

2020年度

筑波大学情報学群情報科学類

卒業研究論文

題目

導電布を用いたVR向け
帽子型タッチインタフェース

主専攻 ソフトウェアサイエンス主専攻

著者 坂田 和輝

指導教員 高橋伸 川口一画 志築文太郎

要 旨

現在、Head Mounted Display（以下、HMD）を用いた Virtual Reality（以下、VR）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。この操作方法ではユーザーが見たい方向に頭部を回転させると、視線方向に応じて視点が回転するため、没入感の高い視点操作が可能である。しかし、視点操作のために頭部の能動的動作が発生すると、疲労感や3D酔いが生起されやすくなる問題がある。この問題を解決するため、我々は先行研究 [1] においてユーザーの頭部表面へのタッチ入力による視点操作を検討した。指で頭部をなぞることが視点を動かすイメージに繋がり、没入感は損なわず疲労感と3D酔いを軽減できると考えられる。先行研究では、静電容量センサが取り付けられたヘルメット表面をなぞることによる視点操作を実現できたが、ヘルメット装着時の重量が負担となり疲労感が引き起こされる問題や静電容量センサによって離散的なタッチ位置しか検出できない問題があった。そこで本研究では、視点操作における VR インタラクションのための軽量化されたデバイスとして導電布を用いた帽子型タッチデバイスを提案する。このデバイスでは、導電布を用いることによる軽量化や電圧測定による位置検出を用いた連続的なタッチ点の検出を実現する。まず帽子の半球形タッチ表面を実現するため、導電布の加工、電極位置の設定、電極に用いる導電糸や導電布の種類を調査を実施した。そしてその調査をもとに、抵抗膜方式を用いたデバイスと指における電圧測定を行うデバイスの2つのプロトタイプを実装した。後者のプロトタイプを用いてタッチ点の検出精度および線をなぞる動作の取得される位置の精度を調査する2つの実験を実施し、帽子の端部を除く位置で精度が高いことが判明した。さらに、Unity による視点操作 VR アプリケーションを実装し、帽子型タッチデバイスを用いた VR とのインタラクションを可能にした。

目次

第1章 序論	1
1.1 背景	1
1.2 目的とアプローチ	1
1.3 本論文の貢献	2
1.4 本論文の構成	2
第2章 関連研究	3
2.1 HMD 装着時における入力手法の研究	3
2.2 視点操作インターフェースの研究	3
2.3 導電布や導電糸を用いたタッチセンシングに関する研究	3
2.4 本研究の位置づけ	4
第3章 導電布を用いたタッチセンサの試作	5
3.1 1枚の導電布を用いたタッチセンサの調査	5
3.2 2枚の導電布を縫い合わせたセンサの調査	5
第4章 導電布を用いた帽子型タッチデバイス	9
4.1 抵抗膜方式による帽子型タッチデバイス	9
4.1.1 帽子型の抵抗膜方式タッチ点検出	9
4.1.2 帽子型タッチデバイスの構造	9
4.1.3 導電糸電極の調査	11
4.1.4 問題点	15
4.2 指における電圧測定による帽子型タッチデバイス	15
4.2.1 タッチ点検出方式	15
4.2.2 導電布の調査	17
4.2.3 帽子型タッチデバイスの構成	17
4.2.4 1つ目のプロトタイプとの比較	18
第5章 実験	20
5.1 実験1	20
5.1.1 実験内容	20
5.1.2 実験結果	20
5.2 実験2	22

5.2.1	実験内容	22
5.2.2	実験結果	24
第 6 章	アプリケーション	27
第 7 章	結論	28
	謝辞	29
	参考文献	30

目次

3.1	タッチセンサの構造	6
3.2	抵抗膜方式タッチセンサ（左）と中間層に使用しているメッシュ生地（右）	6
3.3	2枚を縫い合わせた導電布タッチセンサ	7
3.4	タッチセンサを使っている様子とタッチ点を表示している Unity シーン	8
4.1	帽子型タッチデバイス	10
4.2	抵抗膜方式帽子型タッチデバイスの構造	11
4.3	帽子を作成するために使用した型紙	12
4.4	システム構成	13
4.5	銅箔テープ電極による帽子型導電布上の電位差	13
4.6	導電糸の縫い方による電位差の計測結果	14
4.7	導電糸電極による帽子型導電布上の電位差	16
4.8	静電気除去シートによる帽子表面の電位差	17
4.9	帽子表面の電極位置と2軸の方向（左）、帽子型タッチデバイスの構造（右）	18
4.10	帽子型タッチデバイスのプロトタイプと導電性指サック	19
4.11	システム構成図	19
5.1	実験に使用した軸が書き込まれた帽子型タッチデバイス	21
5.2	帽子表面に書いた軸とはじめに記録する点	22
5.3	予想されたタッチ点の座標と各格子点各点の平均値および標準偏差	23
5.4	5つのX軸をなぞったときの座標をつないだ線	25
5.5	7つのY軸をなぞったときの座標をつないだ線	26
6.1	視点操作アプリケーションを使用している様子と操作している Unity シーンのスナップショット	27

第1章 序論

1.1 背景

HMDを用いたVRにおいて、ヘッドトラッキングによる視点操作が一般的である。この操作方法ではユーザが見たい方向に頭部を回転させると、視線方向に応じて視点が回転するため、没入感の高い視点操作が可能である。しかし、視点操作時の頭部の能動的な動作によって疲労が引き起こされるという問題 [2] がある。頭部動作ではなくハンドヘルドコントローラのジョイスティックによる視点操作も可能であるが、指先のみ動きで操作し、体の動きが視点移動に伴わず没入感は減少する。

その問題を解決するため、先行研究 [1] においてタッチセンサでヘルメット表面を覆ったデバイスを装着したユーザの頭部表面へのタッチ入力による視点操作が検討された。ユーザの頭部位置とVRにおける視点位置が一致しているため、ユーザの頭部表面をなぞる動きが視点の回転操作を想起させることを利用したこの研究では、頭部の回転動作のない視点操作により疲労感を軽減しながら、頭部表面をなぞり視点を回転させるという直感的な操作により没入感を維持したままの視点操作を可能とした。しかし、ヘルメット装着時の重量による疲労や1つの静電容量センサに対して1本のリード線が伸びているため、リード線の多さによって頭部をなぞるタッチ動作の阻害が発生していた。また、センシングのためにヘルメット表面に取り付けられた54点の静電容量センサでは、離散的なタッチ位置しか取得できない問題があった。

1.2 目的とアプローチ

本研究では、導電布を用いたセンサを利用することで、帽子型タッチデバイスを軽量化し、取り回しを容易にする。また、電圧値によるタッチ点測定により、より連続的で解像度の高いタッチ点の検出を可能にする。帽子型タッチデバイスを実現するにあたり、帽子に使用する導電布および電極に使用する導電糸を選択するための予備調査を実施する。そして、選択した材料を用いて帽子型センサを製作し、導電性指サックを装着した指のタッチ点を検出するプロトタイプを実装する。プロトタイプを使用し、タッチやなぞる動作における検出精度について実験を行う。その後、VRアプリケーションを実装し、帽子型タッチデバイスを用いて視点操作を可能にする。

1.3 本論文の貢献

本研究の貢献を以下に示す.

- 導電布を利用した軽量な半球状帽子型タッチデバイスを開発した.
- 帽子型タッチデバイスに適した導電布と導電糸を調査した.
- 開発した提案手法のプロトタイプを用いて, タッチデバイスの認識精度を検証する実験を実施した.

1.4 本論文の構成

第1章では, 本研究の背景と目的を述べた. 第2章では, 関連研究と本研究の位置づけを述べる. 第3章では, 関連研究をもとにしたタッチデバイスの実装について述べる. 第4章では, 帽子型タッチデバイスの2つのプロトタイプについて述べる. 第5章では, 帽子型タッチデバイスのタッチ点検出精度を調査する実験とその結果について述べる. 第6章では, 帽子型タッチデバイスを用いて操作可能なVRアプリケーションについて述べる. 第7章では, 本研究の結論を述べる.

第2章 関連研究

本研究は、導電布とそれに電圧を印加するための電極として導電糸を用いた帽子型タッチデバイスを作成し、HMD 装着時の視点操作インタラクションを可能とする研究である。本研究に関連する研究として「HMD 装着時における入力手法の研究」,「視点操作インタフェースの研究」,「導電布や導電糸を用いたタッチセンシングに関する研究」が挙げられる。

2.1 HMD 装着時における入力手法の研究

HMD を装着した状態で VR に対してインタラクションを行う手法に関する研究は多数存在する。ActiTouch[3] は、VR 空間内で掌に UI が表示され、ユーザが自身の掌に触れることによる UI 操作を実現した。TabletInVR[4] は、ユーザが手に持ったタブレットをタッチすることで、VR 空間内のオブジェクトとのインタラクションを実現した。FaceTouch[5] は、HMD の背面にタッチパネルを取り付けることで、背面へのタッチによる VR 空間内の移動などのインタラクションを実現した。

2.2 視点操作インタフェースの研究

デバイス入力による視点操作の研究として、GlobeFish, GlobeMouse[6] はそれぞれが 6-Degrees of Freedom (以下, 6DoF) の入力インタフェースであり、視点の移動と回転を可能にする。両デバイス共にトラックボールを回転させることによる視点操作が可能であるが、これらのインタフェースは机上に固定されており、ユーザの姿勢と動きが制限される問題がある。

ヘルメットを用いた頭部表面ジェスチャによる視点操作 [1] では、ユーザの頭部表面操作により VR 上の視点操作を可能にした。しかし、このインタフェースはヘルメット上の 54 点の静電容量センサによる離散的なタッチしか取得できず、またヘルメット自体の重量によるユーザの頭部や首への負担による疲労感が発生するという問題があった。

2.3 導電布や導電糸を用いたタッチセンシングに関する研究

導電布を使用し、タッチを検出するデバイスに関する研究は多数存在する。Textile++[7] は、導電布とメッシュ生地を用いた抵抗膜方式タッチセンサを実現した。FlexTiles[8] は、導電繊維と非導電繊維が縞模様に交互に織り込まれた布と piezo 抵抗布を重ねたタッチセンサを実現した。この研究を元に靴下型センサ [9] や、袖に装着するセンサ [10] など身体に装着する

ために形状を加工した研究も行われた。他の身体に装着するセンサに関する研究として、導電布とピエゾ抵抗布を使用し、ズボンの表面上をタッチパッドにする研究 [11]、細長い電極を並べ、腕に巻き付け腕上でジェスチャを行う研究 [12] も存在する。しかし、頭部に装着できる半球形状のものは存在しない。

導電布だけでなく、導電糸を用いたセンシングに関する研究も多く存在する。RESi[13]は、新しく設計した導電糸を用いて、様々な縫い方による圧力センサを作製した。Aigner ら [14] の研究は、非導電性の布に導電糸を様々なパターンで縫い付け、圧力センサの性能を比較した。Project Jacquard[15] は、高導電性の Jacquard Yarn と呼ばれる糸を衣服などに縫い付けてタッチセンサを実現した。StrechEBand[16] は身近な布製品に導電糸を縫いつけることにより伸縮を検出するセンサを簡単に実現する研究である。Mikkonen ら [17] は導電布に対して交流電流を使用することにより、タッチ以外のつまんだり丸めたりする動作などの検出を可能にした。

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センサを提案する。先行研究 [1] に対し、センサのベース部分に導電布、電極部分に導電糸を用いることで軽量化し、ユーザへの負担を軽減する。また、電圧数値によるタッチ点測定により、より連続的で解像度の高いタッチ点を検出することを可能にする。これらに加え、視点操作時は頭部表面のタッチ操作のみであり頭部の能動的操作が伴わないことにより、3D 酔いが引き起こされにくくなると考えられる。

第3章 導電布を用いたタッチセンサの試作

本論文では、軽量の帽子型タッチデバイスを実現するため、軽い布素材でありながら導電性を持つ導電布を用いる。Textile++[7]の抵抗膜方式を参考にしたセンサを帽子の形へ加工する前に、そのセンサを正しく再現できるかどうか確認するため、平面のタッチセンサを作製した。

3.1 1枚の導電布を用いたタッチセンサの調査

平面タッチセンサの構造を図3.1に示す。抵抗膜方式は3層構造であり、上層と下層は導電布を使用し、中間層にはメッシュ生地を使用する。導電布は、厚さ0.8mmの導電布(EeonTex Conductive Fabric)を使用した。メッシュ生地は目が約1mmの裁縫に使用される市販のものを使用した。それらを互いに重ね合わせて1つのセンサを形成している。

ユーザが指でセンサに触れることで、触れた点のX,Y座標、圧力を検出することが可能である。下の導電布層がX軸方向に電圧を印加する導電布、上の導電布層がY軸方向に電圧を印加する導電布である。図3.2に示すように、電極はX軸方向の導電布には左右の辺それぞれの中心と、Y軸方向の導電布は上下の辺それぞれの中心にワニ口クリップで接続されている。電極からX軸方向の導電布とY軸方向の導電布に交互に電圧が印加されている。指が触れると上下層の導電布がメッシュ生地の層を超えて接触するため、反対側の導電布の層で電圧をX軸方向、Y軸方向を交互に計測する。また指が触れているときX+からY-に電圧をかけ、Y+で計測するとタッチセンサにかかる圧力の取得が可能である。

3層に重ね合わせたセンサは電極からマイコン(Arduino Mega 2560)に接続され、出力される電圧の値をUnityのプログラムで処理し、シーンに反映した。

Unityシーンにタッチ点を表示させ、実際に触れている点との比較を行ったところ、導電布の端部付近ではズレが見られた。この理由として、導電布に電極としてワニ口クリップで接続しているため、1辺の電圧を一定にできなかったためであると考えられる。帽子形状に加工する際には、Textile++で使用されていた電極と同じ銅箔テープとリード線を使用した電極を使用することによりこの問題の解決を図った。

3.2 2枚の導電布を縫い合わせたセンサの調査

帽子型に加工するにあたり、導電布とメッシュ生地を切り出し縫い合わせる必要があるため、縫い合わせたセンサが通常の平面のセンサと同様に動作するか調査を行った。導電布と

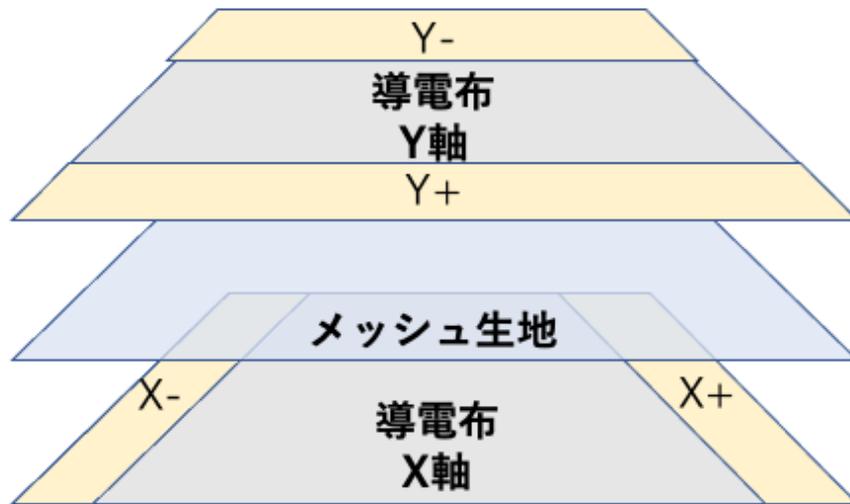


図 3.1: タッチセンサの構造

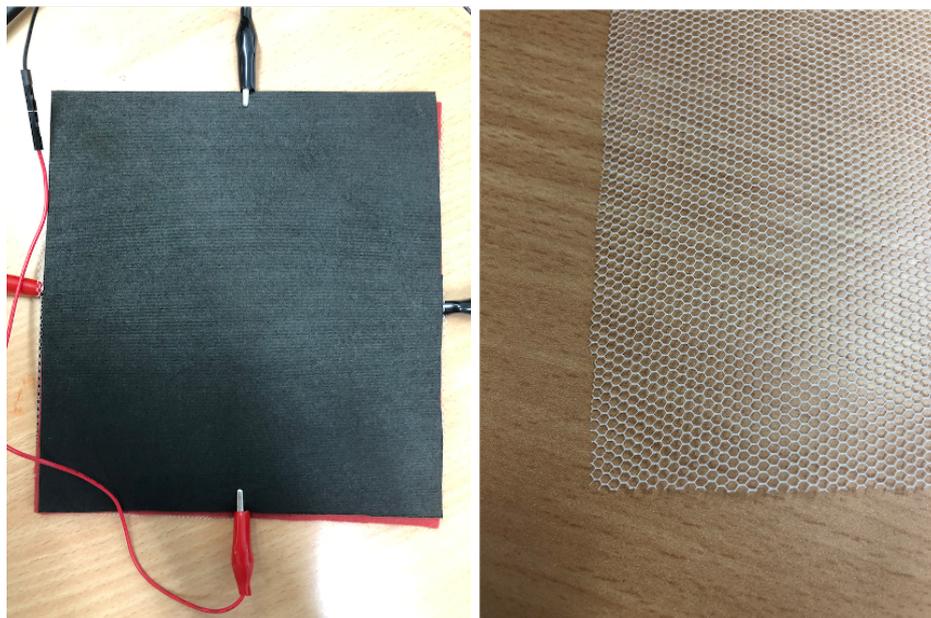


図 3.2: 抵抗膜方式タッチセンサ（左）と中間層に使用しているメッシュ生地（右）

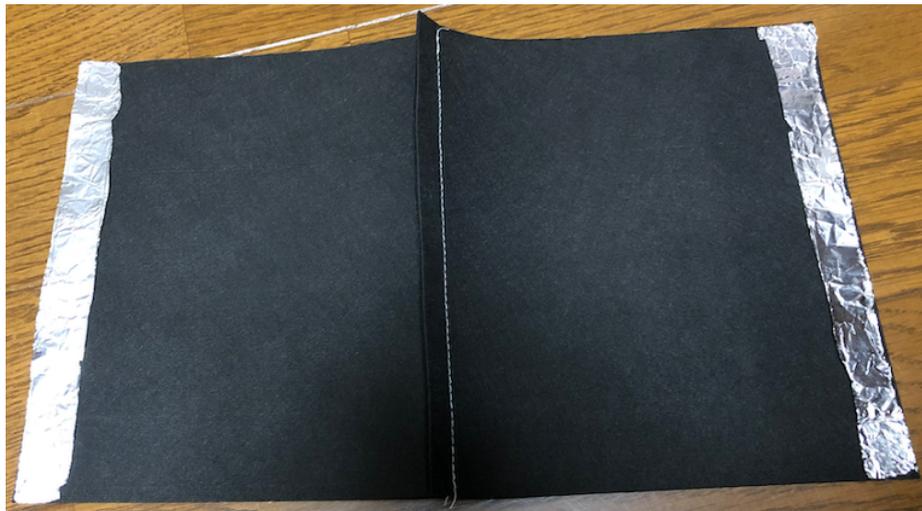


図 3.3: 2枚を縫い合わせた導電布タッチセンサ

メッシュ生地は3.1節と同じものを使用した。15×15cmの導電布をミシンによって縫い合わせたものを図3.3に示す。同様にメッシュ生地も縫い合わせ、それを縫い合わせた導電布2枚と重ね合わせ3層構造の抵抗膜方式タッチセンサとした。長手方向をX軸方向、短手方向をY軸方向として、電極としてワニ口クリップを下の導電布層には左右それぞれの短辺の中心、上の導電布層には上下それぞれの長辺の中心に取り付けた。3.1節同様、このセンサもマイコンの出力をもとにUnityシーンが反映される。このセンサの出力によりUnityシーンに反映されている様子を図3.4に示す。

Unityシーン上に表示されたタッチ点と実際にタッチしている点を比較したところ、縫い合わせている部分に触れたときに周囲の点と比べ座標値の増加が見られた。この理由として、縫い合わせている部分では2枚の導電布が重なっているため他の部分と比べ導電布の厚みが大きくなっており、タッチした際より圧力がかかってしまっていると考えられた。帽子形状に加工する際には、縫い合わせた際にできる2枚の導電布が重なる端部を短く切ることで改善した。

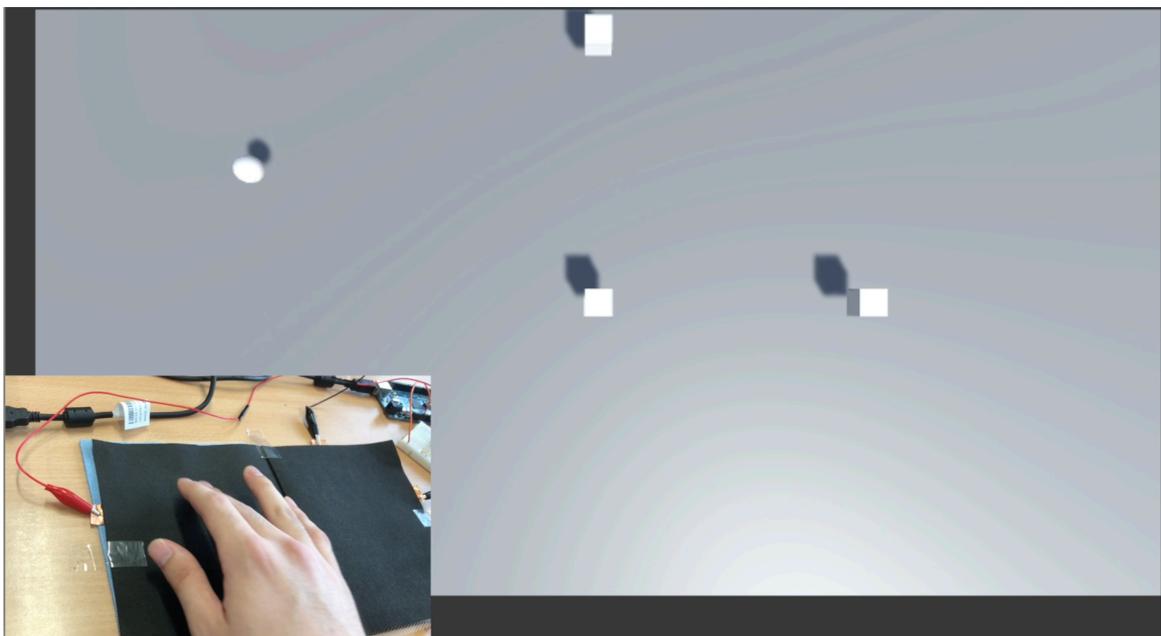


図 3.4: タッチセンサを使っている様子とタッチ点を表示している Unity シーン

第4章 導電布を用いた帽子型タッチデバイス

本研究では，帽子型タッチデバイスとして，2つのプロトタイプを作製した．1つ目は，抵抗膜方式によるプロトタイプである．2つ目は，ユーザの指に導電性指サックを装着しタッチ点を検出する方式によるプロトタイプである．

ヘルメットを用いて頭部表面のタッチを可能とした先行研究 [1] に対し，軽量の導電布を用いた帽子と頭部デバイスから伸びるリード線を減らすことによる軽量化によってユーザへの負担を軽減する．また，電圧を印加しタッチ点の電圧を測定することで，より連続的なタッチ位置の検出を可能とする．

4.1 抵抗膜方式による帽子型タッチデバイス

1つ目のプロトタイプとして，抵抗膜方式を使用した帽子型タッチデバイス（図 4.1）を作製した．抵抗膜方式タッチセンサは，第3章において作製したものをもとに，帽子の作製に使用される型紙を用いて切り出し縫い合わせることで被ることができる半球状に加工した．

4.1.1 帽子型の抵抗膜方式タッチ点検出

帽子表面の軸方向と電極位置を図 4.2 に示す．

帽子の頭頂部と下端部と結ぶ線を Y 軸方向，下端部に並行な線を X 軸方向とした．設定した軸方向に電圧を印加するために，導電布帽子は左右で2つに分割することにした．平面の場合とは異なり，正方形に切り出した銅箔テープにリード線をはんだ付けしたものを電極として使用した．その電極によって電圧を印加し電圧を測定する．下の導電布層を X 軸方向の導電布，上の導電布層を Y 軸方向の導電布として，2つの導電布へ交互に電圧が印加される．指が触れると上下層の導電布がメッシュ生地を超えて接触し，反対側の導電布の層で指が触れている位置の電圧を測定する．分割しているため左右でそれぞれ電圧測定をしているため，左右でそれぞれシングルタッチが検出可能である．

4.1.2 帽子型タッチデバイスの構造

第3章にて使用したのと同じ導電布とメッシュ生地を使用した．導電布を帽子形状にするため，頭囲 60 cm サイズの帽子用型紙¹を用いて 12 枚のパーツを導電布から切り出した．そし

¹<http://dr-cos.com/fp-cloche2.html>

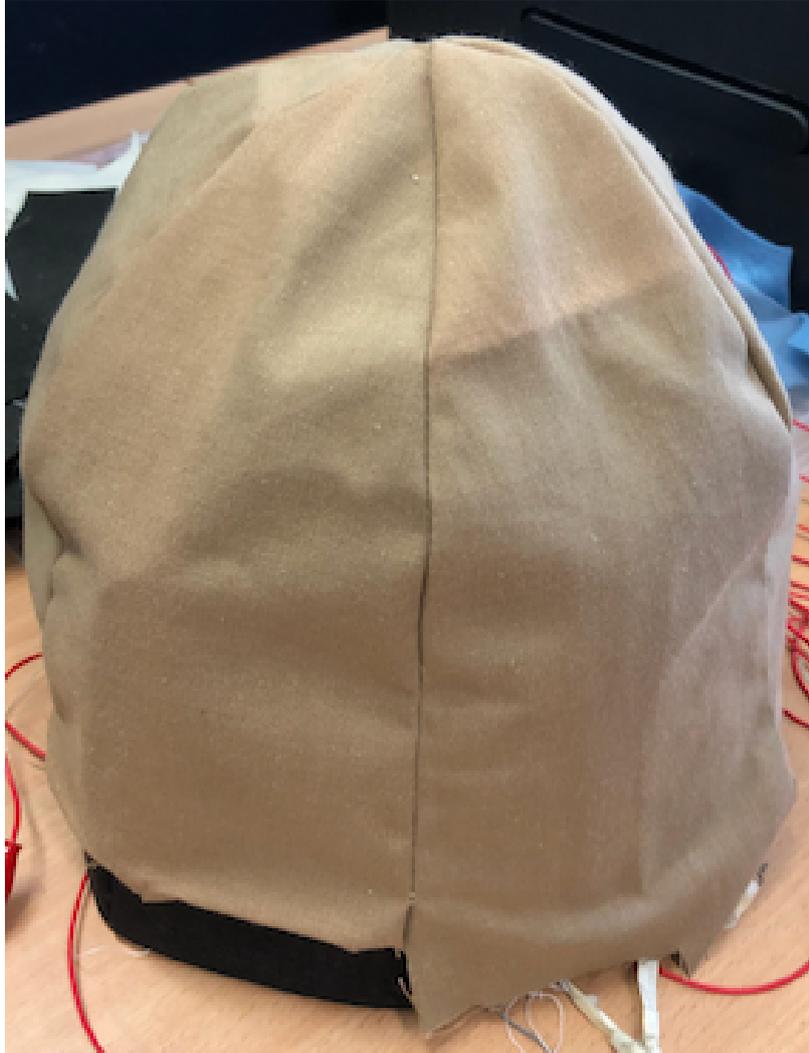


図 4.1: 帽子型タッチデバイス

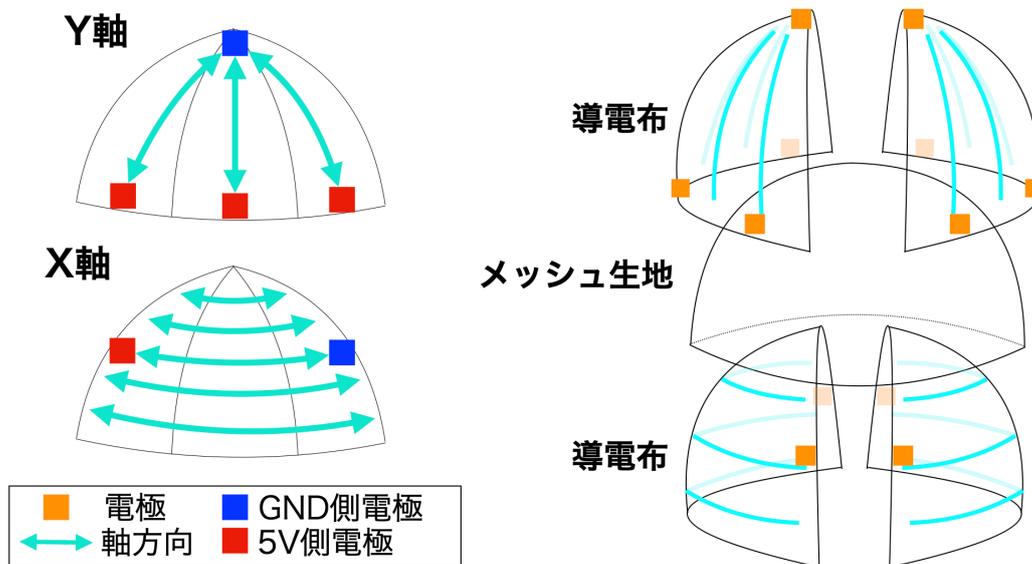


図 4.2: 抵抗膜方式帽子型タッチデバイスの構造

て切り出したものを3つずつ縫い合わせ、半球が左右で分割されている形状を作製した。センサが頭部と指に直接触れないようにするため、同じ型紙を用いて非導電布を切り出し、半球状の非導電性帽子を2つ作製した。導電布で作製した帽子それぞれには、銅箔テープにリード線をはんだ付けした電極を図4.2に示す位置に取り付けた。メッシュの帽子1つと左右に分割された導電布帽子を2セットを重ね合わせることで3層構造の抵抗膜方式の帽子を作製した。

帽子型タッチデバイスは電極からリード線を通してマイコン（Arduino MEGA 2560）に接続されている。PCではUnity スクリプトがマイコンからの入力を座標に変換し、座標をもとにUnity シーンが操作される。システム全体の構成図を図4.4に示す。

このプロトタイプを使用し、Unity シーンで表示されるタッチ点と実際にタッチしている位置を比較したところ、第3章のセンサと同様に導電布端部でタッチ点のズレが見られた。この理由として、銅箔テープとリード線を用いた電極を使用しても、帽子の下端やX軸の両端における電圧が辺に沿って一定にならないためであると考えられた。この電極を使用した際の各軸方向の電位差を計測した結果を図4.5に示す。図4.5より、電極と電極を結ぶ軸では電位差が大きくなっているが、それ以外の軸では電位差が小さくなっていることが判明した。また、銅箔テープを辺に沿って延長して貼り付けたが電圧は一定にならず、別の方法で辺に沿った電極を作成することとした。

4.1.3 導電糸電極の調査

上述したプロトタイプでは、銅箔テープにリード線をはんだ付けした電極によって、布の端部の電圧を軸に対して垂直方向に一定にできず、導電布の端部を指で触れると得られる X,Y

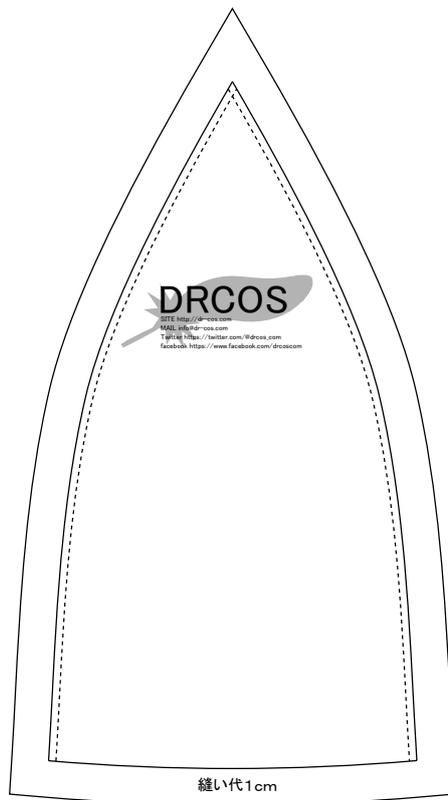


図 4.3: 帽子を作成するために使用した型紙

座標値にズレが生じてしまう問題があった。

ここで、軸によって電位差が異なる問題を解決するために、電極に導電糸を使用することを検討した。導電糸を電極として導電布端部の一辺に沿って縫い付けることにより、辺における電圧を一定にする。導電糸を電極として使用するにあたり、導電糸の種類、縫い方により導電布に印加される電圧の違いを調査した。

まず、導電糸の縫い方による電位差の違いを調査した。15 × 15 cm に切った導電布に対して、左右の両端の辺に沿って導電糸を縫い付けた。縫い方を 5 cm 間隔の手縫い、50 cm 間隔の手縫い、本返し縫い、ミシン縫いの 4 種類で右端から左端の電圧を 5 箇所計測して比較した。また、同じ導電布を使用して縫わずにワニ口クリップのみで接続した場合も計測した。電圧を計測した結果を図 4.6 に示す。

縫いなしの場合、ワニ口クリップで接続されている部分の電位差が大きく、測定位置により電位差が大きく異なるため、タッチ点検出のときにずれが生じる。導電糸電極の場合、ミシン縫いが最も電圧のばらつきが少なく、どの位置においても比較的電位差が大きい。

次に、導電糸の種類による電位差の比較を行った。導電糸は Spakfun 製 DEV-10867 と DEV-13814 の糸を比較した。どちらもステンレス製の繊維からできているが、DEV-10867 は繊維

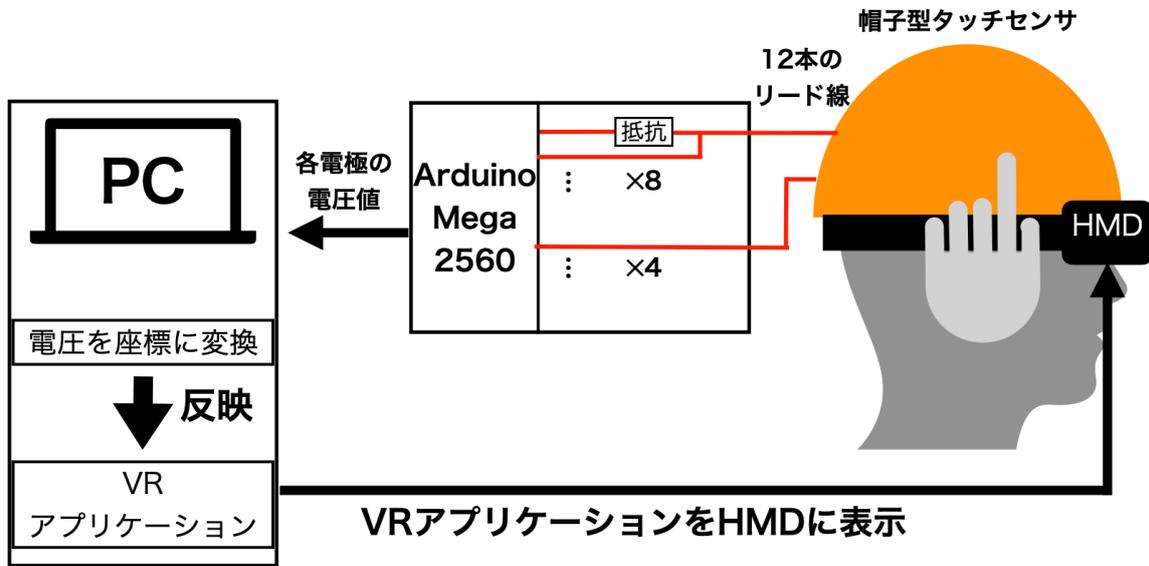


図 4.4: システム構成

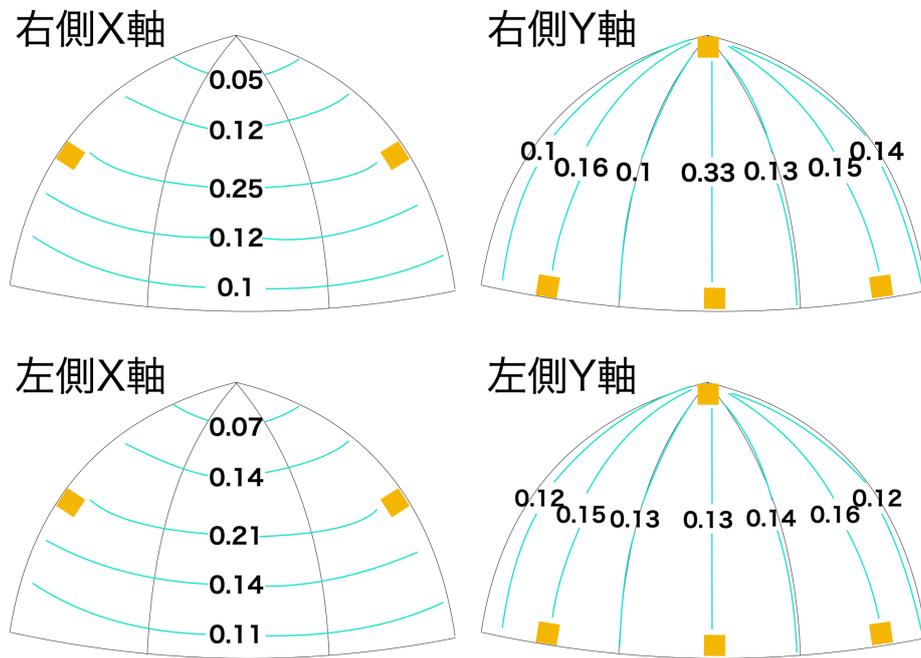


図 4.5: 銅箔テープ電極による帽子型導電布上の電位差 (単位: V)

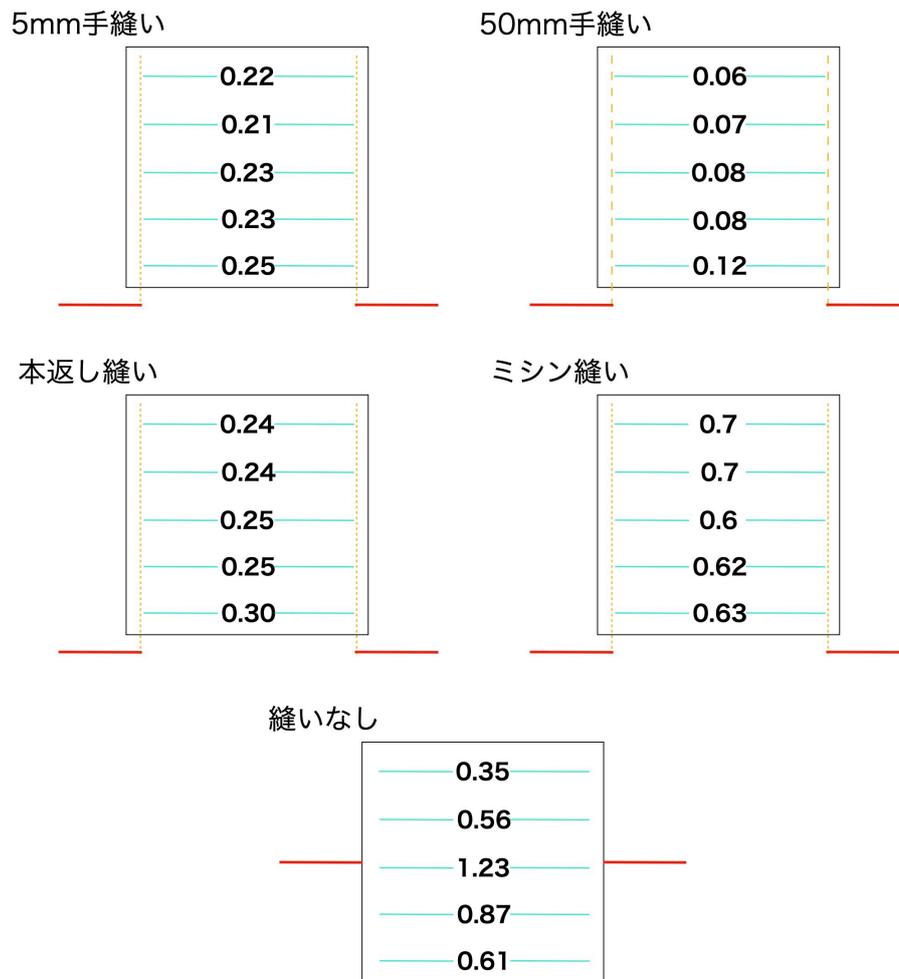


図 4.6: 導電糸の縫い方による電位差の計測結果 (単位: V)

のほつれやすい糸，DEV-13814 はより細い繊維でほつれが出にくい糸である。2種類それぞれの導電糸を下糸にして帽子の端部にミシン縫いし，電位差を計測した結果を図 4.7 に示す。

X 方向ではどの位置でも電圧は比較的一定であり，Y 方向では幅が広いほど電位差が大きくなっていた。2つの導電糸間では，ほつれにくい DEV-13814 の導電糸のほうが電位差が大きくなった。

2つの調査の結果より，DEV-13814 の導電糸をミシン縫いを用いて導電布に縫い付けることで電極として使用する。

4.1.4 問題点

調査結果より，DEV-13814 導電糸をミシン縫いを用いて電極として使用した帽子型タッチデバイスを作製した。このデバイスを用いて取得される値と実際にタッチしている点を比較すると，触れた強さや場所によって取れる電圧が不安定になり，電圧値とタッチ点の結びつけが難しいことが判明した。これは，上下層の帽子の形が完全には噛み合わず，場所によって上下層の距離が異なり，また頭が帽子の形と一致しない場合に，帽子と頭部の間に空洞ができる箇所が存在するためであると考えられる。よって，帽子形状や頭部形状に依らず一定の電圧を取得できる手法を検討した。

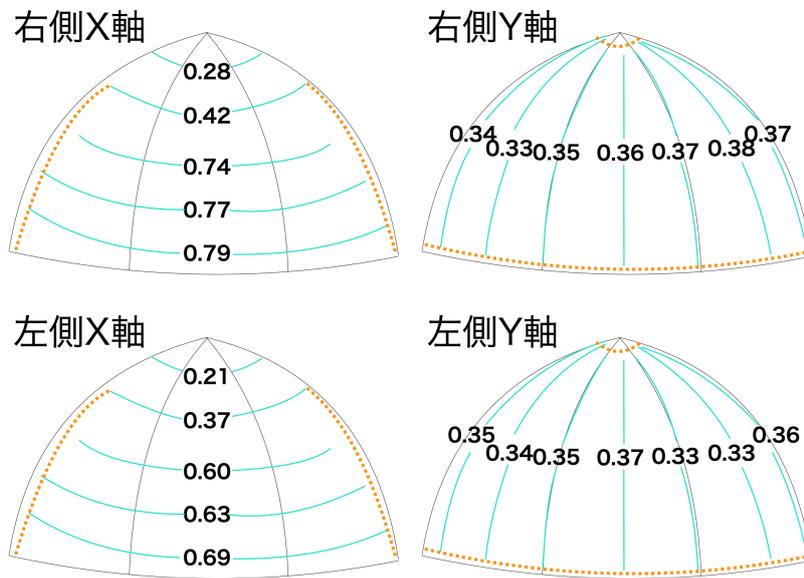
4.2 指における電圧測定による帽子型タッチデバイス

抵抗膜方式によって発生した取得電圧の不安定性の問題を解決するため，ユーザの指に電極を装着し電圧測定を行う手法を検討した。抵抗膜方式とは異なり，導電布層が1層のみであり指から電圧を測定するため，頭部形状や帽子形状による接触の不安定さを改善できると考えられた。このタッチデバイスは，導電布と導電糸を用いて作られる電圧印加用の帽子と，電圧測定のため指に装着する導電性指サックから構成される。

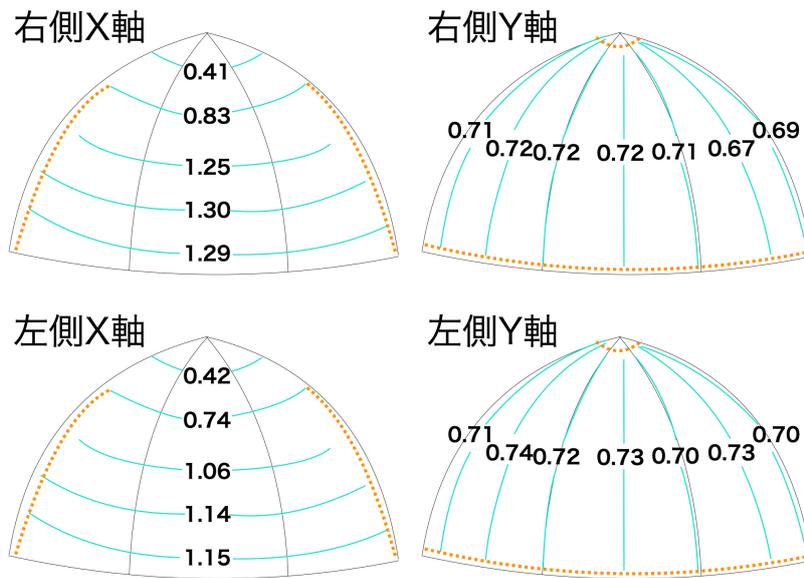
4.2.1 タッチ点検出方式

ユーザは頭部に帽子型タッチデバイスを装着し，指には導電性指サックを装着する。帽子表面の軸方向と導電糸による電極位置を図 4.9 に示す。導電布帽子側では，導電糸電極から X 軸方向と Y 軸方向へ交互に電圧を印加する。導電性指サック側では，指サックを装着した指で帽子表面をタッチし，指サックにおける電圧を X 軸方向と Y 軸方向を交互に計測する。測定した電圧を，GND 側の電極を座標 0，5V 側電極を座標 100 として座標値へ変換する。変換のために，使用前に Y 軸の GND 側電極部分の電圧 $V_{Y_{min}}$ ，5V 側電極部分の電圧 $V_{Y_{max}}$ を記録する。記録後に Y 軸方向の電圧 V_Y を Y 軸方向の位置 Y に変換する式を以下に示す。

$$Y = (V_Y - V_{Y_{min}}) \times \frac{100}{V_{Y_{max}} - V_{Y_{min}}} \quad (4.1)$$



(a) Sparkfun 製 DEV-10867



(b) Sparkfun 製 DEV-13814

図 4.7: 導電糸電極による帽子型導電布上の電位差 (単位: V)

X軸ではYの線形関数としてGND側電極部分の電圧を $V_{X_{min}}(Y)$ 、5V側電極部分の電圧を $V_{X_{max}}(Y)$ とする。使用前に $V_{X_{min}}(0)$ 、 $V_{X_{min}}(100)$ 、 $V_{X_{max}}(0)$ 、 $V_{X_{max}}(100)$ を記録し、Yに応じた $V_{X_{min}}(Y)$ 、 $V_{X_{max}}(Y)$ を計算する。X軸方向の電圧 V_X をX軸方向の位置 X に変換する式を以下に示す。

$$X = (V_X - V_{X_{min}}(Y)) \times \frac{100}{V_{X_{max}}(Y) - V_{X_{min}}(Y)} \quad (4.2)$$

4.2.2 導電布の調査

抵抗膜方式を用いた帽子型デバイスに使用している導電布 Eeontex Conductive Fabric の抵抗値が $105 \Omega/\text{m}^2$ であり、導電糸を使用しても導電布自体の抵抗値が小さいため電極間の電位差が大きくなりにくい問題が判明した。よって、より抵抗値が大きい導電布として静電気除去シートを用いて帽子型デバイスを作成し、Eeontex 導電布によるデバイスと電位差を比較する調査を行った。使用したのはTRUSCO 製静電気除去シートであり、抵抗値は $3 \times 10^4 \Omega/\text{m}^2$ である。静電気除去シートを用いた帽子表面の電位差を図4.8に示す。Eeontex 導電布を使用した帽子の電位差は図4.7bに示されている。

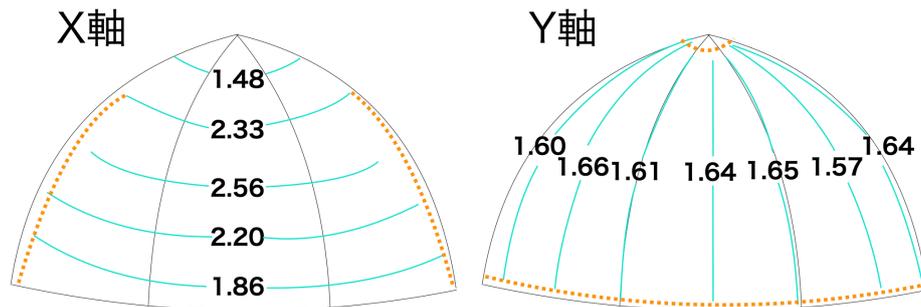


図 4.8: 静電気除去シートによる帽子表面の電位差 (単位: V)

計測結果より、静電気除去シートを使用した帽子が Eeontex 導電布を使用した帽子より電位差が約2倍に大きくなったため、この指における電圧測定による帽子型タッチデバイスでは静電気除去シートを用いる。

4.2.3 帽子型タッチデバイスの構成

抵抗膜方式を用いた帽子と同様に、60 cm サイズの型紙を用いて静電気除去シートから6枚のパーツを切り出した。切り出したものを3つずつ縫い合わせ、半球が左右で分割されている形状を作製した。センサが頭部に直接触れないようにするため、同じ型紙を用いて非導電布を切り出し、半球状の非導電性帽子を作製した。導電布で作製した帽子の左右には、導

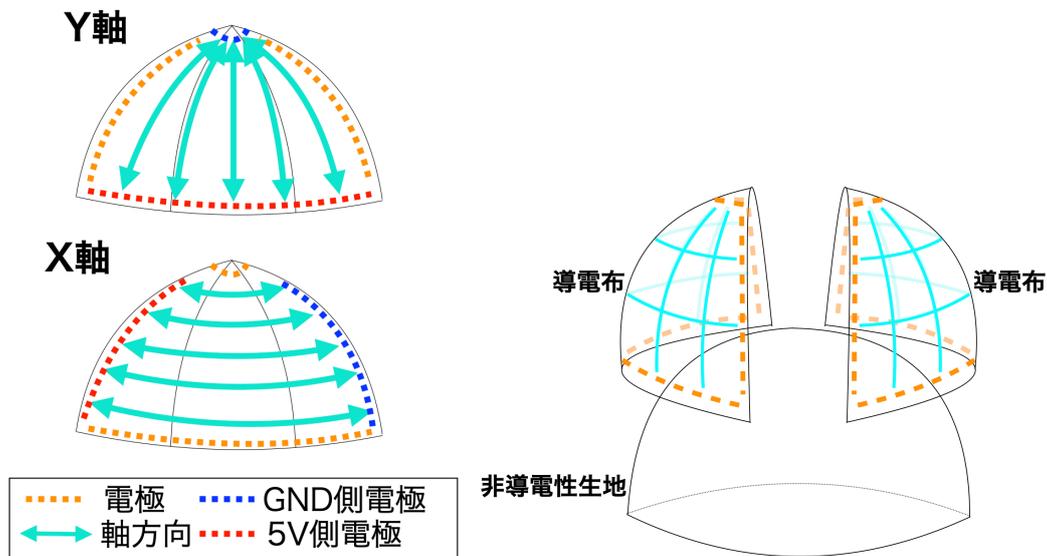


図 4.9: 帽子表面の電極位置と 2 軸の方向 (左), 帽子型タッチデバイスの構造 (右)

電糸をミシンで縫い付けることでそれぞれ 4 つの電極を取り付けた。導電糸を縫い合わせた電極箇所とタッチ位置の X 軸, Y 軸を図 4.9 に示す。

電圧を計測するため指に取り付ける指サックは TURTOX 製スマートフォン用指サックを使用した。指サックも帽子と同様に直接皮膚に触れないようにするため、非導電性の布の指サックを作成し、その上から導電性指サックを被せて装着する。作製した帽子型タッチデバイスと導電性指サックを図 4.10 に、システム全体の構成図を図 4.11 に示す。

導電布に縫い付けられた電極および指サックはどちらもリード線を通してマイコン (Arduino MEGA 2560) に接続されている。PC では Unity スクリプトがマイコンからの入力を座標に変換し、座標をもとに Unity シーンが操作される。システム全体の構成図を図 4.11 に示す。

4.2.4 1 つ目のプロトタイプとの比較

本プロトタイプを用いてマイコンより出力される値と実際に触れている点を調査した。導電性指サックの電圧測定により、触れている圧力の強弱による座標の変化はわずかになり、圧力による影響はかなり減少した。また、帽子が 3 層構造だったものが 1 層のみになり、電極につながっているリード線が 8 本に減ったため、動作を阻害せず、より軽量で負担を減らすことが可能になったと考えられる。



図 4.10: 帽子型タッチデバイスのプロトタイプと導電性指サック

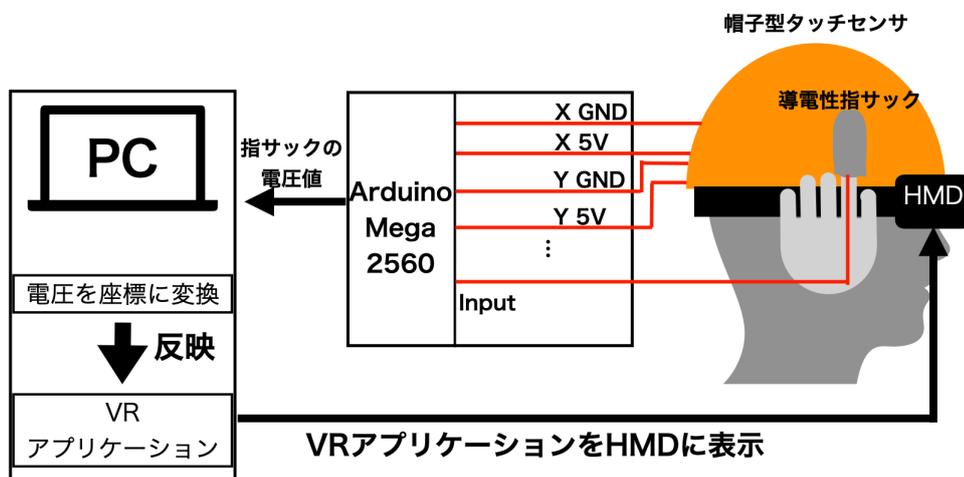


図 4.11: システム構成図

第5章 実験

2つ目のプロトタイプである指における電圧値測定による帽子型タッチデバイスを用いて、タッチ動作となぞる動作の認識精度を調査する実験を行った。

5.1 実験1

帽子デバイス上のある1点をタッチしたときに、取得される座標の値にどれだけのズレが生じるのか調べるため実験を行った。

5.1.1 実験内容

著者1名（男性，21歳）が実験を行った。タッチ点を示すために図5.2のように帽子表面に軸を書き、それらの軸の交点を測定するタッチ点とした。実験時に表面のタッチ点を見えるようにするため、新聞紙で作られた頭部を模した半球形状に被せて実験を行った。

ユーザは指サックを右手の人差指に装着し、その指でタッチする。

実験の手順を以下に示す。

1. 電圧を座標へ変換するための $V_{Y_{min}}$, $V_{Y_{max}}$, $V_{X_{min}}(0)$, $V_{X_{min}}(100)$, $V_{X_{max}}(0)$, $V_{X_{max}}(100)$ の電圧値を記録する。
2. それぞれの格子点において5秒間タッチし、タッチ中は0.5秒ごとに座標値を記録する。これを帽子型タッチデバイスの分割された右側の35点の格子点で行う。
3. 上記の手順1,2を5回繰り返す。

5.1.2 実験結果

隣接する格子点間の座標の差が等しいと仮定したときの予想されるタッチ点の座標と各点の平均値および標準偏差を図5.3に示す。標準偏差の範囲が重なり合っていないタッチ点は35点中31点であり、それらの点はすべてX方向とY方向の両方の標準偏差が10未満となることが判明した。左上のタッチ点において特に標準偏差が大きく広がっているのは、導電布端に縫い付けられた電圧を印加するためのX軸用電極とY軸用電極の境界の近くであり、電極がない部分のため電圧が不安定になったためだと考えられる。



図 5.1: 実験に使用した軸が書き込まれた帽子型タッチデバイス

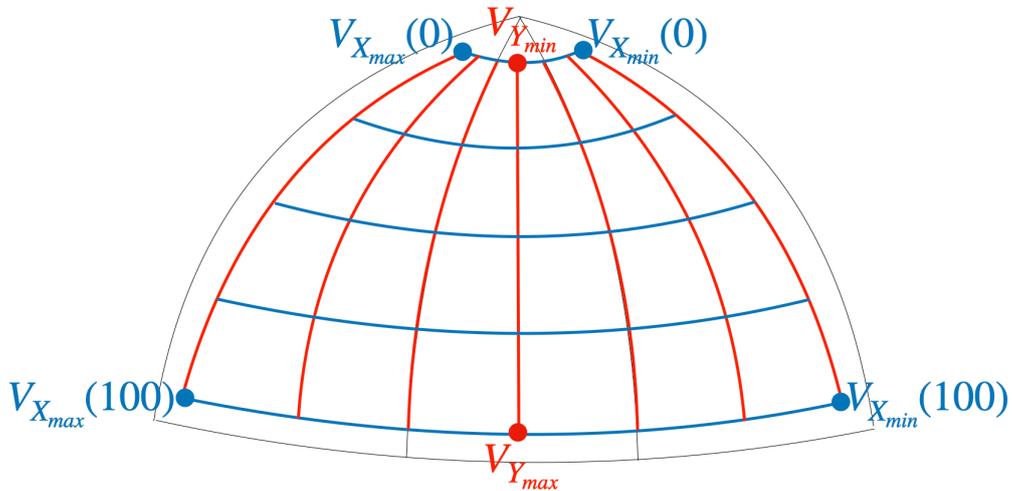


図 5.2: 帽子表面に書いた軸とはじめに記録する点

5.2 実験 2

本研究における帽子型タッチデバイスは、タッチ点だけでなく連続的な値を取得できるため、帽子デバイス上をなぞったときの取得される電圧のブレと 4.2.1 節の電圧から座標に変換する際に用いる X 軸端の電圧の線形変換による計算が適切かどうか調査するための実験を行った。

5.2.1 実験内容

実験 1 と同様に、新聞紙を用いて形作られた半球の頭部形状に帽子を被せ、指に導電性指サックを装着し著者 1 名が実験を行う。

実験の手順を以下に示す。

1. 電圧を座標へ変換するための $V_{Y_{min}}$, $V_{Y_{max}}$, $V_{X_{min}}(0)$, $V_{X_{min}}(100)$, $V_{X_{max}}(0)$, $V_{X_{max}}(100)$ の電圧値を記録する。
2. 図 5.2 に示す 7 つの X 軸と 5 つの Y 軸上を端から端までなぞり、なぞっている間はタッチ位置の座標を 0.1 秒毎に記録する。
3. 上記の手順 1,2 を 5 回繰り返す。

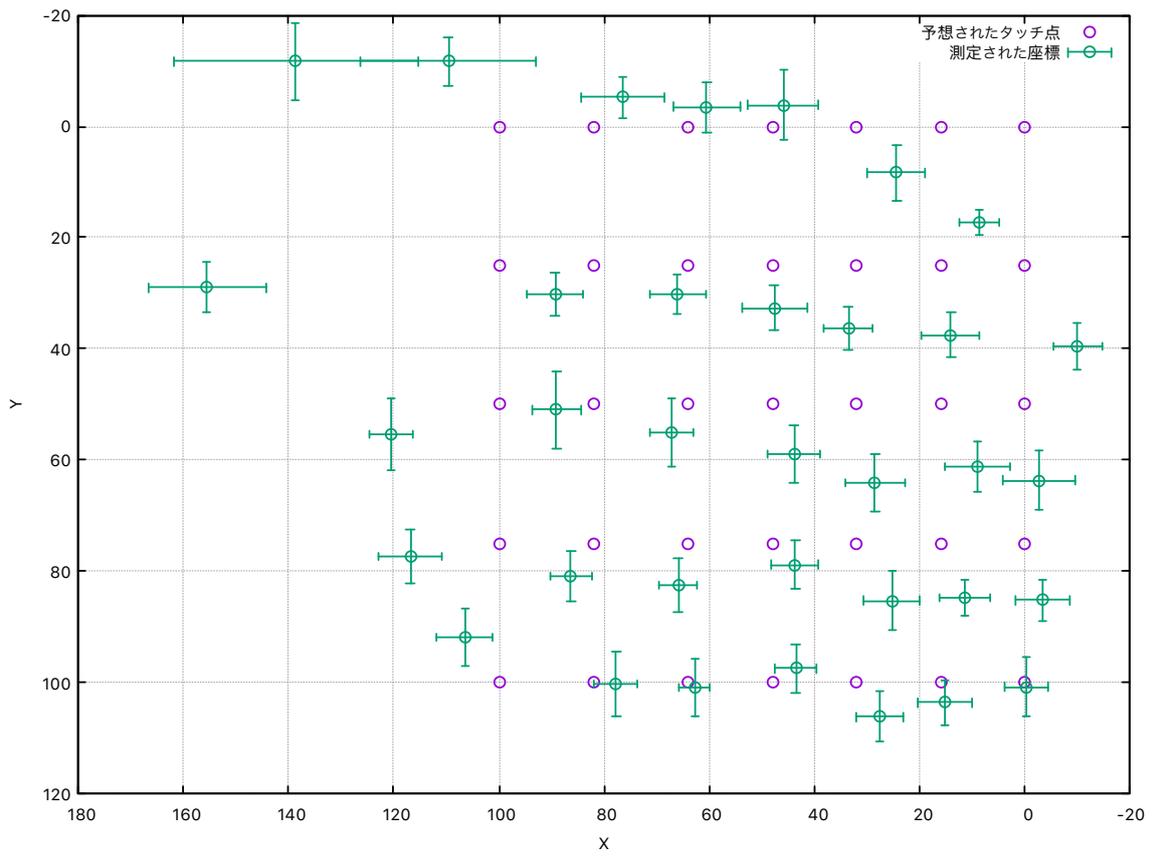


図 5.3: 予想されたタッチ点の座標と各格子点各点の平均値および標準偏差

5.2.2 実験結果

軸をなぞったときの座標値を線をつなぎ、5回分の線を重ねたグラフを図 5.4, 5.5 に示す。X 軸, Y 軸をなぞったとき両方の場合において、左上をなぞったとき大きく値がずれており、また Y 軸をなぞったときの右下でも Y 軸負の方向へ大きくずれているのは、実験 1 で左上の座標が大きくずれてしまったことと同じく、導電糸電極がない部分であり電圧が不安定になっているためであると考えられる。X 軸をなぞったとき右端で一部 X 軸負の方向へ大きくずれが生じたのは、端までなぞった際に右側の導電糸電極に触れてしまったことが原因であると考えられる。さらに、Y 軸をなぞったときタッチ点の分布が $Y = 0$ 辺りで重なり合っているのは、帽子上部では Y 軸が短く格子点の間隔が短くなっているためであると考えられる。それらのズレ以外の部分では大きく重なることなく軸が分かれている。また、座標変換の際に用いる X 軸両端の線形変換については、Y 軸をなぞったときに X 座標が右端では X 軸負の方向に、左端では X 軸正の方向に、1 度外に膨らむようにしてずれていることから、他の変換手法を考える必要がある。

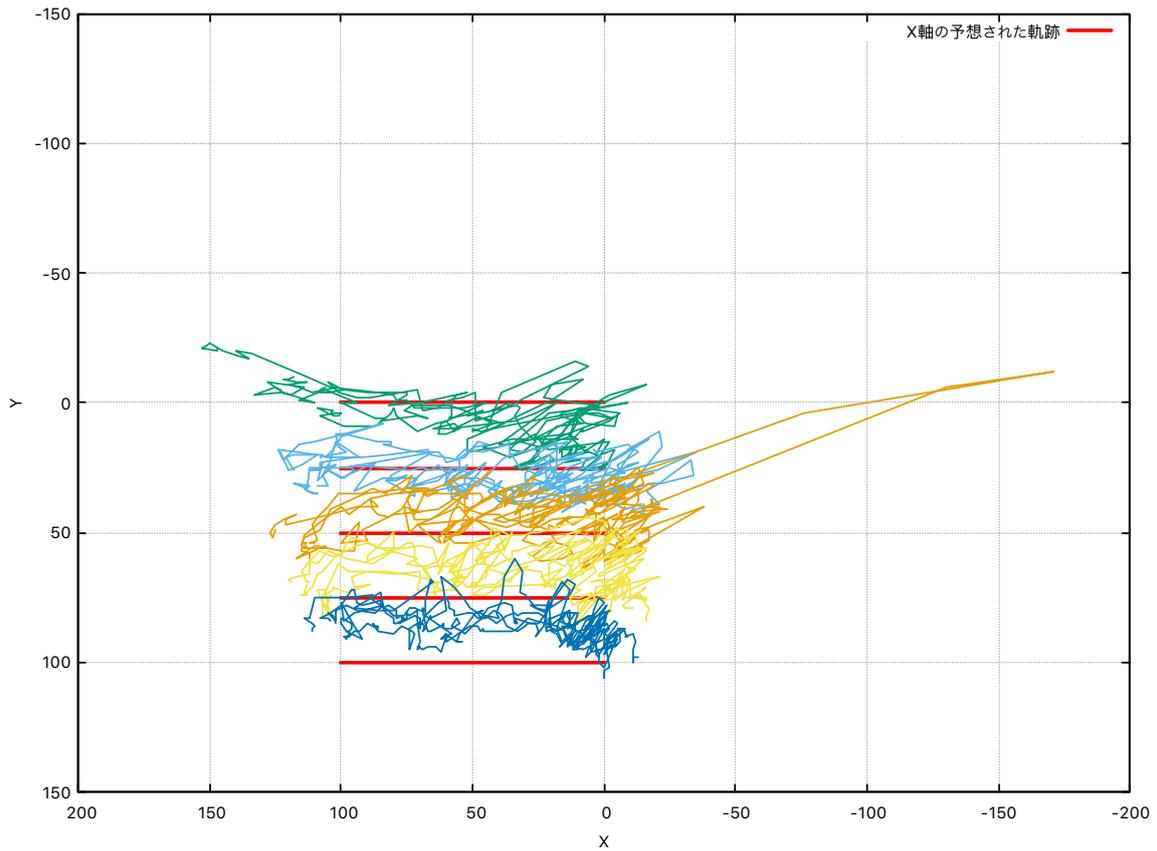


図 5.4: 5つの X 軸をなぞったときの座標をつないだ線。1 回につきなぞった座標の変化が 1 本の線で表され、5 つの軸をなぞっているため 5 本の線が引かれている。5 回繰り返したため、5 回分の 5 本の線が重なり示されている。破線は X 軸間の座標値が等しいと仮定したときの予想される軌跡である。

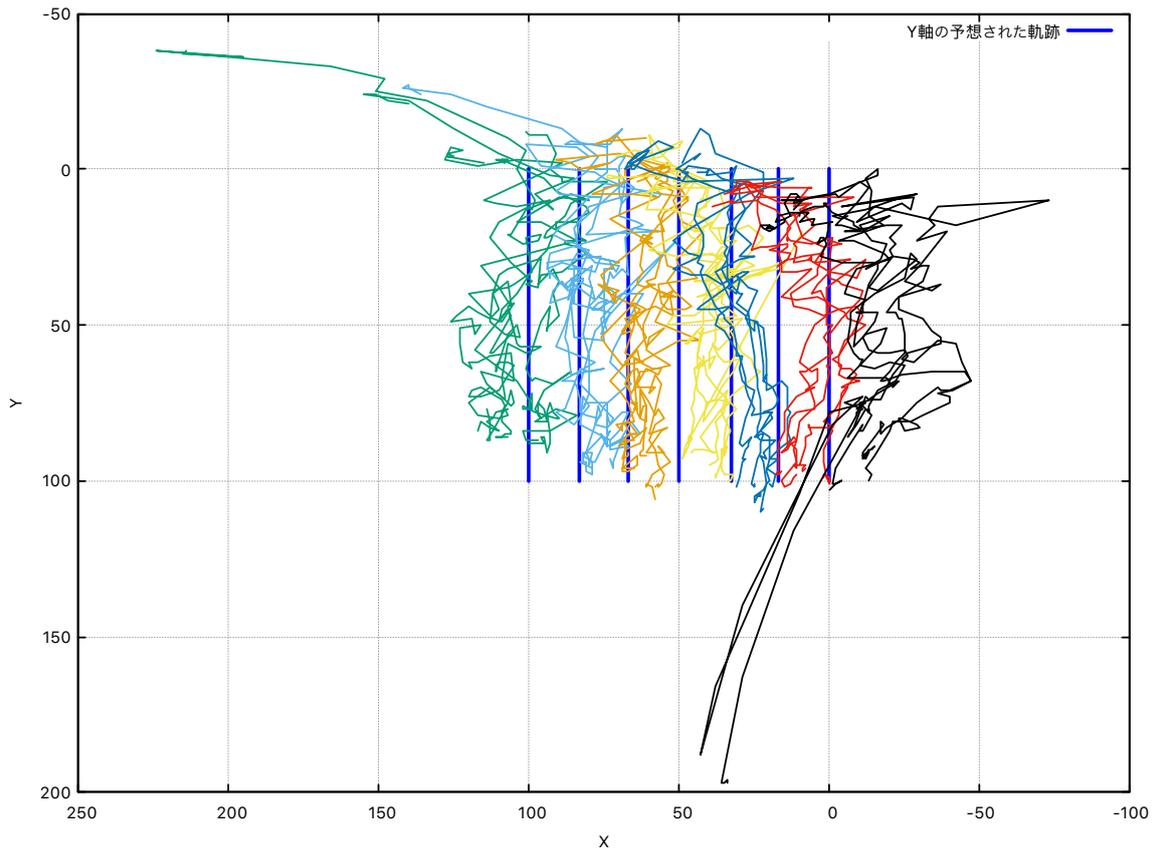


図 5.5: 7つの Y 軸をなぞったときの座標をつないだ線。1 回につきなぞった座標の変化が 1 本の線で表され、7つの軸をなぞっているため 7本の線が引かれている。5回繰り返したため、5回分の 7本の線が重なり示されている。破線は Y 軸間の座標値が等しいと仮定したときの予想される軌跡である。

第6章 アプリケーション

帽子型タッチデバイス表面をなぞることによりカメラを回転操作するアプリケーションを実装した。マイコンからの電圧を座標データへ変換し、1フレームごとに値の変位が測定される。その変位に応じてVR空間内のターゲットオブジェクトがユーザの周りを移動する。ユーザの頭部前側では上下になぞると上下にオブジェクトが動き、頭部後側では上になぞるとオブジェクトが下に動き下になぞると上に動く。また、左右になぞると同じようにオブジェクトが左右に動く。そしてVRの視点カメラはそのターゲットオブジェクトをカメラの中心に収めるようになめらかに回転する。よって帽子上のタッチ操作に応じてカメラが回転するように動作する。視点操作アプリケーションを使用している様子を図6.1に示す。



図 6.1: 視点操作アプリケーションを使用している様子と操作している Unity シーンのスナップショット

第7章 結論

本研究では、導電布を用いた VR 向け帽子型タッチインタフェースを提案した。提案手法において、導電布を縫い合わせることで半球状に加工し、ユーザが導電性指サックを装着して使用することで頭部表面のタッチ位置を取得することが可能となる。帽子に使用する導電布と電極に使用する導電糸を選択するための予備調査を実施し、それらを用いて帽子型タッチデバイスのプロトタイプを作製した。そのプロトタイプを使用してタッチ位置の認識精度を調査する実験を2つ行った。実験1では、1点をタッチしたときの精度を調査し、35点中31点のタッチ点において標準偏差の範囲が重なり合わないという結果となった。実験2では、軸に沿ってなぞったときの精度を調査し、軸間隔が狭い箇所ではタッチ点が重なり合い、また導電糸電極の分かれ目で電極のない部分では座標が大きくなる可能性があることが判明した。さらに、視点操作アプリケーションとしてユーザが帽子型タッチデバイスをなぞることで、それに応じてカメラが回転するアプリケーションを Unity 上にて実装した。今後は、導電性指サックを使用せずに交流電流を用いて指で直接触れることによる測定を可能にする研究を行う。

謝辞

本論文の執筆にあたり，指導教員である高橋伸先生，川口一画先生，志築文太郎先生には熱心なご指導を頂きました。深く感謝致します。特に高橋伸先生には研究を進める上で，丁寧なご指導を賜りました。心よりお礼申し上げます。また，インタラクティブプログラミング研究室の皆様には，研究生活に関する様々な助言を頂きました。特に UBIQUITOUS チームの皆様にはチームゼミをはじめ，論文執筆時の添削など多くの支援を頂き，充実した研究生を送ることができました。深く感謝致します。

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*, SUI '19, pp. 1–2, New York, NY, USA, 2019. Association for Computing Machinery.
- [2] 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, 2011. Visual Image Safety.
- [3] Yang Zhang, Wolf Kienzle, Yanjun Ma, Shiu S. Ng, Hrvoje Benko, and Chris Harrison. ActiTouch: Robust Touch Detection for On-Skin AR/VR Interfaces. In *Proceedings of the 32nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '19, pp. 1151–1159, New York, NY, USA, 2019. Association for Computing Machinery.
- [4] Hemant Bhaskar Surale, Aakar Gupta, Mark Hancock, and Daniel Vogel. TabletInVR: Exploring the Design Space for Using a Multi-Touch Tablet in Virtual Reality. In *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '19, pp. 1–13, New York, NY, USA, 2019. Association for Computing Machinery.
- [5] Jan Gugenheimer, David Dobbstein, Christian Winkler, Gabriel Haas, and Enrico Rukzio. FaceTouch: Enabling Touch Interaction in Display Fixed UIs for Mobile Virtual Reality. In *Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '16, pp. 49–60, New York, NY, USA, 2016. Association for Computing Machinery.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Patrick Parzer, Kathrin Probst, Teo Babic, Christian Rendl, Anita Vogl, Alex Olwal, and Michael Haller. FlexTiles: 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] Patrick Parzer, Florian Perteneder, Kathrin Probst, Christian Rendl, Joanne Leong, Sarah Schuetz, Anita Vogl, Reinhard Schwoediauer, Martin Kaltenbrunner, Siegfried Bauer, and Michael Haller. RESi: A Highly Flexible, Pressure-Sensitive, Imperceptible Textile Interface Based on Resistive Yarns. In *Proceedings of the 31st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '18, pp. 745–756, New York, NY, USA, 2018. Association for Computing Machinery.
- [14] Roland Aigner, Andreas Pointner, Thomas Preindl, Patrick Parzer, and Michael Haller. Embroidered Resistive Pressure Sensors: A Novel Approach for Textile Interfaces. In *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '20, pp. 1–13, New York, NY, USA, 2020. Association for Computing Machinery.
- [15] 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.

- [16] 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.
- [17] Jussi Mikkonen and Riikka Townsend. Frequency-Based Design of Smart Textiles. In *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '19, pp. 1–12, New York, NY, USA, 2019. Association for Computing Machinery.