は表面抵抗 $3 \times 10^4 \Omega/\text{sq}$ の不織導電布を型紙に合わせて切り、3つを縫い合わせることで作成した (図 B.2)。この型紙は円周が 64 cm となるようサイズを調整し用意した。また、指に電極を装着するため、表面抵抗 $105 \Omega/\text{sq}$ の導電布を指の腹側に縫い付けた布製指サックを作成、使用した。導電布帽子の端部 4 箇所には前後左右の位置に等間隔に電極を装着した (図 B.2)。この電極はマイコンの ADC ピンと接続され、指サックから帽子へ印加された電圧を測定するために使用する。電極と接続されたマイコンが電極の電圧測定、GND の切り替え、電圧からタッチ位置の計算を行う。そして電圧から計算されたタッチ位置の値を Bluetooth を通じて PC などに送信することが可能である。タッチ検出のため、指の電極にはマイコンから正電圧が印加され、帽子にタッチすることで指の電極が導電布に触れ、導電布へ電圧が印加される。帽子に使用した導電布と指サックに用いた導電布は異なるが、帽子に使用した方が抵抗値が大きいのは、十分な電圧降下が発生しより帽子上に大きな電圧が印加されることで、ノイズに影響されにくくなりタッチ点を検出しやすくするためである。また、指サックに用いた導電布の抵抗値が比較的小さい理由は、指サックと導電布帽子の接触抵抗を小さくし、十分に電圧が帽子へ印加されるようにするためである。

3.2.2 タッチ位置の計算

使用時はまずユーザが帽子と指サックを装着する。タッチ検出のため、指の電極にはマイコンから正電圧 3.3 V が印加される。その指が帽子に触れることで帽子にも電圧が印加される。まず帽子の前後の電極を GND に設定し、左右の電極から電圧を測定する (図 B.4)。次に、左右の電極を GND にし、前後の電極から電圧を測定する。測定した 4 つの電圧値からタッチ点及び帽子に触れている強さを算出する。タッチしている位置は、帽子表面を 2 次元平面として、左右の電極方向を X 方向、前後の電極方向を Y 方向とする。また帽子に触れる強さを P とした。それぞれの計算式は式 B.1 に示す。

$$X = \frac{V_1}{V_1 + V_2}, Y = \frac{V_3}{V_3 + V_4}, P = \frac{V_1 + V_2 + V_3 + V_4}{4} \quad (3.1)$$

式に示すように電圧値の比を計算しタッチ位置を計算している。このような式となった理由として、まずタッチすると、タッチ位置から電極までの長さによって抵抗値が変化する (図 B.4)。ゆえに、タッチ位置が電極に近いほど抵抗値が小さくなり、得られる電圧値は大きくなる。しかし、図 B.4 に示すように指の電極と帽子の導電布の間には接触抵抗が存在し、強く触れると接触抵抗は小さくなる。そのため、同じタッチ位置でも触れる強さによって電圧値は変化する。同じタッチ位置で値を一定にするために、式 B.1 に示すように電圧値の比を計算しタッチ位置とした。接触抵抗によらずタッチ位置からそれぞれの電極までの抵抗値の比は一定であり、電圧値の比もそれと等しいためこのように計算する。触れる強さ P は各電極の電圧の平均値となっているが、触れる強さによりすべての電圧値が変化するため、その平均を触れる強さの指標とした。

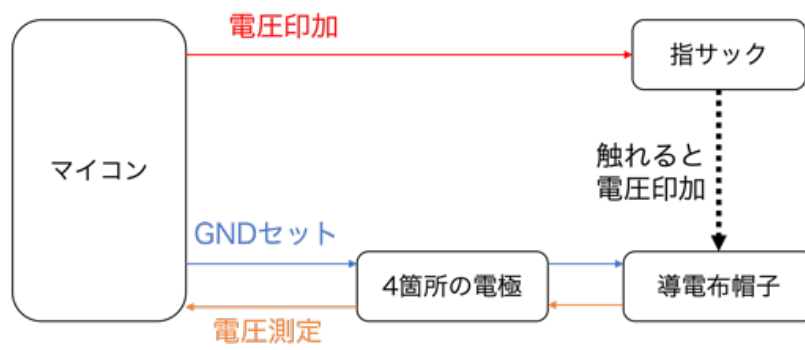


図 3.1: 指に装着した電極からの電圧印加によるタッチ検出を行うハードウェア構成



図 3.2: 導電布帽子と指サック

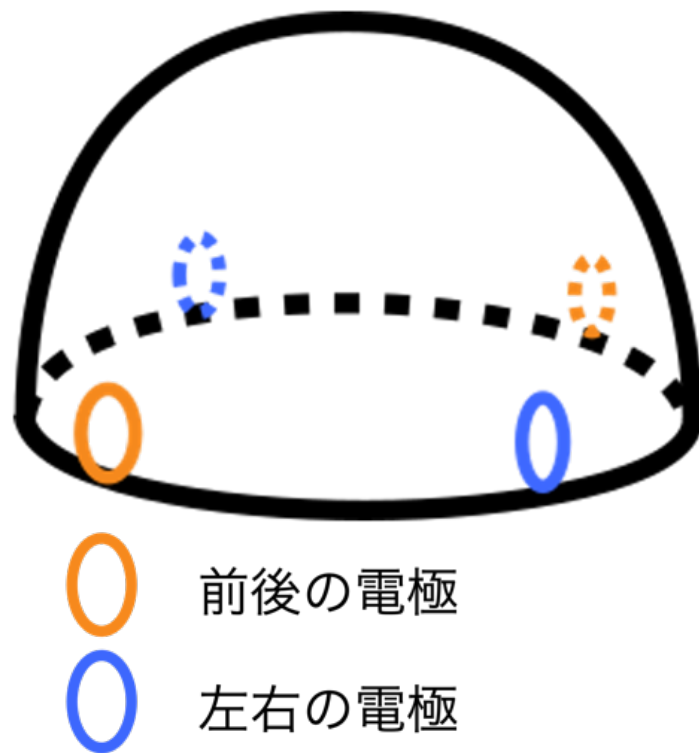


図 3.3: 電極の取付箇所

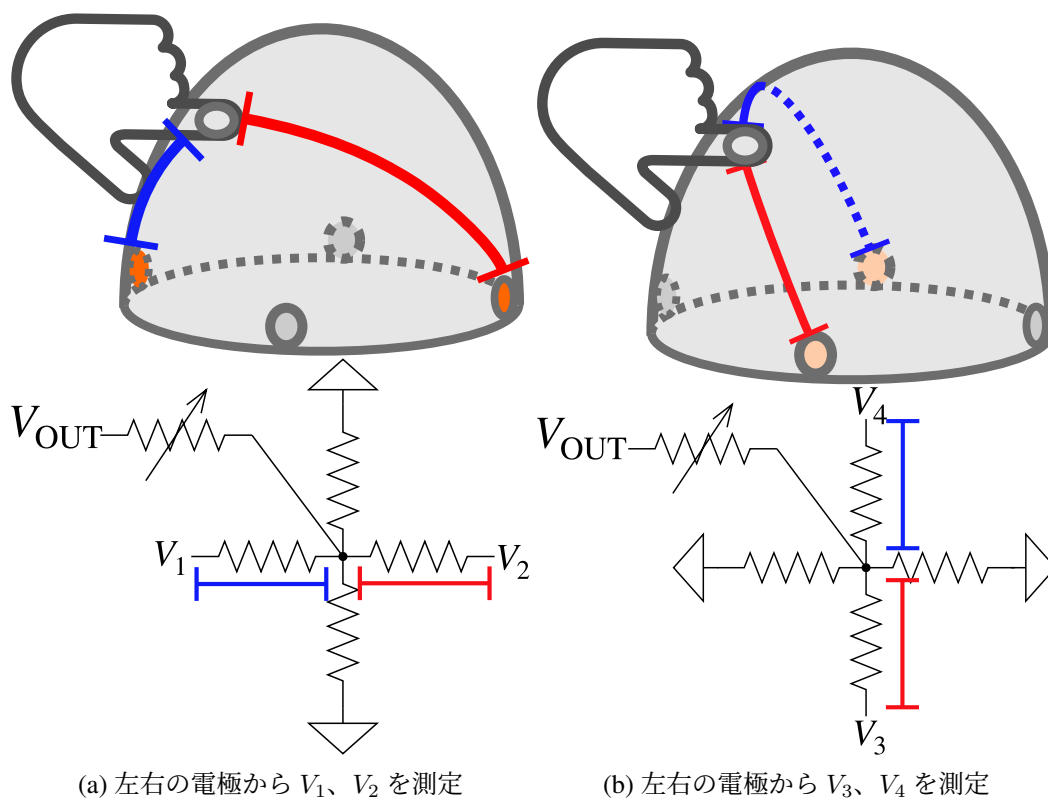


図 3.4: 帽子上の測定時の様子とその等価回路



図 3.5: 指に装着した電極からの電圧印加によるタッチ検出を行う帽子型タッチインタフェース

3.3 身体への電圧印加による指の直接タッチの検出

身体に高周波を流すことによって指で直接タッチ可能な帽子型タッチインタフェースを作成した。帽子型のタッチインタフェースであるため，外出時に歩行や運転時に帽子として常に装着しながら使用することが有用であると考えた。従って，[3.2](#)節のように指先に電極を常に装着している場合は日常動作の妨げとなる可能性がある。これを解決するため，指で直接タッチ検出可能な帽子型タッチインタフェースを作成した。

3.3.1 ハードウェア構成

電圧を指から帽子へ印加するため，高周波を身体表面に流す手法を用いた。本インタフェースはマイコン，波形生成器，信号増幅回路，リストバンド電極，導電布帽子と帽子に装着された電極，整流回路から構成される。インタフェースの構成は[図 3.6](#)のようになる。ユーザは帽子とリストバンドを装着する ([図 3.7](#))。マイコンには [3.2](#)節と同じく ESP32-DevKitC-32E を用いた。まず，マイコンから SPI 通信によって波形生成器に制御信号を送信する。制御信号によって波形生成器から 100 kHz, 0.6 Vpp サイン波が生成される。そのサイン波を信号増幅回路によって増幅する。増幅回路には非反転増幅回路を用いた ([図 3.8](#))。非反転増幅回路による増幅の式を式 [3.2](#) に示す。 V_i が入力電圧， V_o が出力電圧， R_1, R_2 は[図 3.8](#) に示す非反

転増幅回路に含まれる抵抗の抵抗値である。

$$V_o = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \times V_i \quad (3.2)$$

オペアンプを用いた非反転増幅回路によって 0.6 Vpp から約 3 Vpp に増幅した。ユーザがリストバンドを装着すると、リストバンド裏面には導電布が貼り付けられているため、100 kHz サイン波電流が身体に流れる。リストバンドは図 3.11 のようになっている。指で帽子に触れると身体に印加された高周波電流が帽子に流れる。導電布帽子部分は 3.2 節と同じ素材、同じ縫い方で作られたものを用いている。しかし、帽子に接続される電極の配置は異なり、交流読み取り専用の 4 箇所と GND 用の 1 箇所の計 5 箇所接続されている。電極位置は図 3.6 に示す。4 箇所の電極から電圧を計測するが、交流であるため計測前に半波整流回路を用いて直流に変換する。半波整流回路は図 3.8 に示すようにダイオードとコンデンサから構成される。その後、ESP32 の ADC ピンから半波整流回路によって整流された電圧を測定する。3.2 節とは異なり、計算後のタッチ位置データを送信するのではなく、計算する前に測定された電圧値がそのまま Bluetooth Low Energy (BLE) によって操作したい他デバイスへ送信される。

身体に直接電流を流す安全性について、リストバンド電極から帽子の電極までの抵抗値は、身体表面が抵抗値が湿っている場合は約 2 kΩ、指と帽子の接触抵抗値が約 1 kΩ、合計 3 kΩ となる。また、印加される電圧は 3 Vpp であるため、最大で 1.5 V、最小で -1.5 V の電圧がかかる。従って、身体に流れる電流は、最大約 $1.5 \div 3000 = 0.5 \text{ mA}$ と計算できる。また、電圧の実効値は 1.06 V であり、電流の実効値を計算すると 0.35 mA となる。これらの電流は人が感知できる電流値よりも小さい微弱な電流であるため、安全性について問題はない。

本インタフェースを帽子として常に装着することを可能にするため、回路基板を設計した。基盤の回路図を図 3.9 に、配線図を 3.10 に示す。配線図では、赤色の線が基盤の表面の配線、青色で示された部分は裏面の配線となっている。裏面の青色の広い領域で示されているのは GND であり、GND を広い面積で埋めることで電流がノイズに影響されにくく、安定させることができる。

3.3.2 タッチ精度調査

頭部表面ジェスチャに用いる前に、本インタフェースのタッチ位置の認識精度を調査した。タッチ位置の計算は、左右電極からの電圧値を V_1, V_2 、前後電極からの電圧値を V_3, V_4 とすると、式 3.1 と同様に計算した。

7.5 cm 間隔で 3 点タッチ可能なガイドを帽子の上部と左右に付け、同じ位置を複数回タッチできるようにした。その様子は図 3.12 に示す。帽子上の 9 点を 10 回ずつタッチし、そのときの X, Y の値を記録した。

結果を図 3.13 に示す。X は 0.42 から 0.75、Y は 0.48 から 0.69 の値の範囲をとった。各タッチ点の標準偏差を平均すると X は 0.0048、Y は 0.0034 であった。

各点の間隔が 7.5 cm であり、そこに対応するタッチ座標の値の差は約 0.05 から 0.1 であることから、標準偏差は実際の長さとして X が約 0.357 cm、Y が約 0.255 cm 程度であると考え

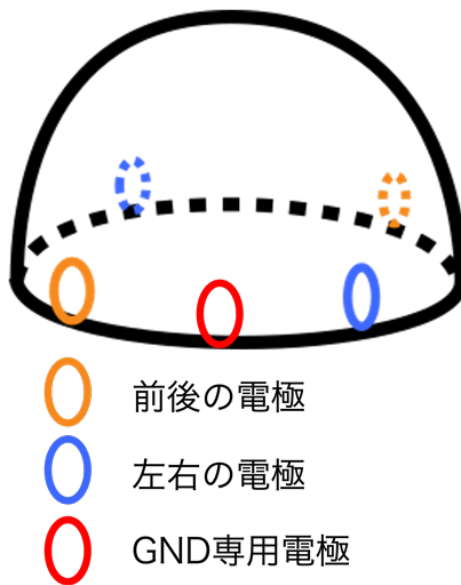
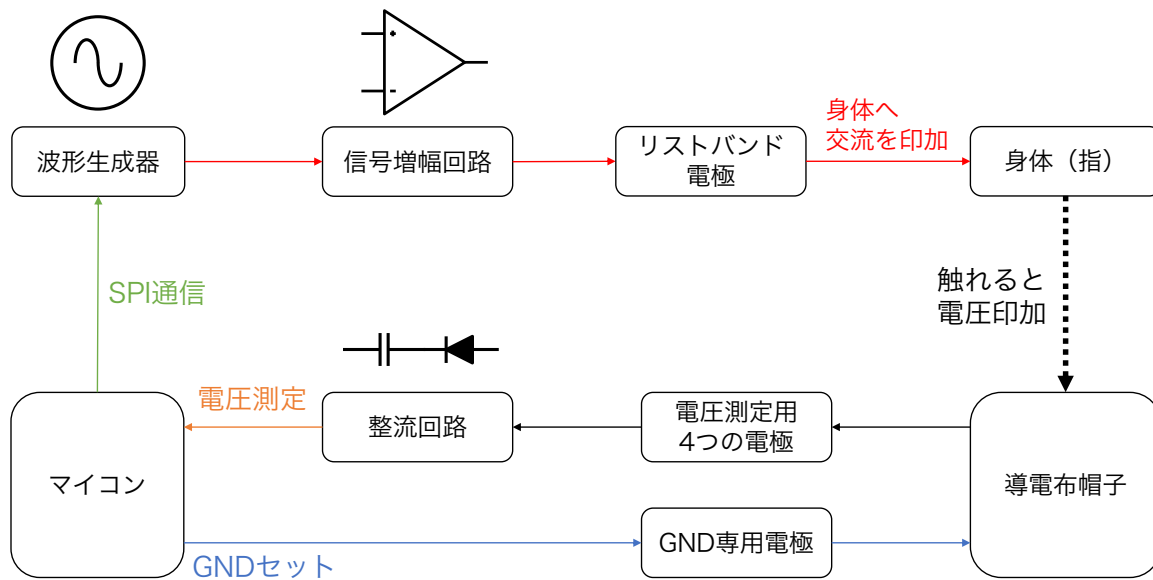


図 3.6: 身体に電圧を印加しタッチ検出を行うハードウェア構成と電極取付箇所



図 3.7: 帽子とリストバンド電極を装着し，帽子に触れる様子

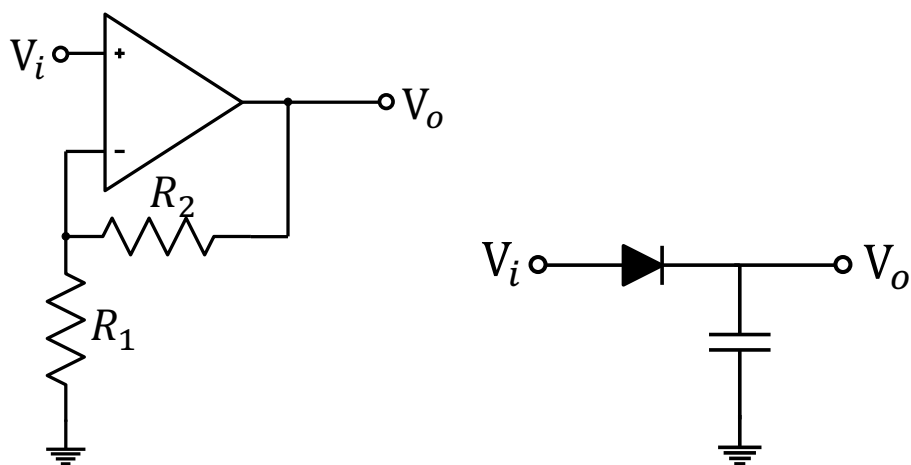


図 3.8: 非反転増幅回路（左）と半波整流回路（右）

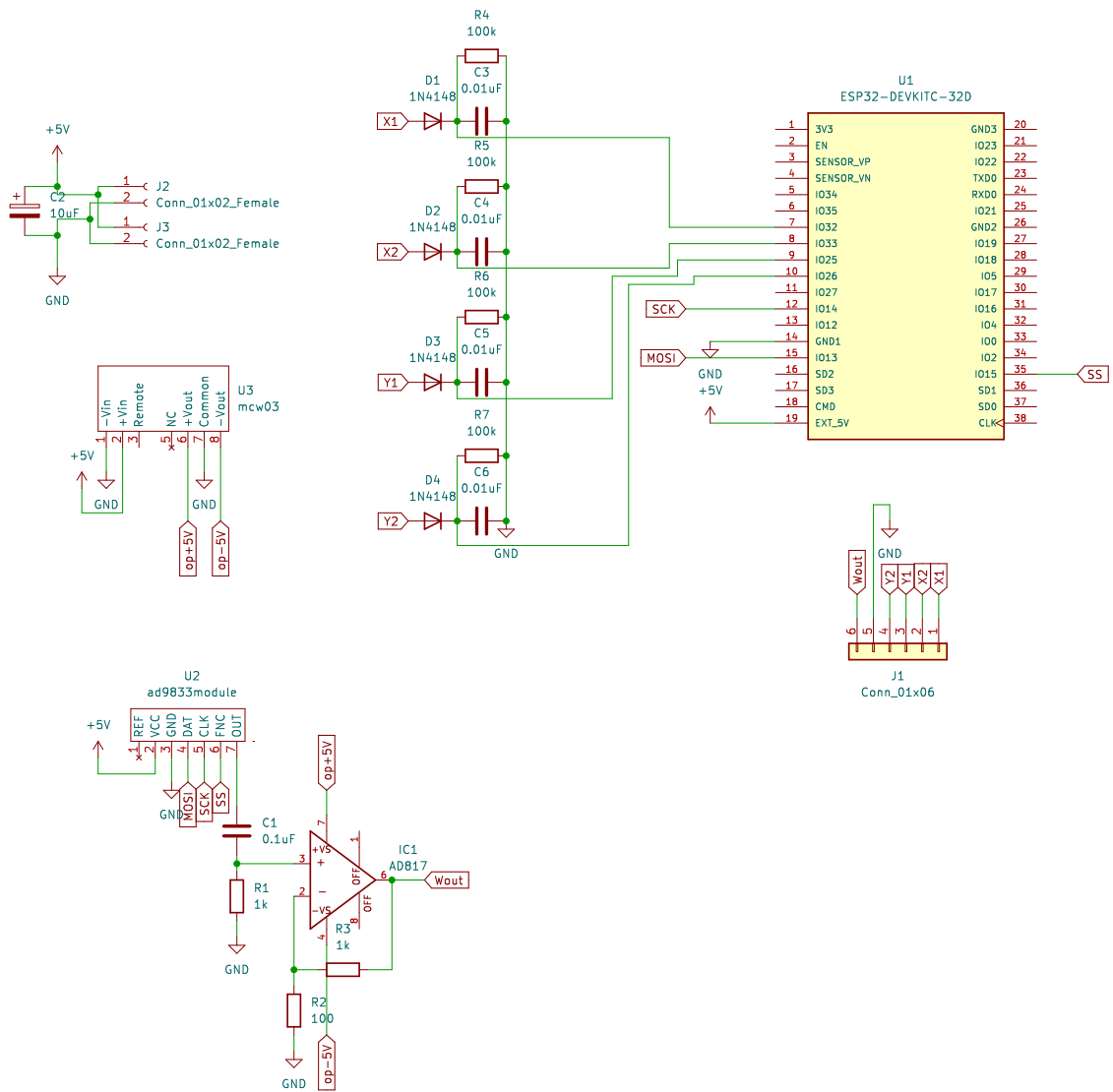


図 3.9: 身体に電圧を印加しタッチ検出を行う帽子型タッチインタフェースの回路図

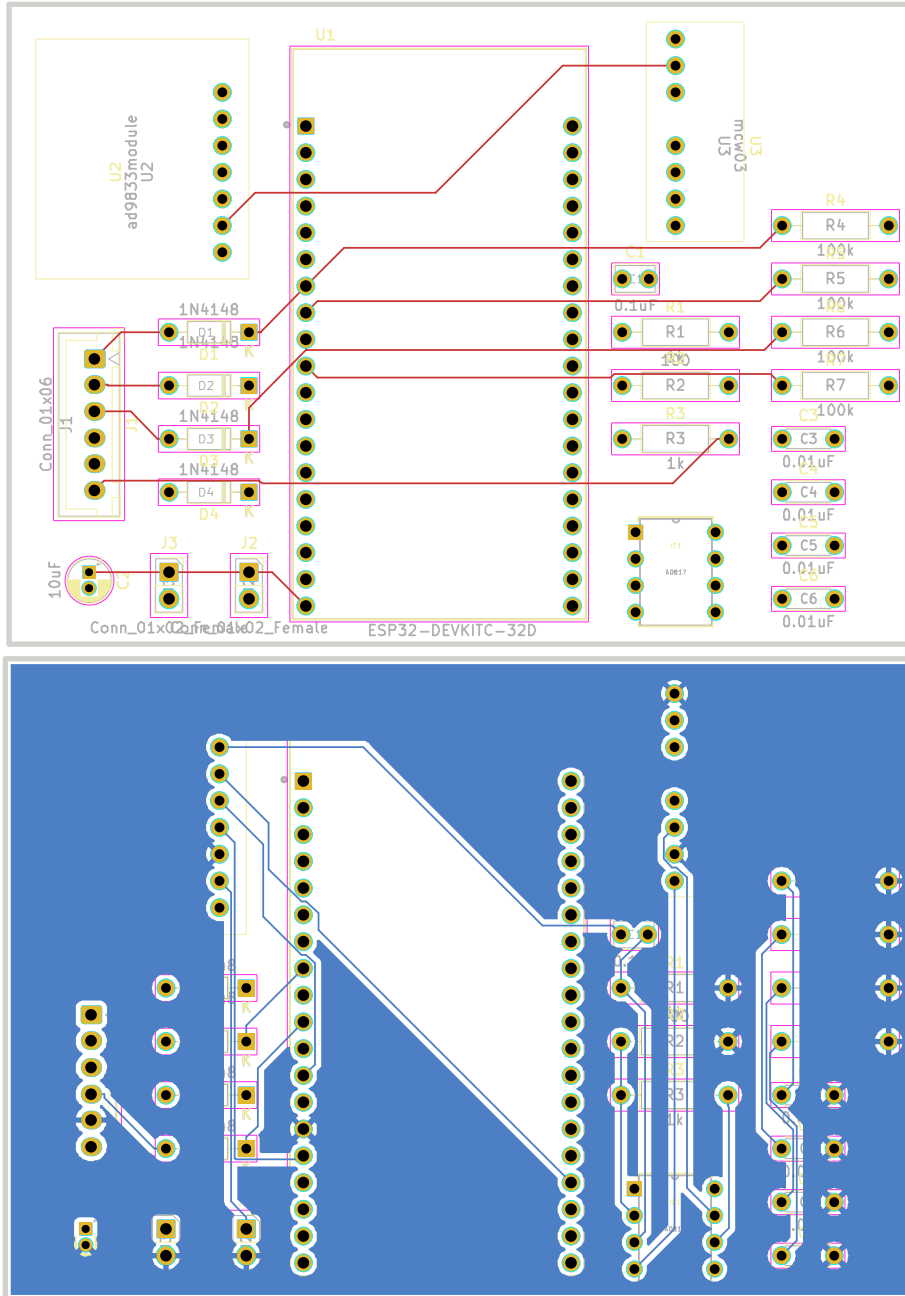


図 3.10: 身体に電圧を印加しタッチ検出を行う帽子型タッチインターフェースの配線図

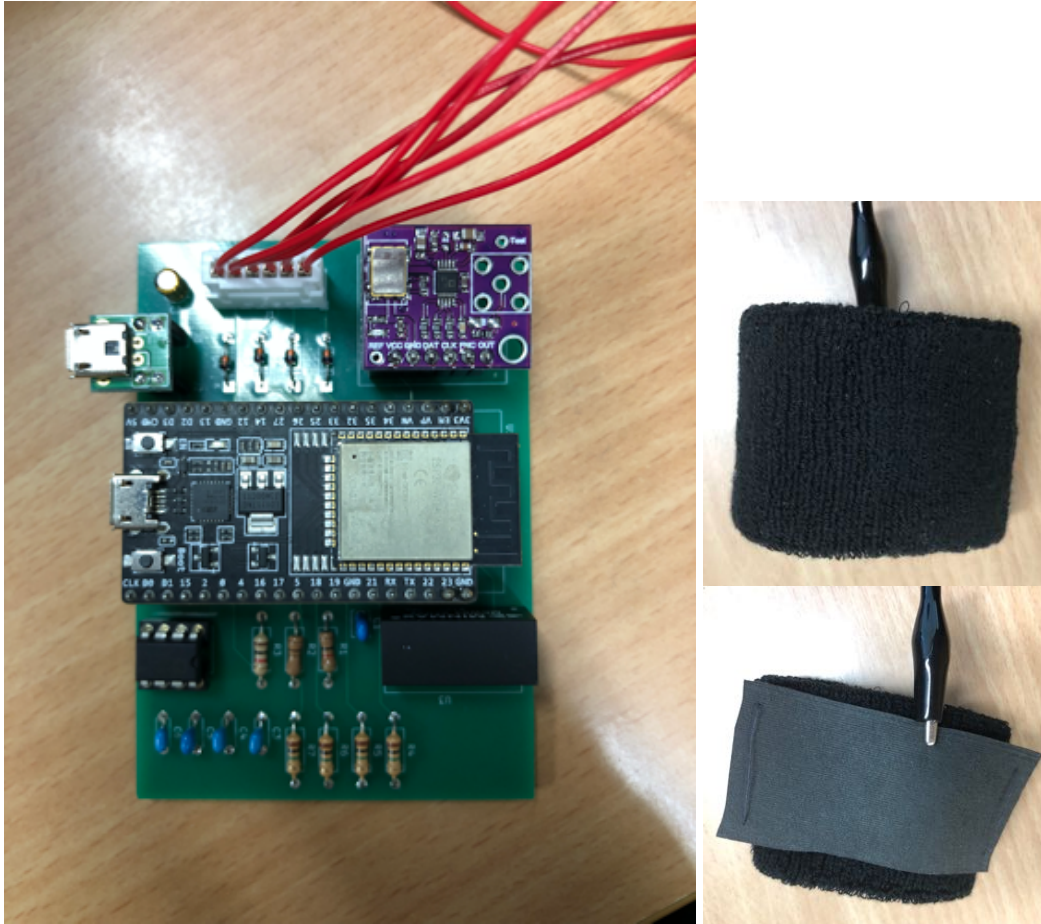


図 3.11: 部品実装済みの基盤（左）と腕に装着するリストバンド（右）

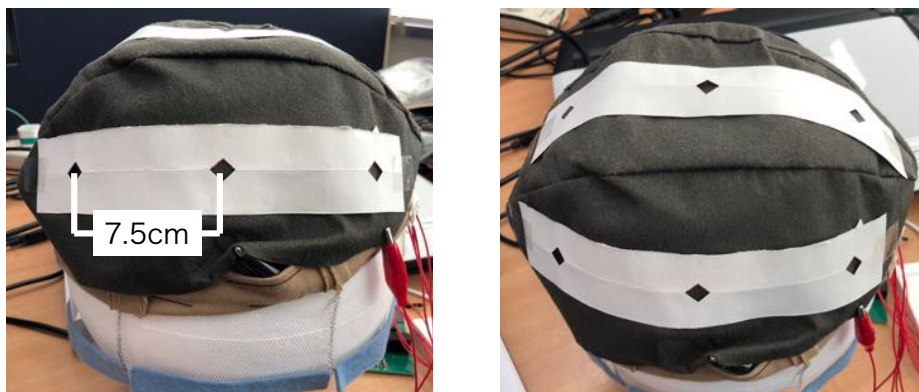


図 3.12: タッチ用ガイドを取り付けた帽子

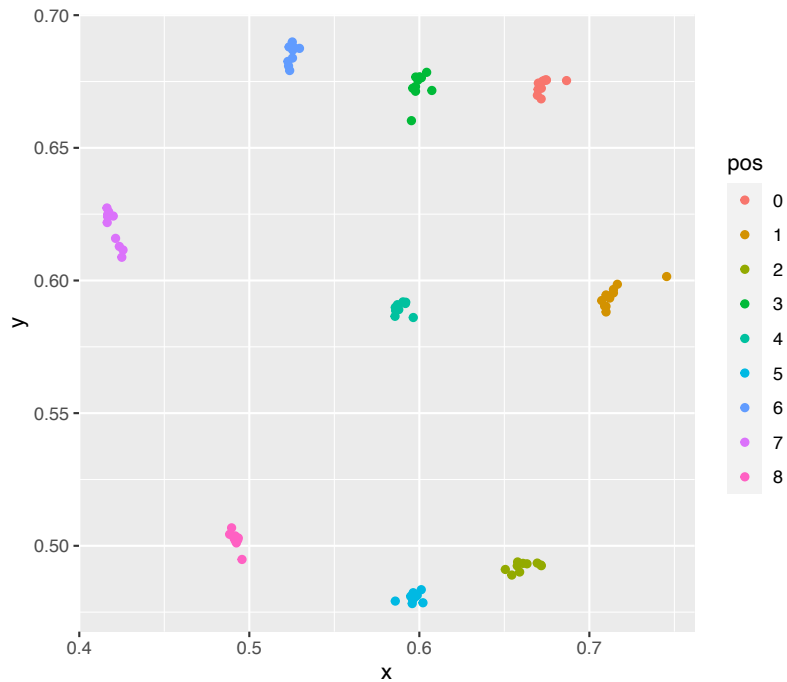


図 3.13: 帽子上 9 点を 10 回タッチした時の散布図

られる。この結果より、1 cm 間隔以上のタッチであればタッチ位置の識別が可能である精度があると考えられる。

3.4 議論

導電布を縫い合わせた半球状の帽子を使用した。ハットやキャップといった一般的な帽子とは形状が異なる。また、現在の帽子型デバイスでは布と布の縫い目部分は導電布部との抵抗値が異なる部分が存在する。従って、市販の帽子に導電スプレーを塗布することによって導電性帽子を作成することを検討している。導電スプレーとしてカーボンスプレーなどを用いることによって一定の表面抵抗値を持った帽子を簡単に作成できると考えている。

また、現在マイコンと帽子を接続する電極はワニ口クリップを用いている。帽子としての使用にはワニ口の大きさや帽子から飛び出した形状が装着を阻害する場合もあるため、電極として金属製のジャンパーホックを使用することを検討している。接触抵抗を小さくするため、導電布への接続には電極を圧着する必要があるためワニ口クリップを使用しているが、ジャンパーホックで導電布を強い力で挟み込み接続することで、接触抵抗を小さくかつ帽子から飛び出さない形状を保つことができると考えている。

第4章 頭部表面ジェスチャによるVR回転操作

本章では、頭部表面ジェスチャをVRへ適用したときの操作とその調査について述べる。最初に頭部表面ジェスチャによるVR回転操作の概要について述べる。次に、帽子型タッチインタフェースを用いてVR回転操作を行うためのシステム構成について述べる。続いて、VR視点回転操作とその調査について述べる。その後、全天球回転操作とオブジェクト回転操作とその調査について述べる。最後に、調査結果について議論する。

4.1 概要

頭部表面ジェスチャを用いて回転操作を行った研究 [1] では、ヘルメット型タッチインタフェースを作成して頭部表面ジェスチャを行った。そして、このタッチインタフェースを用いてVR視点の回転操作が行われた。また、ヘルメット型タッチインタフェースの問題を解決するための帽子型のタッチインタフェースが作成された [2]。しかし、帽子型タッチインタフェースを使用した場合の視点操作の調査は行われていない。従って、本章ではまず帽子型タッチインタフェースを使用したVR視点回転操作について調査を行う。

また、他のVR回転操作として全天球回転とオブジェクト回転についても調査を行う。頭部表面ジェスチャが頭を撫でる操作であることから、全天球を回転させる操作により適しているのではないかと考えた。全天球とはVR空間内でユーザ周囲を取り囲むような球体であり、視点が球体の内部にある。頭部表面ジェスチャが球体をなぞるような操作であるため、全天球操作を直感的に操作できると考えられる。オブジェクト回転操作は全天球回転操作と異なり、視点が物体の外部にあるため、頭部表面ジェスチャよりも手元で回転させるような操作が操作しやすくなるのではないかと推測される。従ってこの全天球操作とオブジェクト操作を操作位置の違いにより比較する。また、調査に際して頭部表面ジェスチャの操作速度に関する2つの仮説を立て、実験を実施する。

4.2 帽子型タッチインタフェースによるVR回転操作手法

まず調査の前に、帽子型タッチインタフェースを回転操作に使用するためのシステムを構成、ソフトウェアを作成した。

4.2.1 システム構成

システム構成を図 4.1 に示す。VR 回転操作の調査では 3.2 節の帽子型タッチインタフェースを用いた。使用時はユーザーが導電布帽子、指サックに加えて HMD を装着する。マイコンにて帽子上のタッチ点を測定し、タッチ座標 X 、 Y 及びタッチの強さ P を bluetooth シリアル通信によって無線で PC へ送信する。送信は 20ms に 1 回、すなわち 1 秒に 50 回行われる。PC にて Unity の C# スクリプトがタッチ座標データから回転操作に必要な数値を算出する。

4.2.2 回転量の計算

帽子型タッチインタフェースからタッチ位置 X, Y 及びタッチの強さ P の値が送信されてくる。タッチ位置データを使用し回転操作に使用するため、帽子上におけるタッチ移動量に対する回転量を計算する。算出方法として初めに、タッチ位置左右方向の X 、前後方向の Y 座標を過去 5 回の送信データの平均を計算し平滑化のフィルタリングを行う。次にキャリブレーションを行い帽子の端から端までの座標値を 0 から 1 に収まるように変換する。具体的には、左右方向の場合、変換前座標の右端と左端の値を予め計測し、その両端が 0 と 1 になるように座標を計算により変換する。計算式にすると式 4.1 のように表せる。 X は変換後、 X' が変換前座標を表す。 X'_{min} が変換前の最小値、 X'_{max} が変換前最大値である。この計算によって座標が 0 から 1 に収まるように変換される。この変換を X と Y の両方に適用する

$$X = (X' - X'_{min}) \times \frac{1}{X'_{max} - X'_{min}} \quad (4.1)$$

変換後は座標 (X, Y) を、3次元座標 (x, y, z) へ変換する。左右方向 X と前後方向 Y の 2次元座標で値を受け取るが、その帽子の表面を 3次元空間の球体表面に置き換えて 3次元位置へ変換する。3次元座標への変換を式 4.2 に示す。 r は帽子を球体として変換したときの半径を表す。

$$\begin{aligned} x &= \cos(X \times \pi) \\ y &= \cos(Y \times \pi) \\ z &= \sqrt{r^2 - x^2 - y^2} \end{aligned} \quad (4.2)$$

3次元座標へ変換した後、帽子を半球としたときの半球中心座標からタッチ座標方向のベクトルを計算する。タッチ位置が変化すると始点は一定であるがそのベクトル方向が変化する。ベクトルの変化した角度を計算することによって、帽子をなぞって回転させるための角度を取得する。最後にその角度を使用して VR オブジェクトを回転させる。ユーザーは HMD からその VR 空間を観察する。

4.3 頭部表面ジェスチャによる VR 視点回転操作

VR における頭部表面ジェスチャの中でも、まず視点回転操作に対して調査を実施する。そのため、頭部表面ジェスチャを使用して視点を回転させる操作方法を検討した。

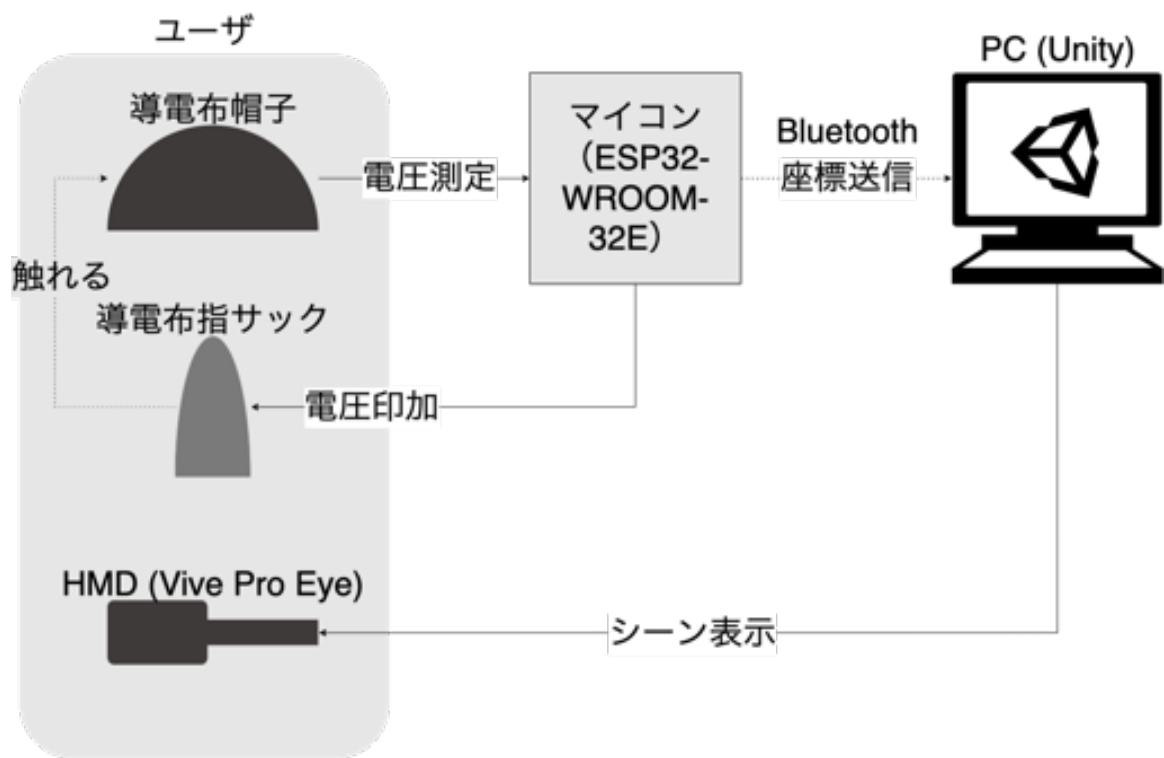


図 4.1: 帽子型タッチインタフェースのシステム構成

帽子型タッチインタフェース

VR内のカメラ

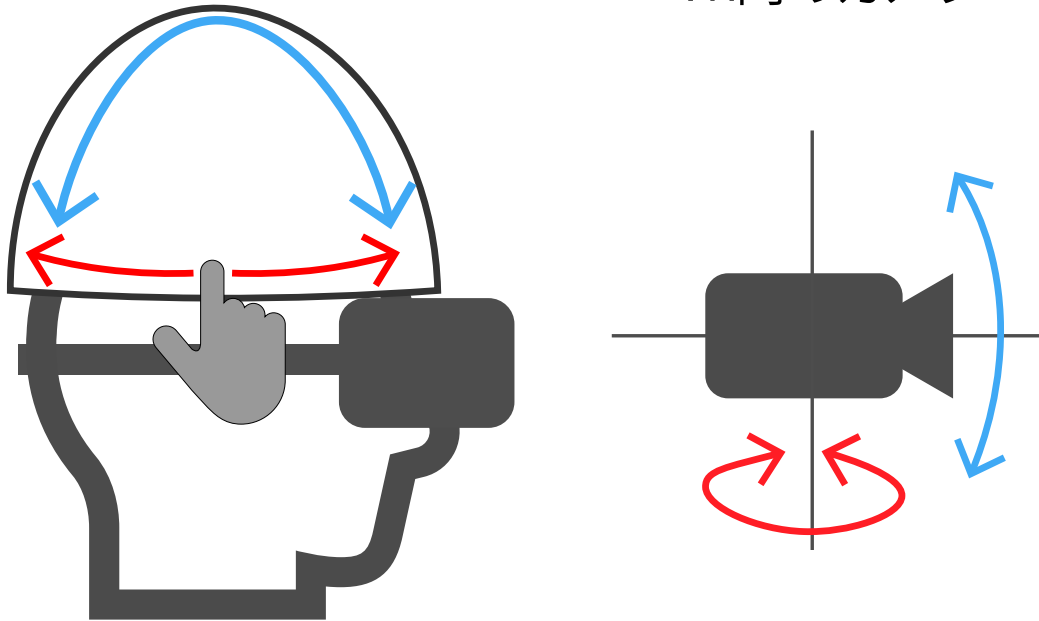


図 4.2: 視点回転操作時の帽子上のタッチ位置と視点の回転方向の対応. 赤：左右方向，青：上下方向

4.3.1 視点回転操作手法

帽子表面を撫でる操作によって、視点を回転させる回転方法を図 4.2 に示す。視点は上下もしくは左右方向へ回転する。側頭部を前後になぞり、視点を左右方向に回転させる。頭頂部を前後になぞり、視点を上下方向に回転させる。左右方向と上下方向は同時には回転せず、タッチ開始の位置によりどちらに回転させるかを決定している。帽子の頭頂部付近（今回の調査では X が 0.35 から 0.65）でなぞり始めたときは視点は前後方向に回転し、それ以外からなぞり始めた場合は左右方向に回転する。視点の回転は 4.2 節で計算された角度に一定の係数をかけた値だけ回転させる。左右方向の係数は 1，上下方向の係数は 0.5 である。上下方向の動きは左右方向に比べて大きな動きを必要としないことからこのように設定された。

4.3.2 視点回転操作におけるユーザビリティと酔いの調査

帽子型タッチインタフェースを使用した頭部表面ジェスチャによって視点を回転させたときのユーザビリティと酔いを調査する。ヘルメット型タッチインタフェース [11] では視点操作について調査が行われた。この研究における問題点を解決するため、帽子型タッチインタフェースが作成された [12] が、こちらのインタフェースでは視点操作について未調査であるため、本研究で調査を実施する。本調査では比較対象として VR 専用コントローラを用いる。

実験参加者と実験手順

実験参加者は4名である。年齢は21から26歳であり、参加者全員がHMDを装着してVRを使用した経験があった。

実験用のVR空間内では、ユーザの周囲の固定位置にオブジェクト（球、四角錐、三角錐、立方体）が設置されている（図4.3）。実験中は色の变化したオブジェクト発見までの時間を計測し、操作時間を調査する。帽子型インタフェースとVR専用コントローラをそれぞれ用いてタスクを行い、比較した。

実験手順として、まずVR使用状況の調査と実験前SSQ（Simulator Sickness Questionnaire）を実施する。SSQは実験前と実験後に体調や気分についての項目に回答してもらい、実験前後の結果の差を見ることでどの程度のVR酔い（Simulator Sickness）が発生したのかを測定するアンケートである。アンケート後、時間測定を開始する前に視点回転方向の組み合わせを設定する。帽子の操作方向に対するVR視点回転方向の反転のあり・なしの組み合わせが上下と左右合せて4パターンある。次に、時間測定を開始すると1つのオブジェクトの色が赤色に変化する。ユーザは赤色に変化したオブジェクトを見つけ出す。赤色のオブジェクトを見つけると色が戻り、別のオブジェクトが赤色に変化する。複数回これを繰り返し、発見するまでの時間を記録する。1セット10回オブジェクトの発見を行い、オブジェクトの大きさを切り替えてこれを4回行う。従って、4セットを4パターンの回数繰り返すため、オブジェクトの発見は参加者1人につき計16セット行われた。最後に、実験後SSQ、SUS（System Usability Scale）、自由記述アンケートを実施する。SUSは10項目のアンケートに回答することで、システムのユーザビリティ指標を0から100のスコアとして出すことができるアンケートである。数値が大きいほどユーザビリティが高いことを表す。

頭部表面ジェスチャの場合とVR専用コントローラの場合を、操作時間、SSQ、SUSの3つの結果から比較する、

HMDはMeta Quest 2を使用し、VR専用コントローラもMeta Quest 2に付属するコントローラを使用した。

実験結果

選択時間の結果を図4.4に示す。全参加者が帽子を用いた選択時間の方が長い結果となった。

SSQスコアを図4.5に示す。SSQでは回答された数値をもとに、N（気持ち悪さ）、O（ふらつき感）、D（目の疲労感）、TS（トータルスコア）の4指標を算出する。スコアが小さいほど体調や気分の悪化が少ないことを示す。参加者3以外はコントローラのスコアの方が大きい結果となった。

SUSスコアを表4.1に示す。SUSの標準平均スコアは68とされており、3人の参加者が標準平均より高いスコアとなった。

また、最後に実施した自由記述アンケートより参加者から以下のような意見が得られた。

- 頭を動かさずに視点操作できて良い

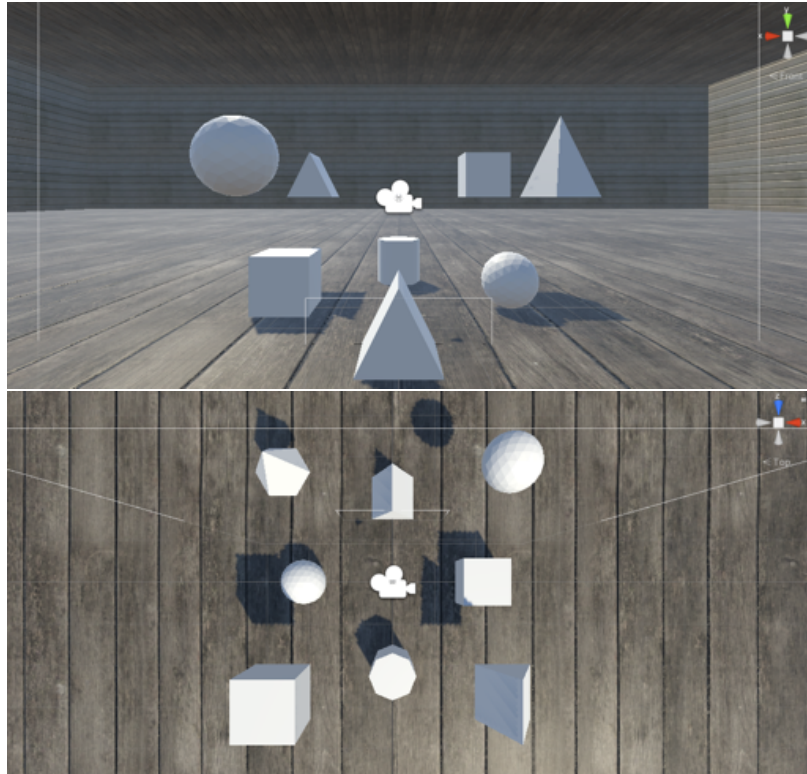


図 4.3: 実験用 VR 空間の様子

参加者	スコア
1	75
2	87.5
3	60
4	87.5

表 4.1: 各参加者の SUS スコア

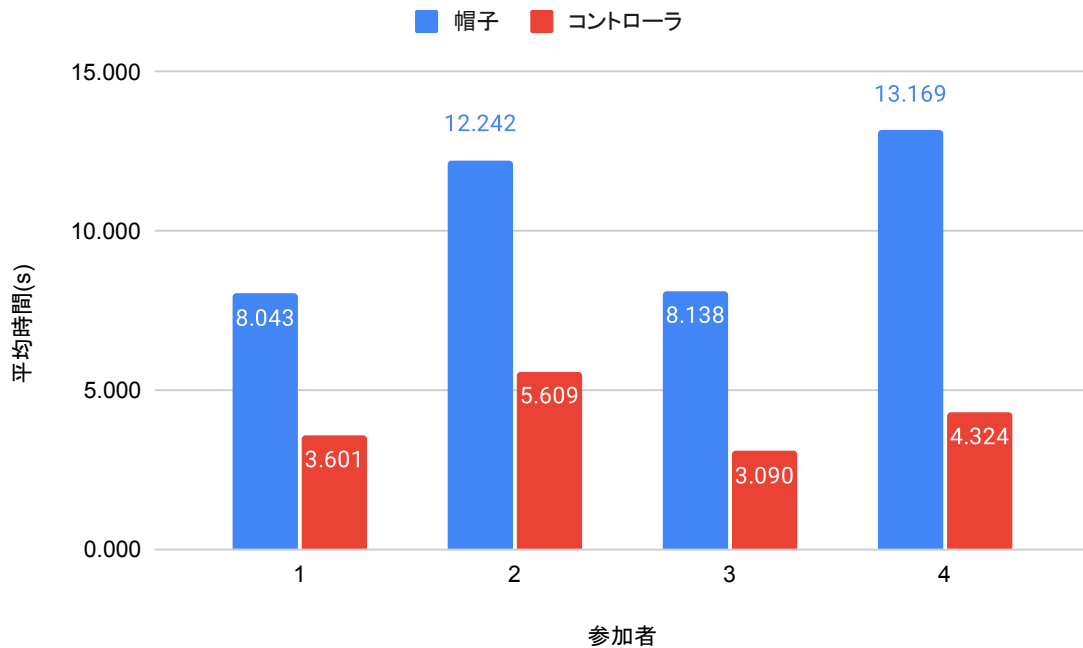


図 4.4: 各参加者の帽子とコントローラ使用時の操作時間

- 直感的な操作ができた
- 腕を上げ続けなければいけない
- 思い通りに回転しない場合があった

議論

視点回転におけるターゲットを発見するまでの時間は本インタフェースよりもコントローラの方が早い操作時間という結果になった。これは、コントローラではジョイスティックを少し傾げるだけで回転をする事ができるのに対し、頭部表面ジェスチャは左右方向に関して現実でなぞった角度と同じ大きさしか動かないために素早く操作できなかった可能性が考えられる。例えば、視点を90度横に回転させようとした時、コントローラではジョイスティックを1秒ほど傾けて操作するのに対し、頭部表面ジェスチャでは帽子の円周64cmの4分の1である16cmをなぞらなくてはならない。1回のなぞる操作で16cmをなぞることが難しく、複数回に渡って帽子を触る必要があることが時間がかかってしまった理由の1つであると考えられる。そのため、現在は操作した角度に対して係数1をかけてそのまま回転させているが、これを大きくすることによって小さななぞる操作で大きく回転させる。これによって、より少ない操作で回転させることで操作時間を短くできる可能性がある。

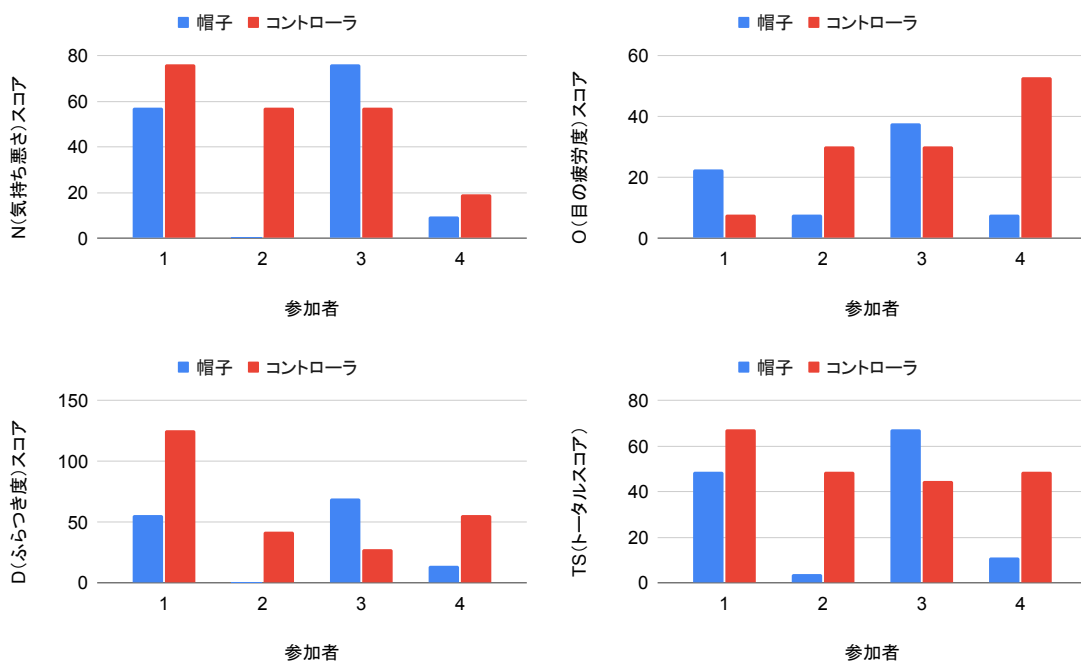


図 4.5: SSQ スコア. 左上: N (気持ち悪さ), 右上: O (ふらつき感), 右下: D (目の疲労感), 左下: TS (トータルスコア)

酔いの SSQ スコアでは 4 人中 3 人の参加者が本インタフェースの方が少ない酔いで操作できた。SUS スコアで評価の高かった参加者 3 人は SSQ スコアが小さかったことより、本インタフェースの操作を実験中に思い通りの操作ができるようになったために快適な操作によって酔いが減少したことがこの理由として考えられる。また、酔いの増加してしまった参加者はアンケートで VR のコントローラ操作に慣れているということがわかったため、コントローラ操作のほうが快適であり、相対的に本手法では酔いの増加してしまったことも考えられる。

また、自由記述アンケートより「思い通りに回転しなかった」ということが挙げられたが、これは上下方向と左右方向の切り替えが正しく動かなかったことによるものであったと聞き取り調査で判明した。今回の調査では X が 0.35 から 0.65 の間で上下方向操作としているため、正しい領域へのタッチをすることができなかったことがあったと考えられる。頭部表面への思った通りの位置にタッチすることが困難である可能性もあるため、ミスが起りにくいように操作手法の修正が必要である。

4.4 全天球回転操作とオブジェクト回転操作の調査

頭部表面ジェスチャを VR において視点回転操作以外に適用する操作として、全天球回転操作とオブジェクト回転操作を検討した。頭部表面ジェスチャが頭を撫でるという操作の特徴から、全天球操作を行うために使用することがより自然ではないかと推測した。

4.4.1 全天球回転操作

全天球操作とは、図 4.7(a) に示すような VR 空間の全天球を回転させる操作である。全天球の内側に 360 度画像が表示されており、視点は全天球の中心にある。通常はユーザは頭や身体を動かして全天球画像を全方位見回すことが可能であるが、全天球を回転させると、頭を動かさずに全天球画像を見ることが可能であるため、この操作を頭部表面ジェスチャを使って行えないかと考えた。この理由は、頭部表面を撫でるという操作と自分の周囲を取り囲む全天球を回転させる操作が直感的に結びつきやすいのではと推測したためである。

操作は図 4.6 に示すように、頭部表面でなぞった方向に対して、なぞった方向に垂直な軸を回転軸として回転させる。

4.4.2 オブジェクト回転操作

オブジェクト回転操作とは、図 4.7(b) に示すように VR 空間のオブジェクトを 3DoF で自由に回転させる操作である。回転の方法は全天球回転操作と同様であるが、ユーザの視点が回転させる物体の外側にあるという違いがある。オブジェクトが自分の前方にあるため、頭部表面ジェスチャよりも手元で回転させるような感覚で操作を行うデバイスの方が操作しやすくなるのではないかと推測される。

操作は全天球回転と同様、図 4.6 のように回転させる。

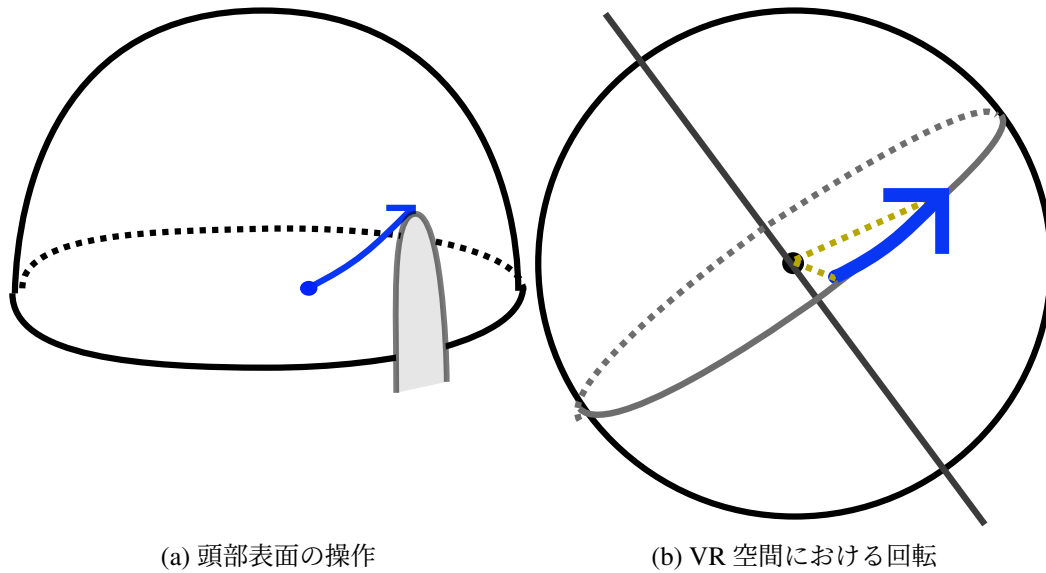


図 4.6: 頭部表面ジェスチャによる操作の回転イメージ

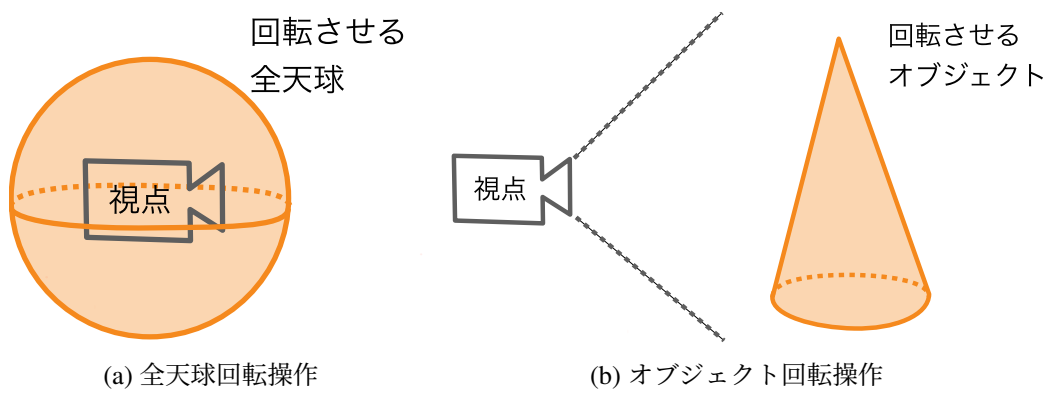


図 4.7: 回転操作対象による視点位置の違い

4.4.3 ユーザビリティ調査

帽子型タッチインタフェースを用いた頭部表面ジェスチャによる VR 空間における回転操作のユーザビリティを調査する。頭部表面ジェスチャが全天球回転操作に向いているのではないかという推測より、以下2つの仮説を設定した。

1. 全天球回転操作の場合、頭部表面ジェスチャの方が卓上の球面ジェスチャより早い操作が可能である
2. オブジェクト回転操作の場合、頭部表面ジェスチャより卓上の球面ジェスチャの方が早い操作が可能である

実験タスクと実験環境

2つの仮説について検証するため、以下2つのタスクを用意した。

全天球回転操作 このタスクでは、図 4.8 に示すように全天球画像が全天球内側に表示されている。視点は全天球の中心に置かれている。ユーザはターゲット（赤い円）が視界の中心になるように全天球を回転させる。帽子表面をなぞることによって全天球は回転する。図 4.9 に示すように回転する。全天球のターゲット以外の領域にはターゲット方向を指し示す三角形が表示されている。従ってユーザはその三角形が指し示す方向へ全天球を回転させる。ターゲットと視界の中心に表示された十字マークを重ねることでターゲットを視界の中心に捉えたと見なす。この操作を繰り返す。ターゲットを視界の中心に捉えるまでの時間が1回ずつ記録される。

円錐オブジェクト回転操作 図 4.8 に示すように、2つの円錐オブジェクトが同じ位置に表示されている。1つは回転可能な緑色の円錐オブジェクト、もう1つは半透明でターゲットとなる終了状態を示すオブジェクトである。このタスクでは、帽子表面をなぞることによって緑色の円錐を回転させる。その円錐をターゲットと同じ向きへ重なるように揃える操作を行う。ターゲットとの角度が20度以内に収まると次のターゲットが示される。この操作を繰り返す。ターゲットと重ね合わせるまでの時間が1回ずつ記録される。

全天球画像は、Blender¹を用いて作成した（図 4.10）。3D空間にオブジェクトを配置し、それを blender の機能を用いて全天球画像用に撮影した。

一方、実験タスクを行うための実験環境も2つ用意した。

頭部表面操作条件 帽子型デバイスを頭部に装着し、頭部表面ジェスチャによる回転操作を行う。

¹<https://www.blender.org>

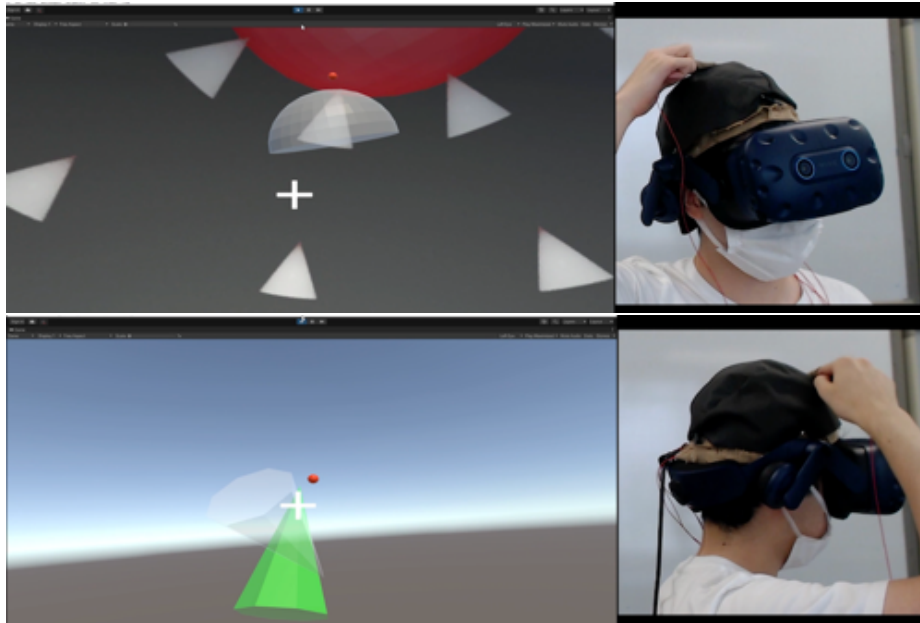


図 4.8: 実験に用いた Unity シーンと操作時の様子. 上：全天球回転操作, 下：オブジェクト回転操作

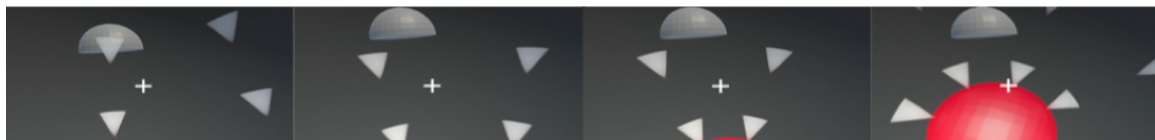


図 4.9: 全天球回転時の視界変化の様子

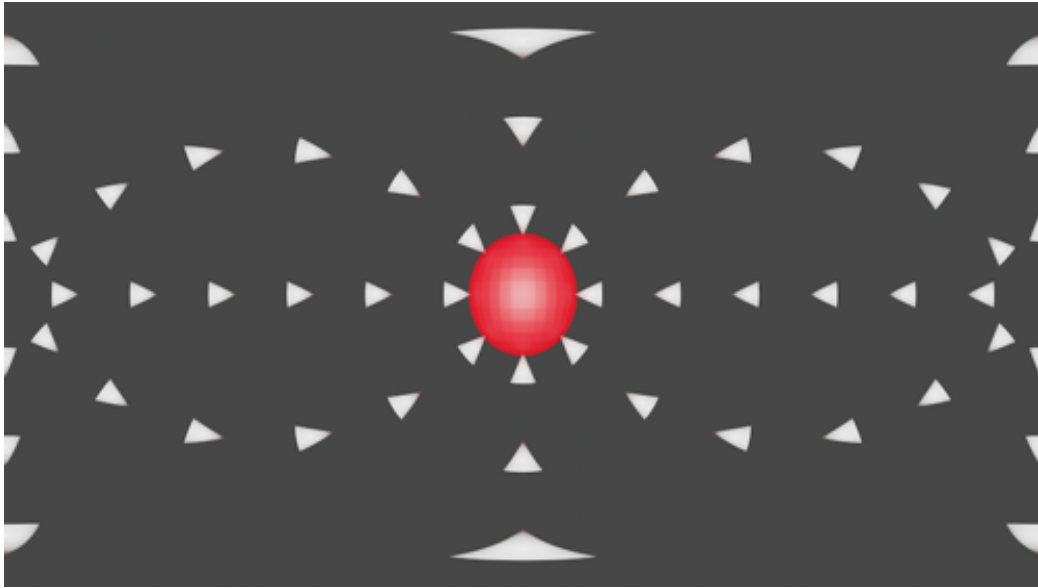


図 4.10: 使用した全天球画像

卓上操作条件 3DoF 回転が行えるデバイスは多数あるが、今回はデバイスの違いではなく操作位置の違いによる比較に注目するため、帽子型デバイスを直径 200 mm の球形発泡スチロールに被せて卓上に設置して用いる (図 4.11)。これにより帽子型デバイスの表面で指を動かす操作は頭部表面操作と同様であるが、操作位置が頭部ではなくユーザの前方位置になる。

また、回転させる角度の大きさによって実験結果が変化するかどうかも調査するため、回転開始位置からターゲットまでの回転角度を、小 (45°)、中 (90°)、大 (135°) と 3 条件を設定した。従って、実験条件はそれぞれの組み合わせであり、操作タスクが 2 条件、操作環境

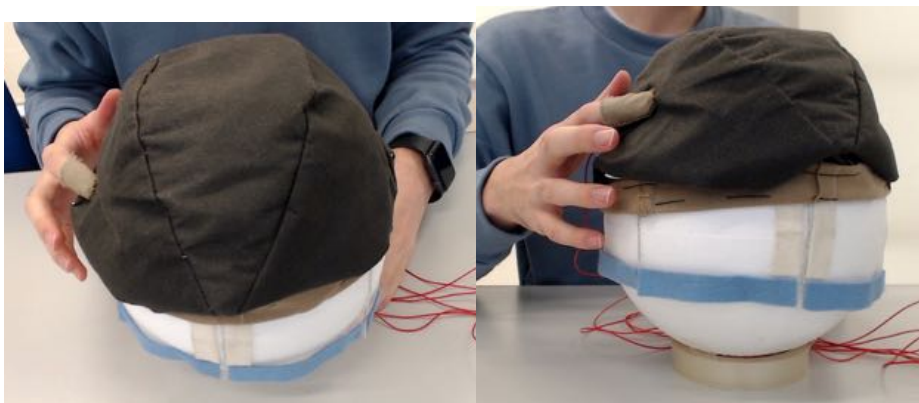


図 4.11: 卓上操作条件で使用する卓上に球形発泡スチロールに導電布帽子を被せたもの

が2条件、回転角度が3条件であるため、 $2 \times 2 \times 3 = 12$ 条件となる。

なお、本実験ではいずれの条件においてもHMDを装着してタスクを行った。また、VR酔い軽減のため、ヘッドトラッキングによるカメラ移動は有効とした。しかし、全天球回転操作にてターゲットを頭の動きのみで確認できてしまうため、能動的な頭部動作を行わないよう、実験前に参加者に伝えた。参加者は帽子型タッチインタフェースの使用時に、導電布指サックを利き手の人差し指に装着した。帽子型デバイスは、参加者によらず頭囲64cmのものを使用した。

実験参加者と実験手順

参加者は8名(22-26歳)であり、全員右利きであった。参加者は12条件のそれぞれでターゲットに合わせることを10回ずつ行った。操作タスクの2条件と操作環境の2条件は、行う順序を参加者ごとに変えることによってカウンターバランスをとった。

実験は初めに研究の目的及び実験内容を説明した後、参加者の同意を得た。次に、実験前アンケートとして、VR使用状況の調査と Simulator Sickness Questionnaire (SSQ) を実施した。参加者によって頭部表面操作条件または卓上操作条件のどちらを先に実施するかは異なる。参加者にデバイスの使用に慣れてもらうため、どちらの環境条件においても最初に5分程度の練習時間を設け、操作の練習を行ってもらった。その後、本番タスクとして全天球回転操作とオブジェクト回転操作のタスク両方を実施した。そして操作後に、SSQと System Usability Scale (SUS) のアンケートを実施した。その後、5分の休憩時間を設け、頭部表面操作と卓上操作の実施しなかった方の条件にて同様のタスクとアンケートを実施した。また、全条件終了後には帽子型デバイスについて自由記述のアンケートにて感想や意見を記入してもらった。

操作時間の結果

各条件の操作時間を図に示す。全天球回転操作における頭部表面操作の操作時間の中央値は各角度ごとにそれぞれ小3.89, 中6.69, 大9.11, 卓上操作では小5.54, 中8.34, 大11.75であった。またオブジェクト回転操作における頭部表面操作の操作時間の中央値は小3.15, 中5.42, 大8.00, 卓上操作では小3.09, 中6.89, 大10.10であった。全天球回転操作では、頭部表面操作・卓上操作条件の各角度別操作時間に対しウィルコクソンの符号順位検定を実施し、有意水準0.01とした結果、角度が中 ($p = 1.68 \times 10^{-3}$) と大 ($p = 7.50 \times 10^{-3}$) の条件において有意差があった。また、オブジェクト回転操作においても、同様に角度が中 ($p = 8.70 \times 10^{-3}$) と大 ($p = 3.52 \times 10^{-2}$) の条件において有意差があった。

SUSとSSQの結果

各参加者のSUSスコアを図に示す。頭部表面操作・卓上操作条件の中央値は、それぞれ65, 60であった。

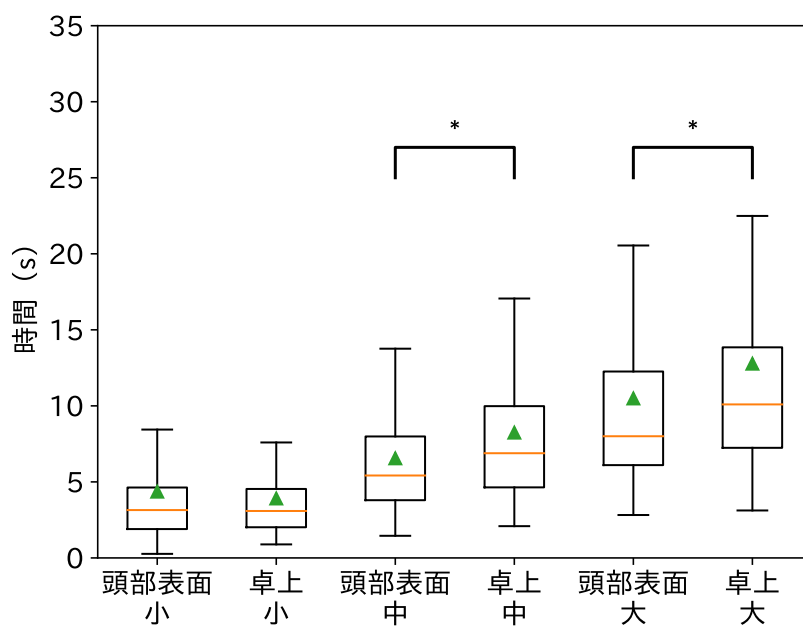
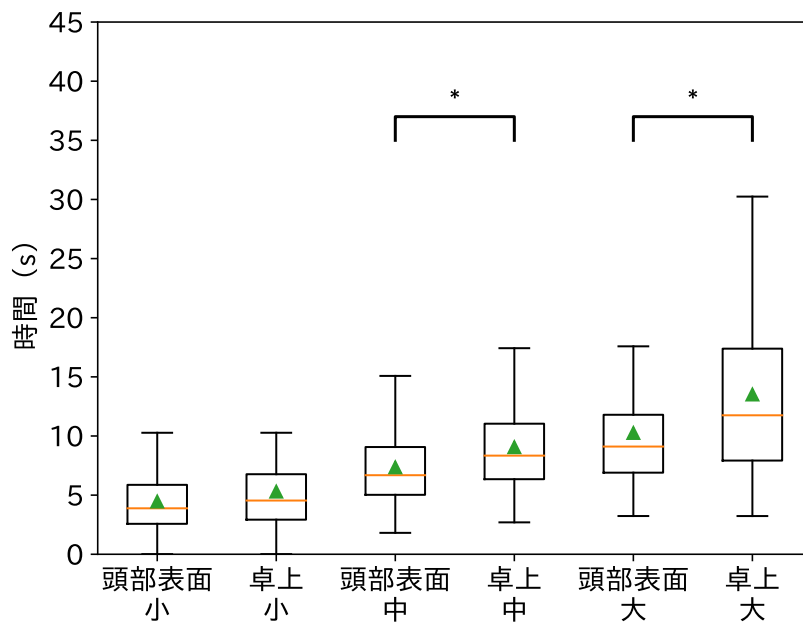


図 4.12: ターゲットへのタスク別操作時間. 上: 全地球操作タスク, 下: オブジェクト操作タスク

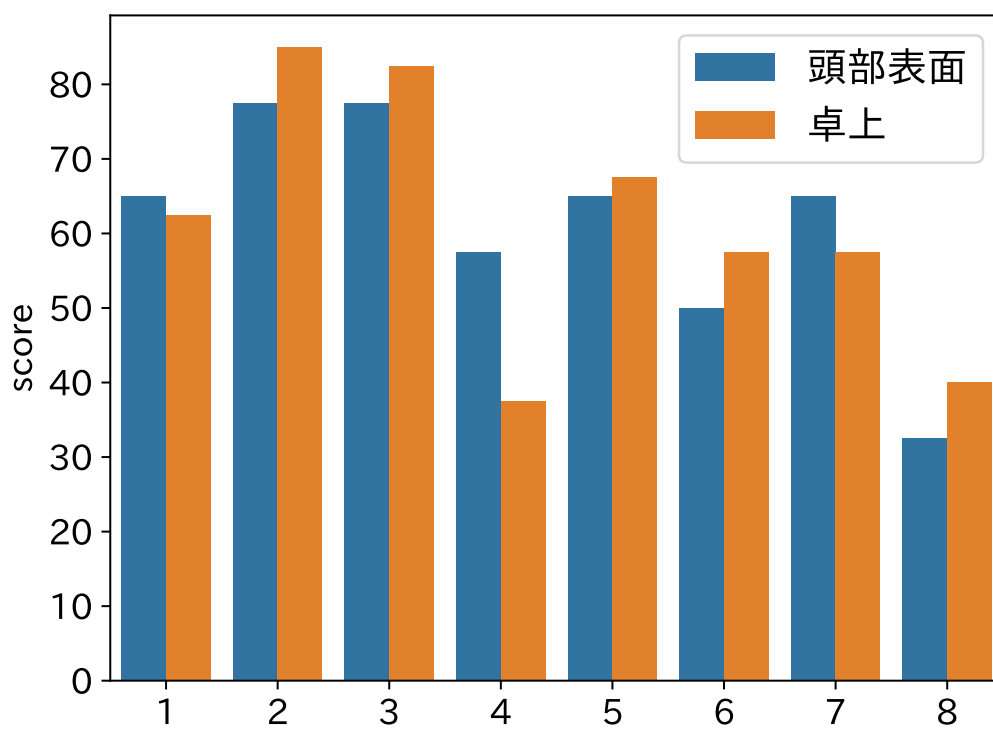


図 4.13: 各参加者の SUS の結果

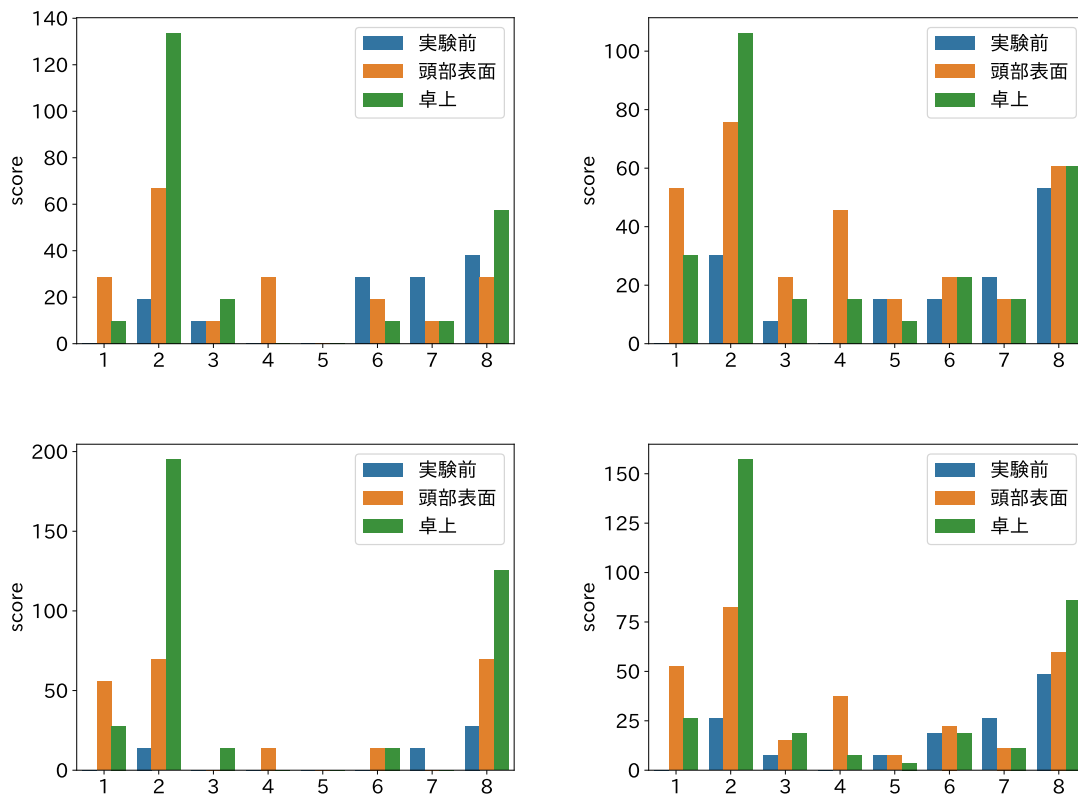


図 4.14: 各参加者の SSQ の結果. 左から順に N スコア, O スコア, D スコア, TS スコア

各参加者の SSQ のスコアを図に示す. N, O, D, TS のスコアの中央値はそれぞれ順番に, 頭部表面操作では 23.85, 34.11, 13.92, 29.92 であり, 卓上操作では 9.54, 18.95, 13.92, 18.7 であった.

4.4.4 議論

回転操作に対する仮説について

全地球回転操作では, 卓上操作より頭部表面操作の方が操作時間が有意に短いという結果が得られたので, 仮説 1 は支持されたと言える. しかし, 各参加者ごとの結果では, 2 名の参加者が卓上操作のほうが短い時間で操作していた. これには, 参加者毎の操作環境への慣れにばらつきがあり影響した可能性があるため, 今後より長期的かつ多様なタスクによる実験により検証していく必要がある.

一方, オブジェクト回転操作においても, 頭部表面操作と卓上操作には有意差が見られ, 頭部表面操作が短い時間で操作できていた. 従って, 仮説 2 は支持されなかった.

操作の早さ

上記の通り、全天球回転操作の場合は頭部表面操作の方が早い操作が可能であると判明した。これは、全天球回転操作においてユーザが操作対象の内側にいることが一因であると考えられる。また、「頭に装着しているので直感的にどこに触れているかはわかりやすかった」、「置いた時と比べて、回転がわかりやすかった」といった意見があったことから、卓上型と比べて半球のどの位置に触れているのが感覚としてわかりやすく、思い通りの回転操作がしやすかったことも要因として考えられる。また、オブジェクト回転操作に関しても、頭部表面操作の方が操作時間が短かった。これも卓上操作において触れている位置が直感的にわかりにくい事が原因として考えられる。

また、本実験では指の移動角度と対象の回転角度とを同じにしたため、「大きな回転を必要とするときに何度もなぞらないといけないため、もう少し感度を高くしてほしいと思った」といった意見があった。ジェスチャの移動距離に対する回転量をユーザが調整できるようにすることで、操作時間の短縮が期待できる。

ユーザビリティ

SUSの結果では、頭部表面操作と卓上操作の間に有意差は見られなかった。「操作対象物の内側に自身がいるような状況においては、使いやすさが感じられた」といった意見があり、頭部表面ジェスチャは全天球回転操作を自然に行える手法であると考えられる。しかし、「卓上型と比較して腕が疲れる」といった意見も見られた。本実験では頭部表面操作では連続的に回転操作を行ってもらったため、腕を上げ続ける必要があった。しかし、実際の使用環境では、目的の方向を向くときに操作を行うのみであり、この動作を何回も立て続けに行うことは少ないと考えられる。また、本実験では指サックを装着した右手人差し指のみでジェスチャを行ったため、特定の部位に疲労が発生し続けたとも考えられるが、左右問わず自由な指を用いて同様の操作をすることは可能であるため、そのような条件での調査も今後行いたい。

頭部表面ジェスチャの操作方法については、「斜めに一回で移動するより、横移動から縦移動を行うほうが思ったどおりの動作を行え、ストレスが少ない」という意見があった。また、参加者の実際の操作を観察すると、主に縦方向の回転が多く行われ、横や斜めに移動することは少なかった。この理由として、横に移動するために帽子の縁に近い部分に触れるとき、指が下にずれてしまうと帽子のない部分となってしまう、タッチ認識ができる範囲を外れてしまうことがありそれがストレスとなるため、参加者が無意識に横方向の操作を避けていた可能性が考えられる。よりタッチ回数を減らし、負担の少ない操作にするために、半球よりも大きな範囲の頭部をカバーしタッチ範囲から外れにくくする、また、タッチ範囲をわかりやすく可視化することで操作を支援する等を検討したい。

VR 酔いの発生

SSQ のいずれのスコアも大きな差は見られなかった。また各参加者ごとの酔いを比較すると、頭部表面操作より卓上操作のほうが酔った参加者が4名おり、どちらの条件においてもVR酔いの発生が見られた。酔いの原因として、VR酔いは体の感覚と視界の移動が一致しないために発生する [21, 22] ため、本実験では頭部表面か卓上かによらず全天球回転操作においてVR酔いが発生していると考えられる。「指をどの向きに動かしたら操作対象物がどう動くのか、理解するまでに時間がかかった」といった意見が見られたことから、操作経験が少なく慣れない状態では、ユーザが回転させたい方向とVRで実際に回転する方向が異なり、その感覚の違いが酔いにつながっていると考えられる。従って、頭部表面ジェスチャによる回転操作をより経験し操作に慣れた状態にするため、中長期的な使用によって思い通りの操作が可能になることで酔いは発生しにくくなるのかどうか調査したい。また、早い回転操作が可能となると、より早く周りの全天球が回転するため、視界の変化が激しいことも酔いの一因になっていると考えられる。コントローラを用いたVRの視点移動では視野角 (FOV) を一時的に減少させる [23, 24] などの手法が用いられているため、今後はこのような手法を頭部表面ジェスチャ使用時に用いることも検討したい。

第5章 頭部表面ジェスチャによるモバイルデバイス操作

本章では、頭部表面ジェスチャをモバイルデバイスへ適用したときのジェスチャ操作について述べる。最初に頭部表面ジェスチャによるモバイルデバイス操作の概要について述べる。次に、操作に使用するジェスチャの種類について述べる。その後、ジェスチャ認識の方法と作成したモバイルデバイスアプリケーションについて述べる。最後に、本手法によるモバイルデバイス操作について議論する。

5.1 概要

頭部表面ジェスチャを VR 以外にも使用するため、本章ではモバイルデバイス、特にスマートフォン操作を検討した。

帽子型タッチインタフェースを実際に帽子として使用することを検討した際、主に屋外での使用が想定されるため、常に持ち歩くモバイルデバイスの操作に適しているのではないかと考えられる。従って、[5.3](#) 節で作成した帽子型タッチインタフェースを用いてモバイルデバイス操作を行う。前章までは頭部表面をなぞることによる回転操作のみを行ったが、今回はスマートフォン操作における様々な操作に対応するため、最初に [5.3](#) 節のインタフェースで可能なジェスチャを検討した。その後、検討されたジェスチャを用いて帽子着用時の使用が想定される様々なアプリに対してジェスチャ操作を行った。

5.2 ジェスチャ操作の種類

まず最初に、帽子型タッチインタフェースを使って行うことができるジェスチャを検討した。今回扱うジェスチャは下記に示す5つである。それぞれのジェスチャは片手で行うことができ、それぞれの操作を左側頭部と右側頭部どちらで行われたか区別して認識する。

- タップ
- ロングタップ
- スワイプ
- 手のひらタッチ

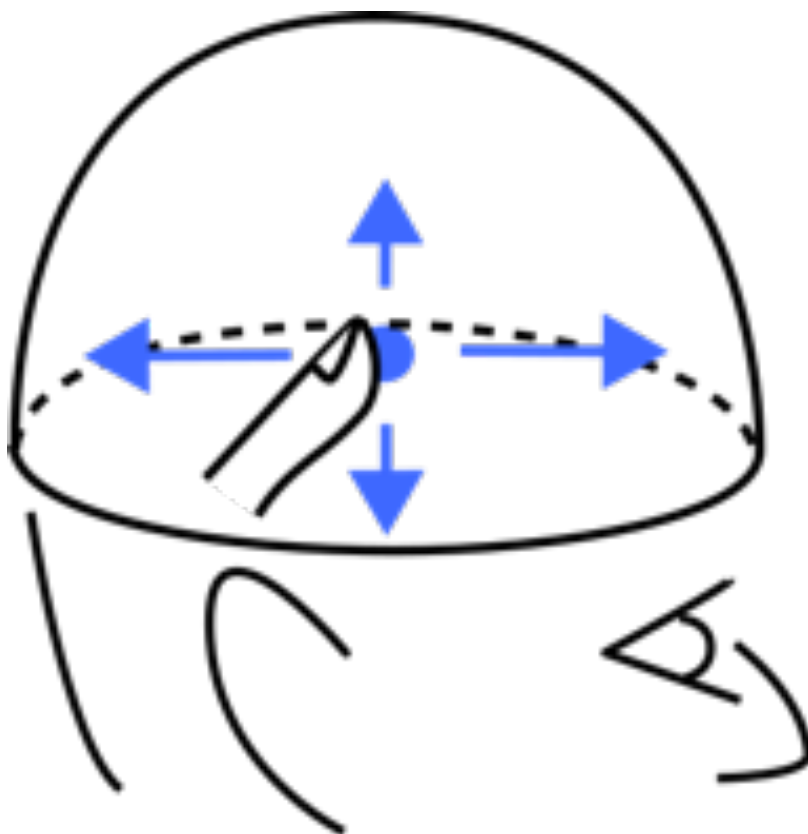


図 5.1: モバイルデバイス操作に用いるドラッグジェスチャの4方向

- ドラッグ

それぞれのジェスチャについて説明する。タップは短時間に1本の指で帽子に触れ、離す操作である。ロングタップは1本指で一定時間以上帽子に触れてから離す操作である。スワイプは1本指で帽子に触れた後、素早く任意の方向にスライドしてから指を離す操作である。スワイプは図 5.1 のように、上下左右方向を区別する。手のひらタッチは図 5.2 に示すように、通常のタップと異なり手のひら全体が帽子と触れ合ってから離す操作である。ドラッグは1本指を帽子と接触させたままなぞる操作であり、スワイプよりも長時間帽子に触れている操作である。

5.3 ジェスチャ認識

アプリはSwiftUIを用いて実装された。帽子型インタフェースのESP32からBLEで送信された電圧値データを読み取り、タッチ位置を計算する。左右電極からの電圧値を V_1, V_2 、前後電極からの電圧値を V_3, V_4 とすると、タッチ位置の計算式は5.2節と同様になり、以下の式で



図 5.2: 通常のタップ (左) と手のひらタッチ (右)

表される.

$$X = \frac{V_1}{V_1 + V_2}, Y = \frac{V_3}{V_3 + V_4}, P = \frac{V_1 + V_2 + V_3 + V_4}{4} \quad (5.1)$$

Swift のプログラム内でタッチ位置の値によってジェスチャ操作のいずれかが行われたのか区別する. ジェスチャ識別の状態遷移を図 5.3 に示す. まずタッチを開始すると, 指が一定時間以上帽子に触れているかどうかを判定する. タッチが開始されたかどうかは触れる強さ P が一定値以上になったかどうかで判定する. 今回は P が 300 以上の場合にタッチ中であるとした. タッチ中である時に一定時間以上触れたまましているとドラッグ認識状態になり, 指を動かした変化量を取得するようになる. 今回の実装では 1 秒以上のタッチでドラッグ操作に移行するようになっている. 指を離すまでドラッグ操作を続けることができる. そして, ドラッグ認識状態から指を離すとロングタップと判定される. ドラッグ, ロングタップ以外は 1 秒未満で指を離した時判定される. タッチ中のに手のひらで大きく帽子に触れることで手のひらタッチ中状態になる. 実装では P が一定値以上であった場合手のひらタッチ中であると判定をする. 今回手のひらタッチ閾値は P が 1000 以上とした. そして手のひらタッチ中状態から手の離すと手のひらタッチと判定される. また, タッチ中状態からスワイプサイズ (今回は 0.03) 以上の長さの指を動かす時にスワイプ中状態なる. スワイプ中状態から指を離すとスワイプしたと判定される. これら手のひらタッチやスワイプの操作をせずに指を離すとタップしたと判定される.

5.4 モバイルデバイス用アプリケーション

アプリは音楽アプリ, ワークアウトアプリ, 地図アプリを作成した. iPhone 11 実機上でアプリを動作させる. 各アプリケーションに対して, ジェスチャと各操作を紐付けた (表 5.1). 各アプリは最初に ESP32 との接続を行うため, アプリ下部に接続・切断ボタンを表示している.

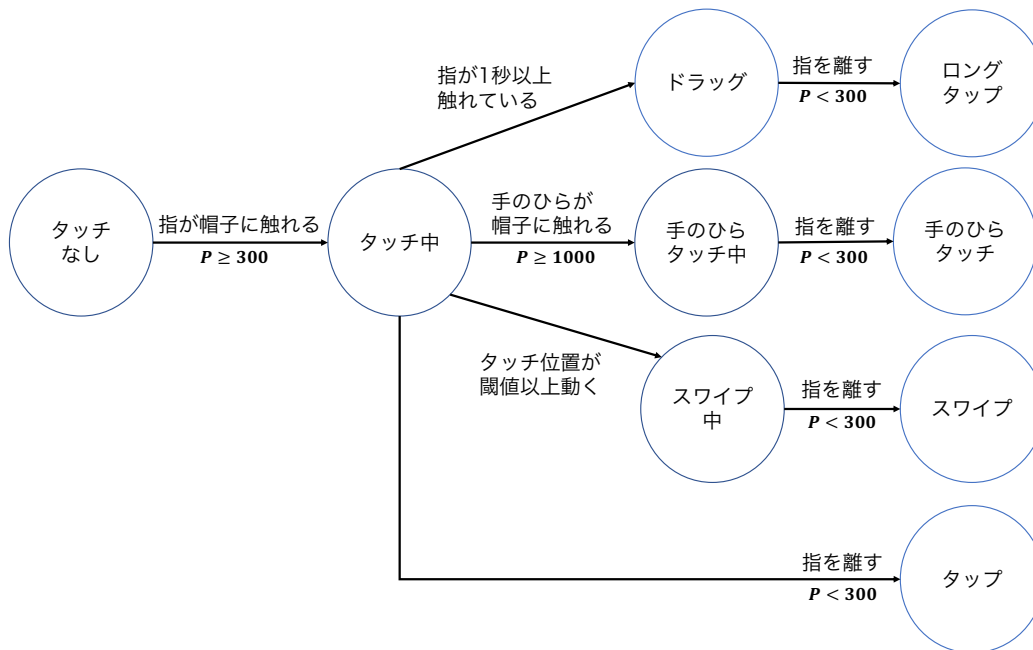


図 5.3: モバイルデバイス操作時ジェスチャ認識の状態遷移図

5.4.1 音楽アプリ

図 5.4 に示す音楽アプリを実装した。音楽アプリでは頭部表面ジェスチャを用いて、音楽の再生・停止、曲のスキップ・戻る、音量の調整が可能である。タップで音楽の再生・停止、前方へのスワイプで次の曲、後方のスワイプで前の曲、ドラッグすることで音量調整を行う。歩行中などでもこの操作によって画面を見ることなく、音楽アプリ操作が可能となる。

5.4.2 ワークアウトアプリ

ワークアウトアプリでは、運動の種類を選択、時間計測の開始・一時停止・終了の操作が可能である (図 5.5)。運動を行った記録をするアプリであり、運動の種類を Running, Walking, Cycling, Dancing から選び、時間を計測する。タップでワークアウトを開始・一時停止し、スワイプで運動の種類を選択する。図 5.5 に示すように、画面に 4 種類の運動が表示されており、スワイプの方向によって 4 つの運動を選択・切り替えを行う。例えば、上方向にスワイプすると、Cycling が選択され、右方向にスワイプすると Walking が選択される。そして、手のひらタッチで現在実施しているワークアウトを終了する。

運動中でも画面を見ることなく帽子を触れることでワークアウトの記録を行うことができる。

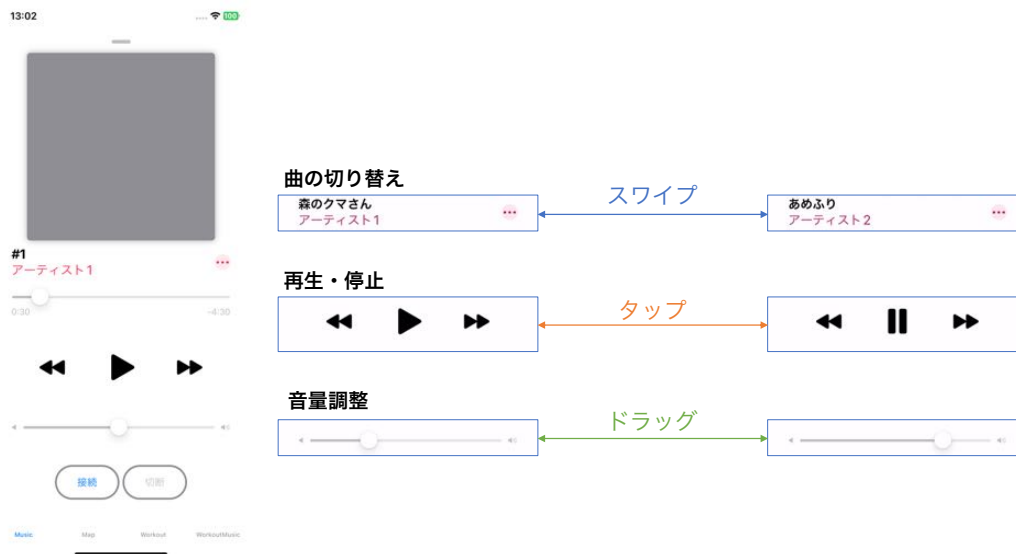


図 5.4: 音楽アプリのスクリーンショットと操作方法

	タップ	スワイプ	手のひらタッチ	ドラッグ, ロング タップ
音楽アプリ	音楽再生・停止	前後の曲		音量調整
運動アプリ	ワークアウト開 始・一時停止	運動の種類を選 択	ワークアウトの 終了, 記録	
地図アプリ	地図の拡大		地図の縮小	地図視点の移動

表 5.1: ジェスチャと各操作の対応表

5.4.3 地図アプリ

地図アプリでは、地図の拡大・縮小、移動が可能である (図 5.6)。タップすると地図を拡大、手のひらタッチで地図を縮小する。また、ドラッグすることで地図を自由に動かすことができる。

スマートフォン画面へ直接タッチせずに地図の操作を可能とするため、自動車運転時やスマートウォッチ使用時の操作を想定している。

5.4.4 2つのアプリの並行操作

それぞれのアプリのジェスチャは片手で行える。そのため、左右それぞれに別のアプリを割り振ることで、2つのアプリを並行して操作可能である。例えば、右手で音楽アプリ、左手で運動アプリの同時使用を行う (図 5.7)。操作方法は個別のアプリ操作ジェスチャと同じである。右手でタップすることで音楽を再生し、左手で手のひらタッチすることで運動の記録

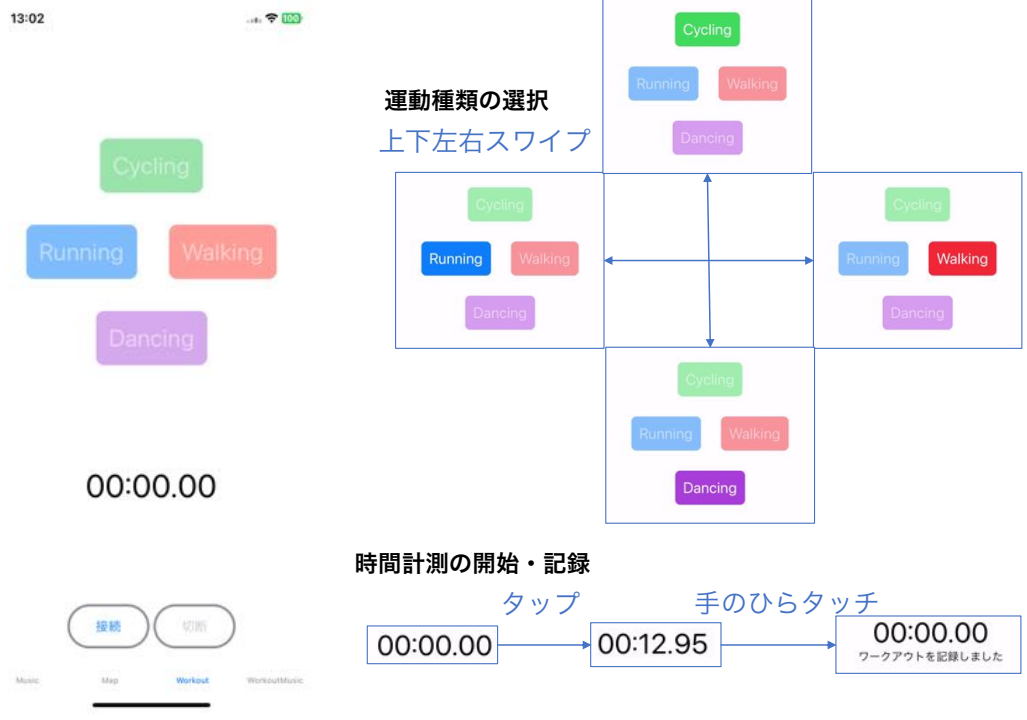


図 5.5: ワークアウトアプリのスクリーンショットと操作方法

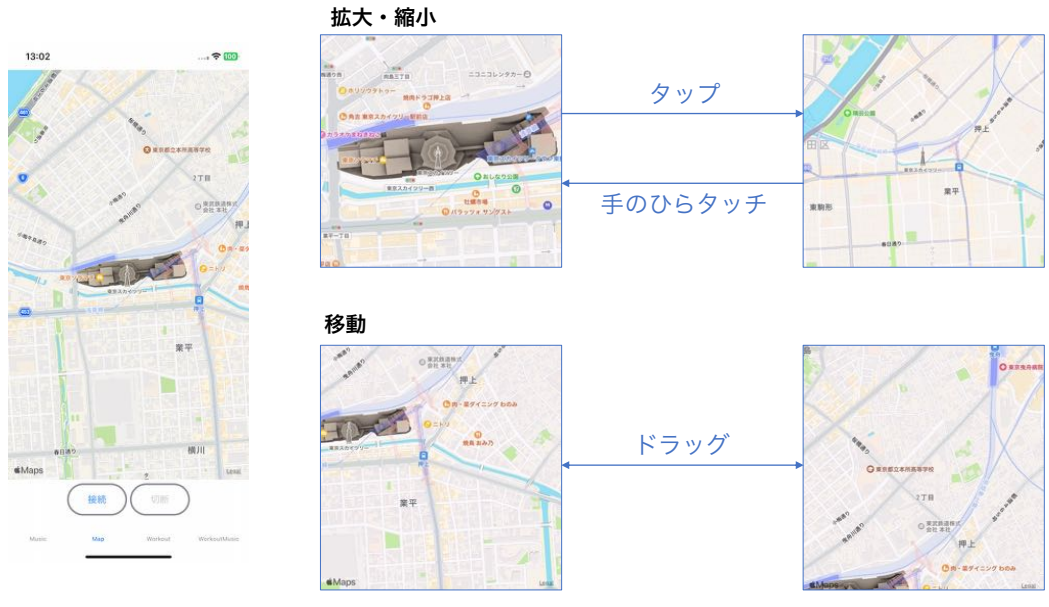


図 5.6: 地図アプリのスクリーンショットと操作方法

をするなどの操作が可能である。これにより、触る位置で操作対象を切り替えるため、アプリを切り替える時間を短縮し、画面を見ずにより素早い操作が可能である。

5.5 議論と今後の課題

音楽アプリやワークアウトアプリは歩行中や運動中の操作を想定して作成された。これは、帽子を屋外で装着する状況において自然に操作可能であると考えられる。地図アプリはスマートフォンの画面を見る必要があるため、歩行中や運動中の操作ではなく、自動車の運転時やスマートウォッチ使用時の操作が想定された。自動車の運転にはスマートフォンをダッシュボードへ取り付た際に腕を前方へ伸ばすことなく地図操作が可能であると考えられる。これに加え、自動車に限らず、ヘルメット型のデバイスを用意することで、自転車やバイクの運転時にも画面を触ることなく地図操作を可能にすることができる。また、スマートウォッチではタッチ可能な画面領域が小さいために頭部表面ジェスチャによる操作が有効であると考えられる。

両手を使用した2つのアプリの平行操作では、左右どちらへタッチしたのかによって操作アプリを変えているが、より細かく帽子の領域を分けることによって、より多くのアプリケーションを切り替えなく操作できると考えられる。

また、これらのモバイルデバイス操作をユーザに使用してもらうことによるユーザビリティの評価を今後実施したい。

その後、頭部表面ジェスチャが他にもスマートグラスなどのAR機器への使用も検討している。スマートグラスなどのAR機器と帽子型タッチインタフェースは屋外でも常に装着している状態の使用が考えられるため、適しているのではないかと考えられる。直接物理的な画面を持たずタッチできないため、頭部表面におけるタッチ操作を使うことでより快適なARのUI操作やARオブジェクト操作に使用することを検討したい。

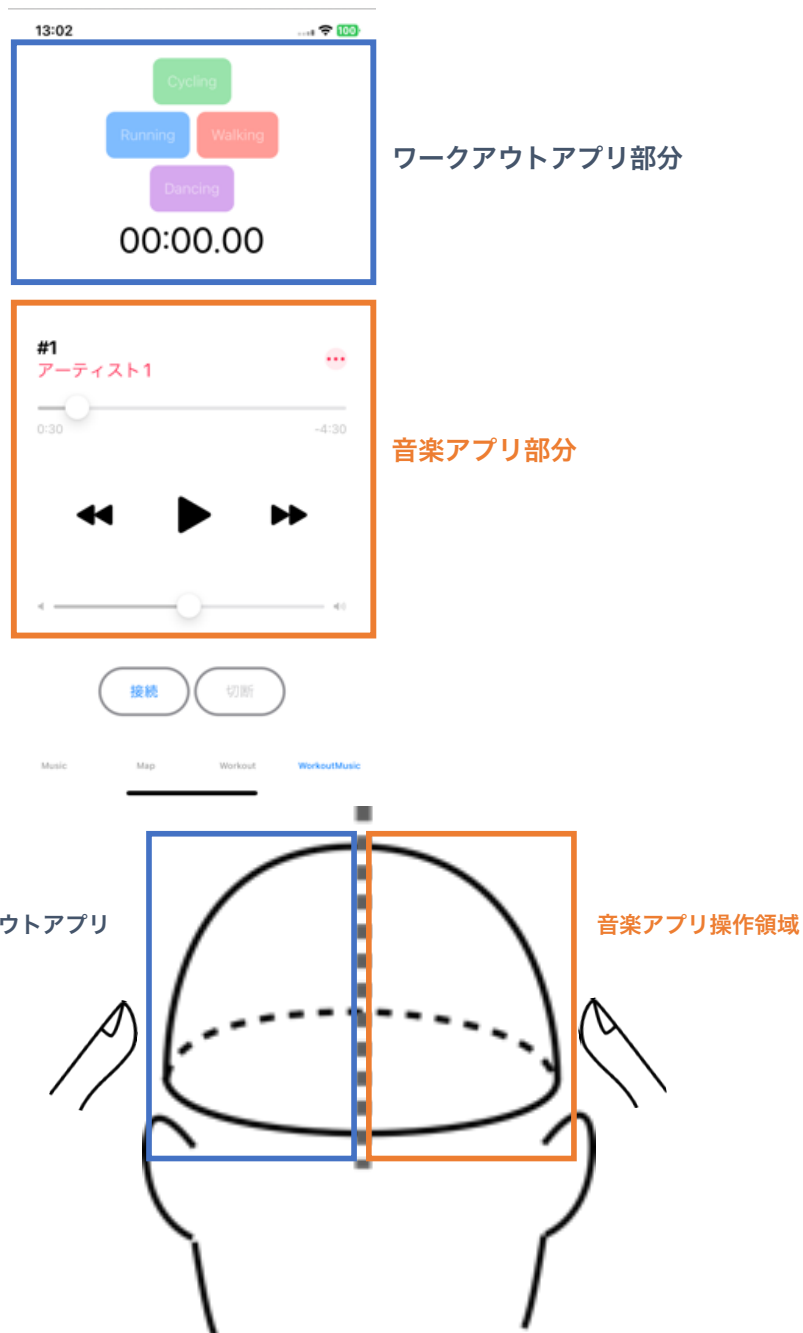


図 5.7: 同時操作アプリケーションのスクリーンショットと帽子上の操作のためのタッチ位置の分け方

第6章 結論

本論文では、帽子型タッチインタフェースにおけるジェスチャ入力手法について述べた。

まず帽子型タッチインタフェースについて卒業研究では2点の問題があったため、それらを解決した帽子型タッチインタフェースを作成した。導電布を加工することで帽子を作成し、指に装着された電極の電圧印加によるタッチ検出を行い、触れる強さによらず一定のタッチ位置と検出可能とした。また、身体に高周波を流すことによって指に電極を装着せずにタッチ検出を行った。

続いて、頭部表面ジェスチャを用いたVRの回転操作についてユーザビリティ調査が未実施であったため、1つ目の帽子型インタフェースを用いて調査を行った。VR回転操作として視点操作、全天球操作、オブジェクト操作に対して頭部表面ジェスチャを行い、調査した。まず、視点操作の調査ではユーザビリティを高く評価しVR酔いの減少した参加者がいた一方、思い通りの操作が難しいことがある手法であることも分かった。次に、全天球操作とオブジェクト操作の調査では、頭部表面ジェスチャは全天球操作のほうが早い操作が可能であるという仮説のもと、頭部表面操作と卓上へ設置したときの操作を比較した。その結果、全天球操作時間は回転角度が大きい場合に頭部操作が優位に短かった。また、オブジェクト操作時間も角度の大きい場合頭部操作のほうが優位に短かった。その後、調査結果を踏まえ、頭部表面ジェスチャによって早い回転操作が可能である可能性とデバイスのユーザビリティを向上させるための今後の課題などについて議論した。

そして、頭部表面ジェスチャを用いたVR以外の操作が実現されていなかったため、2つ目の帽子型インタフェースを用いて頭部表面ジェスチャによるモバイルデバイス操作を行った。モバイルデバイス操作のために、本インタフェースで行える5種類のジェスチャを考え、ジェスチャ認識可能なモバイルデバイスのアプリケーションを作成した。アプリケーションは音楽アプリ、ワークアウトアプリ、地図アプリの3種類を作成した。それぞれを別々に操作するだけでなく、頭部表面の左右で別々のアプリ操作を行うことも可能とした。最後に、アプリケーション操作について議論を行い、アプリケーション操作に対するユーザビリティの調査や、スマートウォッチやAR機器などの他のデバイスに対する操作を今後の課題とした。

謝辞

本研究を進めるにあたり，高橋伸准教授，志築文太郎教授，川口一画助教には多大なご助力を賜り，深く感謝を申し上げます。特に，高橋伸准教授には，研究の方針や内容，論文の書き方など研究活動において数多くのご意見やご指導をいただきました。重ねて感謝いたします。インタラクティブプログラミング研究室の皆様には，研究における様々なご助力をいただきました。特に UBIQUITOUS チームの皆様には，チームゼミを始め，実装や論文時の添削など多くのご支援をいただきました。感謝いたします。さらに，昨年度修了生である大和優輝さんには，メンターとして指導していただき，研究の方針や実装，論文の執筆において多くのご助力をいただきました。深く感謝いたします。最後に，研究室生活を支えてくださった家族，友人，学生生活にてお世話になった皆様にお礼申し上げます。

参考文献

- [1] 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*, No. 33 in SUI '19, pp. 1–2, 2019.
- [2] 坂田和輝. 導電布を用いた VR 向け帽子型タッチインタフェース, 筑波大学 卒業論文, 2020.
- [3] Keisuke Ono, Shinichiro Iwamura, Akira Ogie, Tetsuaki Baba, and Paul Haimes. Textile++: Low cost textile interface using the principle of resistive touch sensing. In *ACM SIGGRAPH 2017 Studio*, SIGGRAPH '17, pp. 1–2, New York, NY, USA, 2017. Association for Computing Machinery.
- [4] Tobias Grosse-Puppendahl, Christian Holz, Gabe Cohn, Raphael Wimmer, Oskar Bechtold, Steve Hodges, Matthew S. Reynolds, and Joshua R. Smith. Finding common ground: A survey of capacitive sensing in human-computer interaction. In *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '17, pp. 3293–3315, New York, NY, USA, 2017. Association for Computing Machinery.
- [5] Narjes Pourjafarian, Anusha Withana, Joseph A. Paradiso, and Jürgen Steimle. Multi-touch kit: A do-it-yourself technique for capacitive multi-touch sensing using a commodity micro-controller. In *Proceedings of the 32nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '19, pp. 1071–1083, New York, NY, USA, 2019. Association for Computing Machinery.
- [6] Jun Rekimoto. Smartskin: An infrastructure for freehand manipulation on interactive surfaces. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '02, pp. 113–120, New York, NY, USA, 2002. Association for Computing Machinery.
- [7] Patrick Parzer, Kathrin Probst, Teo Babic, Christian Rendl, Anita Vogl, Alex Olwal, and Michael Haller. Flexiles: A flexible, stretchable, formable, pressure-sensitive, tactile input sensor. In *Proceedings of the 2016 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '16, pp. 3754–3757, New York, NY, USA, 2016. Association for Computing Machinery.

- [8] Joanne Leong, Patrick Parzer, Florian Perteneder, Teo Babic, Christian Rendl, Anita Vogl, Hubert Egger, Alex Olwal, and Michael Haller. Procover: Sensory augmentation of prosthetic limbs using smart textile covers. In *Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '16, pp. 335–346, New York, NY, USA, 2016. Association for Computing Machinery.
- [9] Patrick Parzer, Adwait Sharma, Anita Vogl, Jürgen Steimle, Alex Olwal, and Michael Haller. Smartsleeve: Real-time sensing of surface and deformation gestures on flexible, interactive textiles, using a hybrid gesture detection pipeline. In *Proceedings of the 30th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '17, pp. 565–577, New York, NY, USA, 2017. Association for Computing Machinery.
- [10] Florian Heller, Stefan Ivanov, Chat Wacharamanotham, and Jan Borchers. Fabritouch: Exploring flexible touch input on textiles. In *Proceedings of the 2014 ACM International Symposium on Wearable Computers*, ISWC '14, pp. 59–62, New York, NY, USA, 2014. Association for Computing Machinery.
- [11] Stefan Schneegass and Alexandra Voit. Gesturesleeve: Using touch sensitive fabrics for gestural input on the forearm for controlling smartwatches. In *Proceedings of the 2016 ACM International Symposium on Wearable Computers*, ISWC '16, pp. 108–115, New York, NY, USA, 2016. Association for Computing Machinery.
- [12] Ivan Poupyrev, Nan-Wei Gong, Shiho Fukuhara, Mustafa Emre Karagozler, Carsten Schwesig, and Karen E. Robinson. Project jacquard: Interactive digital textiles at scale. In *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '16, pp. 4216–4227, New York, NY, USA, 2016. Association for Computing Machinery.
- [13] Thorsten Karrer, Moritz Wittenhagen, Leonhard Lichtschlag, Florian Heller, and Jan Borchers. Pinstripe: Eyes-free continuous input on interactive clothing. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '11, pp. 1313–1322, New York, NY, USA, 2011. Association for Computing Machinery.
- [14] Anita Vogl, Patrick Parzer, Teo Babic, Joanne Leong, Alex Olwal, and Michael Haller. Stretcheband: Enabling fabric-based interactions through rapid fabrication of textile stretch sensors. In *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '17, pp. 2617–2627, New York, NY, USA, 2017. Association for Computing Machinery.
- [15] 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. Association for Computing Machinery.

- [16] 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.
- [17] David Englmeier, Joseph O'Hagan, Mengyi Zhang, Florian Alt, Andreas Butz, Tobias Höllerer, and Julie Williamson. Tangiblesphere – interaction techniques for physical and virtual spherical displays. In *Proceedings of the 11th Nordic Conference on Human-Computer Interaction: Shaping Experiences, Shaping Society*, NordiCHI '20, New York, NY, USA, 2020. Association for Computing Machinery.
- [18] David Englmeier, Julia Dörner, Andreas Butz, and Tobias Höllerer. A tangible spherical proxy for object manipulation in augmented reality. In *2020 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, pp. 221–229, 2020.
- [19] David Englmeier, Isabel Schönwald, Andreas Butz, and Tobias Höllerer. Feel the globe: Enhancing the perception of immersive spherical visualizations with tangible proxies. In *2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, pp. 1693–1698, 2019.
- [20] Gary Perelman, Marcos Serrano, Mathieu Raynal, Celia Picard, Mustapha Derras, and Emmanuel Dubois. The roly-poly mouse: Designing a rolling input device unifying 2d and 3d interaction. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '15, pp. 327–336, New York, NY, USA, 2015. Association for Computing Machinery.
- [21] Joseph J LaViola, Jr. A discussion of cybersickness in virtual environments. *SIGCHI bull.*, Vol. 32, No. 1, pp. 47–56, 2000.
- [22] Xavier Hunt and Leigh Ellen Potter. High computer gaming experience may cause higher virtual reality sickness. In *Proceedings of the 30th Australian Conference on Computer-Human Interaction*, OzCHI '18, pp. 598–601, 2018.
- [23] Ajoy S Fernandes and Steven K Feiner. Combating VR sickness through subtle dynamic field-of-view modification. In *2016 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI)*, pp. 201–210, 2016.
- [24] Isayas Berhe Adhanom, Nathan Navarro Griffin, Paul MacNeilage, and Eelke Folmer. The Effect of a Foveated Field-of-view Restrictor on VR Sickness. In *2020 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, pp. 645–652, 2020.