ハンドインタフェースのための
センサの多用途化に関する研究

2021年3月

高田 峻介

ハンドインタフェースのための
センサの多用途化に関する研究

高田 崚介

システム情報工学研究科
筑波大学

2021年3月

概要

ユーザがコンピュータを操作する際に，キーボードやマウス，タッチパネルといった入力インタフェースが用いられている．これら入力インタフェースには，人の振る舞いを認識するためのセンサが必要不可欠である．つまり，センサの技術的可能性を拡張することにより，より多様な入力インタフェースを設計可能となる．

センサの技術的可能性を拡張するためには，センサそのものの種類を増やす方法と，センサ応答の処理方法（ラベリング）を増やす方法がある．そこで，本研究ではラベリングを工夫することにより単一のセンサにて複数の人の振る舞いをセンシングする手法を開発する．センシング手法の設計にあたって，以下の2つの研究方針を設定し，それらの研究方針に従ってセンシング手法を開発した．[設計方針1] 単一センサの用途を拡張もしくは多用途なセンサを開発することにより「省センサで多用途なセンシング」を開発する．[研究方針2] 既に広く知られている入力方法に倣うことにより「省習熟コストなセンシング」を開発する．また，手の多彩な表現力に着目し，特にハンドインタフェースのためのセンシング手法を開発した．

本研究では，上述の研究方針に従って省センサかつ多用途なセンシング手法を開発した．その結果，以下に示すハンドインタフェースのためのセンシング手法を発見した．（1）単一電極にてタッチおよびスワイプを判別可能なMonoTouch．（2）防水端末のタッチパネルおよび内蔵の気圧センサを用いて押下圧力を取得する手法であるBaroTouch．（3）導電繊維編み込み手袋に電気信号を流した際の応答から，指の曲げ，指同士の接触ならびに把持物体認識を行う手法Grov．（4）既存のQWERTY配列の物理キーボード上にて開始符号を用いることにより，文字入力操作，ポインティング操作，ジェスチャ操作を切り替えながら行う方法FJKeyboard．（5）フリック入力キーボード，マウス，ゲームコントローラとして利用可能な片手把持キーボードであるJoyKey．

本研究の貢献は以下のとおりである．（1）センシング手法を新たに5通り発見し，センシング多様化に寄与した．（2）発見したセンシング手法を実装し，その妥当性を評価した．（3）センシング手法を発見した過程から得られた，発見に至るプロセスをまとめ，単一センサの多用途化のためのデザイン手法を示した．

目 次

第 3 章 BaroTouch：防水タッチパネル端末に内蔵された気圧センサを用いた押下圧力取得手法 29

図 目 次

表 目 次

第1章　序論

昨今，コンピュータの形態は多様化し，我々の生活を様々な場面にて補助するようになった．例えば，筆者の生活においては，朝になると腕に着けたスマートバンドが振動し，スマートフォンのアラームが鳴ることによって起床を助け，「電気をつけて」と声に出すとスマートスピーカがその発声を認識し，寝室の電気が付くといった具合である．それ以外にも冷蔵庫や炊飯器といった家電に加え，車や電車などの交通機関，さらに学生証や定期券といった多様な形態の「コンピュータ」が登場している．

こういったコンピュータのアプリケーションを利用するためには，ユーザがアプリケーションに命令するための入力インタフェースが必要である．この入力インタフェースは通常，以下の3つの要因の組み合わせによって適したものが異なる．要因の組み合わせごとに適した入力インタフェースを選択できれば，我々は日々快適にコンピュータを利用できる．

[コンピュータ要因]	コンピュータの形態（例：デスクトップ/モバイル/ウェアラブル） アプリケーション（例：オフィスソフトウェア/SNS/健康管理/ゲーム）
[ユーザ要因]	ユーザの趣味嗜好/身体的制約/得意不得意など
[コンテキスト要因]	周囲の環境/ユーザの行動/時間など

入力インタフェース選択の例を挙げると，ユーザが通学のための電車の座席に座っている際に，スマートフォンのSNSアプリケーションにて文字入力する場面において，ユーザはタッチパネルを用いたフリック入力やマイクを用いた音声入力などの入力方法を選択できる．この場合，ユーザは音声入力を行うと周囲の乗客に迷惑をかけるため，フリック入力を選択することになる．しかしユーザが電車から降り，歩いて学校に向かう場面においてテキストを入力する場合，フリック入力だとスマートフォンの画面に集中する必要があるため，障害物に衝突する可能性がある．そのため，ユーザは音声入力を選択できる．しかし，周りに通学中の学生がいる場合，配慮して音声入力が利用できない場合がある．その場合，手元に注視せずに前を向いたまま文字入力を行える入力インタフェースがあれば良い．この時，手元を注視せずに入力できる小型の物理キーボードがあればこの問題を解決できる．このように十分に入力インタフェースが多様化すると，ユーザは要因の組み合わせに応じて入力インタフェースを選択できる．

また，入力インタフェースは人の振る舞いを認識するための「センシング」の技術的可能性（センシングの実現可能性/金銭的コスト/設計難度など）の範囲内で設計する必要がある．そのため，入力インタフェースを多様化するためにはセンシングの技術的可能性を拡張（センシングを多様化）することが必要不可欠である．センサの技術的制約の拡張をするためには，センサそのものの種類を増やす方法と，ラベリングを増やす方法がある．

1.1　UIモデル

本研究にて，ユーザインタフェース（UI）のモデルを図1.1のように定義する．本モデルにて，センシングはセンサおよびラベリングによって構成される．センサとは入力（人の

振る舞い）を電気的な応答に変える装置（ハードウェア）を指し，ラベリングとはその電気的な応答とユーザの振る舞いに応じたラベルを対応付ける処理（ソフトウェア）を指す．ラベリングの例として，キーボードの場合，センサはキーボード上の各スイッチを指し，スイッチが押下された際に「ユーザがn番目のスイッチが押した」というラベルに変換する処理が挙げられる．その後，ラベルをn番目のスイッチに対応する文字に変換する処理がラベル操作変換である．

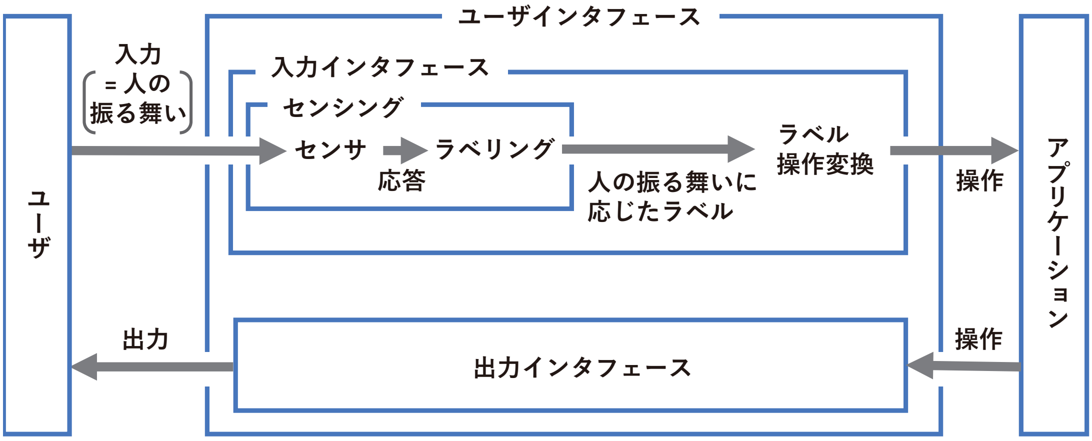


図 1.1: 本研究における UI モデル

1.2　プロトタイピングの普及

最適な入力インタフェースは要因の組み合わせの数だけ存在し，特にユーザ要因（趣味嗜好/身体的制約/得手不得手）によって最適な入力インタフェースは異なると考えられる．一部のインタフェース設計者が全てのユーザ要因を想定し，その需要を満たすだけの入力インタフェースを設計することは難しい．そこで，ユーザが自身のユーザ要因に合わせた入力インタフェースを自作できれば，この問題を解決できる．

安価なマイコンボードや3Dプリンタ，レーザカッタなどのプロトタイピングツールが普及している．ユーザはこのようなツールを用いて入力インタフェースを自作することで，自分に合った入力インタフェースを手に入れることができる．近年，キーボードを自作するユーザは増加しており，将来的にキーボード以外にもタッチパネルやデータグローブといった入力インタフェースを自作するユーザが増えると予想される．また，プロトタイピングが容易なセンシング手法であれば，手軽に自作入力インタフェースに組み込むことができる．

1.3　入力インタフェースの煩雑化

理想的には要因の組み合わせだけ入力インタフェースを用意するべきであるが，実際にいくつもの入力インタフェースを持ち運び，要因に応じて切り替えながら利用することは難しい．そのため，ユーザは自身の趣味嗜好などに応じて入力インタフェースの数を絞る

と考えられる．理想的には文字入力やポインティング，ジェスチャ入力といった全ての入力に対応した単一の入力インタフェースがあれば望ましい．

単一の入力インタフェースにて複数の入力に対応するために新しい入力方法を設計した場合，その入力方法は使い慣れるまでに習熟コスト（時間/ストレス）がかかる．ユーザにとってこの習熟コストは大きい．その例として，キーボードにおいてQWERTY配列というキー配列が1874年から用いられているが，1932年に，より効率的に打鍵可能なDVORAK配列が提案されているにも関わらず，未だにQWERTY配列が利用されている．これは新たにキー配列を覚え直すだけの習熟コストと打鍵効率をユーザが天秤にかけた結果である．そこで，すでにユーザ自身が習熟している既存の入力方法に倣うことにより，省習熟コストな入力インタフェースの構築を目指す．

1.4　省センサで多用途なセンシング

単一の入力インタフェースにて全ての入力に対応するためには，その分だけセンサを組み込む必要がある．しかし，組み込むセンサの種類が増えるほど，入力インタフェースの自作は難しくなる．そこで，単種類のセンサ（単一センサ）の新たなラベリングを発見し，多用途化すれば，省センサにてより多くの入力に対応できる．また，入力インタフェースを自作した際に，センサや計測回路等のハードウェアを後から変更するのは難しいが，ソフトウェア的処理は比較的容易に変更できる．そのためラベリングを多様化することによって，柔軟に用途を拡張・変更できる入力インタフェースを構築できる．

1.5　ハンドインタフェース

数ある身体部位の中で手がコンピュータへの入力に偏重される理由として，図1.2のように手は27の骨，21の関節，8つの筋肉によって構成されており，他の身体部位に比べて格段に動きの幅が広いという特徴が挙げられる．大脳皮質の3割が手指の感覚や運動機能に対応しているということを示したPenfieldの地図は広く知られており，このことからも身体における手の役割は大きいことがわかる [PB37, PR50]．また，図1.3のように腕自体も2つの剛体リンク，3つの関節，6つの筋肉から構成されるため自由度が非常に高い．さらに，図1.4のように身体の他のエンドエフェクタである頭，目，舌および足に比べて拘束が少なく，あらゆる姿勢で自由に動かすことができる．また，手は身体の部位の中で多くの役割を担っている．例えばキーボードの打鍵，食器や飲食物の把持，ドアノブをひねるといった操作を行うことができ，加えて手話のように発声の代わりとして，松葉杖を用いた視覚の代わりとして，車椅子を用いた脚の代わりとして使用することができる．また，人は手を介したジェスチャによる意思疎通，ハイタッチや握手のような手と手の接触，あくびのときに口を手で抑える，手を揉み合わせるといった様々な癖や感情の表現といったコミュニケーションツールとして利用している．そのため，手の振る舞いのセンシング手法を開拓することは，このような行動をより詳細かつ多彩に計測することにつながり，本研究にて提示する後述の各研究テーマの応用例を超えて，将来のインタフェースに寄与すると考えられる．

上記の理由により，筆者は手を用いた入力インタフェース（ハンドインタフェース）に強い興味を抱いたため，これを研究する．

ハンドインタフェースには，大きく分けて環境設置型，ウェアラブル型，把持型の3種類の設置方法が考えられる．例えば，キーボードやマウス，エレベータのボタンは周囲の机や壁といった環境に設置した状態，スマートウォッチやデータグローブは手や手首に装着し

図 1.2: 手は 27 の骨，21 の関節，8 つの筋肉によって構成されており，動きの幅が広い

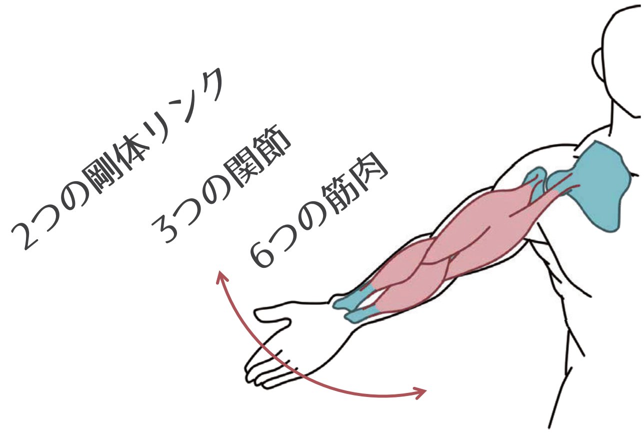


図 1.3: 腕は 2 つの剛体リンク，3 つの関節，6 つの筋肉から構成されており，自由度が高い

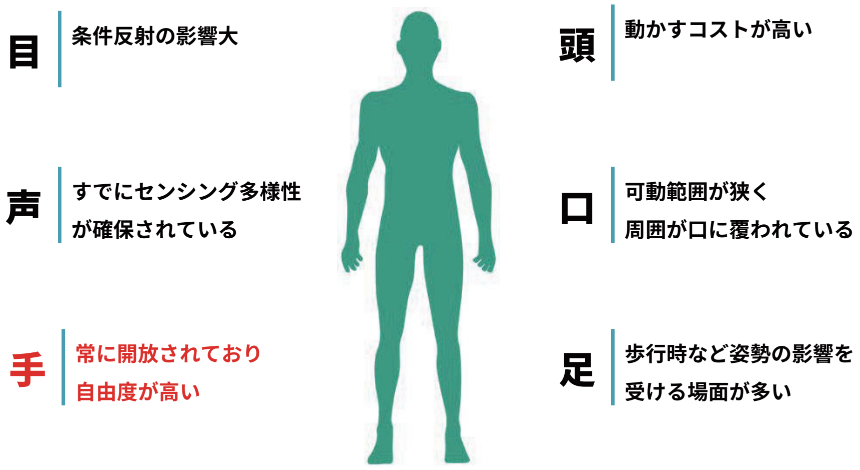


図 1.4: 手と他のコンピュータへの入力に使われる部位との比較

た状態，スマートフォンやゲームコントローラは手にて把持した状態にて用いられる．これら設置方法によって，ユーザが入力インタフェースを使用する場面や，ユーザが入力インタフェースに対して行う振る舞いは異なる．そのため，本研究にて各設置方法ごとにセンシング手法の開発を行う．

1.6　本研究の目的と方針

以上の理由より, 本研究では**単一センサの多用途化を行うことにより，ハンドインタフェース設計者が省センサで多用途な入力インタフェースを構築できるようにすることを目指す.** また単一センサの多用途化は以下の研究方針に従って行う．

[研究方針 1] 単一センサの用途を拡張もしくは多用途なセンサを開発することにより「省センサで多用途なセンシング」を開発する

[研究方針 2] 既に広く知られている入力方法に倣うことにより「省習熟コストなセンシング」を開発する

1.7　本研究の貢献

本研究では，上述の研究方針に従って 5 つの研究テーマに取り組み，省センサかつ多用途なセンシング手法を開発した．

1.7.1　MonoTouch: 複数ジェスチャ認識が可能な単一電極タッチセンサ

MonoTouch はタップ, 上下左右スワイプを判別可能な静電容量式の単一電極タッチセンサである．MonoTouch の電極はジェスチャごとに応答が異なるように設計された電極パターンを有しており, 3D プリントが可能である．本研究にて MonoTouch を実装し，実験によりジェスチャの認識精度を評価した．その際，複数の導電部に指がまたがることにより判別精度が落ちる問題が生じたため，この問題を解決するための電極パターンの工夫を発見し，その効果を検証した．また，電極の導電部および非導電部の幅とジェスチャ認識精度の関係を調査し，デザイン指針を示した．

1.7.2　BaroTouch：防水タッチパネル端末に内蔵された気圧センサを用いた押下圧力取得手法

BaroTouch は防水機能を有し, 気圧センサを内蔵しているタッチパネル端末において, 指の押下圧力を取得する手法である．BaroTouch では, 画面を押下した際に端末表面がたわみ, 内部の気圧が上昇する現象を, 気圧センサを用いて計測することにより押下圧力を取得することができる．BaroTouch において周囲の環境や端末の気密性の違いによって気圧センサの応答が異なるという問題を発見し，その問題を解決するためのアルゴリズムを示した．実装した BaroTouch を用いて，様々な条件下における BaroTouch の感圧特性を評価し，ユーザによる押し分け精度評価を行った．

1.7.3　Grov：導電繊維編み込み手袋を用いた手形状認識手法

Grov は導電繊維が編み込まれた手袋をセンサの一部として用いることにより，指の曲げ具合，指同士の接触並びに接触位置といった手形状に加え，把持物体の認識を同時にリアルタイムで行う手法である．また Grov は，小型・軽量・安価に実装可能であり，柔軟であるため壊れにくく，洗濯することもできる．本研究にて Grov の実装を行い，手形状の認識精度を評価し，手形状を認識可能であることを示した．また把持物体の認識手法を示した．さらに Grov を用いたアプリケーションを容易に実装するための SDK を実装した．

1.7.4　FJKeyboard：キーボード上における 2 つのキーの連続押下を開始符号とする操作手法

FJKeyboard は既存の QWERTY 配列の物理キーボードのみを用いて，文字入力操作，ポインティング操作，ジェスチャ操作を行う手法である．FJKeyboard において各操作の切り替えは，ユーザがキーボードの F キーおよび J キーもしくは K キーを連続押下し，J キーもしくは K キーを押下したまま F キーから指を離しという開始符号を入力することにより行われる．FJKeyboard は物理キーボードのみを用いるため，他デバイスを併用する場合に比べ設置に必要となる面積が小さく，かつデバイスの持ち替えを必要としない点において優れている．本研究にて開始符号の妥当性についてキーロガーを用いた実験により示した．また，FJKeyboard の実装を行い，その入力速度および入力精度，使用感を調査した．

1.7.5　JoyKey：4×3 の格子状にジョイスティックを有する片手把持キーボード

JoyKey はスマートフォンにおいて広く用いられているフリック入力を行うための片手把持キーボードである．JoyKey を実装し，入力速度，入力精度および使用感をタッチパネルのソフトウェアキーボードと比較した．その結果，ソフトウェアキーボードはアイズフリーだと著しく入力精度が落ちる一方，JoyKey はアイズフリーにて文字入力が可能であることを示した．さらに JoyKey は，持ち方を変えることにより，文字入力操作以外に画面のカーソルを操作するためのマウスとして用いたり，ビデオゲームを操作するためのゲームコントローラとして用いることができる．

1.8　本論文の構成

本論文の構成は以下の通りである．

1 章 研究の背景，目的，モチベーションならびに方針を説明する．

2–5 章 研究方針に基づいて発見した 5 つのセンシング手法について，各種法の目的，実装，実験ならびに議論を示す．

7 章 本研究の 5 つの研究テーマから得た知見および, 本研究の今後の発展について議論する．

8 章 本研究の結論を述べる．

第2章　MonoTouch: 複数ジェスチャ認識が可能な単一電極タッチセンサ

コンピュータの入力装置として広く用いられている，タップ，スワイプなどのタッチジェスチャを取得する静電容量方式のタッチパネルおよびタッチパッドは，多くのタッチセンサから構成される．これらは，個々のタッチセンサの静電容量を計測するために，多くの結線，およびマルチプレクサを用いた高速なスイッチングを必要とする．

これに対して，単一電極のタッチセンサのみを用いて複数タッチジェスチャの認識が可能になれば，スイッチが不要であり，単一結線のみを要するため，インタフェースの設計が簡単になる．すでに単一電極にて作製された静電容量方式のタッチセンサを用いてタッチ，左右方向のスワイプ，およびスワイプを行う際の指の本数を検出する手法は真鍋らによって提案されている [真鍋月]．[真鍋月] において，非対称な感度を持つ面積の異なる 2 つの導電部を持つプリント基板を電極とし，指を電極上にてスワイプさせた際の静電容量変化の急峻さを利用してスワイプ方向を認識している．そのため計測精度および速度が優れた静電容量計測回路を必要である．さらに，左右という 1 軸のスワイプしか認識できない問題がある．そこで指が触れているか/触れていないかという ON/OFF 情報のみを用いるため単純な静電容量計測回路を用いることができ，電極パターンを工夫することにより左右に加えて上下方向のスワイプ方向を認識できる MonoTouch を開発した．MonoTouch はスワイプの向きを認識するために，スワイプの向きによって非対称なセンサの応答を持ち，かつタップ，左右スワイプ，および上下スワイプにおいてセンサの応答回数が異なる図 2.1a に示す電極パターンを用いている点で [真鍋月] と異なる．また，MonoTouch の電極は導電素材および非導電素材を用いて図 2.1b のように 3D プリントして製作することが可能である．

MonoTouch において，電極上にて指をスワイプさせた際に，指が複数の導電部にまたがることによって意図しない応答波形になり，認識精度が低下するという問題が確認された．この問題を解決するために，導電部の間をわずかに盛り上げる手法を考案した．

図 2.1: 製作した MonoTouch（a: 電極内部の構成，b: 3D プリンタを用いて印刷した電極）

2.1 本章の構成

本章の構成は以下の通りである．2.2 節にて MonoTouch の研究を行うにあたって参考にした研究について述べ，MonoTouch と先行研究の差異を述べる．2.3 節にて MonoTouch を設計するための電極パターンの形状や工夫点，製作方法を述べる．2.4 節にて MonoTouch に利用した静電容量計測手法およびタッチジェスチャを認識するためのアルゴリズムを述べる．2.5 節にて MonoTouch に用いる電極形状を変えた場合のタッチジェスチャ認識精度を評価した実験，ならびに最適な電極の設計指針を明らかにするために行った実験を述べる．2.6 節にて MonoTouch を利用したアプリケーション例を述べる．2.7 節にて PC やスマートフォンのマイク端子を用いて MonoTouch を実装する方法を述べる．2.8 節にてまとめを述べる．また，付録 A に MonoTouch の実験に用いた書類を示す．

2.2 関連研究

本手法はタッチ検出が可能なセンサおよび導電部を非導電部にて区切るような構造を持つ電極を用いて，スワイプ方向などのタッチジェスチャを認識する手法である．また電極は 3D プリンタなどのファブリケーション手法を用いて自由な形状にて製作することができる．関連研究として，タッチ操作に関する研究，ファブリケーション手法に関する研究，周辺環境のインタフェース化手法が挙げられる．

2.2.1 タッチ操作に関する研究

MonoTouch におけるタッチジェスチャ認識は，タッチジェスチャを入力するユーザの指が電極の導電部にタッチしたかどうかという ON/OFF 情報をもとに行われる．本手法はユーザの指のタッチをタッチ検出回路を用いて検出し，その時間的変化である応答波形を利用してタッチジェスチャ認識を可能とする．そのため MonoTouch と関連する研究として，タッチを検出する手法，タッチした際のセンサの応答波形を利用する手法，ならびにタッチ操作を拡張する手法が挙げられる．

タッチ検出手法

押下圧力によって抵抗値が変化する圧力センサを用いてタッチを検出できる．圧力センサを用いたタッチセンサとして，The UnMousePad [RP09]，および PreSenseII [RS06] が挙げられる．The UnMousePad は平面形状の圧力センサにかかっている圧力を，場所ごとに計測可能な圧力センサである．PreSenseII はタッチした位置を計測可能なタッチパッドに圧力センサを組み合わせることにより，タッチした際の強弱をインタラクションに利用している．

気圧センサを用いることによりタッチを検出できる．Emoballoon は空気を充満させた風船の中に気圧センサを閉じ込め，風船に触れた際の内部気圧の変化を計測することにより，風船を押す，撫でる，抱きしめるといったジェスチャを認識している [中島 13]．

センサに指を近づけた際の光の反射を利用することによりタッチを検出できる．光学式のセンサを用いたタッチセンサとして，ThinSight [HIB$^+$07]，および Printed Optics [WBHP12] が挙げられる．ThinSight は液晶ディスプレイ背面部から表面向きに配置した複数の赤外線フォトリフレクタを用いて，液晶ディスプレイをタッチパネル化する研究である．Printed

Optics は光を透過する素材を用いて，3D プリントしたオブジェクトを製作する研究であり，応用例の一環として光の反射を利用したタッチ検出インタフェースを構築している．

光学式カメラを用いてタッチを検出する研究がなされている．光学式カメラを用いたタッチセンサとして，Han らの手法 [Han05]，および OmniTouch が挙げられる [HBAD11]．Han らは透明なアクリル板の側面より光を照射した際に，アクリル板に手や指が触れた場所が明るくなる現象を用いて，タッチ位置を検出している．OmniTouch はユーザの肩に装着した深度カメラセンサを用いて手を撮影し，手が紙やもう片方の手のような面状の物体に触れた際の位置を検出している．

指もしくは手が金属等の導電性物質によってできた電極に触れた際に，指と電極との間に生じる静電容量を計測することによりタッチを検出できる．静電容量を用いたタッチセンサとして Holleis らの手法 [HSP$^+$08] および PrintSense [GSO$^+$14] が挙げられる．Holleis らは衣服上に縫い付けた導電繊維を電極とした静電容量方式のタッチセンサを製作している．PrintSense は導電インク印刷により製作した曲げられるタッチ電極を用いた，静電容量方式のタッチセンサである．

物体に手や指が触れた際の音響の変化を用いてタッチの検出を行う研究や製品がある．音響特性を用いたタッチセンサとして Skinput [HTM11] および PseudoButton [HW12] が挙げられる．Skinput は指を用いて肌を叩いた際に生じる皮膚の振動を，皮膚に貼り付けた音響センサを用いて検出し，インタフェースに利用している．PseudoButton はスマートフォンなどの携帯端末のマイクを指を用いてふさいだ際の入力音声信号の減衰を用いてタッチを検出している．また超音波表面弾性波（SAW：Surface Acoustic Waves）方式のタッチパネルディスプレイが市販されている [Iiy]．SAW 方式のタッチパネルは指が画面にタッチした際に，画面上を伝搬している超音波が減衰する現象を用いてタッチを検出している．

前段落までに述べたタッチ検出手法以外の手法を述べる．Raphael らは電極にタッチした際の時間領域反射を測定することによりタッチを検出している [WB11]．Gabe らは室内のコンセントや家電機器が発する電磁ノイズを，ユーザの体を一種のアンテナとして用いることにより受信し，解析することにより，壁にタッチしたかどうかおよび壁までの距離を認識している [CMPT11]．TempTouch はペルチェ素子にタッチした際の，指の体温によりペルチェ素子の温度が上がる現象を用いてタッチを検出している [PN13]．

MonoTouch はタッチジェスチャを認識している点で異なる．また，MonoTouch は電極にタッチしたかどうか，というタッチの ON/OFF 情報をもとにタッチジェスチャを認識しているため，本節にて述べた手法は MonoTouch に利用できる可能性がある．

接触した際に生じる波形を利用する手法

前節にて述べたように，音，光，静電容量などを用いてタッチを検出できる．MonoTouch はタッチの ON/OFF 情報の時間的変化を解析することによりタッチジェスチャを認識している．MonoTouch と同様に，タッチした際のセンサの応答を解析することによりタッチ入力を拡張する研究を述べる．

波形を基に物体の種類および物体への入力を認識する研究を述べる．Acoustic Barcodes はアクリル板の表面上に一定のパターンになるように間隔を空けながら溝を設け，板が引っ掻かれた際の音の波形を基に，引っ掻かれた板を識別している [HXH12]．同様のインタラクションを 3D プリントしたオブジェクトを用いて行う研究もある [SHH$^+$15]．Acoustruments はスマートフォンに内蔵されたマイクおよびスピーカの間を 3D プリントした管を用いて接続することにより，管を押す，捻るなどの動作を応答波形を基に認識してる [LBHH15]．

EM-Senseはタッチした電気機器ごとに固有の，電磁波を解析することにより，タッチした電気機器を認識している[LYX$^+$15].

応答波形を基に物体への触れ方を認識する研究を述べる．Touché [SPH12] および Botanicus Interacticus [PSLS12] は電極に手が触れた際に生じる静電容量によって変化する周波数特性を，周波数が連続的に変化する掃引信号およびフーリエ変換を用いて解析し，電極への触れ方を認識している．本手法を応用することにより，誰が触れているかも認識できる[HSP12]．同様のことは，音響特性を用いても可能であり，Touch&Activate[OST13]は，ユーザが物体に触れた際の音響的な周波数特性を計測することにより，物体への触れ方を認識している．本手法を応用することにより物体にタッチした際の押下圧力を計測することも可能である[OST14].

真鍋らの手法は静電容量方式および光学式のタッチセンサを用いて，センサに触れた際の応答波形の立ち上がりおよび立ち下がりの急峻さを用いて，指を用いて電極表面をなぞるスワイプジェスチャやなぞる指の本数を認識可能である．

MonoTouchは真鍋らの手法[真鍋月]のように，タッチした際の応答波形の変化をもとに，タッチジェスチャを認識している．しかし，タッチの応答波形の急峻さを計測するためには，複雑な回路が必要なのに対し，MonoTouchはタッチのON/OFFという単純な応答を用いてタッチジェスチャを認識できるため，構築が容易である．

タッチ操作を拡張する手法

タッチセンサを用いて指や手の接触を検出する際に，他のセンサを組み合わせることによりタッチ操作の拡張が可能である．MonoTouchにおいても以下に述べる研究を参考にタッチ操作を拡張できる可能性がある．

タッチ時に押下圧力を計測する研究を述べる．BaroTouchはタッチパネル押下時の気圧センサの応答波形を基に押下圧力を取得する研究である[高田16]．Expressive Touchはタッチパネルを押下した際に生じる音の大きさを基に押下圧力を取得している[PH14]．ForcePhoneはTouch&Activate [OST14]の様に，スマートフォン内蔵のマイク，スピーカを用いた超音波音響センシングにより，押下圧力を計測している[TS16]．GripSenseは端末内蔵の振動モータおよびスマートフォンを指にてタッチした際の角速度を計測し，端末の把持状態ならびにタッチの強弱を識別可能にした研究である[GWP12]．ForceTapは端末をタッチした際の加速度変化を基にタッチの強さを推定している[HL11b].

押下圧力以外のタッチ操作拡張を行う研究を述べる．TapSenseはスマートフォンに搭載されたタッチパネルに触れた際に，指の先端や第一関節といった触れた手の部位を，タップした際に生じる音の波形を基に認識する研究である[HSH11]．Expressyはタッチパネルを操作する手の腕に装着したスマートウォッチのセンサを用いて，タッチしている指の角度を認識する研究である[WKH$^+$16].

2.2.2 周辺環境のインタフェース化に関する研究

MonoTouchは導電性の物体（金属製のドアノブ，壁，PCの一部）に，非導電性のテープ等を貼り付け，タッチ検出回路を接続することにより，導電性の物体をタッチンタフェース化できる．本手法以外に，容易に周辺環境をインタフェース化できる研究を述べる．

Sugiuraらはぬいぐるみやクッションのような柔軟な物体を入出力インタフェースとして用いるためのデバイスを開発した[SLW$^+$11, SKW$^+$11, LSFI13]．Scratch Inputは物体を引っ掻くようになぞった際の音をコンタクトマイクで検出することにより，タッチジェス

チャを認識する研究である [HH08]．Makey Makey はワニ口クリップを導電性の物体に接続することにより，タッチ入力インタフェース化するためのツールキットである [CS12]．Sony の Mesh は既存の物体に装着することにより入力インタフェース化することができるツールである [SON]．Lego Mindstorms はブロックを組み立てる玩具である LEGO への，モータなどのアクチュエータの組み込みおよびプログラミングを行うことができるツールである [LEG]．

2.3 タッチセンサ MonoTouch の設計

ユーザのタップおよび上下左右スワイプという 5 種類のタッチジェスチャを認識できる単一電極タッチセンサ MonoTouch の設計および製作を行った．本節においては電極パターンの設計方針，および電極の設計と製作について述べる．

2.3.1 電極パターンの設計方針

以下の要件を満たすことにより，単一電極タッチセンサの電極パターンを用いてタップ，スワイプおよびスワイプの向きが認識可能となる．

要件 1 応答波形の山の数がタッチジェスチャによって異なる

要件 2 応答波形の山の幅がタッチジェスチャによって異なる

以下にそれぞれの要件を説明する．

[要件 1] ユーザがタップを行う場合，ユーザは指を用いて電極に触れ，指を離す．つまり，1 度のタップに対して 1 回の応答が得られる．これに対し，スワイプを行う際にユーザの指が，導電部と非導電部に交互に触れるよう電極パターンの設計を行うことより，1 度のスワイプにて複数回の応答を得ることが可能となる．この応答回数をスワイプの軸方向によって異なるよう設計することにより，タップおよびスワイプの軸の認識が可能となる．

[要件 2] スワイプを行う際，導電部幅を長くすることによりセンサの応答時間が長くなる．[要件 1] より，スワイプを行う際は指が複数の導電部に触れるため，導電部の長さが異なるように設計することにより，スワイプ方向に応じてセンサの応答が非対称になる．たとえば，順方向スワイプにおいては，長い電極に触れた後に短い電極に触れ，逆方向スワイプにおいては，短い電極に触れた後に長い電極に触れるように設計すれば，2 つの応答時間を比較することによりスワイプの向きの認識が可能となる．

上記の 2 つの要件を満たすように電極パターンの設計を行った．

2.3.2 指のまたがり問題と盛り上げの付与による解決

プロトタイプとして 30 mm 四方の電極パターンを作成し，タッチジェスチャの認識実験を行った．結果，上下スワイプにおいて導電部間に指がまたがることにより応答回数が減り，別タッチジェスチャとして認識される問題が確認された．この問題は電極パターンの小型化に際して，より顕著に表れることが予想される．この問題を解決するために，我々は非導電部をわずかに盛り上げる方法を考案した．非導電部を盛り上げることにより，指が図 2.2 のように盛り上げに阻まれ，2 つの導電部に同時に触れくくなると予想される．盛り上げを付与する位置は図 2.3 に示す上下スワイプに用いる導電部間の非導電部とし，盛り上げの高さは 0.3 mm とした．

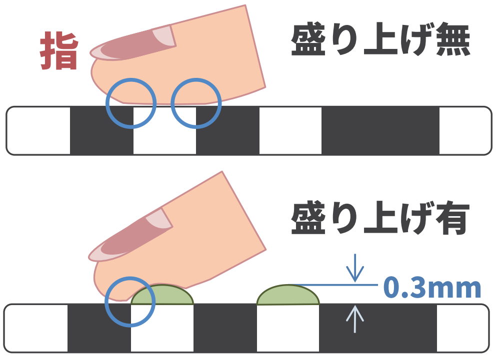


図 2.2: 盛り上げによる指のまたがりの解消

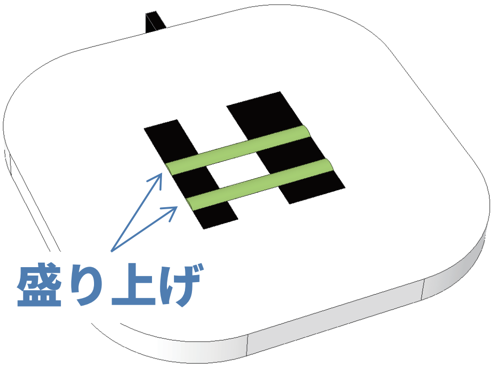


図 2.3: 盛り上げの付与位置

2.3.3 電極の設計と製作

2.3.1 節にて述べた電極パターンの設計と製作を行った．電極は全て図 2.1a のように，導電部が内部にて互いに導通しており単一電極となっている．

電極は全体が 70 mm 四方となるよう設計し，電極パターンを中心に配置した．[要件 1] に従い，上下スワイプの際はセンサの応答回数が 3 回，左右スワイプの際は 2 回となるように設計した．これは人差し指先端が楕円形状になっており，指の厚みが指幅より狭いため，左右スワイプより上下スワイプの方が，複数の導電部に指がまたがりにくいためである．この時，2.3.2 節に従い盛り上げを付与した．また，[要件 2] に従い，上下間においては上側の電極に，左右間においては右側の電極に指が長く触れる様に電極パターンを設計した．

電極の製作には，3D プリンタとして熱溶融積層方式の 3D プリンタ（FLASHFORGE 社製，Dreamer）を用いた．また，素材として導電性 PLA フィラメントおよび非導電性 PLA フィラメントを用いた．

2.4 タッチジェスチャの認識

タップおよび上下左右スワイプを，電極の静電容量の変化に基づき認識するシステムを構築した．図 6.7 に作製した電極を組み込んだ認識システムの構成を示す．

図 2.4: 認識システムの構成

2.4.1　静電容量の検出

本システムにおいては静電容量の計測は Arduino の送信ピンの状態を変化させた際に，受信ピンの状態が変化するまでの遅延時間を用いて静電容量を計測するライブラリである CapSense[Bad] を用いた．遅延時間はユーザの指が電極の導電部に触れた際に形成されるキャパシタンス C と，10kΩ の抵抗 R によって決まる時定数 R×C に依存しており，タッチした際に C が大きくなることにより遅延時間が長くなるため，この遅延時間を計測することにより指が電極に触れたことを検出することができる．

2.4.2　タッチジェスチャの認識方法

電極上にてタッチジェスチャを行った際に，観測された波形を図 2.5 に示す．図 2.5 中段の青いセンサ応答の波形は，縦軸が 2.4.1 節にて述べた遅延時間であり，横軸が時間である（静電容量の計測が完了する度に更新される）．図 2.5 下段はセンサ応答の波形を微分して得られた波形である．微分値が正の区間を橙色，負の区間を紫色，零の区間を緑色を用いて着色している．この微分値に関して，1 回のタッチジェスチャを行った際に正の符号の区間が何回出現したかという情報と，さらに先頭の正の符号の連続区間と末尾の正の符号の連続区間のどちらの方が時間が長かったかという情報を用いてタッチジェスチャの認識を行った．

2.5　評価実験

本手法において，電極の形状を変えた際に認識率にどのような影響を与えるか調査するために 2 つの評価実験を行った．1 つ目の評価実験は，タップ及び 4 方向スワイプ認識可能な電極のサイズおよび形状を変えた際にどのように認識率が変わるか評価するために行った．2 つ目の評価実験は，電極の導電部の幅および間隔を変えた際に，どのように認識率が変わるか評価するために行った．本節にて，評価実験の実験条件，実験結果および考察について述べる．

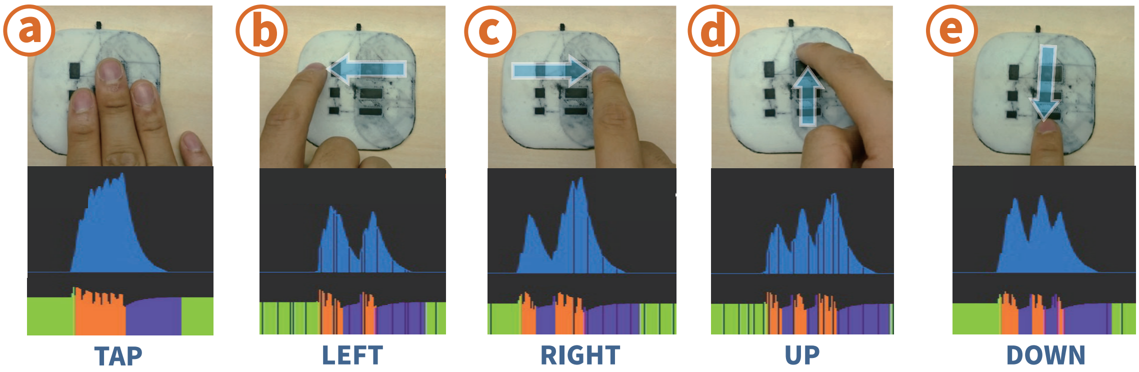
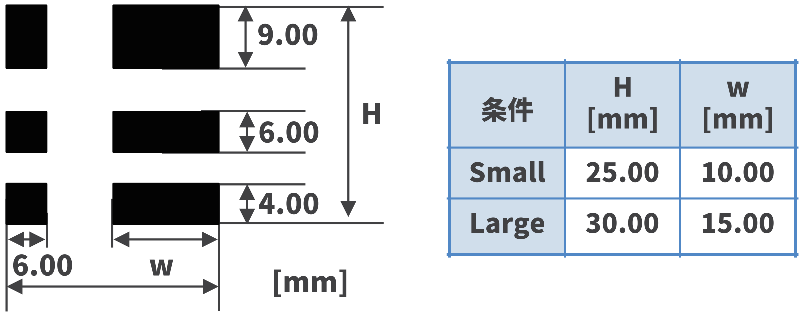


図 2.5: それぞれのタッチジェスチャを行った際に得られる静電容量変化の波形（上段：タッチジェスチャの写真，中段：センサ応答の波形，下段：センサ応答を微分して得られた波形）



条件	H [mm]	w [mm]
Small	25.00	10.00
Large	30.00	15.00

図 2.6: サイズ条件ごとの電極パターンのサイズ

2.5.1　評価実験 1

MonoTouch のタッチジェスチャ認識精度を測定するために実験協力者 8 名（男性，22–24 歳）に協力してもらった．電極サイズを小さくした際のまたがり問題に対し盛り上げを付与することが有効か調べるため，サイズ条件（電極パターンのサイズ）および形状条件（盛り上げの有無）が異なる 4 種類の電極を作製し，比較を行った．

実験設計

実験 1 を行った際の実験協力者，実験条件，実験手順を述べる．また，実験中に実験協力者に提示した資料を本論文の付録 A にて示す．

実験協力者

実験は全て静かな屋内にて行われた．実験協力者は大学院生のボランティア 8 名 (P1–P8，男性 8 名，22–24 歳) であった．全ての実験協力者は，スマートフォンを用いたタップおよびスワイプの利用経験があった．また，実験を行う際に全ての実験協力者の右手人差し指のサイズ（指の腹の幅，指の厚さ，および指の先端面積として幅 × 厚さ）を測定した．表 2.1 に各実験協力者の指のサイズを示す．

表 2.1: 実験協力者の右手人指し指の腹の幅，指の厚さ，および指の先端面積

実験協力者	幅 [mm]	厚さ [mm]	面積 [mm^2]
P1	13.87	8.20	113.7
P2	13.36	7.26	96.99
P3	12.84	8.72	112.0
P4	10.98	7.19	78.95
P5	13.39	7.38	98.82
P6	12.40	8.17	101.3
P7	12.59	8.36	105.3
P8	12.40	8.28	102.7

実験条件

電極のサイズ条件および形状条件について述べる．サイズ条件は図 2.6 に示す Small および Large の 2 種類である．これらのサイズ間において導電部の上下方向の幅は一定であり，導電部間の非導電部の幅を変えている．形状条件は Flat（盛り上げ無）および Embossed（盛り上げ有）の 2 種類である．

実験手順

実験の様子を図 2.8 に示す．実験協力者には実験中，常に椅子に座るよう指示した．実験者は実験の準備として実験内容の説明をした後，実験協力者の右手人指し指の先から 10 mm 程度内側の図 2.7 の位置にて，指の厚みおよび幅をデジタルノギスを用いて測定した．次に練習タスクに用いる練習プログラムの提示内容を説明した．この練習プログラムは MonoTouch の電極に触れた際に現れるセンサ応答と，センサ応答ごとに検出されるタッチジェスチャを提示する．

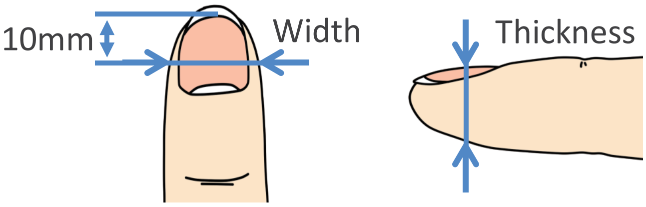


図 2.7: 測定した指の位置

次に我々は実験協力者に 4 つの電極を 1 つ提示するごとに練習タスクと実験タスクを行って貰った．練習タスクは，実験協力者がタッチジェスチャを一通り入力できると感じるまで行った．実験タスクにおいては，練習プログラムを用いずにタッチジェスチャを行って貰った．また，スワイプジェスチャを行う際は右手の人差し指のみを用い，かつ電極に対して指の先端部分が触れるように指を立てて入力するように，実験協力者に指示した．タップジェスチャを行う際は右手指全体を用いて電極を覆うように触れるよう指示した．

実験タスクにおける 1 試行は実験協力者が 1 つのタッチジェスチャを指示されてから入力を完了するまでである．実験協力者は各タッチジェスチャをタップ，上スワイプ，下スワイプ，右スワイプ，左スワイプの順に 10 試行ずつ行い，これを 1 セッションとした．4 つの電極条件ごとに，練習タスクと実験タスクを行った．したがって，各実験協力者は

$$\begin{aligned} \text{総試行回数} = \text{計}\ 1,600\ \text{回} &= 8\ \text{名} \\ &\times 4\ \text{電極条件} \\ &\times 5\ \text{タッチジェスチャ} \\ &\times 10\ \text{試行} \end{aligned}$$

を行った．

疲労による入力速度への影響を抑えるため，実験タスクを終えるごとに 3 分以上の休息を挟んだ．

なお電極上にてスワイプすることに慣れる可能性を考慮し，カウンターバランスをとるために P1–4 へは電極を条件 A→B→C→D の順番に，P5–8 へは電極を条件 B→A→D→C の順番に提示し，練習と実験を行った．タスク終了後に実験協力者はアンケートに回答した．実験に要した時間は 50 分程度であった．

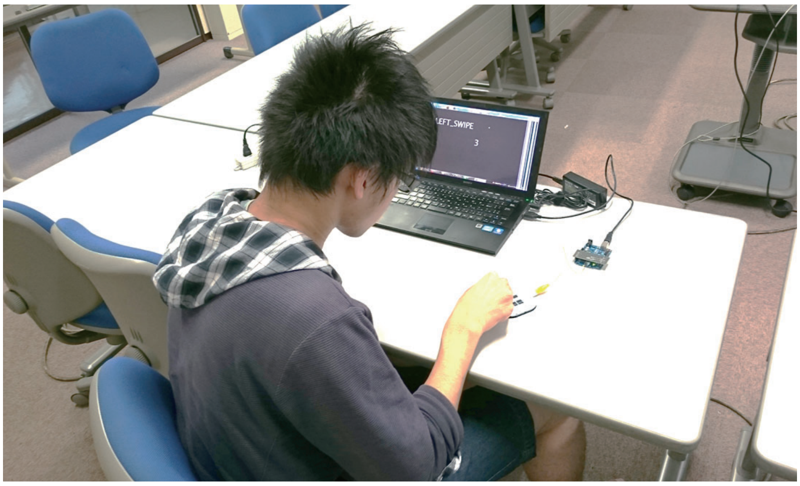


図 2.8: 実験の様子

実験結果

各電極条件ごとの認識精度を表 2.2 に示す．また，実験協力者ごとの各電極条件における正答率を表 2.3 に，入力速度を表 2.4 に示す．結果，条件 B の認識精度が最も高く，電極パターンを小さくすると認識精度が落ちるという結果を得た．

評価実験 1 の考察

表 2.2 に示す電極条件ごとの混同行列の内訳を見ると，表 2.2B において下スワイプが左スワイプと誤認識されていることがわかる．これは図 2.5b および図 2.5e のとおり，左スワイプと下スワイプはセンサ応答が大きな波形から小さな波形へと変化することを利用して認識しており，ユーザがタッチジェスチャ入力を行う際に，盛り上げ部分に指が引っかかり，下スワイプ入力が途中で終わったと判断されたためである．この問題は特に P3 と P7 の実験の際に生じた．この問題が生じたことは，表 2.4 の P3，P7 の 1 入力当たりの時間が他の実験協力者に比べ短くなっていることからもわかる．また，P3，P7 のアンケートによると，指がひっかかり操作しづらいという意見が得られた．

表 2.2A と表 2.2C から，形状条件が同じであっても，電極を小型化すると上下スワイプの認識精度が低下することがわかる．これはサイズが小さくなると非導電部の間隔（Small 条件：3.0 mm，Large 条件：5.5 mm）が狭くなり，指が図 2.2 のように複数の導電部にまたがる問題が表れているためである．

表 2.2C と表 2.2D より，盛り上げを電極表面に付与することにより，条件 D の上下スワイプの認識精度が，同サイズである条件 C に比べて向上していることが分かる．これにより電極を小型化した際に，盛り上げを付与することがタッチジェスチャの認識精度向上に有効であることが示唆された．しかし，他の電極条件に比べ，左右スワイプの認識精度が著しく低下していることがわかる．これは，条件 D の電極の 3D プリント精度が悪く，左右スワイプに用いる導電部の反応が悪かったためである．

指の断面積と各電極条件における正答率の関係を調べるために，表 2.1 と表 2.3 から相関係数を求めた．結果は，それぞれ条件 A：-0.029，条件 B：-0.428（負の相関），条件 C：-0.421（負の相関），条件 D：0.272（弱い正の相関）となった．この条件 C と条件 D の相関係数よ

表 2.2: 各電極条件におけるタッチジェスチャ認識の混同行列（A：Large，Flat 条件，B：Large，Embossed 条件，C：Small，Flat 条件，D：Small，Embossed 条件）

Ⓐ

正答率(Large, Flat)

		認識ジェスチャ				
		TAP	UP	DOWN	RIGHT	LEFT
入力ジェスチャ	TAP	100.00%	-	-	-	-
	UP	1.25%	93.75%	3.75%	1.25%	-
	DOWN	1.25%	6.25%	86.25%	-	5.00%
	RIGHT	6.25%	-	-	92.50%	1.25%
	LEFT	3.75%	-	-	11.25%	85.00%
					Total	91.73%

Ⓑ

正答率(Large, Embossed)

		認識ジェスチャ				
		TAP	UP	DOWN	RIGHT	LEFT
入力ジェスチャ	TAP	98.75%	-	-	-	1.25%
	UP	1.25%	92.50%	-	6.25%	-
	DOWN	1.25%	-	80.00%	-	18.75%
	RIGHT	1.25%	-	-	96.25%	2.50%
	LEFT	3.75%	-	1.25%	1.25%	93.75%
					Total	92.25%

Ⓒ

正答率(Small, Flat)

		認識ジェスチャ				
		TAP	UP	DOWN	RIGHT	LEFT
入力ジェスチャ	TAP	97.50%	-	-	1.25%	1.25%
	UP	42.50%	35.00%	6.25%	7.50%	8.75%
	DOWN	41.25%	-	45.00%	1.25%	11.25%
	RIGHT	2.50%	-	-	68.75%	28.75%
	LEFT	6.25%	-	1.25%	2.50%	90.00%
					Total	67.42%

Ⓓ

正答率(Small, Embossed)

		認識ジェスチャ				
		TAP	UP	DOWN	RIGHT	LEFT
入力ジェスチャ	TAP	98.75%	-	-	-	1.25%
	UP	-	76.25%	13.75%	3.75%	1.25%
	DOWN	3.75%	5.00%	75.00%	-	16.25%
	RIGHT	40.00%	1.25%	1.25%	35.00%	22.50%
	LEFT	41.25%	-	1.25%	6.25%	51.25%
					Total	67.93%

表 2.3: 実験協力者ごとの各電極条件における正答率

実験協力者	条件 A	条件 B	条件 C	条件 D
P1	0.98	0.98	0.50	0.80
P2	0.90	0.92	0.80	0.56
P3	0.96	0.72	0.84	0.80
P4	1.00	0.98	0.82	0.68
P5	0.70	1.00	0.68	0.68
P6	0.96	0.98	0.48	0.74
P7	0.84	0.82	0.54	0.46
P8	0.98	0.98	0.72	0.66

表 2.4: 実験協力者ごとの各電極条件における平均入力速度 [s]

実験協力者	条件 A	条件 B	条件 C	条件 D
P1	2.509	2.268	1.941	2.125
P2	1.957	2.260	2.390	2.301
P3	1.226	0.989	1.675	1.471
P4	1.839	2.084	2.166	2.043
P5	2.227	2.051	2.247	1.982
P6	1.882	1.736	1.620	1.836
P7	1.880	1.594	1.410	1.721
P8	1.614	1.757	1.716	1.696

り，Small 条件において盛り上げを付与することにより，導電部に指がまたがる問題の影響を減らし，認識精度を向上させる可能性があると示された．

また実験アンケートから，盛り上げを付与することにより触覚フィードバックが得られるため，アイズフリーな操作が可能ではないかという意見を得たため，この意見から，盛り上げがまたがり問題だけではなく，人が電極表面上のどの位置に触れているかどうかを知る手掛かりになる可能性があると分かった．この知見については 4.8 章にて議論する．

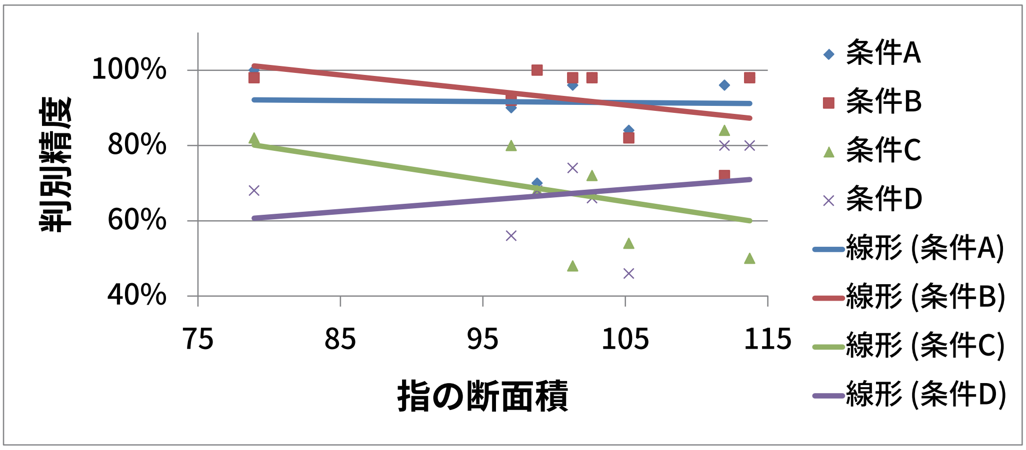


図 2.9: 指の断面積ごとの各電極条件における認識精度と線形近似

2.5.2　評価実験 2

電極の導電部の幅および間隔を変えた際に，認識率にどのように影響を与えるか調査するために著者を含む実験協力者 7 名（大学生および大学院生，21–24 歳）に対し，実験を行った．

実装 評価実験を行うために，レーザカッタ（システムクリエイト社，CutKey 900N）および 3D プリントペン（ウンカン社，RP-100B）を用いて電極を製作した．設計した電極パターンを図 2.10 に，製作した電極の写真を図 2.11 に示す．図 2.11 の電極は，内部の導電部分が全てつながるような構造になっている．電極パターンの製作には，レーザカッタおよび 3D プリントペンを用い，素材として導電部分は導電性 PLA フィラメントを用い，非導電部分は厚さ 2 mm のアクリル板を用いた．

電極は全体が 20 mm × 120 mm となるよう設計し，電極パターンを中心に配置した．電極パターンは図 2.10 の様に，スワイプの際は応答回数が 3 回となるように設計した．また電極は導電部の幅を 6 mm に固定し，間隔を 1–16 mm の範囲にて 1 mm ずつ変えた物，および導電部の間隔を 10 mm に固定し，幅を 1–8 mm の範囲にて 1 mm ずつ変えた物の計 24 枚の電極を製作した．

静電容量の検出スワイプ時の応答回数を，電極の静電容量の変化に基づき認識するシステムを構築した．図 2.12 に，製作した電極を組み込んだ認識システムの構成を示す．評価実験 2 においては，静電容量計測用のマイコンボードとして Arduino を用いた評価実験 1 とは異なり，Intel Edison Kit for Arduino（以下 Edison）をマイコンボードとして用いた．これは，Edison の方が動作周波数が高く（Arduino：16MHz，Edison：500MHz），より高精度に静電容量計測が可能なためである．また静電容量計測には，2.4.1 節にて述べた，送信

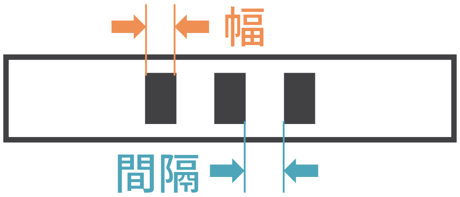


図 2.10: 評価用電極の形状

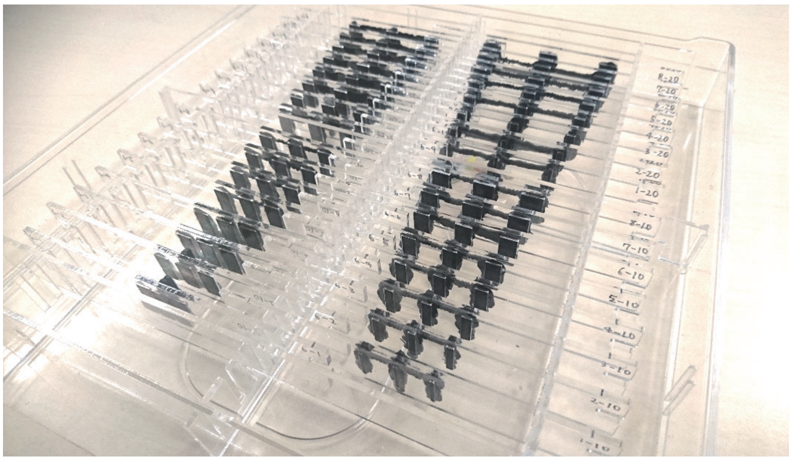


図 2.11: 製作した評価用電極

ピンの状態を変化させた際に，受信ピンの状態が変化するまでの遅延時間を用いた静電容量計測手法を用いた．

図 2.12: 評価実験 2 の認識システムの構成

実験設計

製作したタッチセンサの認識精度を確かめるために実験協力者実験を行った．実験協力者は著者を含む，研究室内の大学院生 7 名（21–24 歳，男性）であった．実験は全て静かな屋内にて行われた．実験協力者は 24 枚の電極上にて，タップ → 右スワイプ → 左スワイプ → 上スワイプ → 下スワイプの順にタッチジェスチャ入力を行った．各実験協力者は 1 タッチジェスチャにつき 10 回のタッチジェスチャ入力を行い，実験者は各タッチジェスチャ入力ごとに応答回数の記録を行った．総試行回数は

$$\text{総試行回数} = 25,200\,\text{回} \quad = \quad 7\,\text{名}$$

× 24電極

× 5タッチジェスチャ

× 10回

であった．また実験の際に，3Dプリントした土台を用いて図2.13に示すように電極を机に固定した．

図2.13: 電極を固定するための土台

実験結果

導電部の間隔を変えた物の評価結果を図2.14に，幅を変えた物の評価結果を図2.15に示す．結果，導電部の間隔が13 mm以上の場合99%以上の精度にて認識が可能であった．また，図2.15から導電部の幅と認識率の相関を調べたところ，特に相関がみられなかった（相関係数0.037）．

評価実験**2**の考察

図2.14から，導電部の間隔が5–9 mmの範囲において線形に認識率が変わることが分かる．また，10 mm以上にした際は80%以上の認識率となり，100%に収束していくような曲線が得られた．また，図2.15より導電部の幅は1–8 mmの範囲において相関係数が見られなかったことから，1 mm以上であれば指の接触の検出精度に差異が無いことが分かった．

以上の結果より，電極の導電部の幅は1 mm以上あれば良く，非導電部の幅が10 mm以上あれば良いと考えられる．

2.6　アプリケーション

MonoTouchはタッチインタフェース設計者向けのタッチジェスチャ認識手法である．本手法を用いることにより，自由な形状のタッチインタフェースを容易に製作することができる．タッチインタフェースの一例として，MonoTouchを利用したアプリケーション例を本章にて示す．

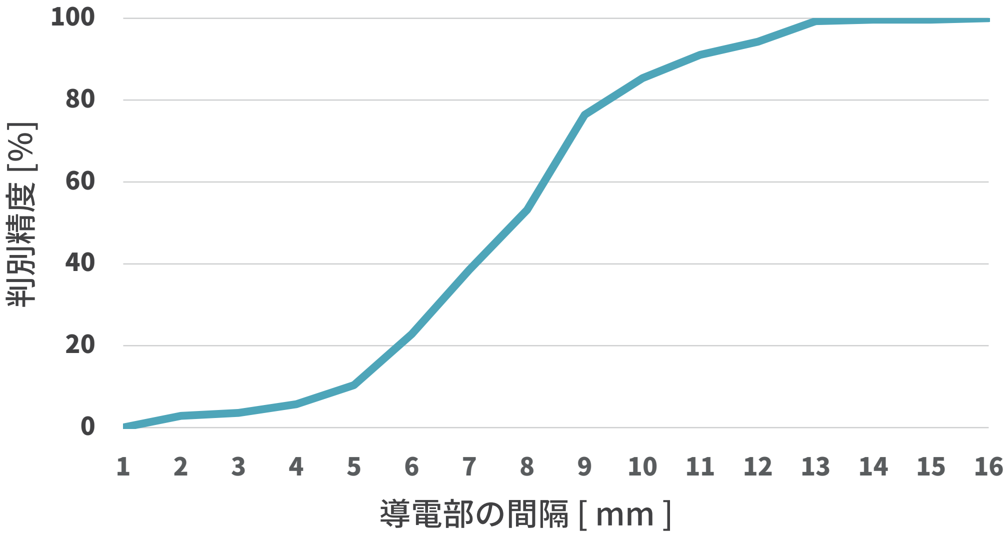


図 2.14: 電極導電部の間隔と認識率の関係

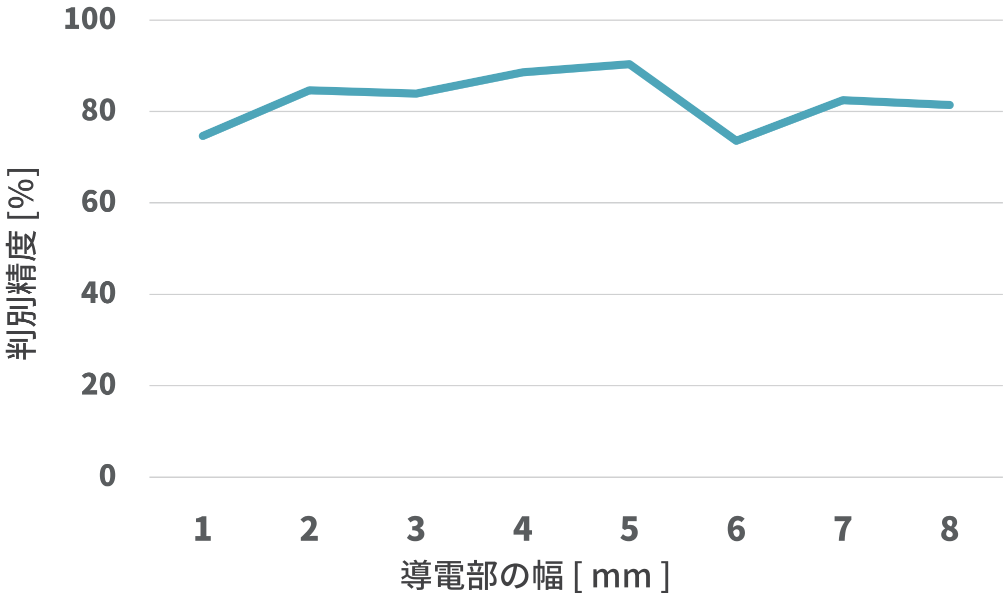


図 2.15: 電極導電部の幅と認識率の関係

2.6.1　ヘッドホン

一部の市販されているイヤホンおよびヘッドホンには，物理的なボタンを用いて音楽プレイヤを操作可能な入力インタフェースが搭載されている．この入力インタフェースを用いることにより，音楽の再生/停止，曲の送り/戻し，音量の上げ/下げを行うことができる．本インタフェースは，無線通信を用いてボタンの押下情報を音楽プレイヤに送られている場合と，マイク端子–GND 間を短絡する場合がある．無線通信を用いる場合はイヤホンおよびヘッドホンにバッテリを搭載する必要があり，マイク端子–GND 間を短絡する場合は，ユーザが行いたい操作ごとに，ボタンを定められた回数分押下する必要がある．そこでバッテリが不要かつボタンを何度も押下しなくてよい，音楽プレイヤ操作用のインタフェースを図 2.16 に示す．

本インタフェースは．ヘッドホンカバー内に MonoTouch の電極を搭載している．本インタフェースを用いるユーザは，音楽の再生/停止，曲の送り/戻し，音量の上げ/下げを，電極上にて指をスワイプすることにより行うことができる．またスワイプの方向と各操作の対応は，図 2.17 に示す入力インタフェース（Apple 社の iPod shuffle）に基づき，図 2.18 のような割り当てとした．さらに本インタフェースの電極は単一結線のみを用いて音楽プレイヤのマイク端子に接続することにより，2.7 節にて述べたタッチ検出手法を用いて，タッチジェスチャ認識を行うことができる．

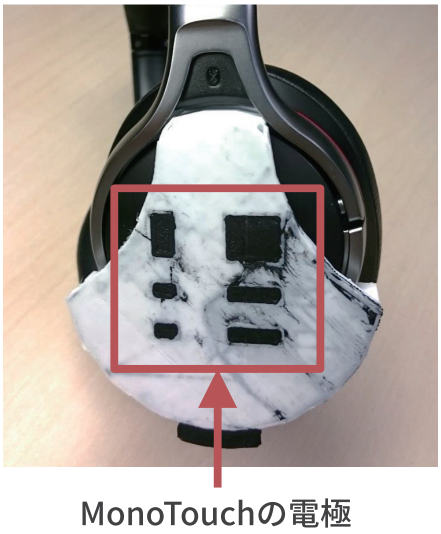


図 2.16: MonoTouch の電極を搭載したヘッドホン用入力インタフェース

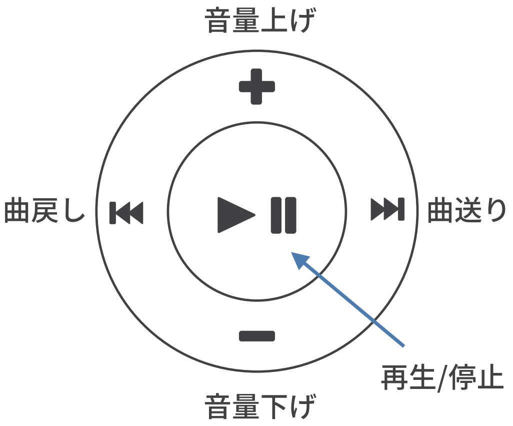


図 2.17: 音楽プレイヤに用いられている入力インタフェースの例

さらに，回転スワイプを用いた曲の再生位置の移動も行うことができる入力インタフェース例を図 2.19 に示す．本入力インタフェースにて，橙色に着色された円周上の回転スワイプを同様の再生位置の変更に利用することができる．この例は，iPod の一部の機種にて，図 2.17 の音量の上げ下げ，曲送り戻しが配置されている外側の円上にて，指をぐるぐると回す様になぞる回転スワイプを用いて，再生している曲の再生位置を移動する機能より着想を得たものである．

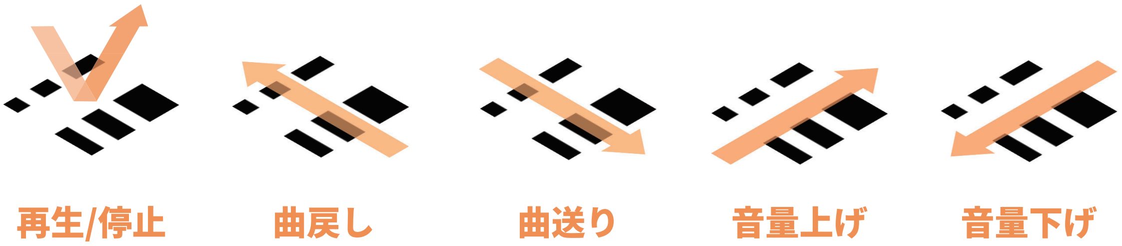


図 2.18: ヘッドホン例における入力の割り当て一覧

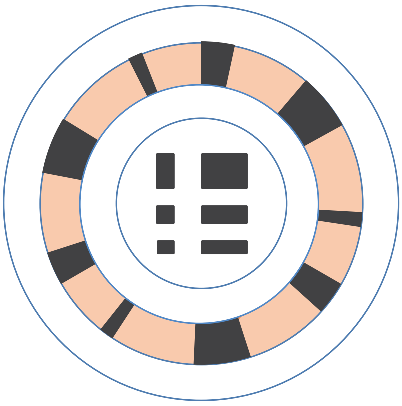


図 2.19: MonoTouch の電極を搭載したヘッドホン用入力インタフェースの拡張例

2.6.2 スマートフォンカバー

携帯端末の背面操作を行う研究はこれまでに提案されている [KRL12, SO13]．携帯端末の背面領域にて操作することにより，画面が指で隠れるオクルージョンの問題 [HB11, VCC+09] が起こらない，ならびに暗号入力の際に人に操作が見られるショルダーサーフィンの問題 [RRF04] が起きにくいという利点がある．

この背面操作に MonoTouch を利用するために，スマートフォンカバーに電極を搭載した例を図 2.20 に示す．本スマートフォンカバーは，スマートフォンを片手にて把持した際に，人差し指が当たる部分に電極が配置されており，このときの人差し指の角度に合わせて電極の角度が傾いている．電極にスマートフォンのマイク端子を接続することによりタッチ検出できるため，追加の回路や電源を必要としない．本アプリケーションはウェブブラウザアプリケーションの次のページに進む/前のページに戻るという操作に割り当てることができる．また本アプリケーションを用いるユーザは端末前面にてウェブブラウザをタッチパネルを用いて操作しながら，指によって画面を隠すことなく，端末背面を用いて 2.6.1 節のヘッドホンの例のように音楽プレイヤアプリケーションの操作を行うことができる．

2.6.3 インタラクティブなフィギュア

図 2.21 に MonoTouch の電極を搭載した恐竜のフィギュアの例，および図 2.22 に梟のフィギュアの例を示す．これらのフィギュアは動物の足および土台の接合部が一本の柱になっている．そのため，2 色成型の家庭用 3D プリンタを用いてプリントする際に，印刷精度の問題により，内部に複数本の配線を行うことが難しい．しかし，MonoTouch を利用するこ

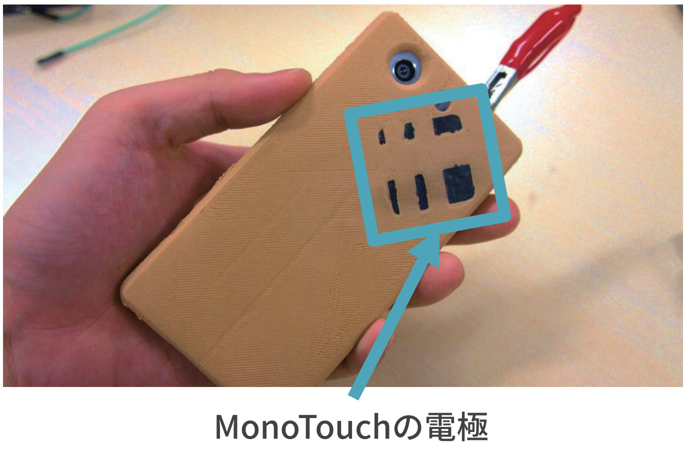


図 2.20: MonoTouch の電極を搭載したスマートフォンカバー

とにより，単一結線のみを用いてタッチジェスチャ認識が可能となり，フィギュアの背中のなで方によって，異なる鳴き声が再生させるといったアプリケーションに利用できる．

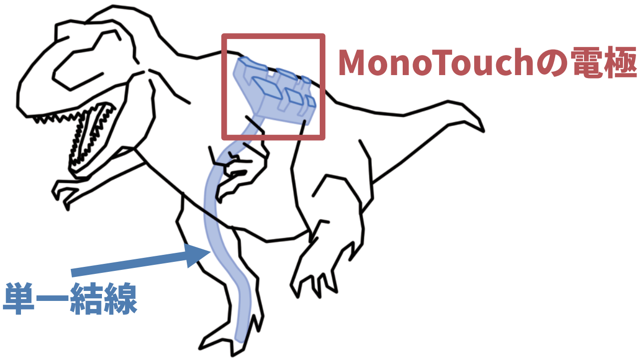


図 2.21: MonoTouch の電極を搭載した恐竜のフィギュア

2.6.4　周辺環境のインタフェース化

MonoTouch は導電部を非導電部にて区切る様な電極があれば，静電容量計測を行うことによりタッチジェスチャ認識が可能となる．この電極を構築するためには，例えば図 2.23 のように金属製のドアノブにマスキングテープを貼り付ければよい．その際は金属製のドアノブの裏側にタッチ検出回路を貼り付けることにより，回路をユーザが触れる表に出すことなくインタフェースの構築が可能である．また同様にして，図 2.24 のように台所の金属製シンクに耐水シールをカットしたものを貼り付け，濡れることがないシンクの裏側に静電容量計測回路を貼り付けることにより，皿洗いを行っている最中に，利用できるインタフェースを構築できる．

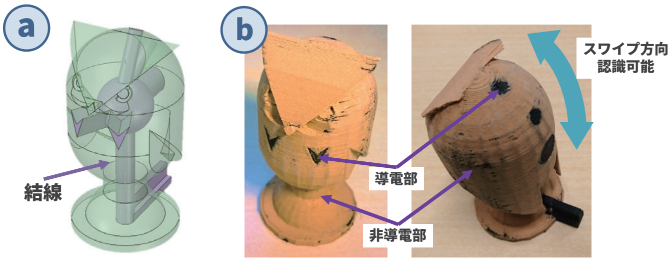


図 2.22: MonoTouch の電極を搭載した梟のフィギュア

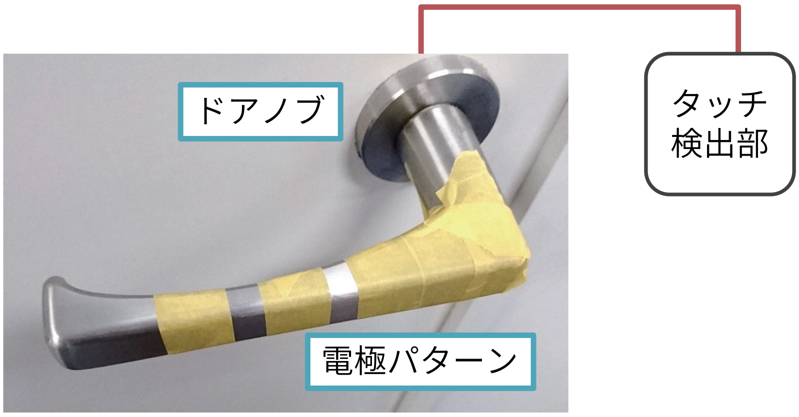


図 2.23: 金属製のドアノブをタッチインタフェース化した例

図 2.24: アルミシンクをタッチインタフェース化した例

2.7 他の実現方法：マイク端子を用いる手法

2.4.1節にて，静電容量計測回路を用いたタッチの検出手法について述べた．MonoTouchはこれ以外にもPCや携帯電話といった情報端末に搭載されているマイク端子を用いて指のタッチを検出する手法を利用できる．この手法は電源を入れたスピーカの入力端子を素手で握った際に，ザザッというノイズ音がスピーカから発せられる現象を利用する手法である．この現象は，人体が一種のアンテナとなっており，受信したHAM等のノイズが手を通して入力端子に流れ込んだ際に起きる現象であり，このノイズの有無を基にタッチを検出できる．

図2.25にマイク端子および電極の接続方法を示し，図2.26に実際にノートPC（Vaio株式会社，VJZ13A1）の4極端子（マイク端子＋ステレオ端子）のマイク端子に電極を接続し，ステレオ端子にヘッドホンを接続した際の写真を示す．図2.26の環境にて，なにも電極に触れていない際のマイク端子の入力波形，および電極に指が接触した際のマイク端子の入力波形を図2.27に示す．図2.27に示すとおり，指が電極に接触した際はノイズの影響により強く入力波形が波打つため，この波の振幅がしきい値を超えたかどうかを認識することによりタッチを検出可能である．

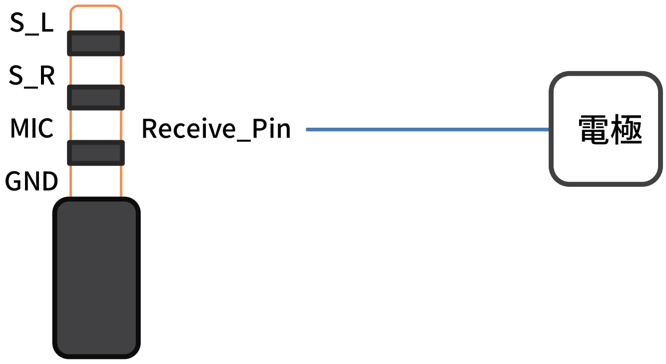


図2.25: マイク端子と電極の接続方法

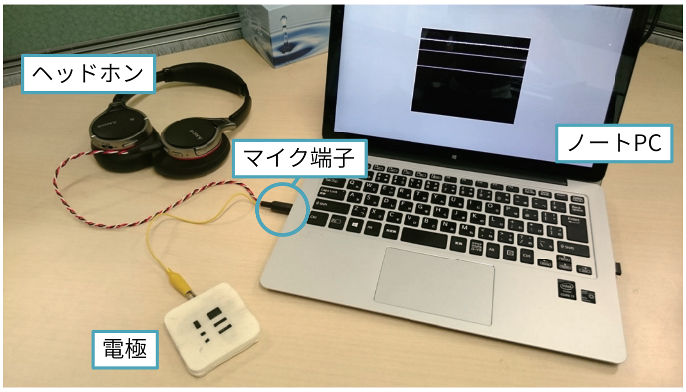


図2.26: マイク端子と電極の接続

本手法を用いたプロトタイピングの例として，スマートフォンのマイク端子およびスマートフォンカバーに埋め込まれた電極を接続した例を図2.28に示す．この例において，マイク端子の入力波形のノイズをもとにタッチを検出し，MonoTouchを用いてタッチジェスチャを認識することにより，スマートフォン背面部を利用した入力（例えば音楽プレイヤアプリ

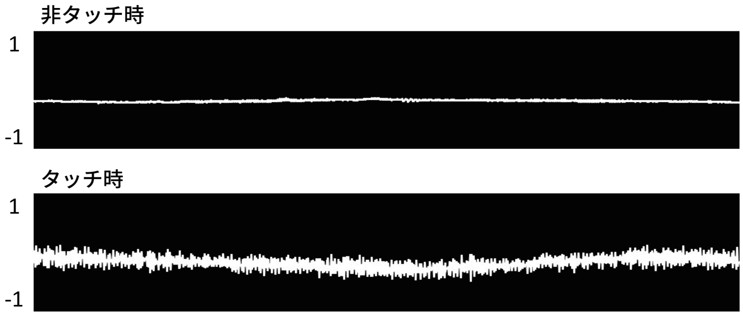


図 2.27: 非タッチ時のマイク端子の入力波形およびタッチ時の入力波形

ケーションの音量および選曲操作）を行うことができる．

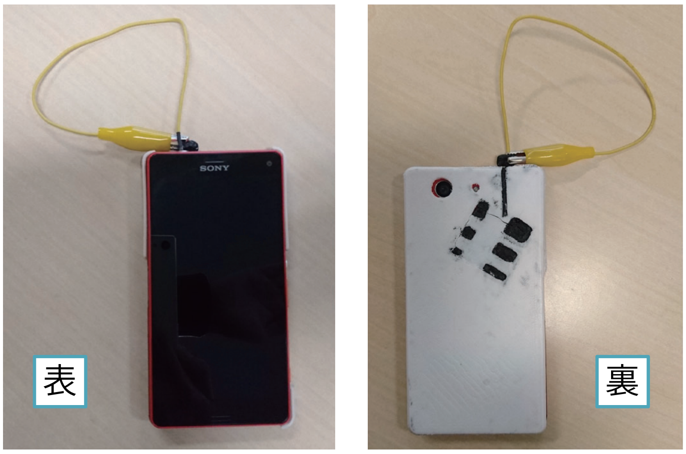


図 2.28: マイク端子を用いる MonoTouch のプロトタピング例

2.8　まとめ

本章にて単一電極を用いた複数タッチジェスチャの認識手法，およびその実装である単一電極タッチセンサを示した．認識可能なタッチジェスチャは，タップおよび上下左右スワイプである．これらのタッチジェスチャの認識を行うために以下の 2 つの要件を満たすように電極パターンを設計した．[要件 1] 応答波形の山の数がタッチジェスチャによって異なる．[要件 2] 応答波形の山の幅がタッチジェスチャによって異なる．

電極パターンを 3D プリントして製作し，ユーザが電極パターン上にてタッチジェスチャを行った際の静電容量の変化をもとにタッチジェスチャの認識を行うシステムを構築した．実験協力者を用いた実験により，単一電極にてタッチジェスチャの認識が可能であることがわかった．また，電極パターンを小型化する際に盛り上げを付与することが，複数の導電部間に指がまたがる問題を防ぎ，認識精度向上に有効な可能性が示された．次に電極導電部の幅および間隔の異なる電極を用いて評価実験を行ったところ，実験結果から導電部の間隔と認識率の関係が示された．また，導電部の幅は 1 mm 以上であれば指の接触の検出が可能であることが分かった．

第3章　BaroTouch：防水タッチパネル端末に内蔵された気圧センサを用いた押下圧力取得手法

iPhoneなどの一部のスマートフォンにて，タッチパネルを押下した際の押下圧力を用いて，押下圧力に応じてウィジェットの応答が変わるインタフェースが利用されている[Gig]．しかし，このようなインタフェースのために専用の押下圧力計測センサをタッチパネルに内蔵する必要があるため，金銭的コストや設計コストが上がるという問題がある．また，Android OSにて静電容量方式タッチパネルの特性を利用し，タッチパネルに触れた指の接触面積を擬似的な押下圧力として利用する機能が提供されている．しかし，押下圧力以外にも例えば指の角度によって接触面積が変わってしまうため，正確な押下圧力を計測することは難しい．そこで，防水性能を有するタッチパネル端末（以下，防水端末）に内蔵された気圧センサを用いて押下圧力を取得する手法である「BaroTouch」を開発した．BaroTouchはスマートフォンに内蔵されている既存のセンサを用いるため，専用のセンサを追加することなく押下圧力を取得できる．

BaroTouchは防水端末のタッチパネルを指を用いて押下した際に端末表面がたわみ，内蔵された気圧センサのセンサ値（以下，気圧値）が変動する現象を用いて押下圧力を取得する．そのため，周囲の気圧変化の影響を受ける問題や押下した際の気圧値は防水端末の気密性によって特性が異なる問題がある．そこで，周囲の環境や気密性に依存せずにタッチ圧力の変化を取得するアルゴリズムを考案した．

3.1　本章の構成

本章の構成は以下の通りである．3.2節にてBaroTouchの研究を行うにあたって参考にした研究について述べ，BaroTouchと先行研究の差異を述べる．3.3節にて周囲の環境や気密性の影響について述べ，その解決方法および押下圧力取得のためのアルゴリズムを述べる．3.4節にて押下圧力やタッチパネル上の押下位置ごとの感圧特性を評価するために行った実験を述べる．3.5節にて3.4節と異なるアルゴリズムを用いて同様の感圧特性評価を行った実験について述べ，ユーザが何段階の押し分けが可能か評価するために行った実験を述べる．3.6節にて端末サイズの異なるスマートフォンを用いて，3.5節と同様に評価を行った実験を述べる．3.7節にてBaroTouchを用いて指の角度推定を行う手法について議論する．3.8節にてBaroTouchを用いたアプリケーション例を示す．3.9節にてまとめを述べる．また，付録BにBaroTouchの実験に用いた書類を示す．

3.2　関連研究

本節にて押下圧力を取得する研究および押下圧力を用いてタッチ操作を拡張する研究について述べる．

3.2.1　スマートフォンに外部装置を組み合わせる研究

スマートフォンに外部装置を組み合わせることで押下圧力を取得し，タッチ操作の拡張を行う手法が提案されている．Nakai らはゲルを用いてスマートフォンとスマートフォンケースを接続し，タッチパネルを押下した際のゲルの張力および指のスライド量の関係性を用いて，押下圧力を検出している [NKOK14]．Acoustruments はスマートフォンのマイクおよびスピーカ間に管をつなげることにより，管を押下した際の圧力を認識可能な手法である [LBHH15]．Force Gestures はスマートフォンに圧力センサを取り付けることにより，タッチパネルにタッチした際の圧力を計測する手法である [HL11a]．Ono らはマイクおよびスピーカを貼り付けたカバーをスマートフォンに装着することで反響した音を計測し，押下圧力を認識している [OST15]．本手法はスマートフォンに内蔵された気圧センサのみを用いる点において，これらの研究と異なる．

3.2.2　スマートフォン内蔵のセンサを用いる研究

スマートフォンに内蔵されているセンサのみを用いて押下圧力を取得し，タッチ操作の拡張を行う手法が提案されている．ForcePhone はスマートフォン内蔵のマイク，スピーカを用いた超音波音響センシングおよび機械学習により押下圧力を取得する手法である [TS16]．GripSense はスマートフォンをタップした際の角速度を周波数解析することによりタッチの強弱を識別する手法である [GWP12]．ForceTap はスマートフォンをタップした際の加速度を基にタップの強弱を識別する手法である [HL11b]．PseudoButton は端末内蔵のスピーカおよびマイクを用いて，端末のマイクが搭載されている穴を指で押下した際の押下圧力を取得する手法である [HW12]．本手法はスマートフォン内蔵のセンサのみを用いる点においてこれらの研究と同様であるが，気圧センサを用いて押下圧力を取得する点にてこれらの研究と異なる．また機械学習を必要としない点にて異なる．

3.2.3　スマートフォン以外の端末にて押下圧力を取得する研究

スマートフォン以外のタッチパネル端末や物体を押下した際に，圧力をセンシングする手法が提案されている．Expressive Touch は大画面タッチパネル端末にて，画面の四隅に取り付けたマイクを用いて測定したタップ時の音の大きさを用いて，タップの強弱を取得する手法である [PH14]．Dietz らはメンブレンキーボードのキー押下時に，内部の電極シートの接触面積が変わり，抵抗が小さくなることを利用してキー押下圧力を取得している [DEWB09]．Pressing the Flesh は指で押下した際の指の腹ならびに爪の色の変化をカメラを用いてセンシングすることにより押下圧力を認識する手法である [MPP$^+$08]．Emoballoon は気圧センサを入れた風船に対するジェスチャ操作を認識する手法である [NIH$^+$13]．本手法は圧力を取得する点においてこれらの研究と同様であるが，スマートフォン上にて圧力取得を可能にした点にてこれらの研究と異なる．

3.3　提案手法：BaroTouch

BaroTouch は防水端末のタッチパネルを指を用いて押下した際に端末表面がたわみ，内部の体積が変化することによって防水端末の気圧値が変動する現象を用いて押下圧力を取得する手法である．そのため，周囲の環境による気圧変化の影響を受ける．また，本手法

は防水端末の気密性によって端末押下時の気圧の変化が異なる．そのため，周囲の環境や端末の気密性に依存せずに押下圧力を取得するための処理手法を示す．

3.3.1 周辺環境による気圧値の変化の影響とその解決方法

防水端末の気圧値は天候，ユーザが居る場所の海抜ならびに建物の内外等によって変化する．図 3.1 に建物の 1 階と 10 階にて防水端末（Xperia Z3 Compact SO-02G，防水性能：IPX5/8）を押下した際のグラフ，ならびにそれぞれの階をエレベータにて昇降しながら防水端末を押下した際の気圧値のグラフを示す．図 3.1 に示すとおり，気圧値がユーザが居る場所の高さによって変化していることが分かる．そのため，押下圧力取得の際に，この環境による気圧値の変化の影響を除去する必要がある．このユーザが居る環境ごとの影響を減らすために，気圧値が更新された際に最新の気圧値とひとつ前の気圧値との差分を利用することを考案した．図 3.2 に図 3.1 の気圧値を差分値に変換したグラフを示す．図 3.2 から，ユーザが居る環境ごとの基準となる気圧値の変化の影響を少なくし，タッチした際の圧力変化を抽出できていることが確認できる．なお，この時点では差分値を利用することにより周囲の気圧変化の影響を除去しているが，後にハイパスフィルタを用いた除去に切り替えた（理由は 3.3.3 節参照）．

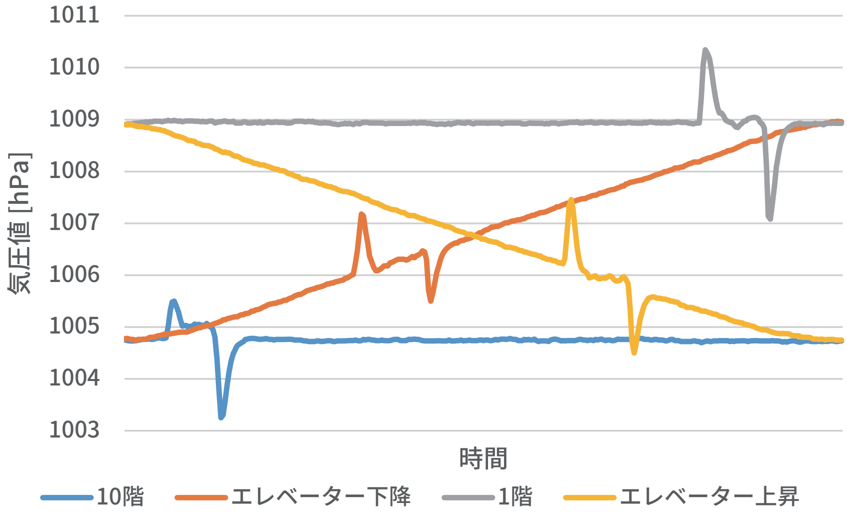


図 3.1: 建物の階ごとおよびエレベータ昇降時に防水端末を押下した際の気圧値

3.3.2 端末ごとの気密性の違いによる影響とその解決方法

BaroTouch は端末押下時に端末内部の空気の密度が変化する現象を用いて押下圧力を取得するため，防水端末の気密性に依存する特徴を有する．この変化の特性を調査するために，防水端末（Xperia Z5 Compact，防水性能：IPX5/8）の気密性を変えるために図 3.3 に示すストラップ穴にテープを貼り付けたテープ有り状態と，テープを貼り付けていないテープ無し状態を用意し，指の押下圧力を計測するための圧力センサ（FSR402）を端末のタッチパネル上に貼り付け，BaroTouch における気圧変化特性を調査した．

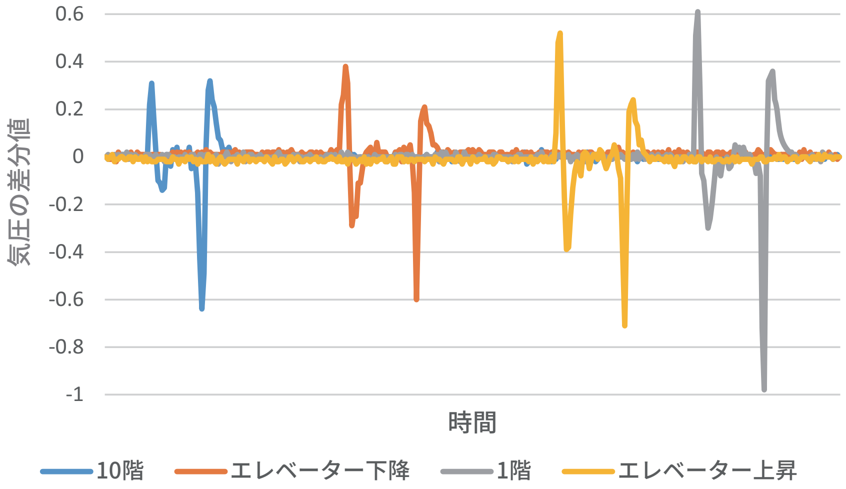


図 3.2: 建物の階ごとおよびエレベータ昇降時に防水端末を押下した際の差分値

テープ有り/無しの 2 状態において，タッチパネルの左上の端および中央を異なる圧力にて，指で押下した際の気圧値の波形を図 3.4 に示す．図 3.4 より，圧力の強さおよび位置に応じて気圧値が変化していることが分かる．図 3.4a の気圧値の変化を見ると，一度大きく気圧値が増加した後，元の気圧値に戻っていき，指を離した際は気圧値が減少してから元の気圧値に戻ることが分かる．これは図 3.5 に示すように，端末押下直後は防水端末がたわむことによって変形し端末内部の気圧が上昇するが，その後僅かな隙間を通じて空気が内外にて交換され，元の気圧値に戻るためである．また防水端末から指を離した際も変形した防水端末が元の形へと戻るため内部の気圧が減少し，その後同様の現象が起きる．さらに図 3.4b の気圧の変化から，テープ有り状態はテープ無し状態に比べ気密性が高く，空気が内外にてほとんど交換されないため，図 3.5 における 2 および 5 の変化のみが生じていると考えられる．

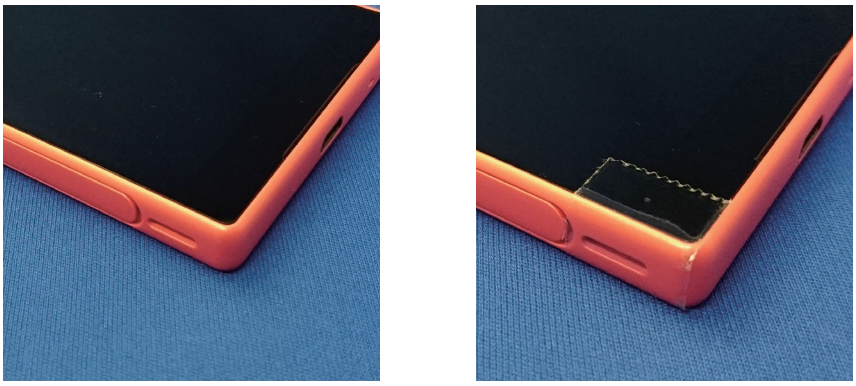


図 3.3: ストラップ穴の状態（左：テープ無し，右：テープ有り）

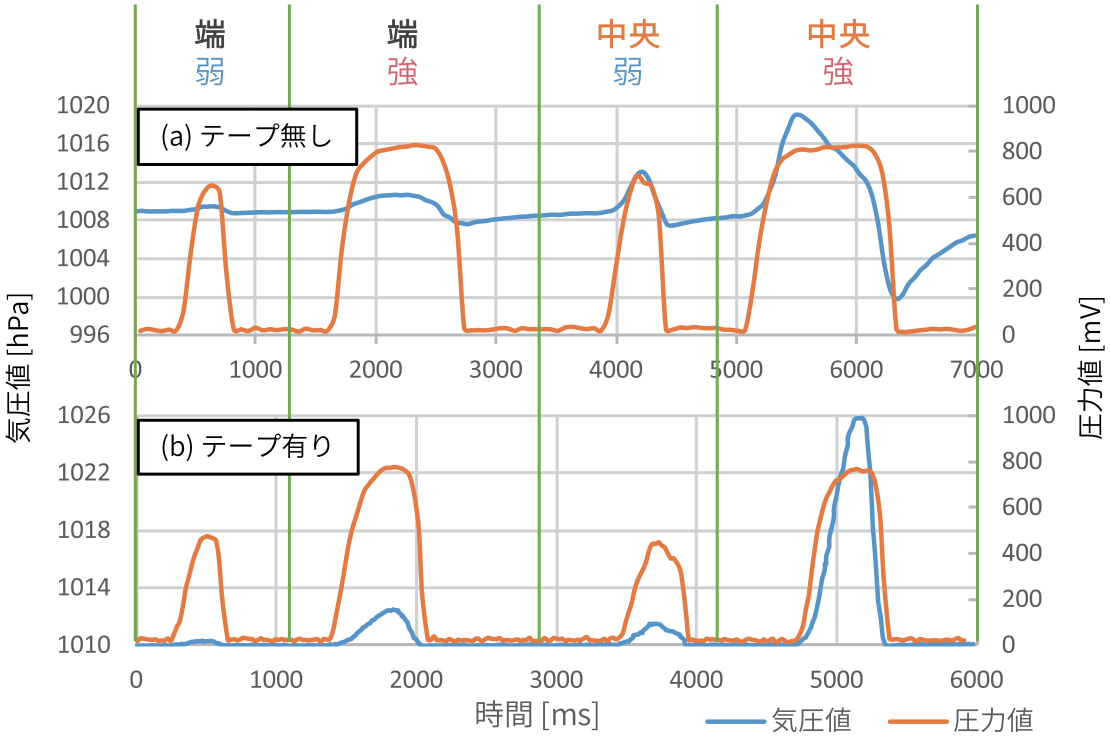


図 3.4: 異なる押下位置および押下圧力にて防水端末押下時の気圧値の波形（a：テープ無し，b：テープ有り）

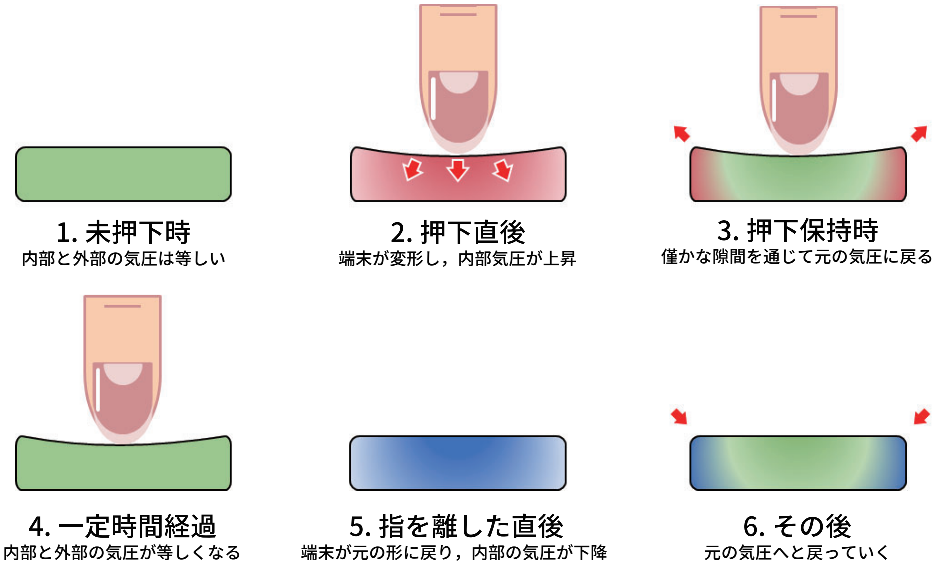


図 3.5: 防水端末押下時の端末内部気圧の変化

3.3.3　押下圧力の取得手法

BaroTouchにおける押下圧力の取得手法を述べる．前節にて述べた通り，テープ無し状態において防水端末を押下した際に押下圧力に応じて気圧値が変化するものの，端末の内外にて空気が交換され元の気圧に戻っていくため，同じ力で押下し続けた際に気圧値から押下圧力を取得できないという問題がある．この防水端末の気密性によって気圧変化特性が異なるという問題を解決するための手法として，気圧値にハイパスフィルタをかけ，積分することにより押下圧力の変化を取得する手法を示す．テープ無し/有り状態における端末押下時の気圧値および圧力値の応答波形を図3.6および図3.7に示す．

本手法における処理手法を述べる．テープ無し状態の場合，図3.6bの様に端末押下時に一度気圧が上昇した後に徐々に元の気圧に戻ろうとし，押下中にさらに押下圧力を上げた場合は気圧値が上昇するものの，押下圧力を下げた場合は元の気圧に戻ろうとする性質と，端末の体積の増加が同時に起こるため，一時的に元の気圧以下に下がるといった変化が生じる．テープ有り状態の場合，図3.7bの様に端末の内外で空気の交換が行われないため，圧力値に応じた気圧値の変化となる．ここで，周囲の環境の影響を除去するために，気圧センサの値が変化する度に，以下の式を用いて気圧値b_{raw}にハイパスフィルタをかけたハイパス値b_{hp}およびハイパス値を積分した積分値b_{sum}を算出し，これをユーザの押下圧力とした．なお，3.3.1節のアルゴリズムでは差分値を用いていたが，一定の圧力で指をホールドさせた場合にうまくその状態を計測できないという問題が合ったため，本アルゴリズムではハイパスフィルタを用いて押下圧力を取得した．

$$\begin{aligned}
b_{lp}[n] &= b_{lp}[n-1] \times (1-\alpha) + b_{raw}[n] \times \alpha \\
b_{hp}[n] &= b_{raw}[n] - b_{l}[n] \\
b_{sum}[n] &= \sum_{i=0}^{n} b_{hp}[i]
\end{aligned}$$

なおセンサの取得間隔を5 ms，$\alpha = 0.015$とした．

図3.6dおよび図3.7dより，押下中に押下圧力を変えた場合においても気密性に依らず圧力値に応じた積分値を取得できていることが分かる．さらに図3.6dにて，端末から指を離した際に一時的に積分値が負となっているが，この現象は指がタッチパネルに触れているかどうかを取得し，指が触れている間のみ積分値を用いることにより無視することができる．

3.4　実験1：差分値を用いた実験

BaroTouchの感圧特性を明らかにするため，タッチ位置およびタッチ圧力と差分値の関係を調査する2つの実験を行った．実験には防水端末としてXperia Z3 Compact SO-02G（防水性能：IPX5/8，防塵性能：IP6X）を用いた．また，実験には3.3.1節にて述べた差分値を用いた．

3.4.1　タッチ位置ごとの感圧特性調査実験

BaroTouchは端末を押下した際に端末表面に力が加えられることによってたわみ，内部の気体が圧迫される現象を用いて押下圧を取得する手法である．また押下した位置によって端末表面のたわみ具合は異なる．例えば同圧力であっても，端末の端を押下した場合よりも中央を押下した場合の方が端末表面は大きくたわむ．この防水端末の押下位置および

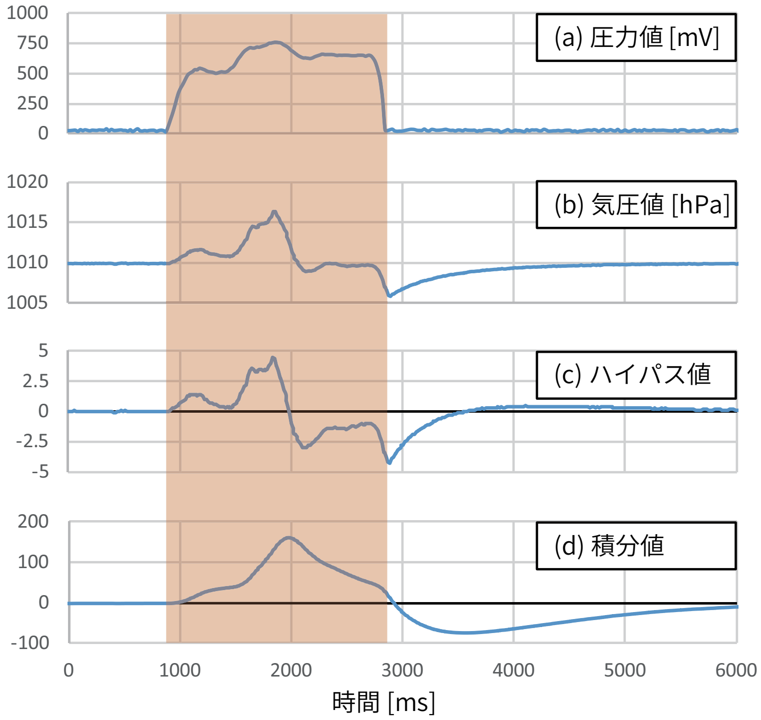


図 3.6: テープ無し状態における端末押下時の応答波形

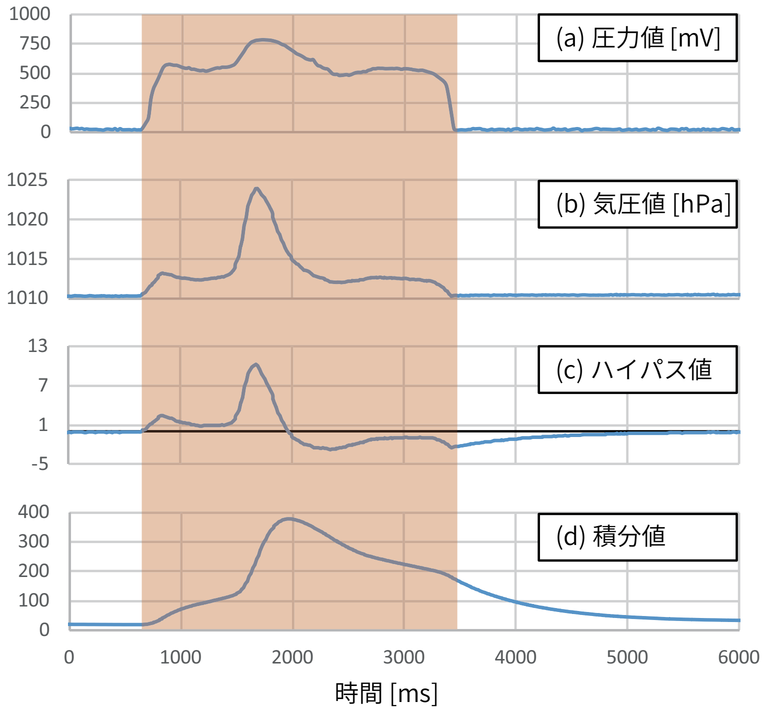


図 3.7: テープ有り状態における端末押下時の応答波形

気圧値の関係性を調査するために，端末のタッチパネルを同圧力にて押下した際に，差分値が位置によりどう異なるか実験を行った．以下に実験を行う手法，環境，結果および考察を示す．

実験手法

まず，異なる位置にて同じ圧力による押下を行うために，先行研究である Expressive Touch [PH14] を参考に，端末に同じ高さからサラミソーセージを投下した．この時のサラミソーセージは先行研究と直径および重量が同じもの（直径 11 mm，長さ 200 mm，重さ 20 g）を利用した．また，同じ位置および同じ高さから複数回投下するために専用の治具を 3D プリンタ（FLASHFORGE 社製，Dreamer）を用いて製作し使用した．実験に用いた治具を図 3.8 および図 3.9 に示す．治具は図 3.8 に示す通り，蓋部，筒部および枠部からなる．蓋部は穴を有しており，この穴は端末のタッチパネルを図 3.10 に示すように横 4 分割 (1.425 cm/分割) × 縦 7 分割（1.4429 cm/分割）した際の任意の位置に対応する．蓋部は上下逆さまにすることにより，分割された全ての領域に対応できるように設計した．また，サラミソーセージおよび筒部の内側には摩擦の影響を減らすために食用油を均一に塗布した．

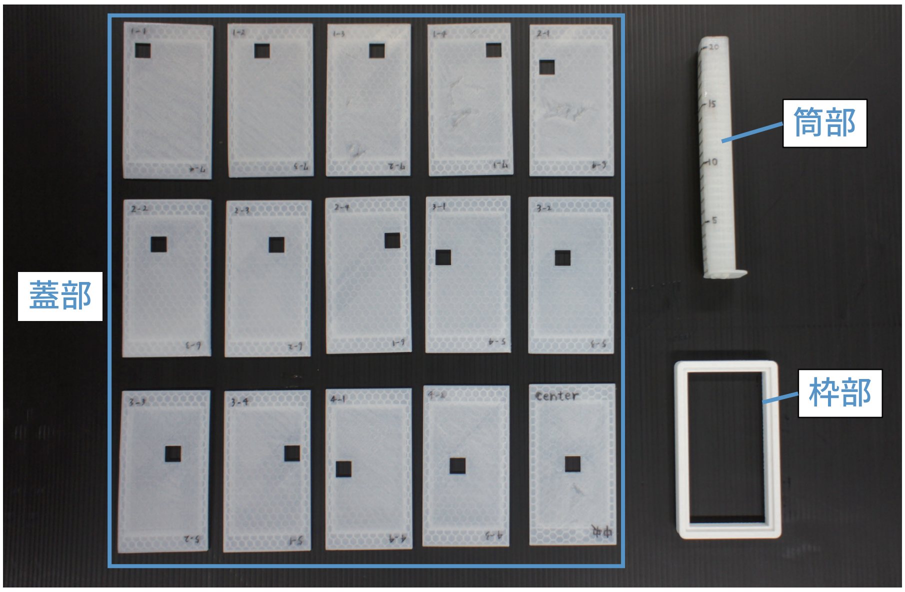


図 3.8: 実験に用いた治具

我々はまず，端末を机の上に静置し，10 秒間差分値の記録を行い，期間中最も大きい差分値をしきい値とした．その後，図 3.9 に示す治具を用いて，10 cm の高さからサラミソーセージを端末のタッチパネルに投下した．これを 28 分割された領域それぞれに 10 試行ずつ行った．サラミソーセージを投下した際の差分値，差分値の絶対値の波形を図 3.11 に示す．図 3.11 の波形において差分値の絶対値をローパスフィルタを用いて平滑化し，平滑化した波形がしきい値以上になっている区間の絶対値の総和を積分値とし，最も高かった絶対値を最大値とした．1 試行ごとに気圧値の積分値および最大値の記録を行った．

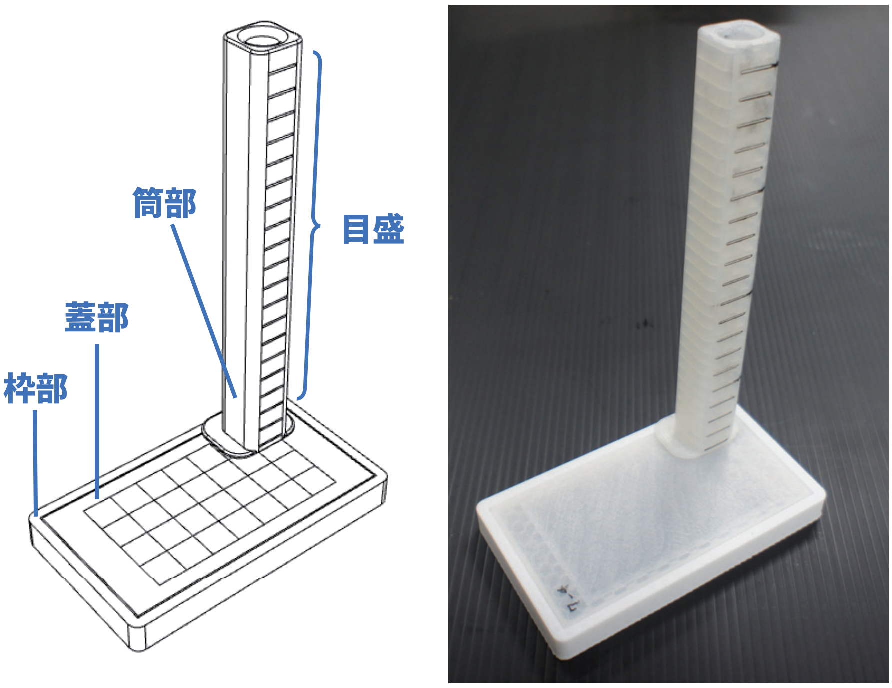


図 3.9: 組み立て後の治具

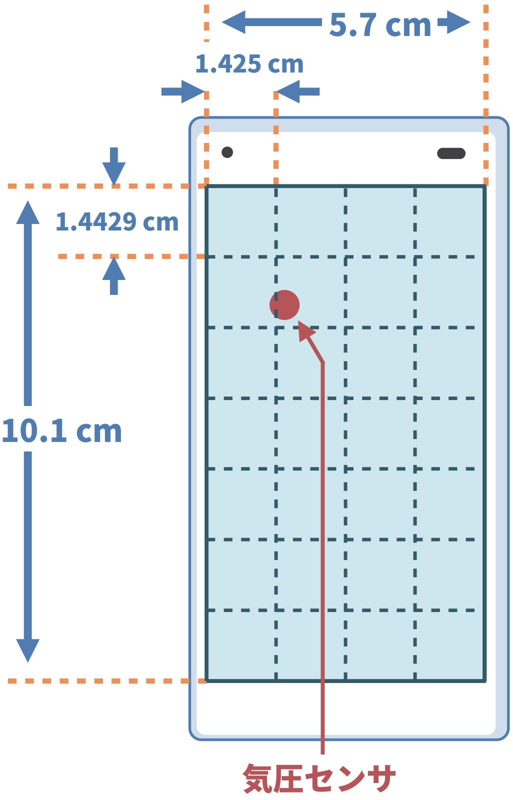


図 3.10: Xperia Z3 Compact の画面分割および気圧センサの位置

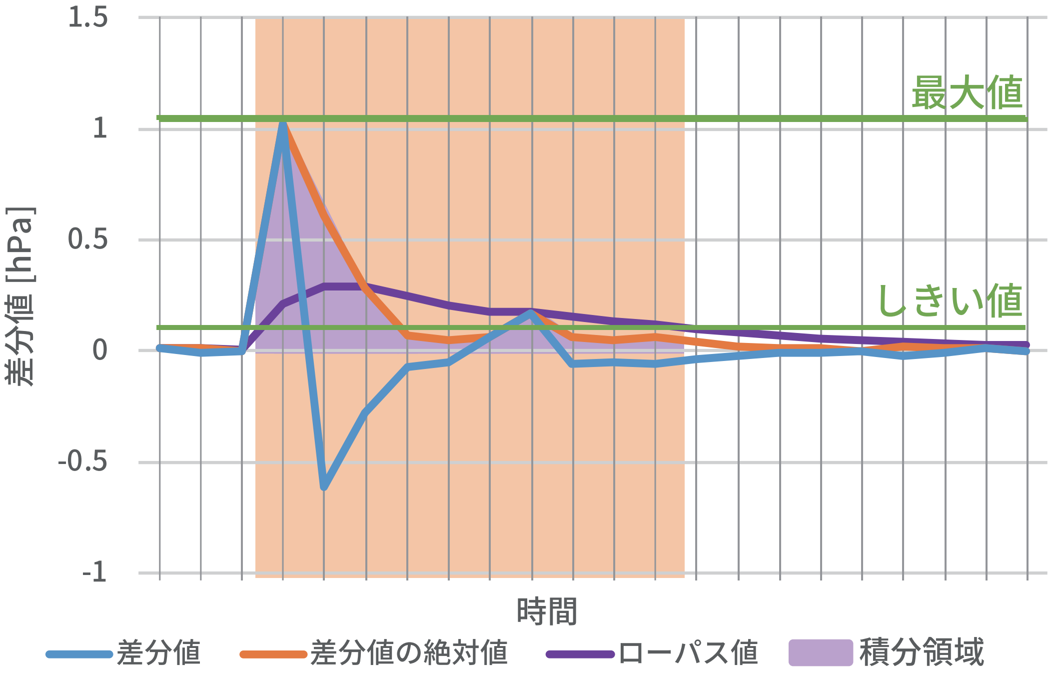


図 3.11: サラミソーセージ投下時（1 試行）の差分値，絶対値およびローパス値

環境

実験は窓や出入り口を締め切った屋内にて行われた．端末を用いて実験環境の気圧値を計測したところ，1008.4 hPa であった．また，3.4.1 節におけるしきい値を計測したところ，0.049926758 であった．

結果および考察

実験の結果を図 3.12 および図 3.13 に示す．図 3.12 は分割された各領域ごとに 10 試行行った際の気圧積分値の平均であり，図 3.13 は気圧最大値の平均値である．

実験結果から中央部は変化量が多くなっているため，中央の方がより大きくたわむと考えらえる．また，中央部よりもやや左上の領域が最も変化量が高くなった．この理由として，気圧センサの搭載位置が関係していると考えられる．実験に用いた Xperia Z3 Compact の気圧センサは図 3.10 に示す位置に搭載されており，実験結果の変化量が高くなった領域と位置が一致している．つまり，たわみ具合が大きい中央部かつ気圧センサが配置された箇所寄りの位置にて最も変化量が大きくなっていることが分かる．また，タッチ圧力を取得する際に，このタッチ位置ごとの感圧特性およびタッチ位置を用いて補正を行うことにより，タッチ位置に依存しない圧力の検出が可能となる．

3.4.2　タッチ圧力ごとの感圧特性評価実験

異なる圧力にて端末を押下した際に，差分値がどう異なるか調査する実験を行った．

0.316852	0.528687	0.483728	0.289856
0.417749	0.937524	1.124426	0.586688
0.72359	1.301312	1.161316	0.491711
0.474756	1.065405	1.119336	0.967487
0.623657	0.71861	0.93349	0.750586
0.379749	0.515686	0.653644	0.456732
0.281854	0.32182	0.417773	0.227875

図 3.12: 分割された各領域ごとの気圧積分値

0.157922	0.247852	0.236877	0.146924
0.215869	0.383789	0.464758	0.244867
0.34881	0.560699	0.49671	0.23985
0.258862	0.469739	0.482721	0.436761
0.304816	0.346814	0.458752	0.370807
0.179895	0.25387	0.326831	0.22688
0.132935	0.14292	0.209882	0.131934

図 3.13: 分割された各領域ごとの気圧最大値

実験手法

我々は同じ位置にて異なる圧力による押下を行うために，3.4.1 節にて述べた治具を用いて，端末にサラミソーセージを投下した．また，3.4.1 節の実験結果より，最も特性の異なる中央および端の両箇所にて同様の特性が得られた場合，端末のタッチパネル全体にて同様の特性を有するという推測できる．したがって本実験は端末のタッチパネル中央および左上端に対して行われた．サラミソーセージをある高さからタッチパネルに投下するまでを 1 試行とし，1–20 cm の高さの範囲にて 1 cm ずつ高さを変えながら各高さごとに 20 試行ずつ行った．また，1 試行ごとに気圧値の積分値および最大値の記録を行った．

環境

実験は窓や出入り口を締め切った屋内にて行われた．端末を用いて実験環境の気圧値を計測したところ，1004.36 hPa であった．また，しきい値を計測したところ，0.039978027 であった．

結果および考察

実験の結果を図 3.14，図 3.15，図 3.16 および図 3.17 に示す．図 3.14 および図 3.16 はそれぞれタッチパネル中央と左上端にて 10 試行行った際の気圧積分値の平均値であり，図 3.15 および図 3.17 はそれぞれタッチパネル中央と左上端における気圧最大値の平均値である．また，それぞれの図において縦方向のバーは標準偏差をプロットしたものである．

実験結果より，高さにおおよそ線形に比例して気圧値の変化量が大きくなっていることが分かる．図 3.14 および図 3.15 より，高さが高くなった際に最大値より積分値の方が線形に増加していることが分かる．このことから，押し分けを必要とするタッチ圧検出には積分

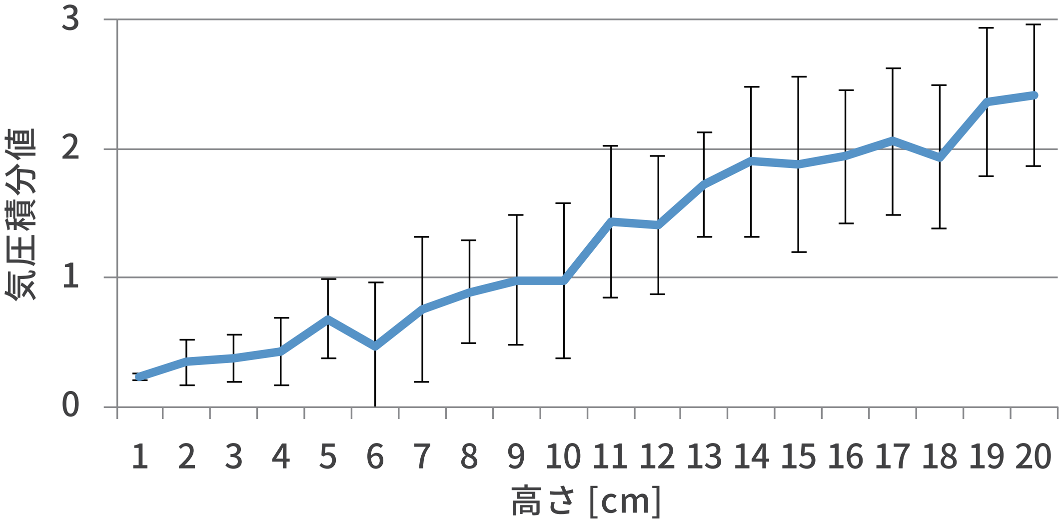


図 3.14: タッチパネル中央における落下させる高さごとの気圧積分値

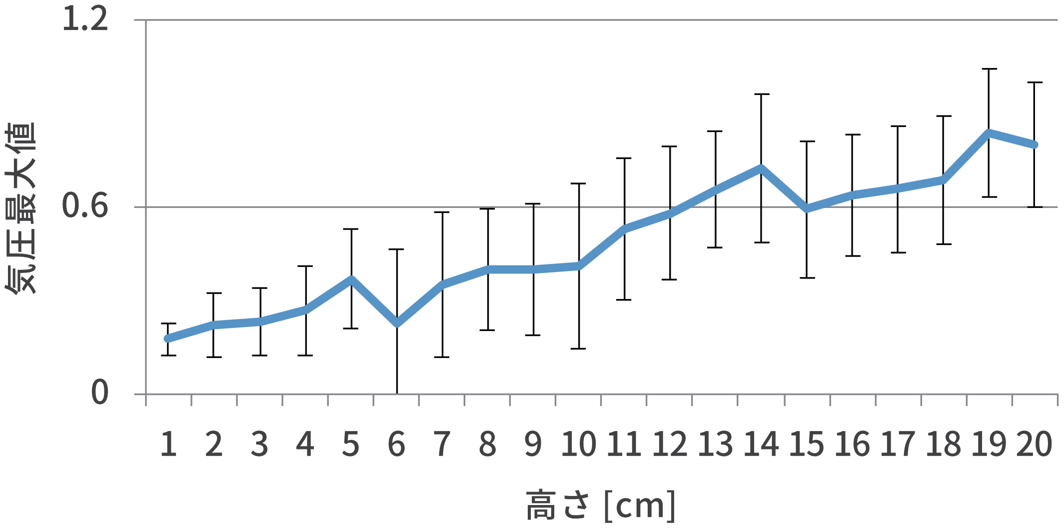


図 3.15: タッチパネル中央における落下させる高さごとの気圧最大値

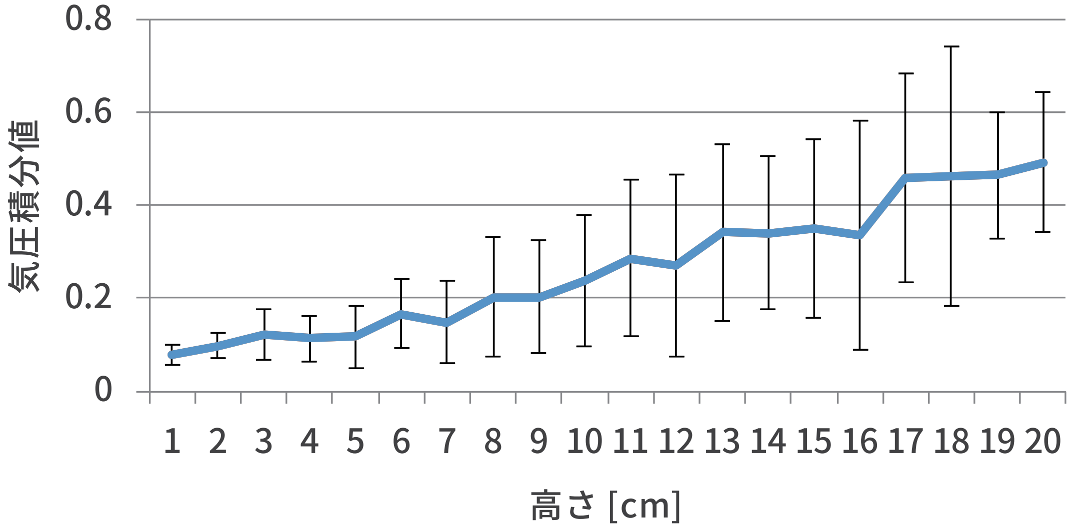


図 3.16: タッチパネル左上端における落下させる高さごとの気圧積分値

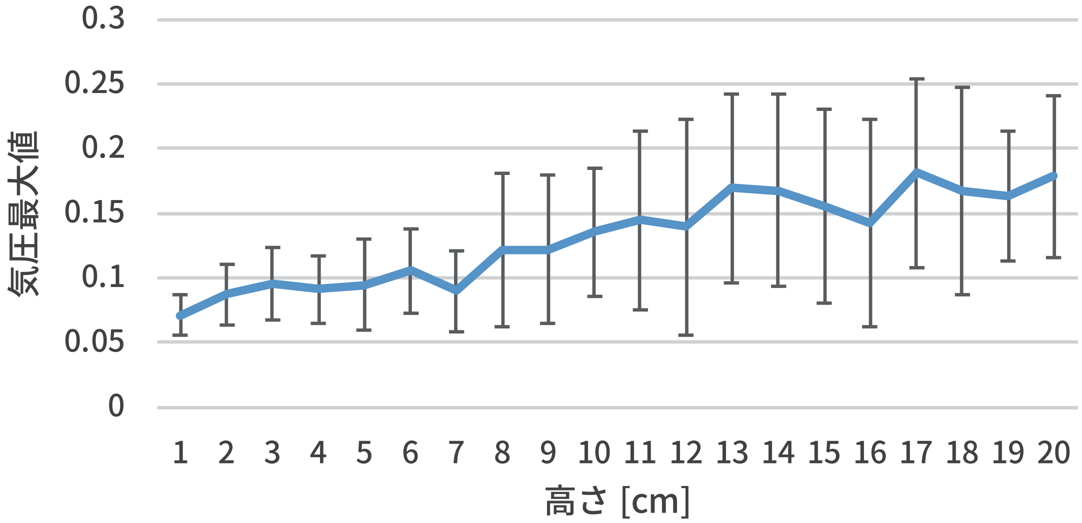


図 3.17: タッチパネル左上端における落下させる高さごとの気圧最大値

値を用いた方が良いことが分かる．また図 3.14 および図 3.16 より高さに比例して積分値が大きくなっていることから，タッチパネル全体にて同様の特性を有していると推測できる．

3.5　実験 2：積分値を用いた実験

実験 1 では先行研究に習い，人の指に近いサラミソーセージを用いて BaroTouch の感圧特性を評価した．しかし，サラミソーセージを防水端末のタッチパネル上に投下すると，試行ごとに当たり具合が変化し，ばらつきが生じる問題があった．そのため，実験 2 では分銅を用いて押下位置および圧力と気圧値の関係を調査する実験を行った．さらに BaroTouch を用いるユーザが何段階の押し分けが可能であるかを評価するための実験を行った．実験には実験端末としてテープの有り/無しという端末状態の異なる 2 台の Xperia Z5 Compact を用いた．また，実験には 3.3.3 節にて述べた積分値を用いた．

3.5.1　押下位置および圧力ごとの感圧特性調査実験

BaroTouch は端末を押下した際に内部の空気が圧迫される現象を用いて押下圧力を取得する手法である．押下した位置によって端末表面のたわみ具合は異なる．例えば同圧力であっても，端末の端を押下した場合よりも中央を押下した場合の方が端末表面は大きくたわむ．さらに同じ位置を押下した場合でも押下圧力によってたわみ具合は異なる．この防水端末の押下位置および押下圧力と気圧値の関係性を調査するための感圧特性調査実験を行った．

実験手順

実験は窓や扉を締め切った屋内にて行われた．端末を用いて実験環境の気圧値を計測したところ，1008.02hPa であった．

押下位置および圧力ごとの感圧特性を調査するために，実験端末のタッチパネル上に分銅を載せた際の気圧値を計測する実験を行った．押下位置ごとの感圧特性調査においては，実験端末のタッチパネル領域を縦 6 分割 × 横 3 分割し，分割した各領域の中心部に 50 g の分銅（半径 1 cm，圧力 480 hPa）を置き，積分値が最大となった際の値を記録した．

押下圧力ごとの感圧特性調査においては，10 g，20 g，50 g，100 g，200 g，500 g および 1000 g の分銅を，押下面積を統一するために，図 3.18 に示す半径 1 cm，重さ 4.33 g の円盤状の治具の上に載せ，2 台の実験端末のタッチパネルの中央および左上端に置き，積分値が最大となった際の値を記録した．

それぞれの調査において 10 回ずつ分銅を置いたため，総試行回数は押下位置ごとの感圧特性調査にて計 360 回（2 端末状態 ×18 領域 ×10 回），押下圧力ごとの感圧特性調査にて計 280 回（2 端末状態 ×2 ヶ所 × 分銅 7 種類 ×10 回）であった．

結果および考察

押下位置ごとの感圧特性調査の結果を図 3.19 に示す．実験結果よりテープの有り/無しに関わらず，端末中央の最大値が大きくなっていることが分かる．これは端末中央の方が端末端に比べ，より大きくたわむためと考えらえる．また押下圧力を取得する際に，この特性および押下位置を用いて補正を行うことにより，押下位置に依存しない圧力の取得が可能になると考えられる．

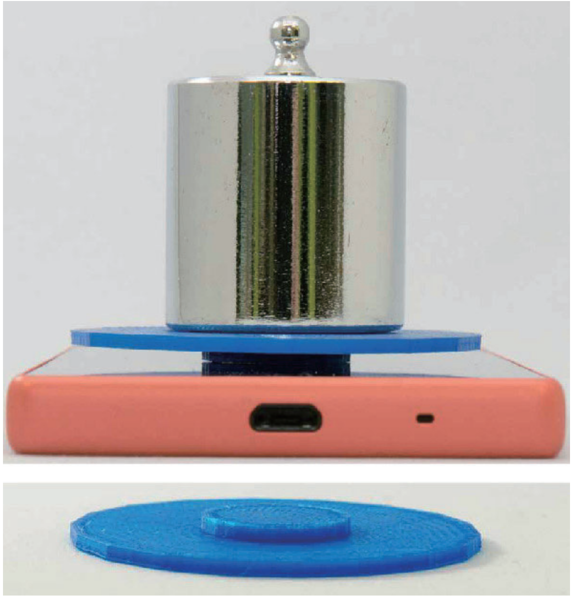
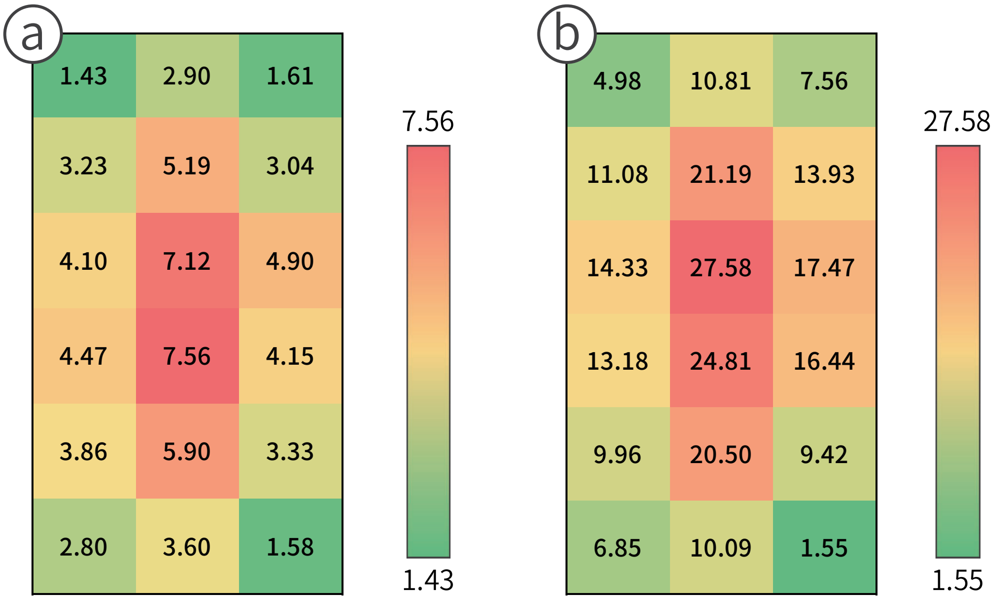


図 3.18: 感圧特性調査に用いた治具（底面半径 1 cm，重さ 4.33 g，ABS 樹脂）



a

1.43	2.90	1.61
3.23	5.19	3.04
4.10	7.12	4.90
4.47	7.56	4.15
3.86	5.90	3.33
2.80	3.60	1.58

b

4.98	10.81	7.56
11.08	21.19	13.93
14.33	27.58	17.47
13.18	24.81	16.44
9.96	20.50	9.42
6.85	10.09	1.55

図 3.19: 押下位置ごとの感圧特性（a：テープ無し，b：テープ有り）

押下圧力ごとの感圧特性調査の結果を図 3.20 に示す．実験結果より，押下圧力におおよそ線形に比例して最大値が大きくなっていることが分かる．図 3.20a および図 3.20b より，テープ無しの方が最大値が小さい．これは分銅を載せた際に，テープ無しの場合は徐々に空気が抜け，気圧が大きく上がらなかったためである．またタッチパネル中央および左上端にて同様の特性が確認されたことから，タッチパネル全体にて同様の特性を有していると考えられる．

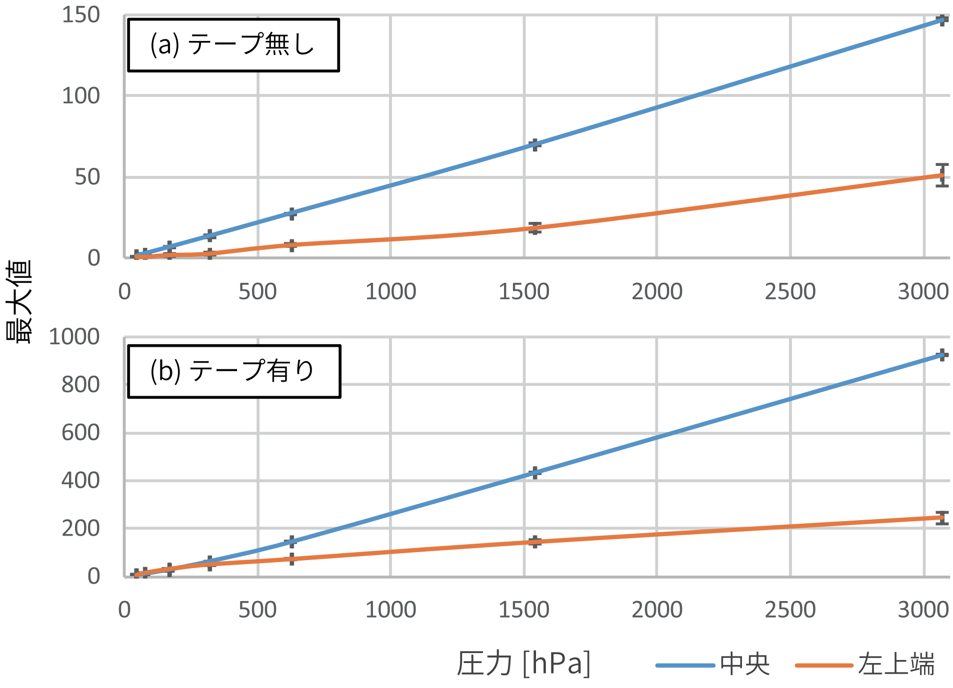


図 3.20: 押下圧力ごとの感圧特性（a：テープ無し，b：テープ有り）

3.5.2　押し分け精度評価実験

BaroTouch を用いるユーザがどの程度の精度にて押し分けを行うことが可能か調査を行った．本実験において，テープ有り/無し状態の防水端末および図 3.27 に示すアプリケーションを用いて，2–6 段階の押し分けを行った際の精度を調査した．

実験協力者

大学生および大学院生 10 名（21–24 歳，男性 5 名，女性 5 名）を実験協力者として雇用した．全ての実験協力者が日常的にスマートフォンを利用しており（利用歴：36–96 ヶ月，平均：55 ヶ月），利き手は右手であった．2 名が感圧タッチの使用歴があった（利用歴：6–7 ヶ月）．実験終了後，各実験協力者には実験への参加に対する謝礼として 820 円を支払った．

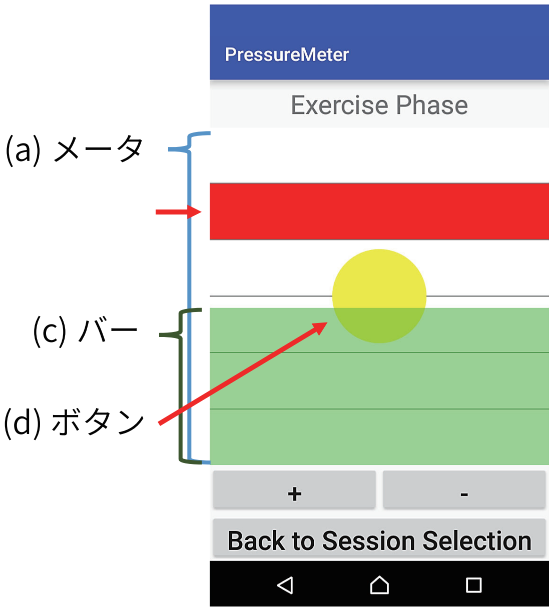


図 3.21: 押し分け精度評価用アプリケーション

実験環境

実験環境の気圧は平均 996.84 hPa（976.08–1002.24 hPa）であった．実験用端末として 2 台の Xperia Z5 Compact を用い，端末条件としてストラップ穴を塞いだテープ有り条件および塞いでいないテープ無し条件の端末を用意した．

実験手順

実験は窓や扉を締め切った屋内にて行われた．実験協力者は実験中，常に着席しているように求められた．

まず実験者は実験内容の説明を行った．その後，アンケートに回答するように指示した．アンケート回答後，ピンチ力計（Baseline 社製，ER HiRes hydraulic pinch gauge）を強く握ってもらい，実験協力者の利き手である右手の親指の指圧を測定した．平均指圧は 7.25 kg（SD = 2.99 kg）であった．

実験者は実験協力者に対して図 3.27 に示す BaroTouch 評価用アプリケーションを提示し，手法の説明を行った．その後，実験端末のタッチパネル中央に表示されたボタンを弱く 5 回，強く 5 回押下してもらい，押下した際の積分値が最大となった際の値を記録した．このとき，強く押下した際の積分値の平均を上限値，弱く押下した際の積分値の平均を下限値とし，キャリブレーションした．

評価用アプリケーションの内容を述べる．アプリケーションにて画面に上限値および下限値の範囲を等分に 2–6 分割されたメータ（図 3.27a）を表示し，メータ内の分割されたブロックの内の一つを赤色に着色しターゲットとした（図 3.27b）．図 3.27c に示す画面内の緑色の矩形は，画面を押下した際の積分値に応じて上下するバーであり，実験協力者の押下圧に応じてリアルタイムに上下する．実験協力者はこのバーの上辺をターゲット内に収めた状態にて，指をタッチパネルから離すことによりターゲット選択を行った．実験中，このターゲットが表示されてから，ターゲット選択が成功するまでを 1 試行とした．

実験では練習タスクおよび実験タスクを実験協力者に行ってもらった．練習タスクでは，2–6 の各分割条件にてランダムにターゲットを表示した．実験タスクでは，試行回数が各ブロックにおいて等しくなるようにランダムにターゲットを表示した．各分割条件にて練習タスク 12 試行および実験タスク 60 試行を実験協力者に行ってもらい，全ての分割条件が完了するまでを 1 セッションとした．実験は端末条件ごとに 1 セッションずつ行い，セッション間において 3 分以上の休憩を実験協力者に取ってもらった．結果として，実験協力者には実験タスクにて合計 600 試行（＝2 セッション × 5 分割条件 × 60 試行）を行ってもらった．

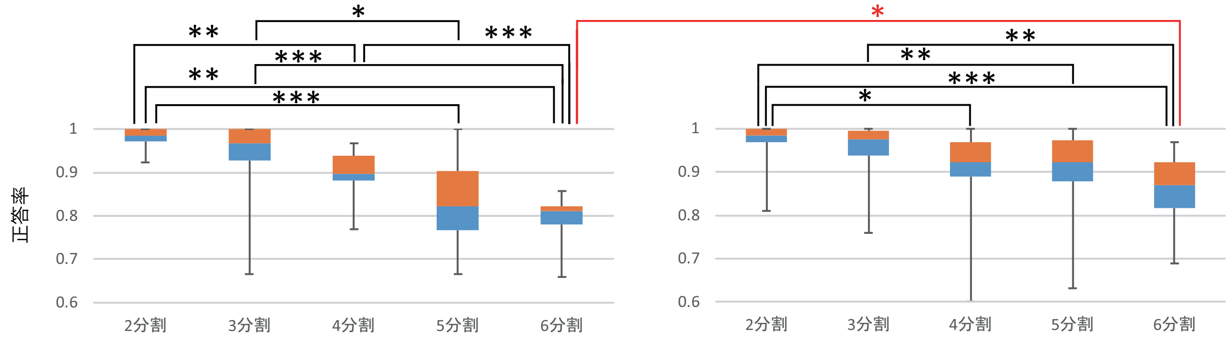
実験終了後に，実験協力者には使用感に関するアンケートに答えてもらった．実験は各実験協力者ごとに，事前説明からアンケート回答まで 40 分程度の時間を要した．なおカウンターバランスをとるために，実験協力者を二つのグループに分け，片方のグループはテープ無し条件から，もう片方のグループはテープ有り条件から行い，実験協力者ごとに各分割条件をどの順序で行うかはラテン方格法を用いて決定した．

結果および考察

図 3.22 に各端末条件，分割条件ごとの正答率および対応のある t 検定の結果を示す．6 分割条件におけるテープ無し条件の平均正答率は 78.02%であり，テープ有り条件の平均正答率は 84.51%であった．さらに図 3.22 より，6 分割条件にてテープ有り条件の方が有意に正答率が高いことが示された．2 分割条件におけるテープ無し条件の平均正答率は 97.72%であり，テープ有り条件の平均正答率は 95.39%であり，4 以上の分割条件より有意に正答率が高かった．

図 3.30 にターゲットが表示されてから正答するまでの選択時間および対応のある t 検定の結果を示す．図 3.30 より，分割数が多いほど選択時間を多く要することが分かる．また端末状態間において有意差は見られなかった．

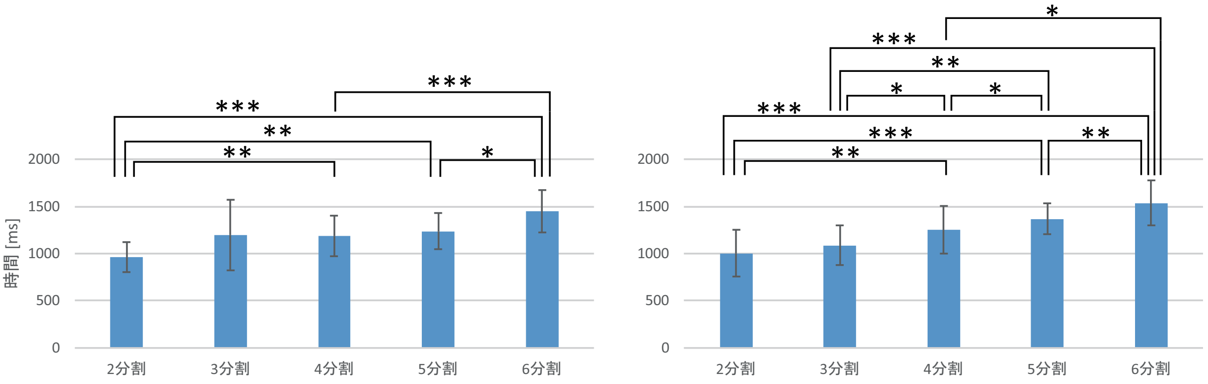
アンケート結果より，10 名中 8 名の実験協力者がテープ有り条件の方が押し分けが容易であったという回答を得た．また 2 名の実験協力者がテープ無し条件において感度が良すぎると感じたと述べていた．これはテープ無し条件の場合，テープ有り条件に比べて押下時の気圧値の変化量が小さく，上限値および下限値の間のレンジが狭くなってしまったことが原因として考えられる．



(a) テープ無し

(b) テープ有り

図 3.22: 端末および分割条件ごとの正答率（*:$p < 0.05$,**:$p < 0.01$,***:$p < 0.001$）



(a) テープ無し

(b) テープ有り

図 3.23: 端末および分割条件ごとの回答時間（*:$p < 0.05$,**:$p < 0.01$,***:$p < 0.001$）

3.6　実験 3：異なる端末における実験

実験 2 では，同一のスマートフォンにおいて気密性の異なる状況を作り出し，実験を行った．しかし，実際の使用環境では，周囲の気圧を計測のためにテープ無し条件であることが多いと考えれる．また，端末の種類やサイズによっても感圧特性が異なると考えられる

そこで，テープ無し条件にて端末サイズの異なる 2 台のスマートフォン（スモール条件：Xperia Z5 Compact，防水性能 IPX5/8，ラージ条件：Xperia Z5，防水性能 IPX7）およびスマートウォッチ（ウォッチ条件：LG G Watch R，防水性能 IPX7）を用いて実験 2 と同様に感圧特性の評価を行った．さらに BaroTouch を用いるユーザが何段階の押し分けが可能であるかを評価するための実験を行った．また，実験には 3.3.3 節にて述べた積分値を用いた．

3.6.1　押下位置および圧力ごとの感圧特性調査実験

BaroTouch は端末を押下した際に内部の空気が圧迫される現象を用いて押下圧力を取得する手法である．押下した位置によって端末表面のたわみ具合は異なる．例えば同圧力であっても，端末の端を押下した場合よりも中央を押下した場合の方が端末表面は大きくたわむ．さらに同じ位置を押下した場合でも押下圧力によってたわみ具合は異なる．この防水端末の押下位置および押下圧力と気圧値の関係性を調査するための感圧特性調査実験を行った．

実験手順

実験は窓や扉を締め切った屋内にて行われた．端末を用いて実験環境の気圧値を計測したところ，1013.2hPa であった．

押下位置および圧力ごとの感圧特性を調査するために，実験端末のタッチパネル上に分銅を載せた際の気圧値を計測する実験を行った．押下位置ごとの感圧特性調査においては，2 台の実験端末として，スモール条件：Xperia Z5 Compact（防水性能 IPX5/8），ラージ条件：Xperia Z5（防水性能 IPX7）を用意した．スモール条件ののタッチパネル領域を縦 5 分割 × 横 3 分割し，ラージ条件ののタッチパネル領域を縦 6 分割 × 横 4 分割し，分割した各

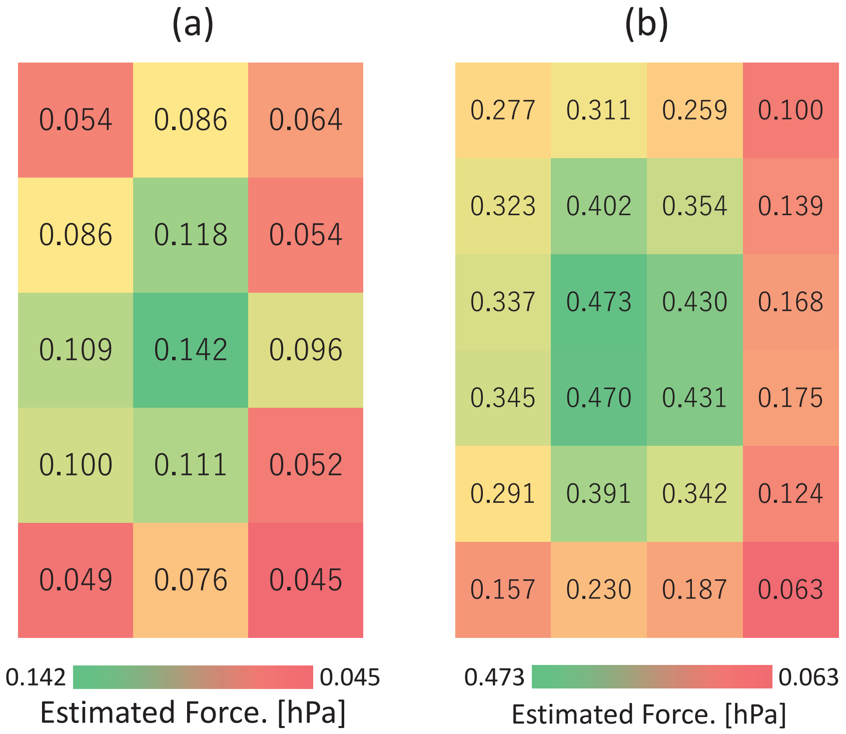
領域の中心部に 50 g の分銅（半径 1 cm，圧力 480 hPa）を置き，積分値が最大となった際の値を記録した．

押下圧力ごとの感圧特性調査においては，20 g，50 g，100 g，200 g，500 g および 1000 g の分銅を，押下面積を統一するために，図 3.18 に示した半径 1 cm，重さ 4.33 g の円盤状の治具の上に載せ，2 台の実験端末のタッチパネルの中央および左上端に置き，積分値が最大となった際の値を記録した．ウォッチ条件では，タッチパネルの中央に置き，積分値が最大となった際の値を記録した．

それぞれの調査において 10 回ずつ分銅を置いたため，総試行回数は押下位置ごとの感圧特性調査にて計 420 回（(スモール条件 18 領域＋ラージ条件 24 領域）×10 回)，押下圧力ごとの感圧特性調査にて計 300 回（(2 端末 ×2 ヶ所 +1 端末)× 分銅 6 種類 ×10 回）であった．

結果および考察

スモール条件における押下位置ごとの感圧特性調査の結果を図 3.24a に，ラージ条件における結果を図 3.24b に示す．実験結果より，端末中央の最大値が大きくなっていることが分かる．これは端末中央の方が端末端に比べ，より大きくたわむためと考えらえる．また押下圧力を取得する際に，この特性および押下位置を用いて補正を行うことにより，押下位置に依存しない圧力の取得が可能になると考えられる．



0.054	0.086	0.064
0.086	0.118	0.054
0.109	0.142	0.096
0.100	0.111	0.052
0.049	0.076	0.045

0.277	0.311	0.259	0.100
0.323	0.402	0.354	0.139
0.337	0.473	0.430	0.168
0.345	0.470	0.431	0.175
0.291	0.391	0.342	0.124
0.157	0.230	0.187	0.063

図 3.24: 押下位置ごとの感圧特性（a：スモール条件，b：ラージ条件）

スモール条件における押下圧力ごとの感圧特性調査の結果を図 3.25a に，ラージ条件における結果を図 3.25b に示す．実験結果より，押下圧力におおよそ線形に比例して最大値が大きくなっていることが分かる．また，タッチパネル中央および左上端にて同様の特性が確認されたことから，タッチパネル全体にて同様の特性を有していると考えられる．図 3.25 中

の数式は，感圧特性を線形近似し，決定係数を求めた結果である．いずれの線形近似においても決定係数 $R^2 > 0.95$ と高いため，押下圧力と最大値は線形に比例することが示された．

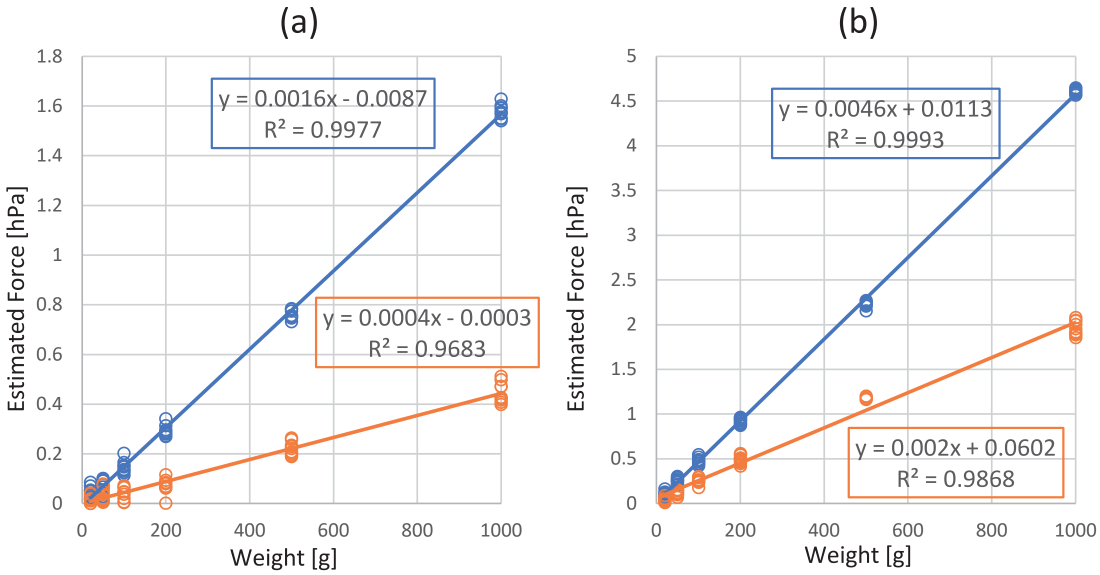


図 3.25: 押下圧力ごとの感圧特性（a：スモール条件，b：ラージ条件）

図 3.26 にウォッチ条件における押下圧力ごとの感圧特性調査の結果を示す．実験結果より，押下圧力におおよそ線形に比例して最大値が大きくなっていることが分かる．図 3.26 中の数式は，感圧特性を線形近似し，決定係数を求めた結果である．決定係数 $R^2 = 0.9985$ と高いため，押下圧力と最大値は線形に比例することが示された．

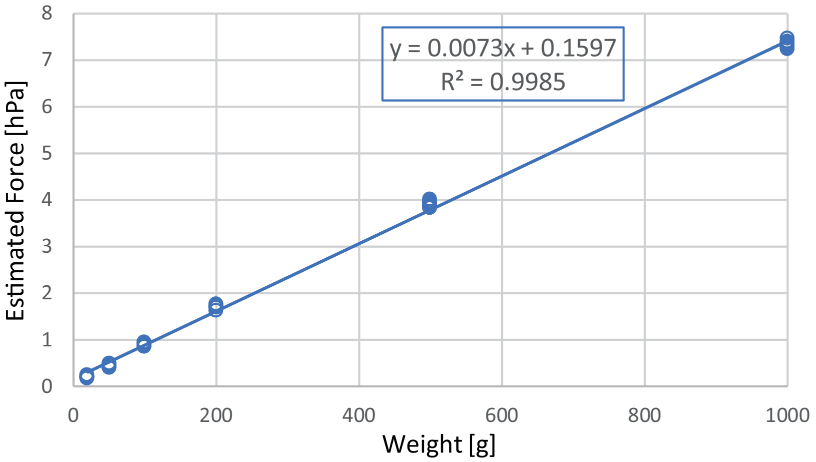


図 3.26: 押下圧力ごとの感圧特性（ウォッチ条件）

3.6.2　押し分け精度評価実験

BaroTouchを用いるユーザがどの程度の精度にて押し分けを行うことが可能か調査を行った．本実験において，テープ有り/無し状態の防水端末および図3.27に示すアプリケーションを用いて，2–6段階の押し分けを行った際の精度を調査した．

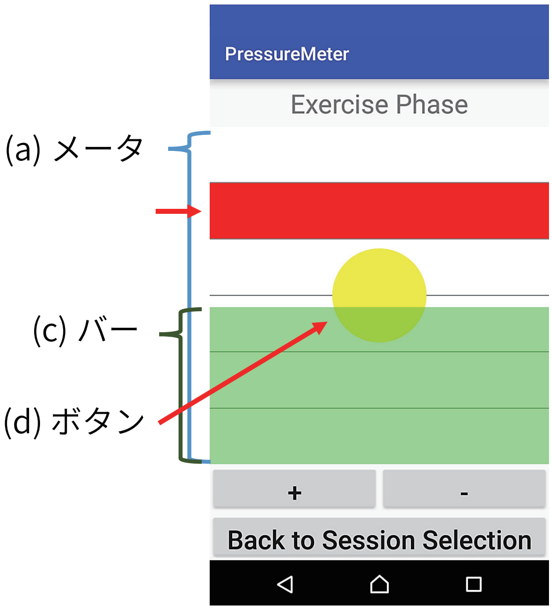


図3.27: 押し分け精度評価用アプリケーション

実験協力者

大学生および大学院生15名（19–30歳，男性11名，女性4名）を実験協力者として雇用した．全ての実験協力者が日常的にスマートフォンを利用しており（利用歴：41–102ヶ月，平均：66.9ヶ月），うち12名の利き手は右手であった．すべての実験協力者は感圧タッチを使用したことがなかった．実験終了後，各実験協力者には実験への参加に対する謝礼として1640円を支払った．

実験環境

実験環境の気圧は平均996.84 hPa（976.08–1002.24 hPa）であった．実験用端末として2台のXperia Z5 Compactを用い，端末条件としてストラップ穴を塞いだテープ有り条件および塞いでいないテープ無し条件の端末を用意した．

実験手順

実験は窓や扉を締め切った屋内にて行われた．実験協力者は実験中，常に着席しているように求められた．

まず実験者は実験内容の説明を行った．その後，アンケートに回答するように指示した．アンケート回答後，ピンチ力計（Baseline社製，ER HiRes hydraulic pinch gauge）を強く

握ってもらい，実験協力者の利き手の親指の指圧を測定した．人差し指と親指で挟むように握った場合の平均指圧は7.60 kg（SD = 3.99 kg）であった．また，机に置いたピンチ力計を人差し指で謳歌した場合の平均指圧は7.61 kg（SD = 1.66 kg）であった．

実験者は実験協力者に対して図3.27に示すBaroTouch評価用アプリケーションを提示し，手法の説明を行った．その後，実験端末のタッチパネル中央に表示されたボタンを弱く5回，強く5回押下してもらい，押下した際の積分値が最大となった際の値を記録した．このとき，強く押下した際の積分値の平均を上限値，弱く押下した際の積分値の平均を下限値とし，キャリブレーションした．

評価用アプリケーションの内容を述べる．アプリケーションにて画面に上限値および下限値の範囲を等分に2–6分割されたメータ（図3.27a）を表示し，メータ内の分割されたブロックの内の一つを赤色に着色しターゲットとした（図3.27b）．図3.27cに示す画面内の緑色の矩形は，画面を押下した際の積分値に応じて上下するバーであり，実験協力者の押下圧に応じてリアルタイムに上下する．実験協力者はこのバーの上辺をターゲット内に収めた状態にて，指をタッチパネルから離すことによりターゲット選択を行った．実験中，このターゲットが表示されてから，ターゲット選択が成功するまでを1試行とした．

実験では練習タスクおよび実験タスクを実験協力者に行ってもらった．練習タスクでは，2–6の各分割条件にてランダムにターゲットを表示した．実験タスクでは，試行回数が各ブロックにおいて等しくなるようにランダムにターゲットを表示した．各分割条件にて練習タスク12試行および実験タスク60試行を実験協力者に行ってもらい，全ての分割条件が完了するまでを1セッションとした．実験は端末条件ごとに1セッションずつ行い，セッション間において3分以上の休憩を実験協力者に取ってもらった．結果として，実験協力者には実験タスクにて合計900試行（= 3端末 × 5分割条件 × 60試行）を行ってもらった．

実験終了後に，実験協力者には使用感に関するアンケートに答えてもらった．実験は各実験協力者ごとに，事前説明からアンケート回答まで95分程度の時間を要した．なおカウンターバランスをとるために，実験協力者を三つのグループ（グループA, B, C）に分け，グループAはスモール条件 → ラージ条件 → ウォッチ条件，グループBはラージ条件 → ウォッチ条件 → スモール条件，グループCはウォッチ条件 → スモール条件 → ラージ条件の順に行った．また各グループの実験協力者5名は，それぞれ5分割条件を以下の順序にて行った．

- 実験協力者1：2 → 3 → 4 → 5 → 6,
- 実験協力者2：3 → 4 → 5 → 6 → 2,
- 実験協力者3：4 → 5 → 6 → 2 → 3,
- 実験協力者4：5 → 6 → 2 → 3 → 4,
- 実験協力者5：6 → 2 → 3 → 4 → 5.

結果および考察

図3.28aおよび図3.29aに各端末条件，分割条件ごとの正答率を示す．図3.28bおよび図3.29bに各端末条件，ターゲットが表示されてから正答するまでの選択時間．図3.28cおよび図3.29cにターゲット選択用のバーが何度ターゲットに入った回数および出た回数（NC：Number of Crossing）を示す．

スモール条件およびラージ条件の実験結果の有意差検定には，反復測定2元配置分散分析（端末条件および分割条件）を用いた．その結果，ターゲット選択時間において各分割条

件間に有意差が見られた（F(4,56)=51.437, p<0.01）．また，NC において各分割条件間に有意差が見られた （F(4,56)=51.117, p<0.01）．

ウォッチ条件の実験結果の有意差検定には, 反復測定 1 元配置分散分析（分割条件）を用いた．その結果，ターゲット選択時間において各分割条件間に有意差が見られた（F(4,56)=51.117, p<0.01）．また，NC において各分割条件間に有意差が見られた（F(4,56)=51.117, p<0.01）．

各端末条件において，正答率の結果には有意差は見られなかった．しかし，結果より 2–6 分割条件を 96 %以上の精度にて押し分け可能であることが分かった．もし，市販のスマートフォンにて用いられている 3 分割の押し分け [Gig] であれば，各端末条件それぞれ 99.64%（スモール条件），98.31%（ラージ条件），98.30%（ウォッチ条件）で押し分けできる．

ウォッチ条件において，NC は 5 分割条件が 6 分割条件より少し高くなっている．これは，それぞれの分割条件においてターゲット幅はほとんど同じであり（5 分割条件：7.00 mm, 6 分割条件：5.83 mm），6 分割条件において実験協力者がより気をつけて選択した可能性がある．

アンケートにて，「設問 1：BaroTouch を用いた押し分けは簡単でしたか？」「設問 2：スモール条件における押し分けは簡単でしたか？」「設問 3：ラージ条件における押し分けは簡単でしたか？」「設問 4：ウォッチ条件における押し分けは簡単でしたか？」という設問を 5 段階のリッカート尺度（1：難しい–5：簡単）を用いて回答してもらった．その結果，設問 1 は平均 4.00，設問 2 は平均 4.05，設問 3 は平均 4.32，設問 1 は平均 4.08 であった，また，7 名の実験協力者が BaroTouch の操作は簡単であったと自由記述欄に回答した．

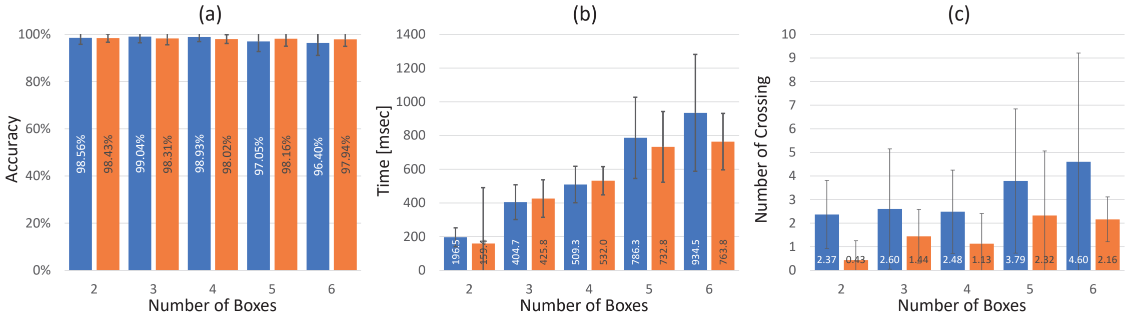


図 3.28: スモール条件（青色）およびラージ条件（橙色）における，分割条件ごとの正答率，ターゲット選択時間および NC

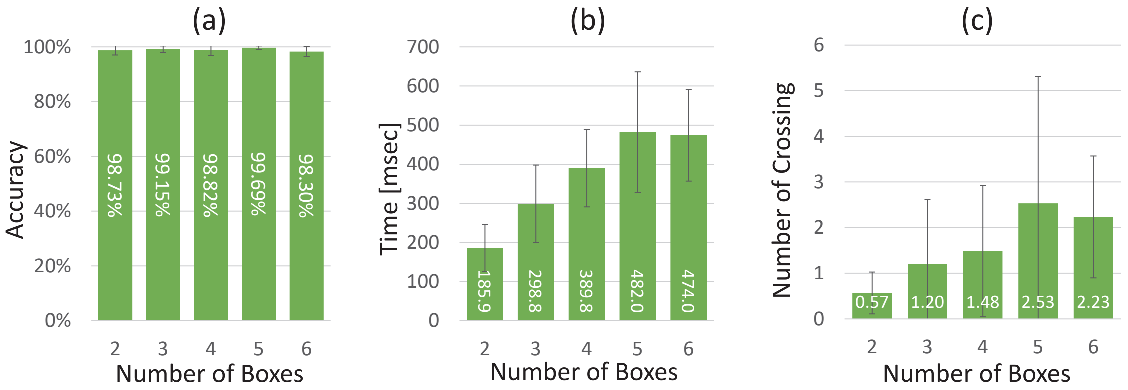
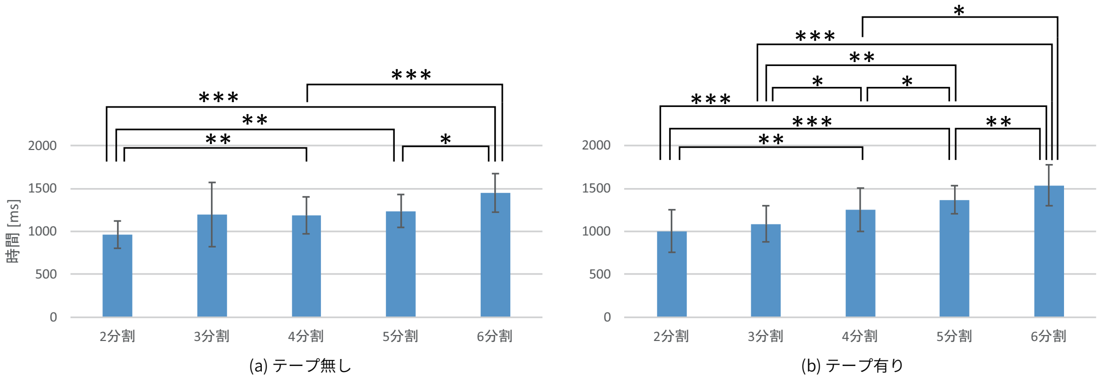


図 3.29: ウォッチ条件における，分割条件ごとの正答率，ターゲット選択時間および NC



(a) テープ無し

(b) テープ有り

図 3.30: 端末および分割条件ごとの回答時間（*:$p < 0.05$,**:$p < 0.01$,***:$p < 0.001$）

3.7 議論

これまで BaroTouch を用いて押下圧力を推定する手法について述べてきた．それ以外に，BaroTouch を応用して指の角度の推測する手法を考案したため，本節にて議論する．

3.7.1 指の角度の推測

一部のスマートフォンにて提供されている押下圧力取得機能は，指が端末のタッチパネルにタッチした際に押下圧力に応じて先端が変形し，タッチ面積が変わる現象を用いている．しかし，タッチ面積は指の角度によって異なる．図 3.31 に異なる角度（指を立てた状態および寝かせた状態），異なる圧力にて端末を押下した際の気圧値とタッチ面積のグラフを示す．図 3.31 から気圧値およびタッチ面積は押下圧力に応じて変化していることが分かる．しかし，タッチ面積に基づく手法は押下圧力以上に指の角度によって大きく変化していることが分かる．一方で BaroTouch は指の角度に関係なく押下圧力を取得することができることが分かる．

またタッチ面積は指の角度および押下圧力によって変化するため，ここから押下圧力成分を除去することにより指の角度成分のみを抽出できる．そこで BaroTouch を用いて取得した押下圧力を用いてタッチ面積から指の角度のみを抽出する手法が考えられる．

3.8 アプリケーション例

BaroTouch を用いたアプリケーション例を示す．

音楽プレイヤ

BaroTouch を用いた音楽プレイヤの例を図 3.32 に示す．本音楽プレイヤにて，ユーザがタッチパネルを軽く押下すると，再生/一時停止が切り替わり，強く押下すると楽曲リストを表示するという例である．

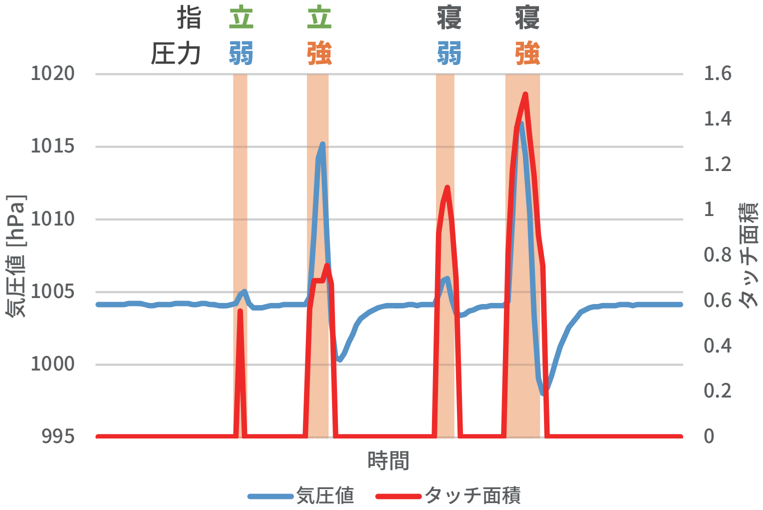


図 3.31: 端末を押下した際の気圧値とタッチ面積

図 3.32: BaroTouch を用いた音楽プレイヤ（a：再生モード, b：一時停止モード, c：楽曲リスト）

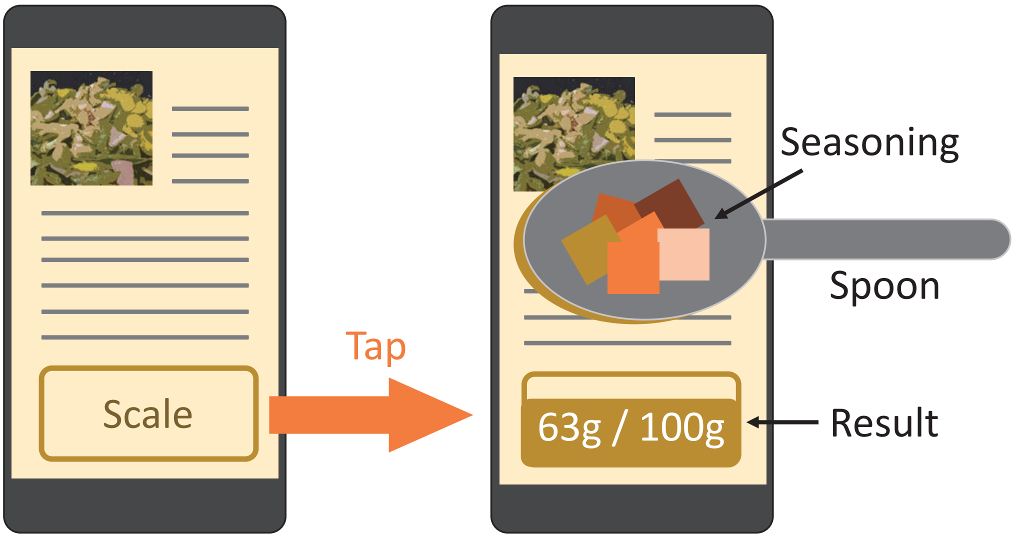


図 3.33: BaroTouch を用いたレシピ閲覧アプリ

レシピ閲覧アプリケーション

BaroTouch を用いたレシピ閲覧アプリケーションの例を図 3.33 に示す．本アプリにて，ユーザが料理を作りながらスマートフォンにてレシピを閲覧している際に，調味料の量を計測したい場合がある．その際に，スプーンをタッチパネルの上に載せ，調味料をスプーンに注ぐことにより，その重量を計測するという例である．

3.9 まとめ

本章にて防水端末に内蔵された気圧センサを用いて押下圧力を取得する手法である BaroTouch を示した．さらに防水端末において，周囲環境の気圧変化の影響を除去し，端末の気密性が高い状態および低い状態のどちらにおいてもタッチ圧力を取得するための処理手法を示した．

また BaroTouch において，タッチする位置や圧力によってどのような感圧特性を有するか実験により明らかにした．実験結果より端末を押下した際のたわみが大きくなる中央部付近が最も感度が高く，さらに積分値は押下圧力に線形に比例することが明らかになった．ユーザの押し分け精度評価実験を行ったところ，2 段階の分割条件において，気密性の高いテープ有り条件時 95.39%，気密性の低いテープ無し条件時 97.72%の精度，6 段階の分割条件において，テープ有り条件時 84.51%，テープ無し条件時 78.02%の精度にて押し分けることが可能であった．

第4章　Grov：導電繊維編み込み手袋を用いた手形状認識手法

手の形状をリアルタイムに認識できれば，VR ゴーグルを用いた没入型コンテンツや，手話認識のための入力インタフェースを構築できる．この手形状認識のためのデバイスとして，主にセンサを搭載した手袋（データグローブ），カメラ，ならびに筋電位センサが用いられている．これらの中でもデータグローブは，カメラを用いた手形状認識手法に比べて，認識対象が撮影できる場所にカメラを置かなければならない問題や，手が重なり認識対象が撮影できなくなる問題（オクルージョン）を持たず，また筋電位に基づく手法が苦手とする細かい指の動きを認識できる．しかし，手袋にセンサを搭載する必要があるため，重い，指が曲げづらい，洗濯できない，高コストなどの問題がある．

そこで，図 4.1 に示す，導電繊維が編み込まれた手袋をセンサの一部として用いることにより，これらの問題を解決可能な手形状認識手法である「Grov[1]」を開発している．提案手法は手形状として指の曲げ具合，ならびに指同士の接触および接触位置を推定する．これらの手形状を推定することにより，例えば VR コンテンツにおいては指の曲げ具合を 3D ハンドモデルに反映させることができる．また，指の接触位置を用いて文字入力やショートカット操作を行うことができる．指の曲げ推定には，指を曲げた際に手袋表面の導電繊維同士が接触し，短絡することによって電気抵抗（以下，単に抵抗）が減少する現象を用いる．また，指同士の接触および接触位置の推定には，手袋の指ごとに異なる周波数の交流信号を印加し，指同士が接触した際に交流信号が伝搬する現象を用いる．

図 4.1: 導電繊維が編み込まれた手袋

4.0.1　データグローブの歴史

データグローブは手形状をセンシングするために，手袋にセンサが搭載されたウェアラブルデバイスである．1977 年に登場し，主にヘッドマウントディスプレイ（HMD）を装着する没入型バーチャルリアリティ（VR）コンテンツのための入力装置として用いられてきた．

---

[1] 由来は “grow up”+“glove”

またそれ以外にも，遠隔医療手術（ロボット操作），エアギター，モーションキャプチャ，ハンドジェスチャ認識など幅広い用途に利用されている．データグローブにおける手形状センシング手法として，様々な手法が研究されてきた．例えばひずみゲージ式の曲げセンサを用いる手法 [5DT]，光ファイバを用いる手法 [MEL]，複数の加速度センサ [SPI] を用いる手法などである．これらの手法は手袋にセンサを縫い付ける必要があるため，指の動きを阻害する，手袋自体が重くなる，手袋の脱着の際に断線する，そのまま手袋を洗濯することができないといった問題があった．また，指同士の接触および接触位置を認識するデータグローブも市販されている [The]．[The] のデータグローブは，指同士の接触位置に依った文字入力，ゲームのショートカット操作などに利用することができる．ただし，指の曲げ等を計測することができないため汎用性に欠ける問題があった．

次に，国内における市販されているデータグローブの価格について述べる．例えば，[5DT] に示した 5DT Data Glove は約 2,000 ドル程度であり，指の開きまで計測可能な Cyber Glove II になると約 10,000 ドル程度で市販されている．これらのデータグローブは 10 年以上前に製品化されており，研究・産業向けの製品として提供されていたため高価であった．しかし，近年 HMD および没入型 VR コンテンツが市場で普及していくのに伴い，コンテンツ操作用の入力インタフェースとして安価なデータグローブがクラウドファンディング等を通して市販され始めている．価格としては Manus VR：約 1,000 ユーロ，CaptoGlove：約 250 ドルである．指の曲げ認識用データグローブは曲げセンサのコストの都合上これ以上安価にするのは難しい．また，指同士の接触認識が可能な図 5 の The Peregrine Glove は約 180 ドルと安価であるが指の曲げ計測ができない．最も普及しつつある HMD としてスマートフォンを筐体にはめ込むことにより構築可能なカードボード VR デバイス（例：ハコスコ[2]がある．カードボード VR デバイスは約 10-100 ドルで購入可能であり，VR デバイスに比べると，データグローブの方が高価である．そのため，データグローブがあまり普及していない．これまでのデータグローブの解決すべき問題点を以下にまとめる．本プロジェクトにてこれらの問題をまとめて解決する手法の開発を行う．

4.1　本章の構成

本章の構成は以下の通りである．4.2 節にて Grov の研究を行うにあたって参考にした研究について述べ，Grov と先行研究の差異を述べる．4.3 節にて Grov の原理を述べ，その実装方法を述べる．4.4 節にて Grov の手形状推定精度を評価したため，その実験を述べる．4.5 節にて 4.3 節にて述べた Grov の実装をさらに改良したため，その改良点を述べる．4.6 節にて Grov を用いて簡単にアプリケーションを実装するために SDK を開発したため，その構成や使用方法を述べる．4.8 節にて Grov の問題点ならびにその検証について議論する．4.9 節にて Grov の今後の発展や応用を述べる．4.10 節にて Grov を用いたアプリケーション例を示す．4.11 節にてまとめを述べる．

4.2　関連研究

従来より様々な手形状認識手法が開発されてきた．

---

[2] `https://hacosco.com/`

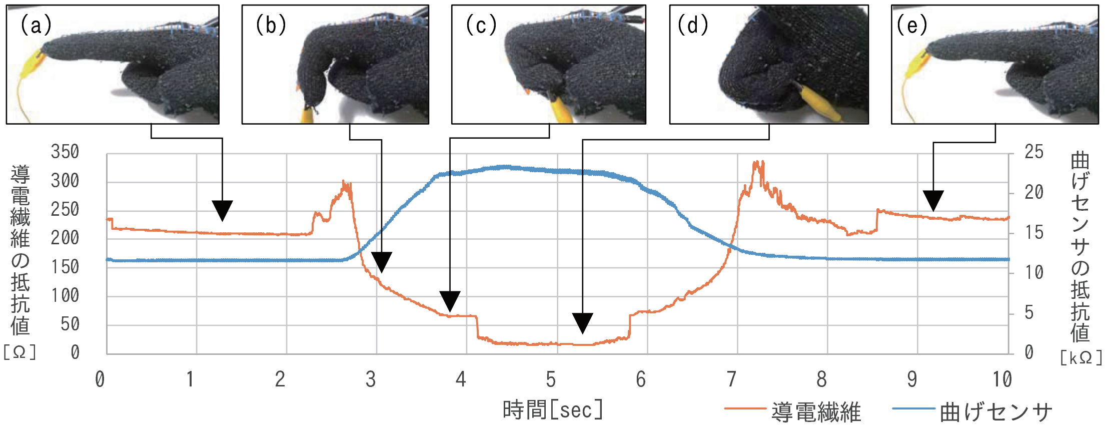


図 4.2: 指を曲げた際の導電繊維および曲げセンサの抵抗値変化

4.2.1　カメラを用いた手形状認識手法

カメラを用いた手形状認識手法はユーザに何も装着させずに手形状認識を行える点において魅力的である．Leap Motion は 2 台の赤外線カメラおよび赤外線照射 LED を用いて手形状を認識している [Lea]．Tang らは Kinect を用いて手形状を認識している [TLW$^+$15]．しかしカメラの撮像範囲外にて手形状を認識できない．

この問題に対し，身体に装着したカメラを用いる手法も提案されている．OmniTouch は肩に装着したカメラを用いて手形状を認識する手法である [HBAD11]．Brainy Hand は耳に装着したカメラを用いて手形状を認識する手法である [TMR09]．Digits は手形状を認識できる手首に装着するためのカメラを含むセンサ郡である [KHI$^+$12]．Niikura らは手首に装着したカメラに映る指形状を認識している [NWI14]．CyclopsRing は手形状を認識できる指に装着するためのカメラである [CCH$^+$15]．

これらのカメラを用いた手法全般は，手が障害物に隠れると認識できないオクルージョンの問題を持つ．一方，データグローブはこれらの問題を持たず，例えば両手が重なった場合でも容易に手形状認識が可能である．

4.2.2　データグローブにおける手形状認識手法

データグローブにおいて用いられている指の曲げ推定手法には，ひずみゲージ方式 [Cap]，圧電素子方式 [BKS$^+$15]，慣性センサ方式 [HWW13, KADY07]，光ファイバ方式 [5DT]，静電容量センサ方式 [DSD08]，磁気センサ方式 [DSD03] などがある．提案手法は，ひずみゲージ方式のような導体の引張による抵抗変化ではなく，手袋表面の繊維同士の短絡による抵抗変化を用いている点において異なる．

電気的接点を搭載することによって，親指が他の指のどの指骨に触れたかを推定しているデータグローブもある [MSBA12, PDD14]． 提案手法は同様の接触の推定に，交流信号の伝搬を用いて行っている点でこれらと異なる．また提案手法は接触の推定に加えて指の曲げを推定できる．

4.2.3　その他のウェアラブルな手形状認識手法

ThumbSlide は腕に巻き付けた赤外線フォトリフレクタを用いて計測した筋肉の隆起からハンドジェスチャを認識する手法である [AST16]．同様の手法は圧力センサを用いても実現されている [DP14]．ViBand は腕につけたスマートウォッチ内蔵の加速度センサのセンサ値を，高い時間分解能にて計測することによりハンドジェスチャを認識する [LXH16]．Yang らは腕に巻いた電極を用いて，腕内部構造を推定することにより手形状認識を行っている [ZH15]．筋電位を用いて手形状を認識することもできる [KMA08, note]．

これらの手法は手ではなく腕にセンサを取り付けることにより手形状を認識するため，手を用いた作業時に装置が邪魔になりにくいという利点を有するが，指の曲げを推定してはいない．一方，提案手法は指の曲げ具合の推定を行っている点で異なる．

4.2.4　導電布を用いたセンシング手法

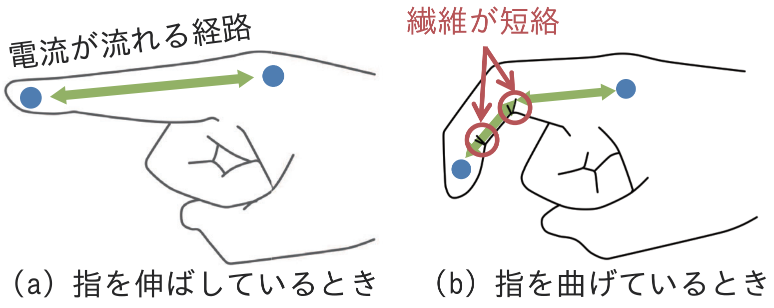
導電繊維を縫い込むもしくは樹脂を塗布した導電布を用いたセンシング手法がこれまでに提案されてきた．導電布を用いたセンシング手法として，導電布へのタッチ位置を検出する手法 [HIWB14, SV16]，導電繊維を用いて曲げを推定する手法 [GCBD13] がある．提案手法はこれらの導電布へのタッチ位置および指の曲げを併せて推定することができる．さらに，これらの手法は特定のパターンにて導電繊維を布に編み込む等の工夫を必要とするが，提案手法は手袋全体が導電性を有する場合に，各指の先端および手首への配線を行うのみにて構築できる．

Plex は布に塗布された導電樹脂のパターンを用いて，指の曲げおよび布へのタッチ位置を推定する手法 [YHR14] である．しかし，指の曲げおよびタッチ位置推定用のパターンは独立しているため，それぞれのパターンへの配線を必要とする．提案手法は導電布全体が導通するような手袋を用いているため，少ない配線にて同様の認識を可能にしている．

4.3　提案手法：Grov

Grov は導電繊維が編み込まれた手袋（以降，単に手袋）を用いて，指の曲げおよび指同士の接触を推定する手法である．以下に両者の原理を示す．

4.3.1　導電繊維を用いた指の曲げ推定



（a）指を伸ばしているとき　（b）指を曲げているとき

図 4.3: 指の曲げ推定の原理

導電繊維を用いた指の曲げ推定手法の原理を述べる．図 4.2 に手袋を装着したまま指を曲げた際の，人差し指の先端から根本までの導電繊維の抵抗変化および手袋に搭載したひずみゲージ方式の曲げセンサ（SpectraSymbol 社製，SEN-08606）の抵抗変化を示す．図 4.2 上部の写真 a–e はグラフの各点における指の曲げ具合を示す．図 4.2 にて，指を曲げた際に曲げセンサは抵抗値が増加しているのに対し，導電繊維は抵抗値が減少している．これは，図 4.3 に示すように，指を曲げた際に関節付近にて手袋表面の導電繊維同士が接触することによって，電流が流れる経路が短くなるためである．また図 4.2c のように指を曲げた際に前後より大きく抵抗値が減少している．これは指の先端が手の平と接触することによって，電流が流れる経路が短くなったためである．

また，指を伸ばした状態から曲げた場合（図 4.2a → 図 4.2b）および曲げた状態から伸ばした場合（図 4.2d → 図 4.2e）において，一時的に抵抗値が高くなっている．この現象は指の曲げ伸ばしをゆっくり行った場合にも発生する．これは，曲げ始めおよび終わり時には指の腹側の関節付近における短絡による抵抗変化が少なく，指の背側の電流の経路が伸びることによる抵抗値の変化の方が大きいためである．この抵抗値の上昇を確かめるために，手袋の指の部分を引っ張ったところ，抵抗値が上昇した．

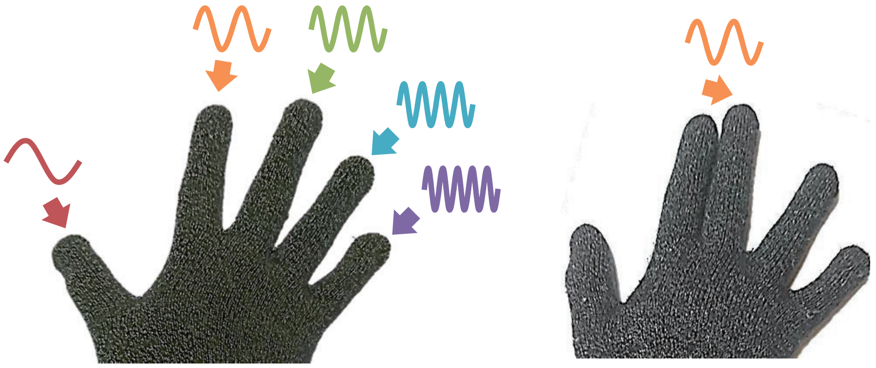
4.3.2 指の曲げ推定用のデータグローブの試作

4.3.1 節にて述べた指の曲げ推定手法を利用したデータグローブ（図 4.4）を製作した．重量は手袋＋配線のみで 25.8 g，回路やバッテリ込で 66.0 g である．本データグローブを 2015 年 3 月より運用しているが断線等は起きていない．本データグローブの回路部分を取り外し，洗濯機を用いて 3 回洗濯したところ，問題なく指の曲げの推定が可能であることが分かった．

図 4.4: 指の曲げ推定用データグローブ

4.3.3　導電繊維を用いた指同士の接触の推定

指同士の接触推定手法の原理を述べる．Grov では，図 4.5a のように手袋の各指の先端部にそれぞれ異なる周波数の交流信号を印加する．このとき指同士が接触すると，図 4.5b のように導電繊維を通じて交流信号が伝搬するため，伝搬してきた信号の周波数を高速フーリエ変換（FFT）を用いて解析することによりどの指同士が接触したかを推定できる．



(a) 指ごとに異なる周波数
の交流信号を流す

(b) 指同士が接触すると
交流信号が伝搬する

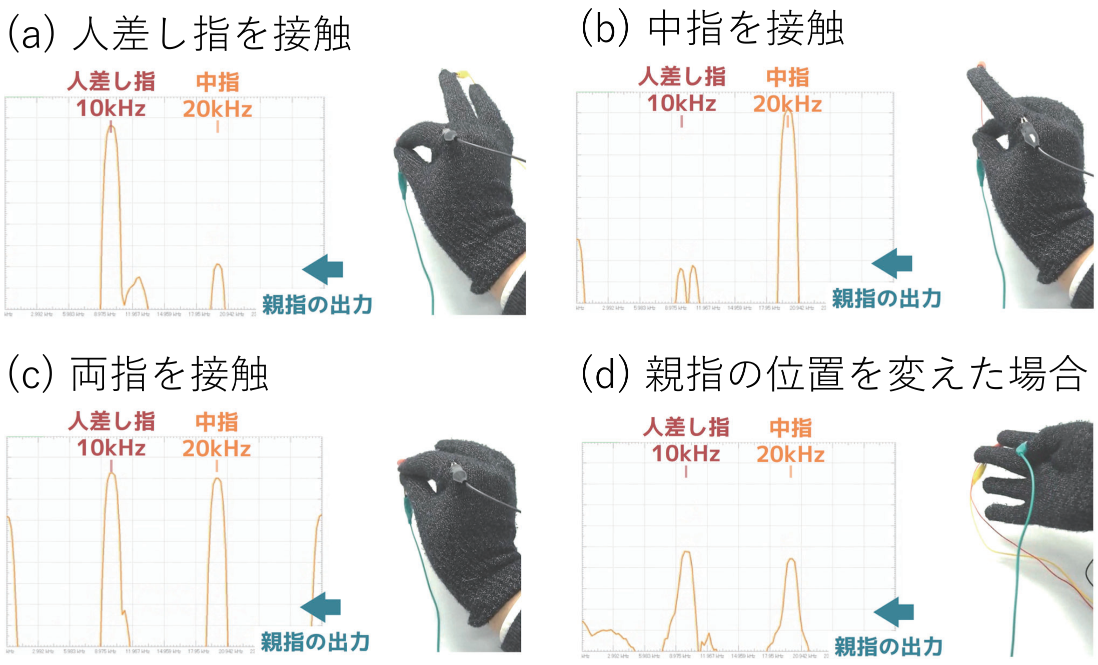
図 4.5: 指同士の接触推定の原理

片手の手袋のみを用いた場合の指の接触認識

人差し指に 10kHz，中指に 20kHz の電子信号を印加した際の，片手の手袋のみを用いた指同士の接触時の応答波形を観察した．結果の波形を図 4.6 に示す．図 4.6 は親指にオシロスコープのプローブを取り付け，FFT を用いて計測した信号を処理した応答波形である．結果より，人差し指および中指それぞれに接触した際には対応する周波数のスペクトルが大きくなり，両指と親指が接触した際は両方のスペクトルが大きくなることが分かった．さらに親指の位置を人差し指–中指間にて推移させた際にはそれぞれのスペクトルが上下し，どの位置に触れているか計測できそうであることが分かった．

4.3.4　実装

図 4.7 および図 4.8 に Grov における手形状認識用回路およびその構成を示す．本回路は各指に異なる周波数の交流信号を印加するための正弦波発振器（Analog Devices 社，AD9833），信号増幅用のオペアンプ（LM358），指の曲げ推定用の分圧回路，制御および PC との通信用のマイコン（mbed 社，mbed LPC1768）から成る．本回路は，手袋の親指以外の各指の先端に，後にフーリエ解析した際に特徴が出やすい正弦波信号を印加している．周波数はそれぞれ，35 Hz（人差し指），60 Hz（中指），85 Hz（薬指），ならびに 110 Hz（小指）とした．これらの周波数はマイコンのサンプリング周波数が 250 Hz であったため，エイリアシングが起きないように半分の 125 Hz 以下とし，かつ互いの周波数成分が干渉しないように選択した．また，手袋の親指部をマイコンのアナログ入力ピンに接続し，手袋の手首部をマイコンのグラウンドに接続した．



(a) 人差し指を接触

(b) 中指を接触

(c) 両指を接触

(d) 親指の位置を変えた場合

図 4.6: 各指が接触した際の応答波形（人差し指に 10kHz，中指に 20kHz の信号を印加）

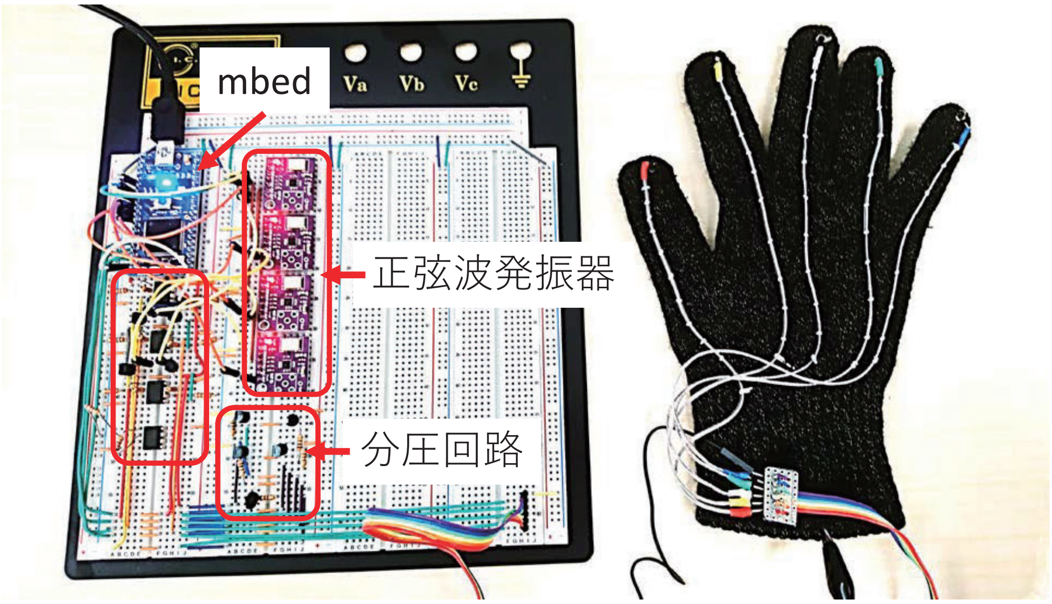


図 4.7: 手形状認識用回路

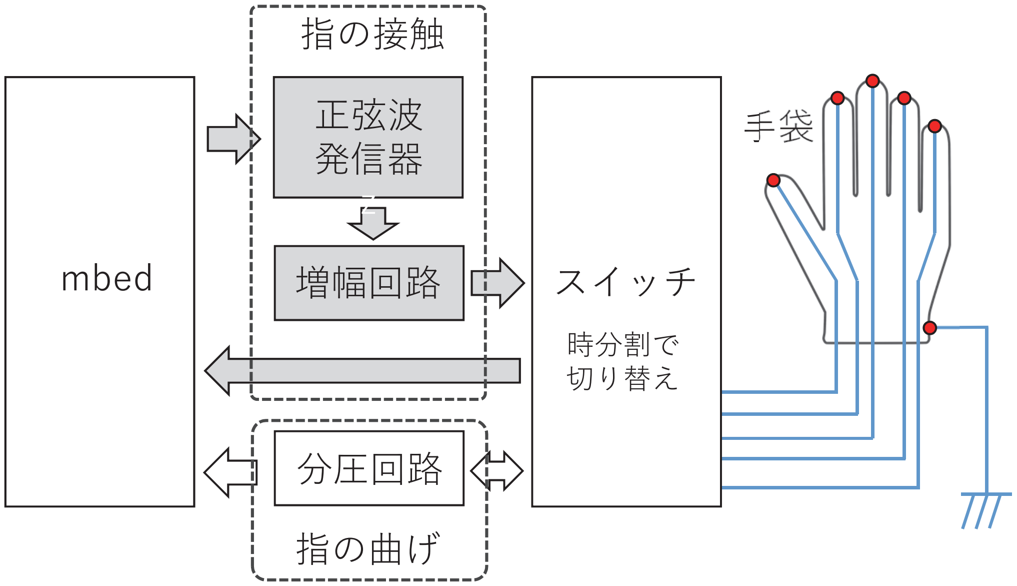


図 4.8: 回路構成

図 4.7 の回路を用いて指同士が接触した際に，親指に伝搬した信号の波形ならびにフーリエ解析後の周波数スペクトルを図 4.9 に示す．図 4.9a のように手を開いた状態では，親指をどの指にも接触させていないため，どの周波数のパワーも低いままであった．図 4.9b のように親指と人差し指の末節骨を接触させると，人差し指の 35 Hz のパワーが増加した．次に図 4.9c のように人差し指の中節骨に接触させると図 4.9b よりも 35 Hz のパワーが減少した．また図 4.9d のように小指の末節骨に接触させると 110 Hz のパワーが増加した．これらのことから，親指に伝搬した信号の周波数スペクトルのパワーを解析することにより，どの指に触れているか，ならびに指のどの部分に触れているかが推定可能であることがわかる．

さらにこのことはデータグローブごとに固有の周波数の交流を印加することにより，両手の接触や，他のユーザとの握手等による接触を推定できることを示唆している．

4.4 実験

提案手法における指の曲げおよび指同士の接触推定手法の精度を評価するために実験を行った．実験には手袋として，Agloves 社製の Agloves Touchscreen Gloves M/L 兼用サイズを用いた．なおこの手袋は，装着したまま静電容量タッチパネルを操作可能な手袋として市販されている．

4.4.1 実験 1：指の曲げ推定手法の評価

指を曲げた際の導電繊維の抵抗値の変化を観察する実験を行った．研究室内の大学生および大学院生 6 名（22–25 歳，平均年齢 23.2 歳，男性，全員が右利き）を実験協力者とした．また各実験協力者の手長（中指の先端から手と手首の間のしわまでの長さ）は平均 18.20 cm（SD=0.87）であった．

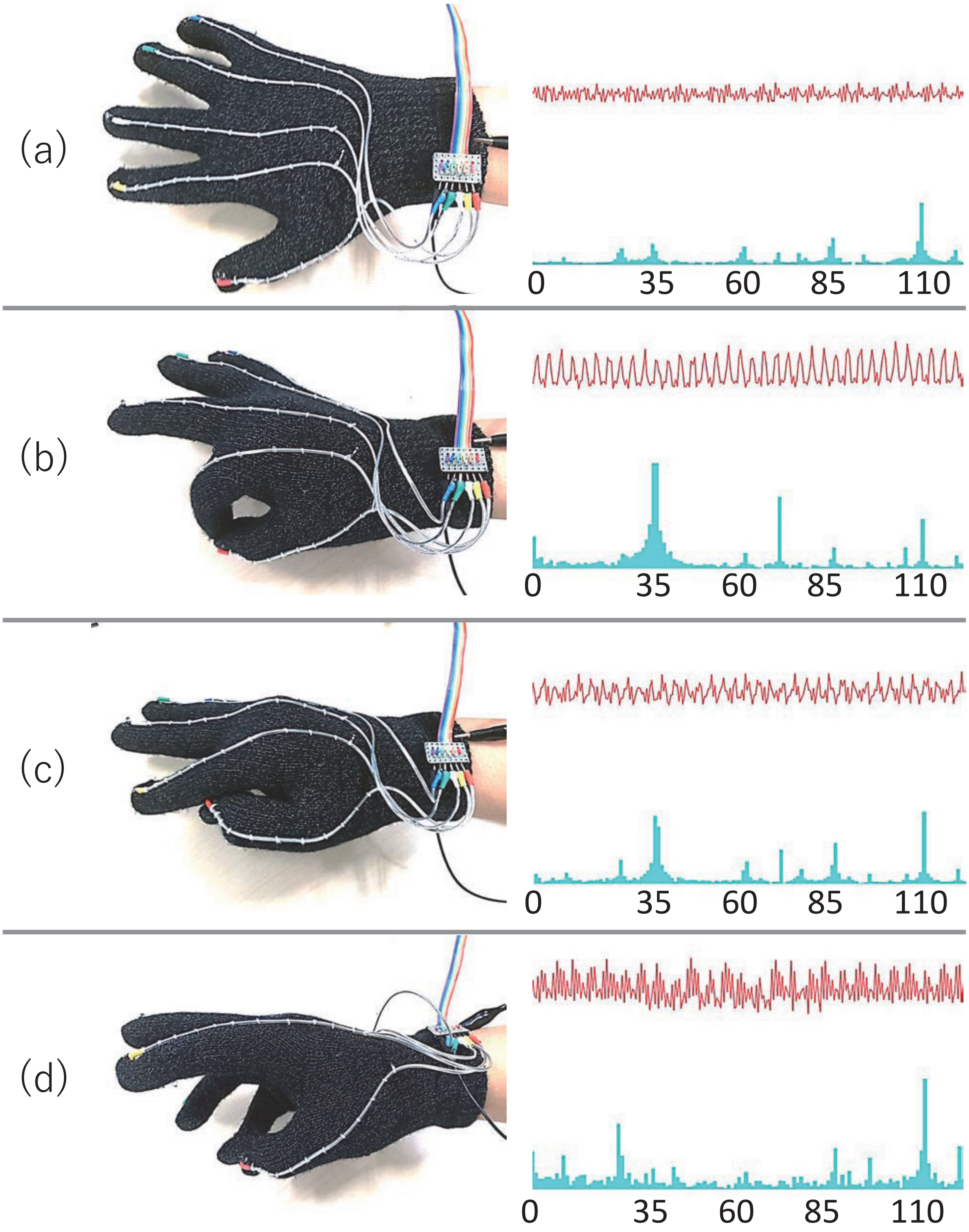


図 4.9: 指同士が接触した際の応答波形（赤線）および周波数スペクトル（青線）

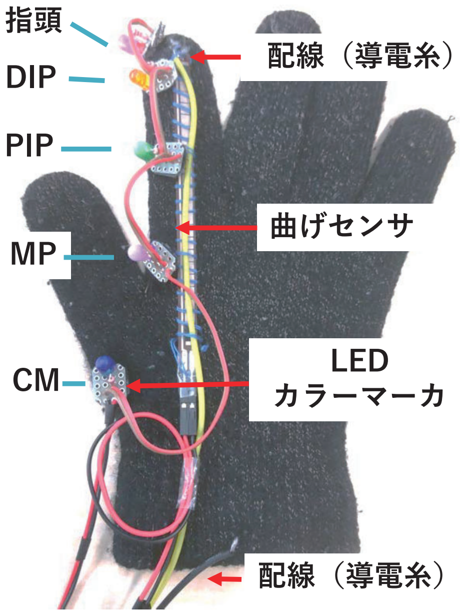


図 4.10: 実験用手袋

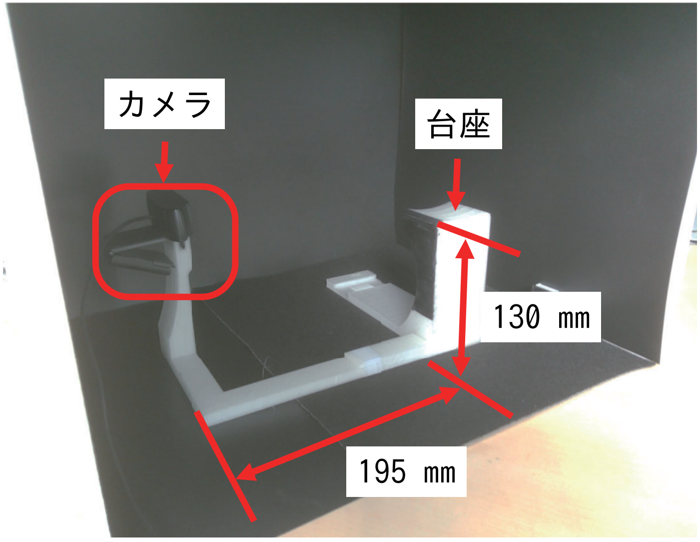
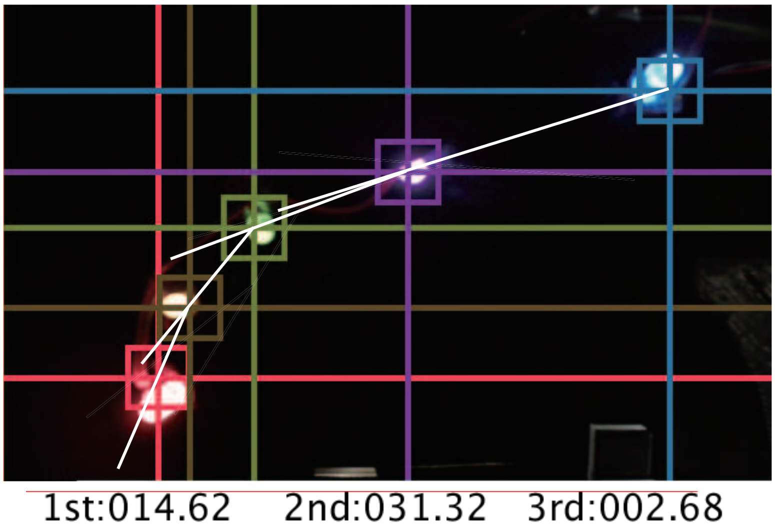


図 4.11: 実験に用いた台座および箱



```
1st:014.62    2nd:031.32    3rd:002.68
```

図 4.12: カラーマーカによる関節角度推定画面

実験内容

指を曲げた際の導電繊維，曲げセンサの抵抗値ならびに指の関節の角度を比較するために，図 4.10 に示す手袋および図 4.11 に示す実験治具を製作した．

図 4.10 の手袋には導電繊維の抵抗値を計測するために，人差し指部分の先端および手首部分に導線を縫い付けた．また比較のために，人差し指に沿うように曲げセンサ（Spectrasymbol 社，FLEX SENSOR，4.419 インチ）を手袋に糸を用いて縫い付けた．さらにカメラを用いて各指の関節位置を推定するために各関節（指頭，遠位指節間関節：DIP，近位指節間関節：PIP，中手指節間関節：MP，手根中手関節：CM）に，カラーマーカとして色の異なる LED を面ファスナを用いて貼り付けた．

次に図 4.11 に示す実験治具について説明する．図 4.11 の実験治具は，カメラおよび手の位置を固定するための台座，ならびに台座の周囲の光を遮断するための黒色の紙製の箱から成る．

実験協力者には右手に手袋を装着し，実験治具に手を固定した状態にて，指を自然に曲げる動作を 10 回ずつ行ってもらった．その際，人差し指の先端が手の平に接触しないよう指示した．また，（1）PIP のみ，（2）MP のみ，（3）指全体，の曲げ動作を行ってもらった．指を曲げる際はゆっくり行うように指示した．さらに，指を曲げている間カラーマーカを隠さないように指示した．各動作毎に分圧回路およびマイコン（Arduino 社，Arduino Nano）を用いて導電繊維ならびに曲げセンサの抵抗値を計測し，シリアル通信にて PC に送信した．併せてカメラ（Logicool 社，HD Pro Webcam C920，640 × 480 px，60 fps）の映像から図 4.12 のようにカラーマーカの重心位置ならびに各関節の角度を推定した．指の各関節角度推定にゴニオメータ等の角度を計測するための計器ではなくカメラを用いたのは，リアルタイムに指の関節角度を変化させた際の抵抗値の変化を計測することにより，4.3.1 節にて述べた指の曲げはじめならびに終わり時に一時的に抵抗値が上昇するなど，過渡的な応答も併せて評価するためである．

実験協力者ごとの，PIP のみを曲げた際，MP のみを曲げた際ならびに指全体を曲げた際の導電繊維ならびに曲げセンサの抵抗値の散布図を図 4.13，図 4.14，図 4.15 に示す．これらの散布図において赤色の実線は近似直線である．なお導電繊維および曲げセンサの両方にて，同じ抵抗値の際に指の角度が分散しているのは，カメラに映るカラーマーカである LED の形状が，角度によって変わることにより重心位置がぶれたためである．

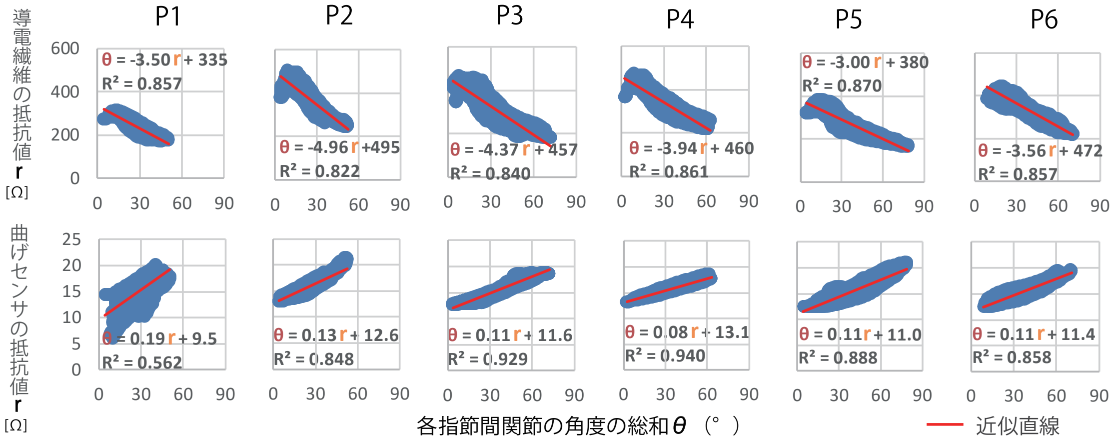


図 4.13: PIP のみ指を曲げた際の導電繊維および曲げセンサの抵抗値

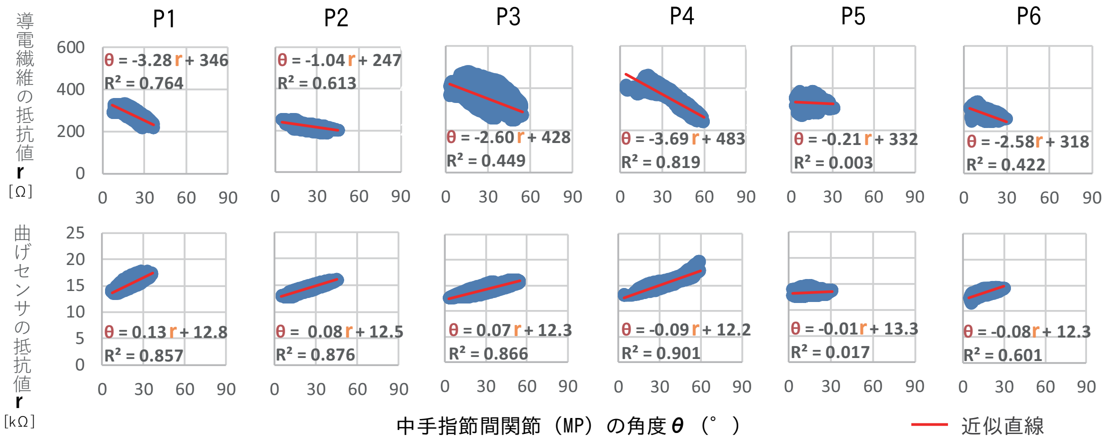


図 4.14: MP のみ指を曲げた際の導電繊維および曲げセンサの抵抗値

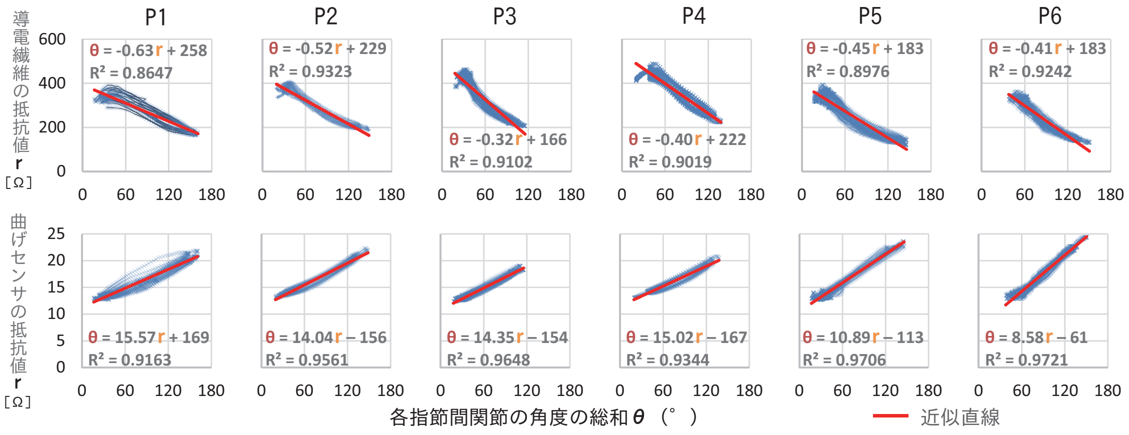


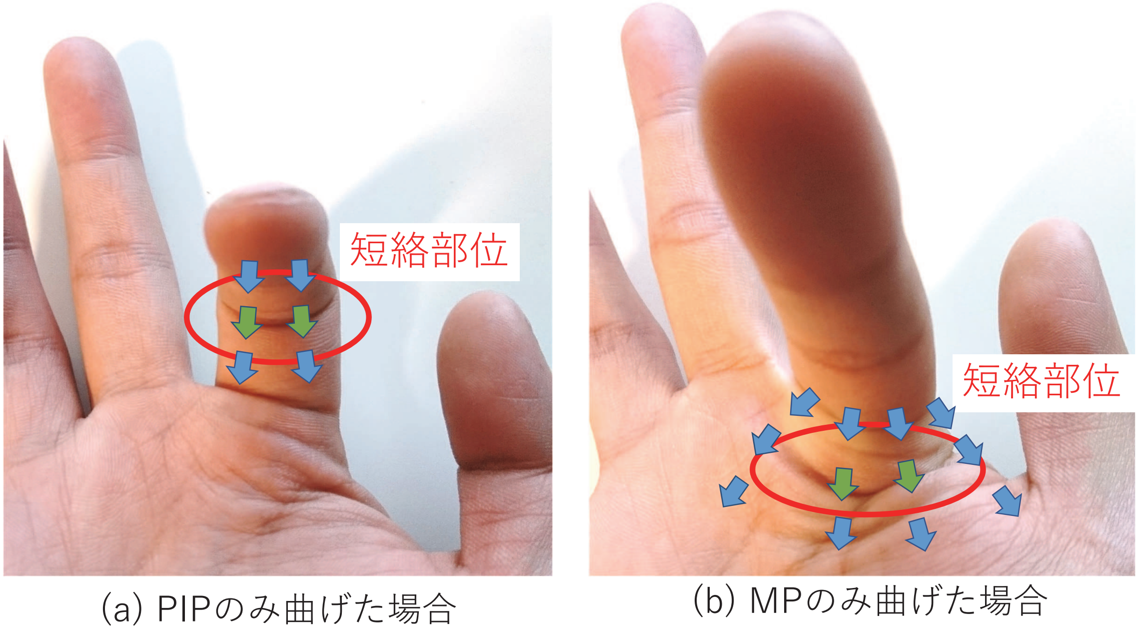
図 4.15: 指全体を曲げた際の導電繊維および曲げセンサの抵抗値

これらの散布図より，指を曲げた際に導電繊維の抵抗値が減少していることから，提案手法にて指の曲げ具合を推定可能であることがわかる．また，指を曲げた際に曲げセンサは抵抗値が上昇しているのに対し，導電繊維は抵抗値が減少していることがわかる．

図 4.13 ならびに図 4.14 より，全ての実験協力者の近似曲線の傾きは PIP のみを曲げた際の方が大きい．これは図 4.16 に示すように，MP の場合は指を曲げた際に短絡される部位が手のひら側の一部のみであるのに対し，PIP の場合は関節部全体が短絡されるため，抵抗値変化が大きくなったと考えられる．本実験において，DIP のみ曲げることは難しいため評価を行っていないが，DIP においても PIP と同様のことが言えると考えられる．そのため，提案手法は特に DIP および PIP の曲げ具合を推定していると言える．

図 4.15 の結果から，指全体の指の各関節の角度と導電繊維の抵抗値の関係は，どの実験協力者も決定係数が $R^2 > 0.8$ であるため，線形性があると言える．しかし，ユーザごとに近似曲線の傾きや切片が異なっているため，ユーザごとにキャリブレーションが必要であると考えられる．

図 4.15 より，実験協力者ごとに導電繊維の抵抗値を入力とし各指節関節の角度の総和を推定する際の標準誤差を，回帰分析により求めた．その結果，P1：16.10°，P2：9.62°，P3：8.18°，P4：9.74°，P5：11.90°，P6：7.96° となった．また，曲げセンサを入力として各指節関節の角度の総和を推定した際の標準誤差を同様に求めた．その結果，P1：12.73°，P2：7.75°，P3：5.12°，P4：7.94°，P5：6.37°，P6：4.83° となった．これらの結果より，提案手法は曲げセンサに比べて，平均 3.13°（SD=1.24°）推定の際の誤差が大きいことがわかる．これは提案手法において指を曲げた際に布のずれやたわみ方の変化によって導電繊維の短絡箇所の位置や短絡する面積が変わるためと考えられる．この問題を解決するために，一様に導電性を持った導電布等を手袋に用いることにより導電繊維同士の短絡の仕方の変化を減らす手法が考えられる．



(a) PIPのみ曲げた場合

(b) MPのみ曲げた場合

図 4.16: 関節ごとの指を曲げた場合に短絡する部位

4.4.2　実験 2：片手における指同士の接触推定手法の評価

指同士の接触を交流信号の伝播を用いて推定する手法の精度を評価する実験を行った．研究室内の実験 1 とは異なる大学生および大学院生 6 名（22–25 歳，平均年齢 23.3 歳，男性，全員が右利き）を実験協力者として実験を行った．また各実験協力者の手長は平均 17.84 cm（SD=1.34）であった．

実験設計

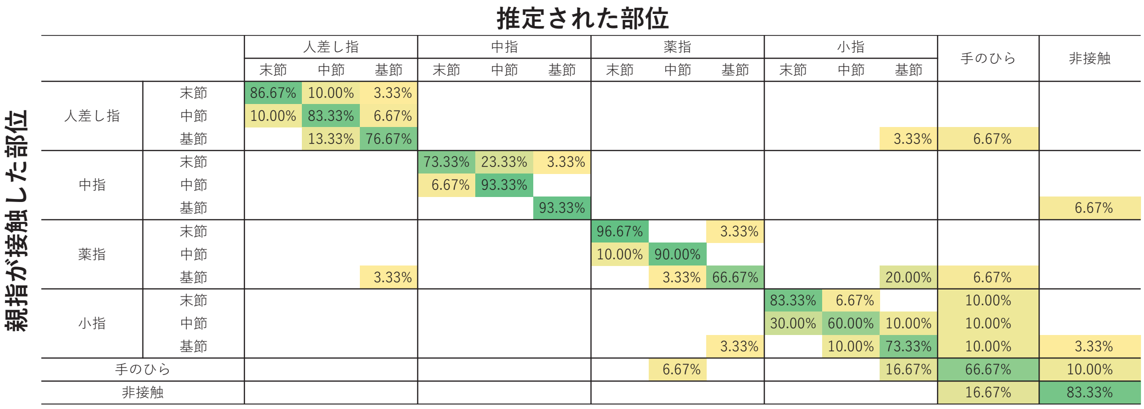
実験には図 4.7 の回路および手袋を用いた．回路はシリアル接続にて PC（VAIO Z VJZ131A11N, OS: Windows 10 Pro，CPU: i7-5557U，RAM: 16GB）に接続した．この PC 上にて入力信号の FFT（ウィンドウサイズ 128，得られる周波数範囲 0–125 Hz，分解能 0.975 Hz）を行い，結果のデータから印加した信号に対応する周波数のパワーのみを入力とした機械学習を用いて接触位置推定を行った．機械学習には LIBSVM [CL11] を用いた．

実験協力者は図 4.7 の手袋を右手に装着してもらった．その後，実験協力者は実験者が指示した，各関節の手の平側に親指を用いて接触してもらった（実験者に指示されてから，その動作が完了するまでを 1 試行とする）．その際，実験者は PC 画面に映された波形を確認し，指を接触している際に指を離した状態と同じ波形である場合は手袋の導電繊維同士の接触がうまくいっていないため，一度親指を離してから再度親指を接触してもらった．また，人差し指–小指の 4 指の間は開いた状態にて行ってもらった．人差し指–小指の 4 指の順に，それぞれ指の先端から根本に向けて 3 箇所の指骨を順に親指で接触してもらった．その後，手のひらに親指で接触した後，最後に手を開いてもらった．これらの計 14 回の試行を 1 セッションとする．

はじめに 2 セッション行い，学習データを作成した．この時，1 試行あたり，周波数スペクトルを 5 回記録した．この合計 2 セッション × 14 試行 × 5 回 = 140 回分の学習データを用いて推定モデルを生成した．その後，評価のために 5 セッション行った．この時各試行において，実験協力者が指を接触してから，応答波形が安定するまで待ち（約 1 秒），接触位置推定を行い，推定された部位の記録を行った．結果として，6 名 × 5 セッション × 14 試行 = 420 試行分の接触位置推定を行った．

結果および考察

表 4.1: 各指の節に接触時における推定結果の混同行列



推定された部位

親指が接触した部位

		人差し指			中指			薬指			小指			手のひら	非接触
		末節	中節	基節	末節	中節	基節	末節	中節	基節	末節	中節	基節		
人差し指	末節	86.67%	10.00%	3.33%											
	中節	10.00%	83.33%	6.67%											
	基節		13.33%	76.67%									3.33%	6.67%	
中指	末節				73.33%	23.33%	3.33%								
	中節				6.67%	93.33%									
	基節						93.33%								6.67%
薬指	末節							96.67%		3.33%					
	中節							10.00%	90.00%						
	基節			3.33%					3.33%	66.67%			20.00%	6.67%	
小指	末節										83.33%	6.67%		10.00%	
	中節										30.00%	60.00%	10.00%	10.00%	
	基節									3.33%		10.00%	73.33%	10.00%	3.33%
手のひら									6.67%				16.67%	66.67%	10.00%
非接触														16.67%	83.33%

表 4.1 に推定結果の混同行列を示す．接触した位置の推定精度は平均 80.5%であった．また触れた指の推定のみに限定すると，人差し指が 96.7%，中指が 97.8%，薬指が 90.9%，小指が 91.1%の精度（平均 93.9%）にて推定できた．

表 4.1 の誤推定の内訳は，同じ指における指骨同士の誤推定の合計が 56.8%，応答波形の振幅が低くなる基節骨，手のひら，非接触間の誤推定の合計が 35.1%，指の末節骨および中節骨と非接触などその他の誤推定の合計が 8.1%であった．このことから，指に印加する交流信号の振幅をさらに増幅することにより，SN 比が向上し，推定率を向上させることができると考える．また他の指との間の誤推定が 0 %であった．このことから，印加する周波数が適切だったことがわかる．

4.4.3　実験 3：両手における指同士の接触推定手法の観測

電源が独立した手袋同士が接触した際に，片方の手袋の信号の伝搬をもう一方の手袋を用いて推定可能かどうかを調査した．

まず，ファンクションジェネレータ（Digilent 社，Analog Discovery）を用いて，著者の右手に装着した手袋の人差し指に 10 kHz，中指に 20 kHz の交流信号を印加した．また左手の手袋の人差し指の先端にオシロスコープ（RIGOL TECHNOLOGIES INC.，DS1054）のプローブを装着した．この時，オシロスコープと電源を独立させるために，ファンクションジェネレータの電源をバッテリ駆動のノート PC から供給した．この状態にて両手の指を接触させた際の応答波形を図 4.29 に示す．

図 4.29a は右手の人指し指と左手の人差し指の末節骨同士を接触させた際の応答波形である．応答波形の周波数スペクトルにおいて 10 kHz のパワーが高くなっていることから，右手の人差し指の交流信号が左手に伝搬していることがわかる．次に，図 4.29b のように右手の人差し指を，左手の人差し指に接触させたまま末節骨から基節骨に向かって動かしたところ，10 kHz のスペクトルが減少した．最後に，図 4.29c のように右手の中指と左手の人差し指の末節骨同士を接触させたところ，20 kHz のスペクトルが上昇した．

以上の結果より，手同士の接触ならびに接触している指の推定ができることがわかる．また 4.4.2 節と同様に指の接触位置が推定できることがわかる．

4.5　計測回路の改良

これまでに述べた Grov の回路は，実装の容易さからモジュール化されたマイコンならびに信号発生器を用いていた．そのためサイズが大きく，金銭的コストが高くなる問題があった．そこで，各モジュールに搭載されているチップ IC を直接搭載し，共通部分を省略することにより回路の小型化および軽量化を図ったため，その実装を述べる．

4.5.1　小型・軽量化

Grov を改良し，50 ドル以下で製作可能であり，抵抗値計測回路，正弦波発信機能，無線通信モジュール搭載ならびにフーリエ変換機能を搭載した回路の制作を目指した．試作した回路の例を図 4.18 に示す．図 4.18a は初めに計測技術の可否を調査するために製作したデバイスである．図 4.18a の回路では，回路は正弦波信号を手袋に印加し，その応答を観察もしくは導電繊維の抵抗値を計測するのみであり，フーリエ変換は計測値を送信した PC 上で行っていた．図 4.18b の回路は図 4.18a の回路をコンパクトにし，Analog Devices 社

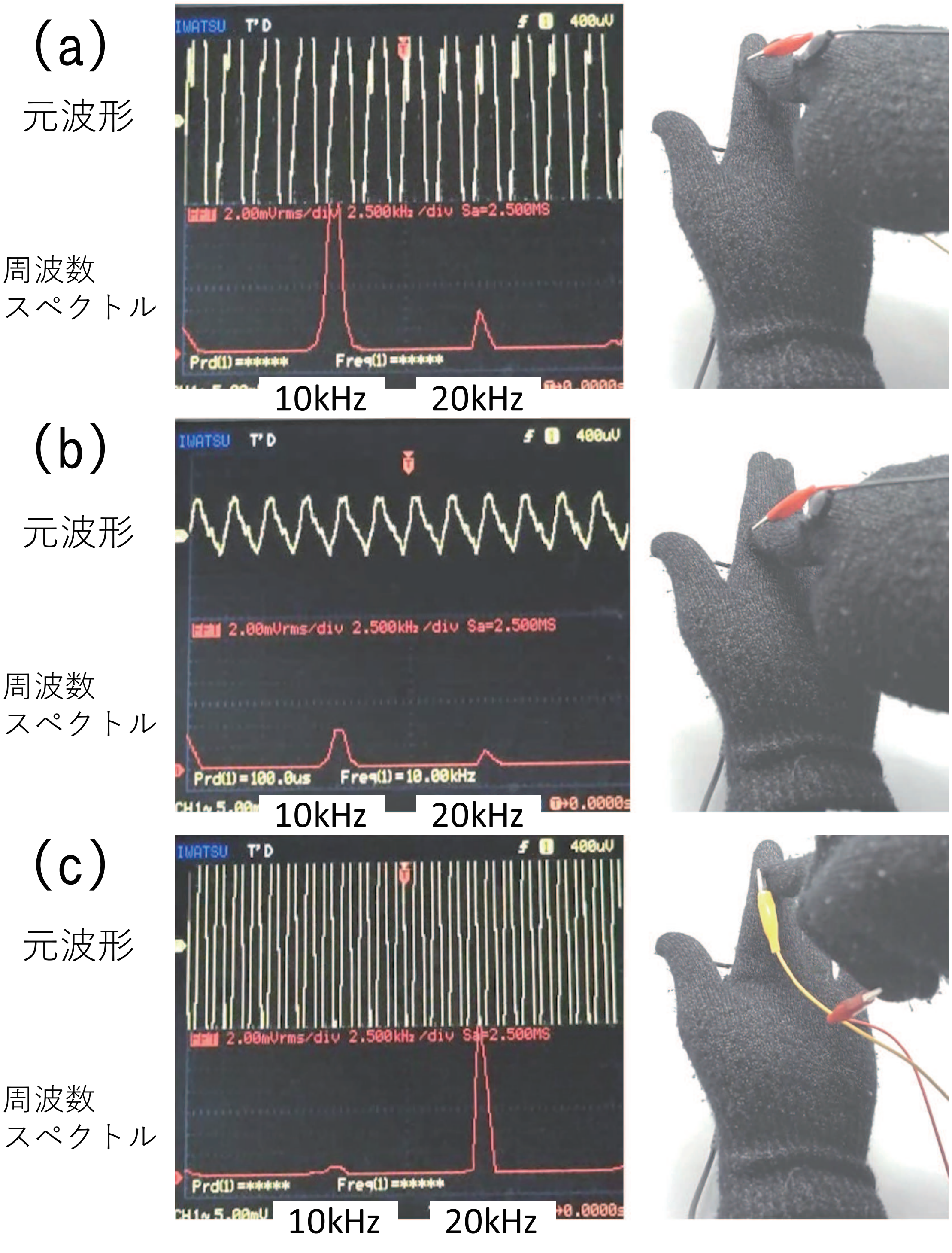


図 4.17: 両手の指が接触した際の応答波形，右手の人差し指に 10 kHz，中指に 20 kHz の信号を印加（a：右手の人指し指が左手の人差し指の先端に接触．b：右手の人指し指が左手の人差し指の根本に接触，c：右手の中指が左手の人差し指の先端に接触）

の ADG2188 という 8 × 8 のクロスポイントスイッチ IC を入れることにより，手袋上のどの箇所にどの信号を流すかを適宜切り替えることが出来るようになったものである．また，Bluetooth 通信モジュールを搭載し，無線通信のテストも含めて行った．図 4.18c および図 4.18d の回路は，図 4.18b の回路を基板化したものであり，CNC フライスを用いて加工した基板である．図 4.18c に近いパターンを 6 種類製作し，うまくチップ IC を用いた制御ができなかったため，モジュール化した基板を用いて製作し直した回路が図 4.18d である．結果的に無線通信，正弦波信号の出力，クロスポイントスイッチ IC の動作，リチウムバッテリーの電圧変換，入力信号の AD 変換等の機能が動作するのを確認した．

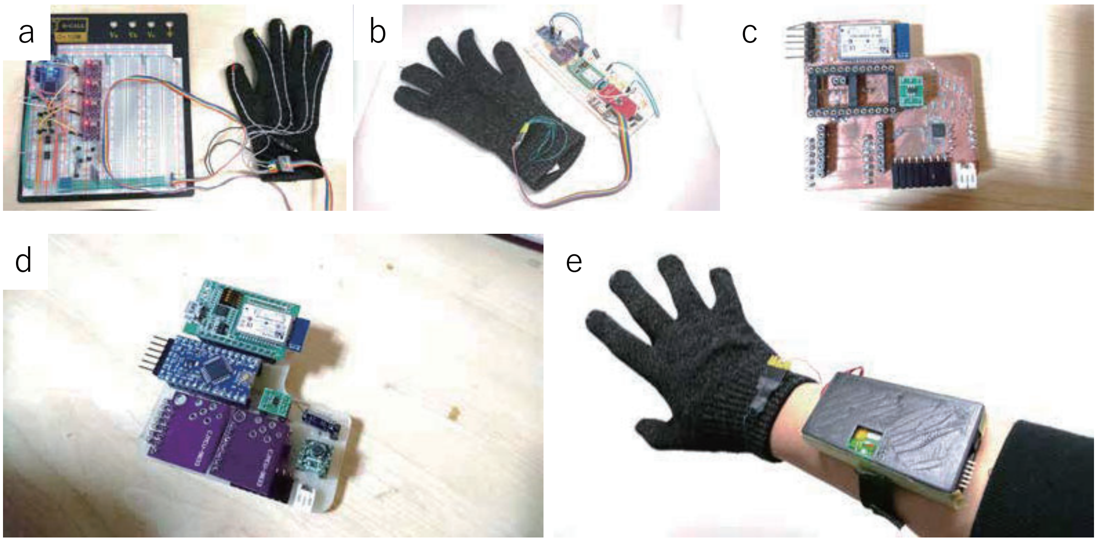


図 4.18: 試作したプロトタイプ例（a：ブレッドボードを用いた例，b：a を小型化した例，c：自作基板を用いて実装した例 1，d：自作基板を用いて実装した例 2，e：腕部に取り付けた例）

その後，図 4.18d の回路を基に一枚の板状になるように設計し直し，完成したデバイスが図 4.18e である．図 4.18e の腕部に取り付けている黒い箱の中に図 4.19 に示す回路が入っている．また，回路図を図 4.20 に示す．本回路の原価は約 40 ドル（通信モジュール 15 ドル，マイコン 3 ドル，クロスポイントスイッチ IC10 ドル，正弦波発信モジュール 10 ドル，ADC3 ドル，基板 1 ドル，その他 1 ドル）である．

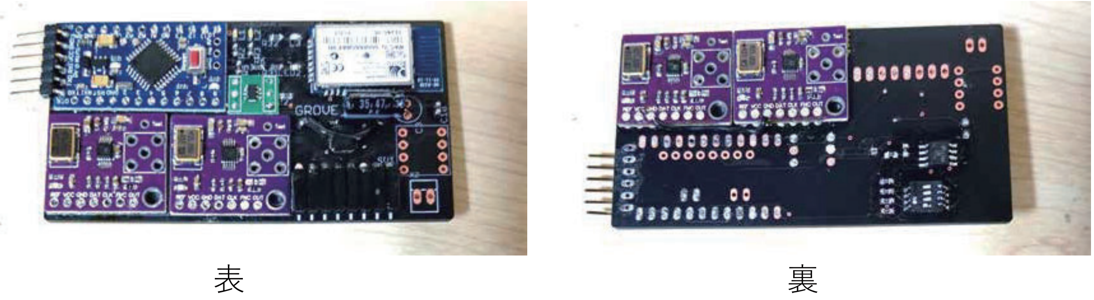


図 4.19: バージョン 2 の計測回路

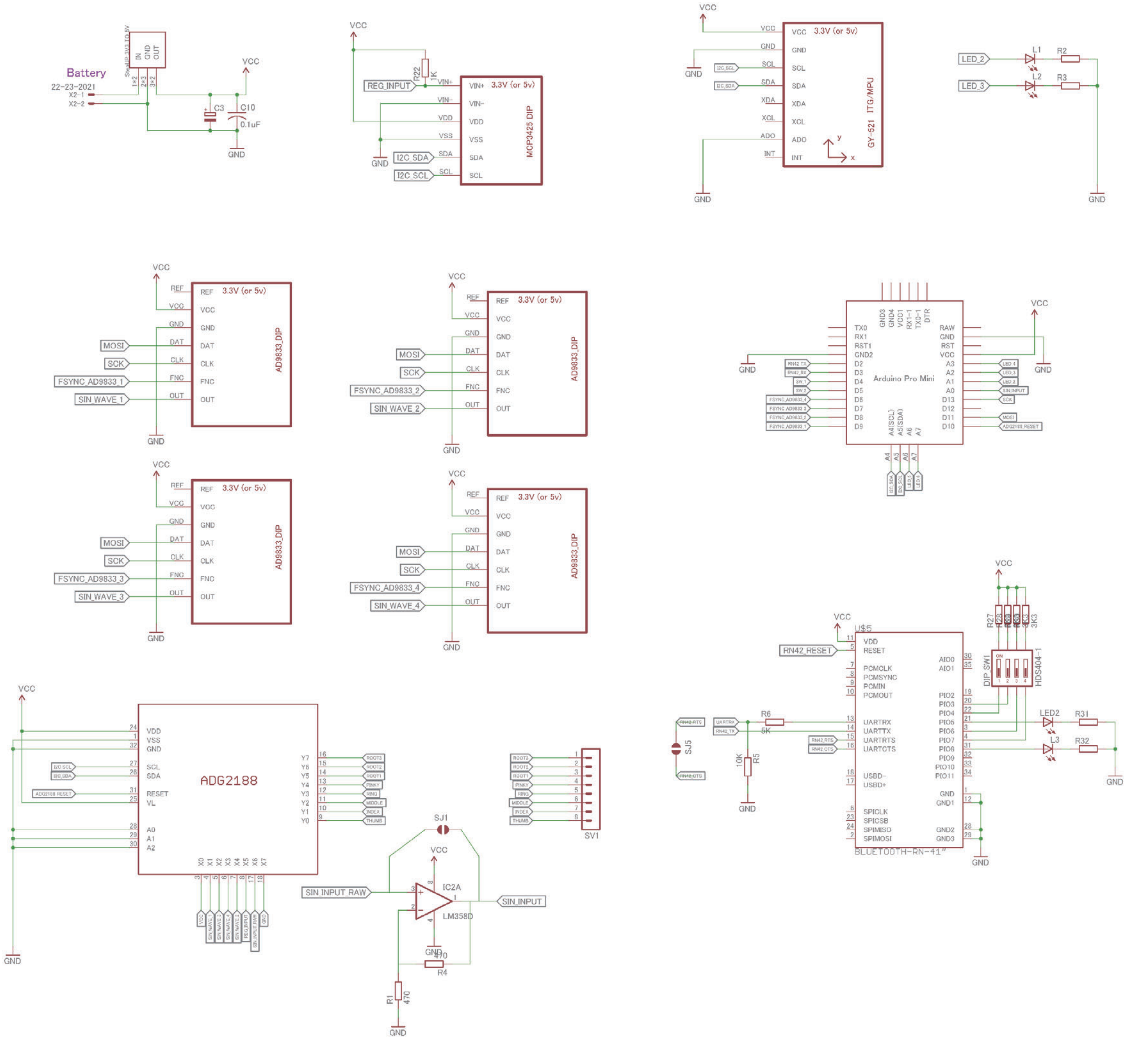


図 4.20: バージョン 2 の回路図

また，図 4.19 に示したバージョン 2 の回路をさらに小型化したバージョン 3 を図 4.21 に示す．本バージョンにて正弦波発振モジュールではなく，モジュールに搭載されている IC（Analog Devices 社製，AD9833）を直接搭載することにより小型化した．

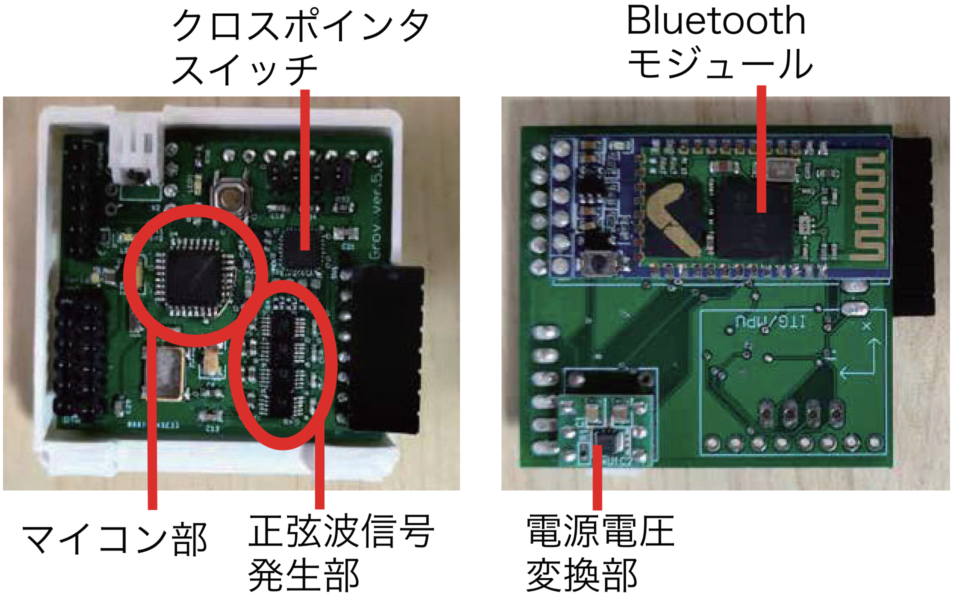


図 4.21: バージョン 3 の回路

4.6 SDK の制作

本技術を用いてアプリケーションを容易に開発することができるように，ソフトウェア開発用キット（SDK）を開発した．SDK はマルチプラットフォームに対応しており，プログラム初心者でも簡単に GUI アプリケーションを構築可能な Processing 言語向けのものとした．SDK は Processing 向けの統合開発環境（IDE）上で回路との通信モジュールのテストやデータ処理等のテストを行い，Java 言語用 IDE である Eclipse Java Oxygen 上に，Processing 言語で書いたものを Java 言語に変換したコードを移植し，パッケージ化（jar ファイル化）を行った．また併せて Javadoc 環境を用いて SDK のドキュメントの自動生成を行った．SDK の構成を図 4.22 に，SDK を用いたコーディングの例を図 4.23 に示す．パッケージには 3 つの Core モジュール（Calibration.class，Hand.class，Controller.class）及びインタフェースモジュール（Grov.class）から構成されている．Calibration モジュールはセンサ値の初期化を行うためのモジュールであり，開発者は本モジュールを Grov モジュールを通して呼び出すことにより Calibration 用のウィンドウを開くことができる．Hand モジュールは受信したセンサ値を元に指の曲げ具合を推定し，指同士によって伝搬してくる信号の強度を元に手形状を推定する．Controller モジュールはデバイスとのセンサ値の受信および受信したパケットの解析を行う部分である．これらのモジュールは Grov モジュールを通じて呼び出すことにより制御することができる．また，本パッケージを用いたサンプルアプリケーションとしてジェスチャ認識アプリならびにハンドモデルの可視化アプリを製作し，SDK 内にパッケージングした．

本 SDK を用いたプログラムの例を図 29 に示す．図 29 に示す通り，ユーザはライブラリの読み込み，インスタンスの生成（生成時に Bluetooth モジュールのポート番号を指定する

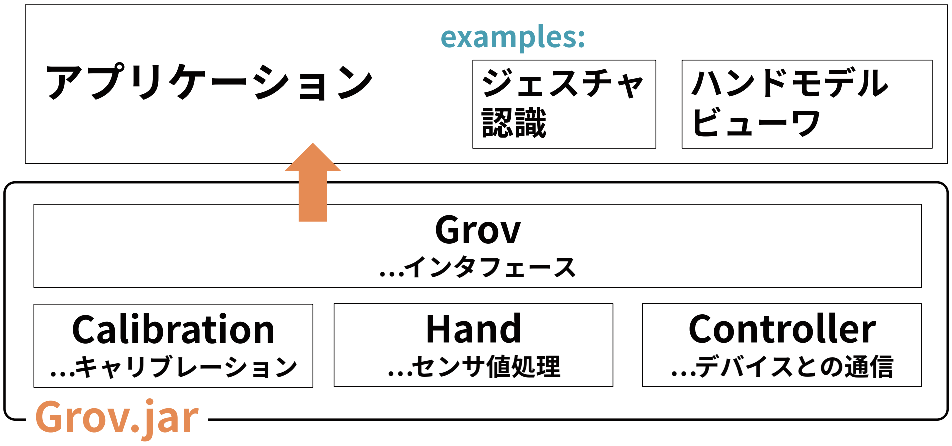
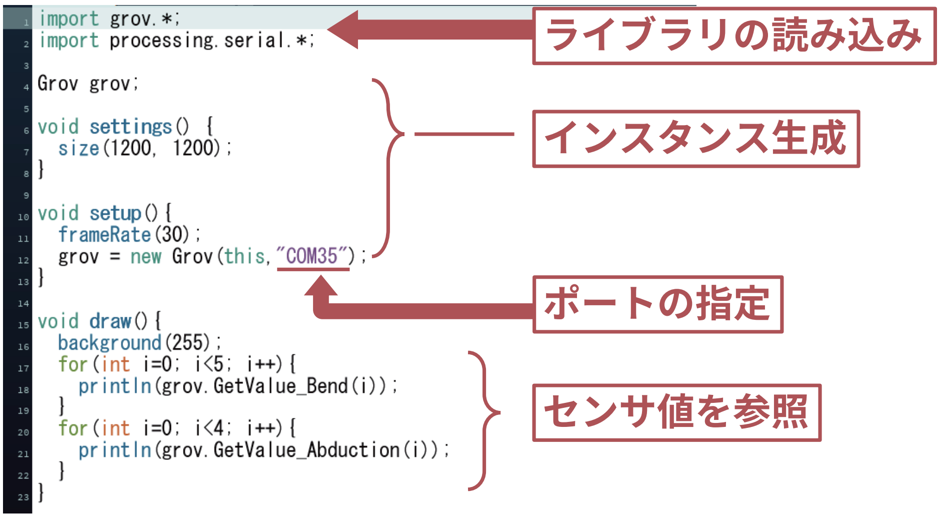


図 4.22: SDK の構造



```
import grov.*;
import processing.serial.*;

Grov grov;

void settings() {
  size(1200, 1200);
}

void setup(){
  frameRate(30);
  grov = new Grov(this,”COM35”);
}

void draw(){
  background(255);
  for(int i=0; i<5; i++){
    println(grov.GetValue_Bend(i));
  }
  for(int i=0; i<4; i++){
    println(grov.GetValue_Abduction(i));
  }
}
```

図 4.23: Processing における SDK を用いたコーディング

必要がある）を行うのみで，センサ値にアクセスできるようになる．こようにデバイスとの通信等の複雑な処理を内包化し，容易にアプリケーション開発ができるような SDK の開発を行った．

4.7　把持物体認識

HMD を用いた没入型 VR コンテンツの操作中に，棒やボールのようなオブジェクトを把持した際に，その把持したオブジェクトを認識し，VR 空間上に反映したい場合がある．例えばレーザー銃とビーム剣を入れ替えながら VR 上のモンスターと戦うようゲームが考えられる．こういったアプリケーションの構築を可能にするために，把持物体認識を行う技術を開発した．把持物体の認識には，図 4.24 のように，自作の固有の周波数を出力する電池を搭載したマーカを用い，マーカを把持した際に手袋に伝搬してくる信号を指の接触認識と同様の手法にて解析し，把持マーカの識別を行った．図 4.25 に実際にマーカの識別を行った際のアプリケーションの画面を示す．

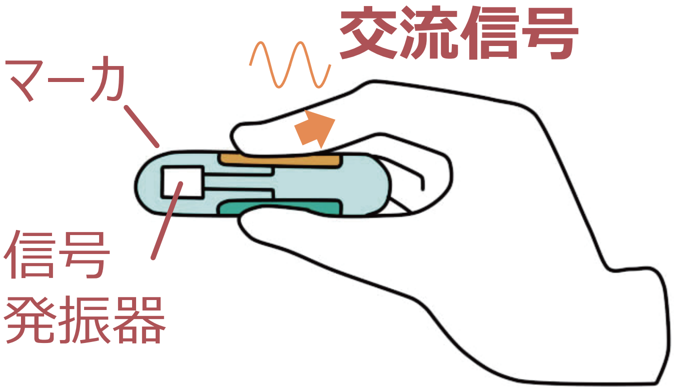
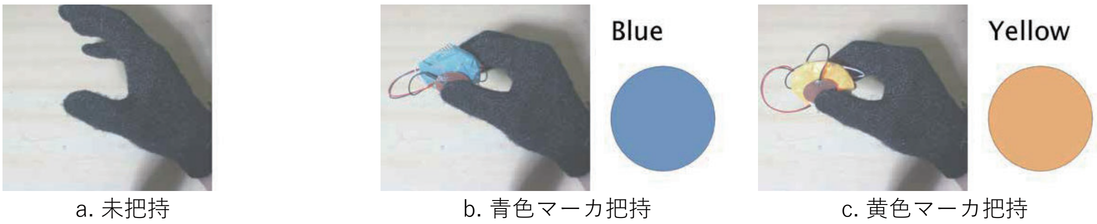


図 4.24: Grov を利用した把持物体認識



a. 未把持
b. 青色マーカ把持
c. 黄色マーカ把持

図 4.25: 把持マーカ識別の様子

本実装にて用いたマーカは，図 4.26a に示すように正弦波発振モジュール，マイコン（Arduino Pro Mini），ならびにリチウムイオンバッテリを内蔵しているが，この他にも，図 4.26b に示すように安価なマイコン（例：Atmel 社製，ATTiny13a）およびコイン電池のみを用いて実装することもでき，その場合マーカ 1 個あたり 1–2 ドル程度のコストにて実装できる．

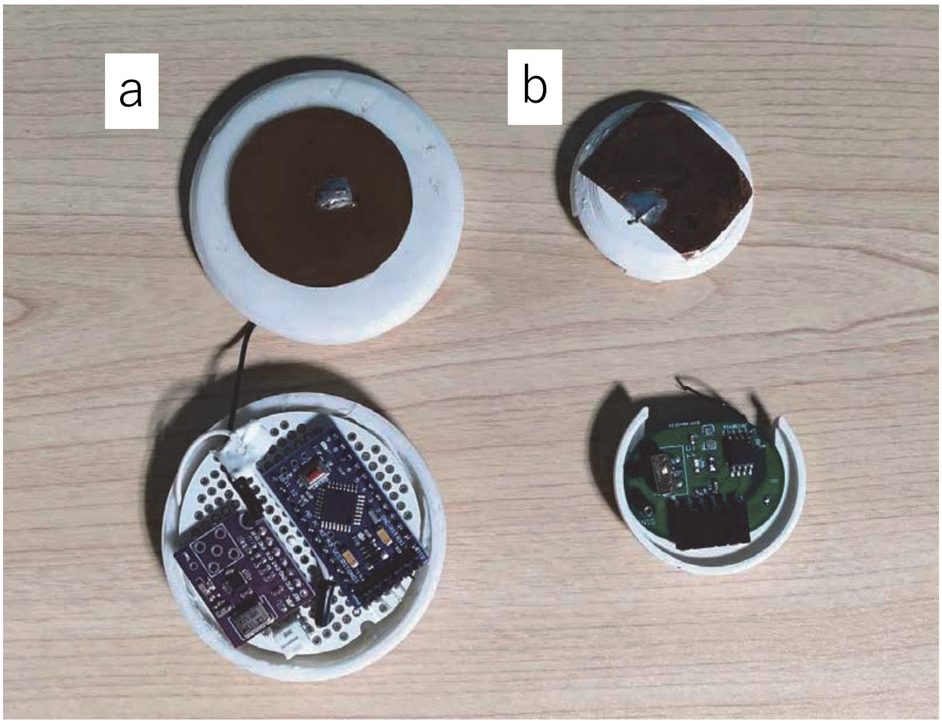


図 4.26: マーカの内部構造（a：正弦波発振モジュール，マイコン（Arduino Pro Mini），ならびにリチウムイオンバッテリを用いた例，b：安価なマイコン（例：Atmel 社製，ATTiny13a）およびコイン電池のみを用いた例）

4.7.1　マーカの形状

図 4.27 にアプリケーションに合わせた形状をしたマーカの例を示す．図 4.27a はソード型のマーカの例であり，マーカを把持した際に持ち手の上部の電極に親指が，下部の電極にその他の指が触れるように設計した．図 4.27b はガン型のマーカの例であり，マーカを把持した際に，持ちての上部の電極に親指が，ガンのトリガ部分に人差し指が，下部の電極にその他の指が触れるように設計した．また，トリガはマーカ内部にて輪ゴムを用いて，トリガを引く際に軽く反発力が発生するようになっている．このように，マーカは固有の周波数を出力する回路および 2 つの電極を備えれば，図 4.27 に示すように，アプリケーションに合わせた形状を設計することができる．

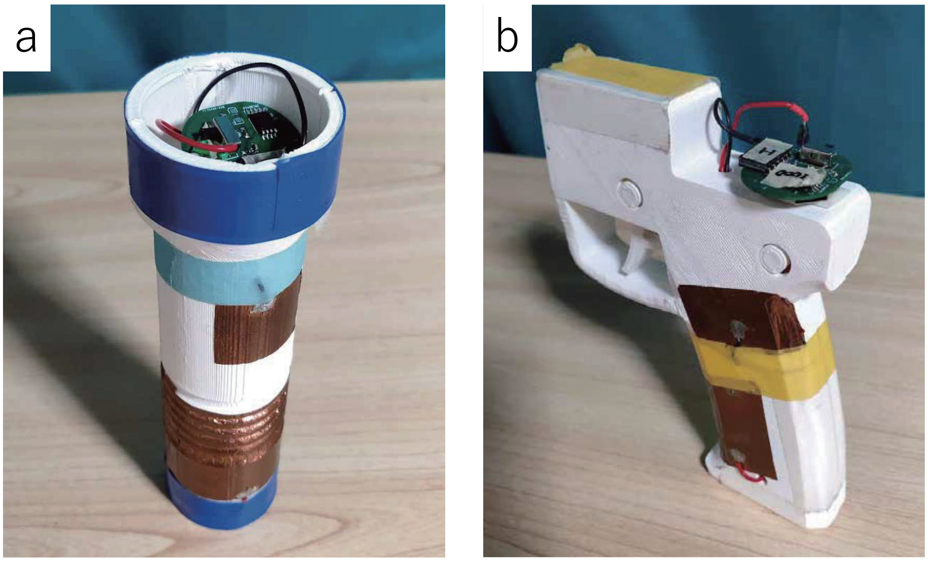


図 4.27: アプリケーションに合わせた形状をしたマーカの例（a：ソード型，b：ガン型）

4.7.2　発展案

4.4.3 節にて示したように，Grov を用いることにより電気的に独立した物体に交流信号を流すことにより，接触ならびに接触した位置を認識できる．これを例えば図 4.28 左のように竹刀の持ち手に交流信号を流したり，物体表面の部位ごとに固有の周波数の交流信号を流すことにより，ユーザが把持した物体および把持している位置を認識できる．そのためスポーツ選手の把持物体の握り方の推移等の動作分析に利用することができる．

また，提案手法は手袋に編み込まれた導電繊維が表面に露出していることを利用している．そのため，例えば手袋を装着したまま導電性の物体を把持した場合，把持物体を介して電流の経路が短絡するため，提案手法の計測回路は導電性物体表面の抵抗値を計測することになり，手形状の認識を行うことができない．しかし，導電物体に逐次的に周波数が変化する掃引信号を印加することにより周波数特性を計測し，物体への把持状態等を認識する技術がある [SPH12]．提案手法においても同様に掃引信号を印加することにより，手を用いて触れた物体の周波数特性等から，非電源の導電物体の把持状態を認識できる可能性がある．

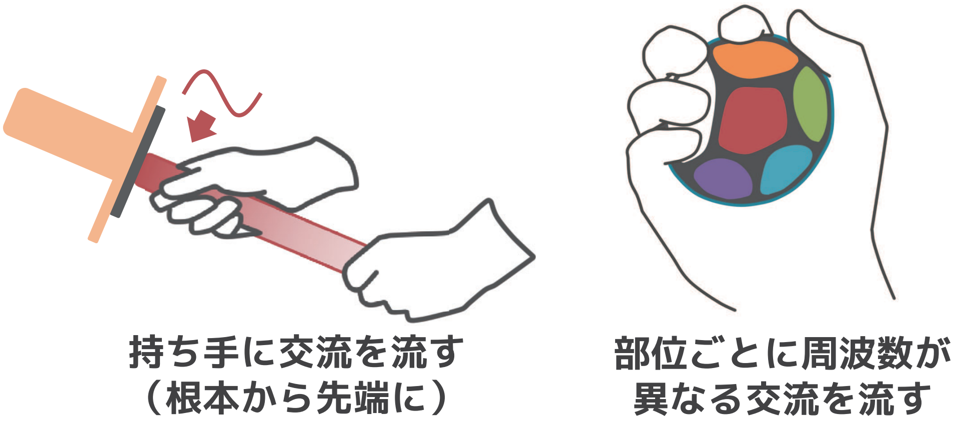


図 4.28: Grov を利用した把持物体認識の応用例

4.8　議論

Grov の問題点や検証すべき点について議論する．

4.8.1　一時的な抵抗値の上昇について

図 4.15 より，指の曲げ角の総和が 0–10° 付近では抵抗値が上昇し，その後減少することがわかる．これは，指を曲げ伸ばしした際に，4.3.1 節にて説明した指の曲げと抵抗値の関係以外に，導電繊維の伸縮による抵抗値の上昇が起こっていると考えられる．つまり，指を曲げた際に，手袋表面上にて短絡が発生しない場合，抵抗値の減少は起きないが，指の甲側（爪がある側）にて導電繊維が伸ばされることによる抵抗値の上昇が起こっており，その影響が観測された結果と考えられる．また，関節部にて短絡が発生すると，その際にできた経路の抵抗値が指の甲側よりも十分に小さい（電流が短い経路にほとんど流れる）ため，その影響は無視できると考えられる．今後，この現象を用いて指の曲げ動作の開始および終了時点の検出に利用できる可能性がある．

4.8.2　人体への影響

手袋に電流を流すことによる人体への影響について述べる．図 4.7 に示した本研究の回路にて，各指もしくは手形状によって異なるものの，最大電圧 3.3 V の信号が導電繊維に印加される．この時，導電繊維上では最大 120 mA 程度の電流が流れることがあるが，手の抵抗値は導電繊維よりも高く感電することはない．さらに手首が回路のグラウンドに設置されているため，手以外に電流が流れることはない．また，著者が手袋を装着したまま手袋を水道水で濡らし，抵抗値を十分に下げた状態にて人差し指の先端から手首へ電流を流した場合でも感電しないことを確認した．

4.8.3　可洗濯性の検証

Grov に用いている手袋を洗濯しても問題なく動作するかテストした．実験 1 ならびに実験 2 に用いたデータグローブから回路を外し，電極および結線付きの手袋を洗濯機に入れ

て 3 回洗濯し（その際，市販の粉洗剤を使用した），再び回路を装着して動作を確認したところ，問題なく動作した．このことから，Grov は洗濯が可能であると考えられる．

4.8.4 ユーザごとの手形状の違いについて

実験 1 において抵抗値変化は，実験協力者ごとに異なった．これは，実験協力者の手のサイズや手袋の装着の具合によるものと考えられる．本実験においては実験条件を統一するために同サイズの手袋を使用したが，実際にはユーザの手のサイズに合わせた手袋を使用する必要があると考えられる．また，ユーザごとにキャリブレーションすることにより，この影響を打ち消すことにより解決できる．ただし精度が要求されない場合は，他人のキャリブレーションを使い回すこともできる．実際にイベントにおけるデモンストレーション（TOKYO GAME SHOW 2018）にて 100 人以上のユーザに体験してもらった際に，筆者のキャリブレーションを使ってもらったが，2 名を除いて問題なく動作した．うまく動かなかった 2 名は，片方が筆者よりもとても手が大きく，もう片方がとても手が小さい人であった．ただ，その場合も，そのユーザにあわせてキャリブレーションを行い，問題なく動作することを確認した．

4.9 技術的な発展

Grov を今後さらに発展させるアイデアやその検証を述べる．

4.9.1 両手の手袋を用いた手の接触認識

右手の手袋の人差し指に 10kHz，中指に 20kHz の電気信号を印加し，左手の手袋の人差し指のオシロスコープのプローブを装着した．この状態にて両手の指を接触した際の応答波形の観測を行った．結果を図 4.29 に示す．応答波形を観測したところ，手同士の接触ならびに接触している指の認識ができることが分かった．さらに前節と同様に指の接触位置も計測できそうである．

4.9.2 抵抗値のみを利用した手形状計測手法

Grov は直流および交流信号を用いて手形状をセンシングしている．この 2 つの信号の内，特に交流信号の FFT に計算コストがサンプリングレートの低下の原因である．そこで，直流信号による抵抗計測のみを用いて手形状センシングが行えないかと考え実装した．

実装した回路の写真を図 4.30 に示す．本回路は Arduino 互換のマイコン構成部分，アナログクロスポインタスイッチ（ADG2188），および信号増幅器（LM358）にて構成される．前バージョンに比べて，正弦波信号発信部が無くなり，信号増幅器が増設された．また，クロスポインタスイッチの接続先も変更した．本回路を用いて手形状センシングを行ったところ，指の曲げのみの場合は約 100SPS 程度，指同士の接触並びにその接触位置を含めた場合は約 50SPS（SPS：サンプル/秒）程度の速度にて計測できた（前バージョンは 5–6SPS 程度）．

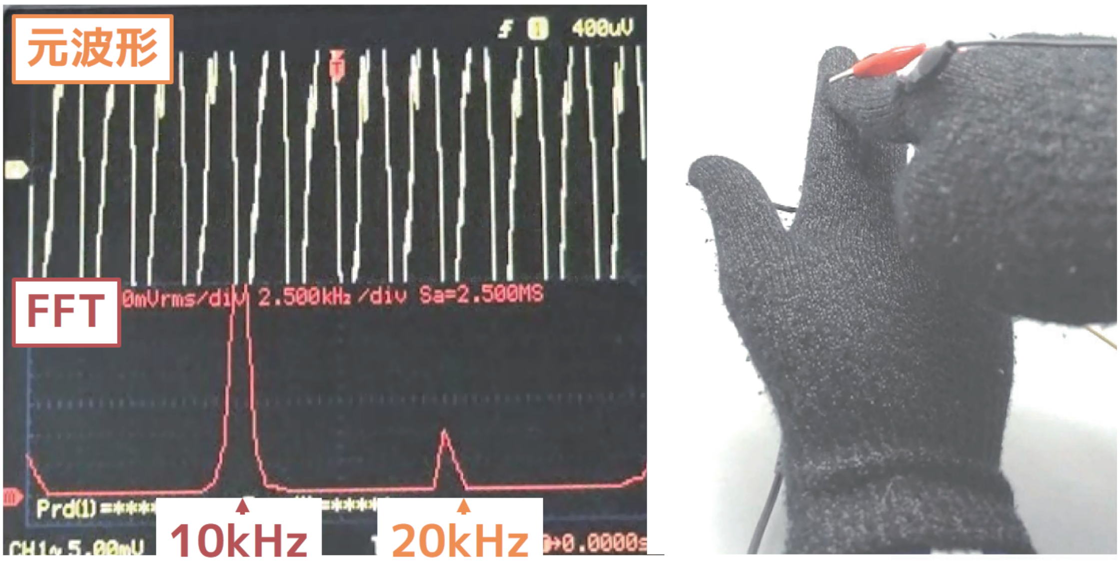


図 4.29: 各手袋が接触した際に左手の手袋に流れ込んだ信号の応答波形（右手の人差し指に 10kHz, 中指に 20kHz の信号を印加）

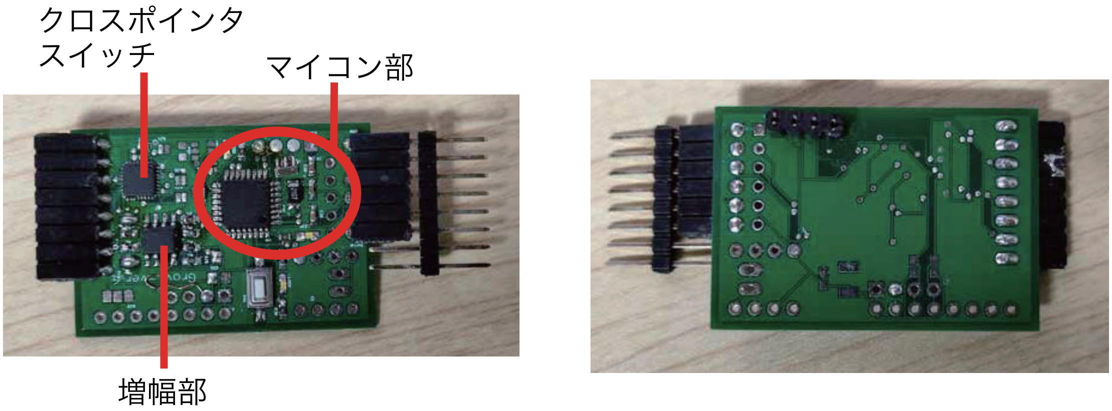


図 4.30: 新しく実装した回路

4.9.3　導電手袋の実装方法

これまでの実装では，Agloves 社製の Agloves Touchscreen Gloves M/L 兼用サイズを用いていた．Agloves Touchscreen Gloves はメッシュ状に導電繊維が編み込まれており，指を曲げ伸ばしした際に抵抗値が数十–数百 Ω にて推移するため，容易に抵抗値変化を計測することができた．他にも導電繊維編み込み手袋は市販されているが（例：ミドリ安全製，静電気拡散性手袋），抵抗値が大きく（数十 MΩ 程度），計測に適さない場合があった．

そこで，任意の抵抗値を持つ導電繊維編み込み手袋を実装するために，2 パターンの実装方法を試した．実際に製作した手袋を図 4.31 に示す．図 4.31a は手袋に導電糸（ステンレススチールファイバー製，27 Ω/m）をジグザクに編み込んだものである．本手袋を用いて指の曲げ伸ばしを行ったところ，抵抗値変化が見られた（数 Ω 程度）．本実装方法を利用すれば，電流の経路を自在に設計でき，例えば場所によって抵抗値を変えることも可能だと考えられる．また，手袋以外の衣類にも適用することができる．

図 4.31b は手袋表面に導電樹脂をプリントして実装した例である．本実装は模様付き軍手を製造するメーカに依頼して実装してもらった[3]．その際，指の曲げおよび指同士の接触（指の各節上にある四角形はそのための電極）に適しており，さらに配線が手首側に規則正しく並ぶようにパターンを設計した．また，パターンの転写にはメーカのスマートフォン対応手袋制作サービス（導電樹脂をパターンに使用）を利用した．結果，抵抗値を計測したところ，非常に高い抵抗値（数十 MΩ）が観測されたため，うまく手形状の変化を観測することはできなかった．

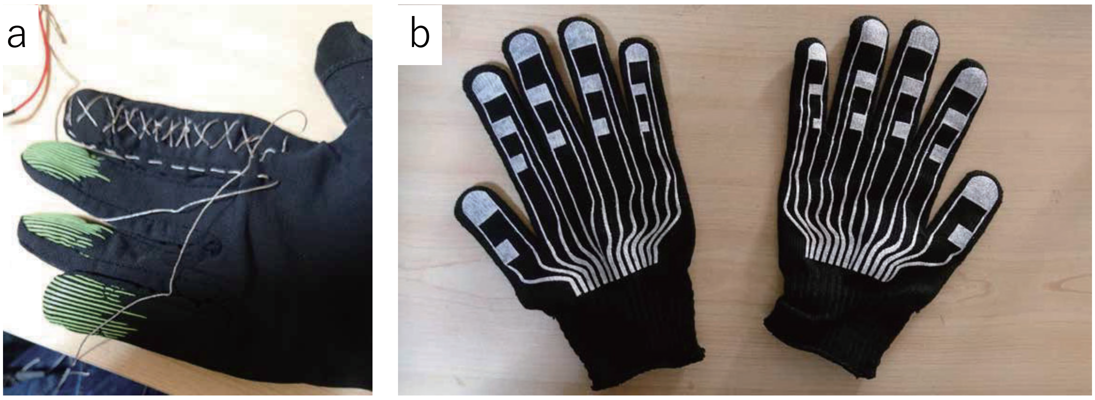


図 4.31: 導電手袋の実装方法の例（a：導電糸を縫い込んだ例，b：軍手に導電樹脂を塗布した例）

4.10　アプリケーション例

Grov は指の曲げ具合，指同士の接触ならびに接触位置といった手形状の推定および把持物体の認識が可能である．本設にて，Grov を用いたアプリケーション例を示す．

4.10.1　ロボットハンド操作

データグローブの用途として遠隔地のロボット等マニピュレータを操作する場合がある．そういったハードウェアの制御を行うアプリケーションとして図 4.32 に示すようなロボットハンドの操作を行った．図 4.32 のロボットハンドは 3D CAD を用いて設計し，3D プリンタを用いて製作したものである．各指はリンク機構を用いた指の関節の連なりを再現してあり，ひとつのサーボモータを動かすだけで，指の各関節が全て曲がるようになっている．本プロジェクトのデータグローブも指の各関節の角度ではなく，指全体の曲がり具合を認識する手法であるため，相性が良い．アプリケーションを通して実際にロボットハンドを操作できることが確認できた．

4.10.2　指文字認識

データグローブを利用したハンドジェスチャ認識の例として，図 4.33 に示す指文字認識アプリケーションを制作した．指文字は主に片手の指の曲げのみを用いて日本語の 50 音を表現可能なハンドジェスチャである．本アプリケーションは，実装した SDK によって得

---

[3] グローブファクトリー，`https://www.p-mizuho.com/`

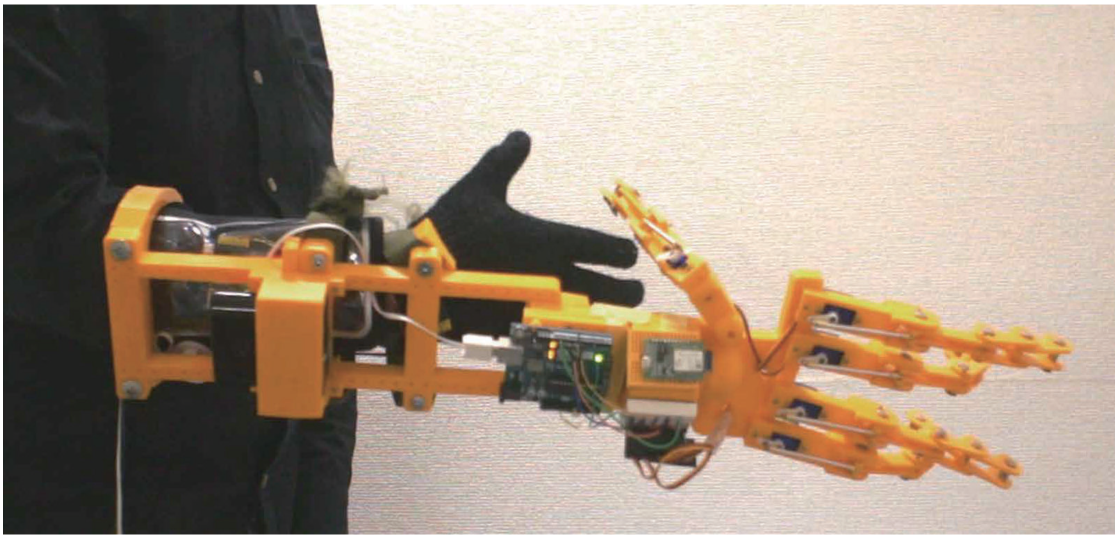


図 4.32: ロボットハンドアプリケーション

られる指の曲げや指同士の接触と行ったセンサ値を元にサポートベクタマシンライブラリである，LIBSVM（https://www.csie.ntu.edu.tw/c̃jlin/libsvm/）を用いて「あ」「い」「う」「え」「お」の 5 つの指文字の認識を行うものである．結果的に，指文字の認識を行うことができた．

図 4.33: 指文字認識アプリケーション

4.10.3　サバイバルゲーム

Grov は指の曲げ認識および把持物体認識を行うことができる．これらの認識を用いたアプリケーション例として図 4.34 節に示すサバイバルゲーム用のアプリケーションを制作し

た．本アプリケーションでは，2種類のモデルガンごとに物体認識用のマーカを貼付しており，データグローブを装着したユーザがモデルガンを把持すると，どちらのモデルガンを把持したかを認識できる．その後，人差し指を曲げると，トリガを引いたとアプリケーションが認識し，把持中のモデルガンの残弾数を減数させる．アプリケーションを利用した結果，把持しているモデルガンのマーカを認識しながら人差し指の曲げ具合の認識を行うことができることを確認した．また，この残弾数のカウントに加えて，ハンドサイン等の認識を行うことも考えられる．

図 4.34: サバイバルゲームアプリケーション

4.10.4　VR ゲーム

Grov は手形状を認識できるため，HMD（ヘッドマウントディスプレイ）を装着して行うVR ゲームにて，手形状を VR 空間上に反映することができる．また，指同士の接触位置認識を用いて文字入力を行ったり，把持物体認識を用いて，4.7.1 に示したようなソードやガンを把持した際に，その端物体を VR 空間に反映することができる．また，把持物体に対する操作（ガンのトリガを引く）も，指の曲げ認識技術を用いて認識することができる．

4.10.5　VTuber

2D や 3D のアバターを用いて動画配信を行う VTuber（Virtual YouTuber）に Grov を利用できる．筆者が複数の VTuber 事務所にてヒアリングを行ったところ，ほとんどの VTuber はカメラによって全身の姿勢を計測し，アバターに反映しているが，一方で手形状はコントローラのトリガの押し込み具合を利用した手の開き具合認識や，裏方が演者の手の形に合わせて，いくつかの手の形をスイッチングしているケースが多かった．これは，リアルタイム配信が多い VTuber では，配信中に手形状が誤って認識され，ありえない形になることを避けるためである．カメラを用いた手形状認識技術では，オクルージョン等の問題があるため，この問題が起こりやすい．一方，Grov はそういった問題が起こらない．

また，一般的に VTuber 事務所は複数の演者をかかえているため，データグローブを導入する場合は，人数分×予備を含めた個数用意する必要がある．さらに，演者は演技中に激し

く手指を動かすことが多い．そのため，安価で壊れにくいデータグローブが必要だが，既存のデータグローブはそういった問題を解決できない．一方，Grov はそういった問題を解決することができる．さらに，容易に洗濯できる利点を有する．

以上の理由より，Grov は VTuber との相性が良いと考えられる．

4.11　まとめ

手袋に編み込まれた導電繊維を用いて，指の曲げ具合および指同士の接触ならびに接触位置を推定し，把持物体を認識する手法である Grov を示した．手形状の内，指の曲げ推定には導電繊維の抵抗値の変化を用い，指同士の接触推定には各指ごとに異なる周波数の交流信号を流し，指同士が接触した際に信号が伝搬する現象を用いる．また，把持物体は指同士の接触推定と同様に，マーカごとに異なる周波数の信号を流し，マーカを把持した際に手袋に信号が伝搬する現象を用いる．

第5章　FJKeyboard：キーボード上における2つのキーの連続押下を開始符号とする操作手法

コンピュータへの入力インタフェースとして，キーボードおよびマウス，トラックパッド等のポインティングデバイスが併用されることが多い．しかしながら，これらを併用するには，両デバイスを設置するための領域が必要となる．また操作の切替のためにデバイスを持ち替えるないし手を移動する必要もある．

そこで，本章にて既存のQWERTY配列の物理キーボードのみを用いたポインティング操作手法を示す．FJKeyboardにおいてポインティング操作は，ユーザがキーボードの一つまたは複数のキーを押下することにより行われる．FJKeyboardは物理キーボードのみを用いるため，他デバイスを併用する場合に比べ設置に必要となる面積が小さく，かつデバイスの持ち替えを必要としない点において優れている．

ただし，物理キーボードを用いたポインティング操作と普段の文字入力操作とは競合する．そこで，Fキー，Jキーを連続して押下し，その後Jキーを押下したまま，Fキーへの押下を解除という一連の操作をポインティング操作の開始符号とした．Fキー，Jキーは物理キーボードのホームポジションに手を置いた際に，人差し指が触れるキーであるため，ユーザはこの開始符号を入力しやすいと考えられる．また，Fキー，Jキーには突起が付与されているため，ユーザは突起の触覚フィードバックを手掛かりとしたアイズフリー操作が可能である．

今回，この開始符号が普段の文字入力時にどの程度発生するか計測するために，5名を対象に1週間のキーロガーを用いた調査実験を行い，開始符号の設計を行った．その後，物理キーボードを用いて開始符号の入力およびポインティング操作を行うという評価実験を行った．

5.1　本章の構成

本章の構成は以下の通りである．5.2節にてFJKeyboardの研究を行うにあたって参考にした研究について述べ，FJKeyboardと先行研究の差異を述べる．5.3節にてFJKeyboardにてキーボードのみを用いた入力切替のための開始符号の設計と，キーボードを用いたポインティング操作およびジェスチャ操作方法を述べる．5.4節にてFJKeyboardの開始符号の妥当性の検証および，FJKeyboardを用いた入力速度および精度を評価するための実験を述べる．5.5節にてまとめを述べる．また，付録CにFJKeyboardの実験に用いた書類を示す．

5.2　関連研究

ソフトウェアキーボード上にてジェスチャ操作を行う手法が提案されてきた．Kristenssonら[KZ07]はソフトウェアキーボードを用いて，Ctrlキーを開始点とし，Oキーを経由し，特定

のキーを終了点とするなぞり操作を用いてジェスチャ操作を行っている．Beyond QWERTY [FLW12] は，マルチタッチ検出が可能なタッチパネル上にて，左手の五指がタッチパネルに触れている際に，右手の一本指を用いてジェスチャ操作を行っている．また，同様にソフトウェアキーボード上の複数のキーを連続してなぞった際の軌跡を文字入力に用いる手法がいくつか提案されている [ZK12, BCO+12]．これらの手法と異なり，FJKeyboard は物理キーボードを用いている．物理キーボードを用いることにより，ユーザが触覚フィードバックを得ることができるため，アイズフリー操作が可能となる．また Hoggan ら [HBJ08] は，文字入力時に触覚フィードバックを与えることにより，触覚フィードバックが無い場合に比べ，入力精度および速度が向上すると指摘している．

物理キーボード上におけるポインティング操作およびジェスチャ操作を検出する試みも多く研究されている．FlickBoard[TCY+15] は物理キーボード上にタッチセンサを組み込んだシリコンカバーを搭載し，キー表面におけるユーザのジェスチャ操作認識を行っている．Surfboard [KSI10] および Keyboard Clawing [KST13a] はマイクを用いて物理キーボード表面をなぞった操作を認識し，ジェスチャ操作を行っている．MéTamorphe [BPDW13] は物理キーボードの，キーをソレノイドを用いて隆起させ，隆起させたキーの側面に備えたタッチセンを押下する操作を行っている Taylor ら [TKH+14] は物理キーボードの各キーの隙間にフォトリフレクタを埋め込み，物理キーボード上におけるユーザの空中ジェスチャの認識を行っている．Dietz ら [DEWB09] は各キーの押下圧力を計測できる物理キーボードを開発し，ユーザの押下圧力に基づいて文字サイズを変えるインタラクション手法を設計している．これらの手法と異なり，FJKeyboard は物理キーボードのキーの押下情報のみを利用するため，追加のセンサを必要としない．

GestKeyboard [ZL14] は複数のキーを次々に押下する操作を用いてジェスチャ入力を行う手法である．GestKeyboard は文字入力およびジェスチャ入力の入力特性を利用することにより，最大 200 ms 以内かつ 95%以上の精度にてキー入力とジェスチャ入力の識別が可能である．一方，本研究は 2 つのキーを連続して押下する操作に基づく開始符号を用いることにより，高精度に普段の文字入力操作からポインティング操作への切替を行う．

5.3 FJKeyboard

物理キーボード上の 1 つまたは複数のキーを押下することによりポインティング操作を行う手法を示す．一つの物理キーボードを用いて，文字入力およびポインティング操作を行うためには，文字入力状態とポインティング状態の切替を必要とする．そこで，F キー，J キーの順に連続して押下し，その後 J キーを押下したまま，F キーへの押下を解除するという一連の操作を開始符号とし，これをポインティング状態のトリガーとして用いる手法を考案した．以下に提案する操作手法を述べる．

5.3.1 開始符号

FJKeyboard では，ユーザは物理キーボード上の 1 つまたは複数のキーを押下することによりポインティング操作を行う．ポインティング状態と文字入力状態との明示的な入力の切替として，図 5.1a の様に F キー，J キーの順に連続して押下し，その後図 5.1b のように J キーを押下したまま，F キーへの押下を解除するという手順を採用した．また，押下している J キーへの押下を解除することにより，ポインティング状態から再び文字入力状態に戻る．

提案する開始符号は，ユーザが物理キーボードのホームポジションに指を置いた際に人差し指が触れるキーを用いているため，入力しやすいと考えられる．また，F キーおよび J キーには突起が付与されているため，ユーザは突起からの触覚フィードバックを手掛かりとしたアイズフリー操作が可能となる．

5.3.2　ポインティング操作

開始符号入力後，ユーザが J キーを押下し続けている間，ポインティング状態が続く．ポインティング状態における物理キーボード上の各キーの役割を図 5.2 に示す．ポインティング操作のために利用した，物理キーボード上の左手が置かれる領域をポインティング操作領域とした．また，J キーを押下し続けている間，ユーザは右手の中指および薬指を自由に動かすことができるため，これらの指を用いて押下しやすい I キーおよび K キーを左クリック用のキー，O キーおよび L キーを右クリック用のキーとして割り当てた．

ポインティング状態において，ユーザはポインティング操作入力領域のキーを一つもしくは複数押下することにより，カーソルの移動を行うことができる．押下したキーとカーソルの移動量の関係を図 5.3 に示す．移動量は押下しているポインティング操作入力領域のキー群の重心座標，およびポインティング操作入力領域の重心座標に基づいて決定される．これらの重心座標を用いて図 5.3b に示すように x 軸方向および y 軸方向の移動量 dx および dy を計算した．この dx および dy に，一定の係数を乗じた値をカーソルの移動量とした．

5.4　実験

文字入力および提案するポインティング操作を一つの物理キーボード上にて行う手法の，ポインティング状態の開始符号の妥当性および，ポインティング状態でのポインティング操作の感性評価を行った

5.4.1　実験 1：キーロガーを用いた開始符号発生頻度調査

提案する開始符号である，F キー，J キーの順の連続した押下が，普段の文字入力操作においてどの程度の頻度にて発生するかキーロガーアプリケーションを用いて調査を行った．また，F キーおよび J キーが同時に押下された際の時間をもとに，普段の文字入力操作と競合しない開始符号の設計を行った．以下に実験設計，結果および考察を述べる．

実験設計

調査は研究室内の 5 名の実験協力者（23–24 歳の大学院生）を対象とし，7 日間，実験協力者が普段使用している PC 上にキーロガーをインストールして行われた．調査中，キーロガーは以下の情報を取得した．

- F キー，J キー，K キーおよび L キーが押下および解放された時間およびキーの種別
- 上記のキー以外のキーが押下および解放された時間

キーロガーは F キー，K キーの連続押下，F キー，L キーの連続押下も開始符号に使用することができるか調査するために，K キーおよび L キーの押下および解放された時間も併せて記録を行った．なお，キーロガーは入力情報の匿名化のために，F キー，J キー，K キー

図 5.1: 提案する開始符号およびポインティング操作の操作手順（a：F→J の順にキーを押下する，b：a の後，F キーへの押下を解除するとポインティング状態に切り替わり，J キーへの押下を保持している間，左手はポインティングに利用し，右手の中指および人差し指をクリック操作に利用する）

図 5.2: ポインティング状態時における各キーの役割

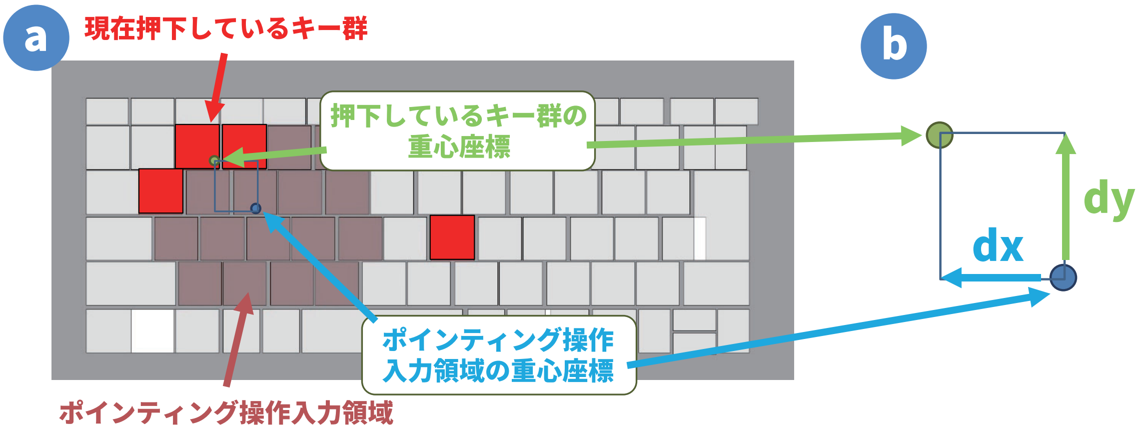


図 5.3: ポインティング状態時におけるカーソル移動量計算のための座標（a：ポインティング操作入力領域内の重心座標および押下しているキー群の重心座標，b：2 つの重心座標の差分から計算したカーソル移動量 dx および dy）

およびLキーのみのキー種別を記録し，その他のキーが押下された際はキー種別をOキーとして扱った．その後，収集したキーログデータから，Fキー，Jキーが連続して押下された回数および，押下されていた時間を抽出した．

実験結果

実験中に入力された入力回数および入力時間を表5.1に示す．実験期間中に合計456.92時間キーロガーが起動され，計69089回キーが入力された．

表5.1: キーロガーにより収集したデータの規模
および特定のキーの入力回数

被験者	入力回数 [回数]					起動時間
	sum	F	J	K	L	[hour]
P1	7009	98	61	399	96	101.10
P2	15246	789	82	87	147	26.48
P3	26276	162	19	1760	101	221.96
P4	11484	330	75	391	211	56.39
P5	9074	40	8	677	9	51.00
計	69089	1419	245	3314	564	456.92

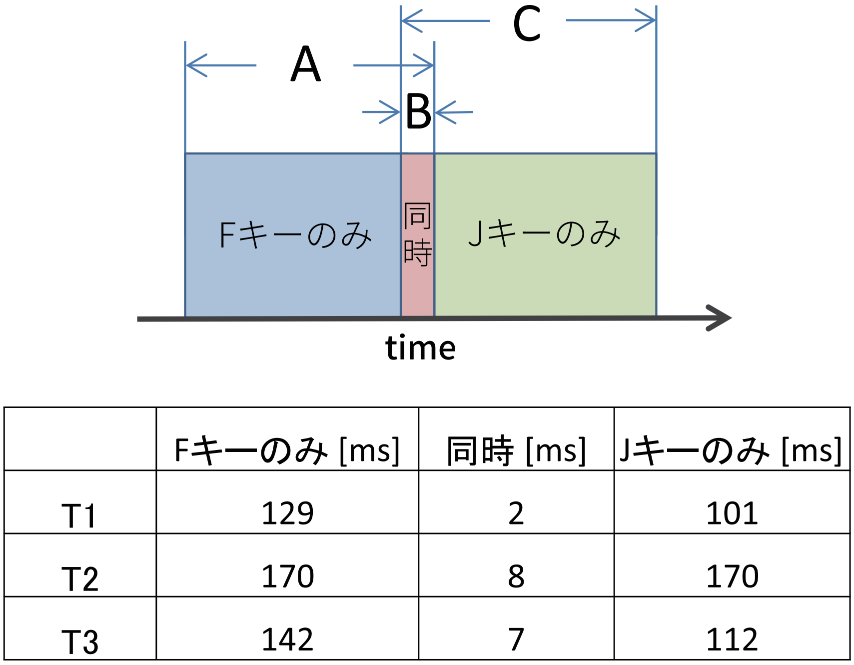
図5.4にキーログ収集期間中に発生した開始符号操作における，Fキー，Jキーの入力時間を示す．本実験に置いて開始符号が発生した回数は合計3回であった．その内訳としては，P1が計2回，P2が計1回開始符号の入力を行っていた．また，P3は計1回JキーおよびFキーの順に開始符号と同様の操作を行っていた．その際に両キーが同時に押下されている時間は119 msであった．

考察

開始符号と同様の文字入力時において，Fキー，Jキーが同時に押下されている時間は2–8 msと短いため，同時に押下する時間を100 ms以上となるように設計することにより，文字入力操作時との競合を回避できると考えらえる．また，JおよびFキーの順に押下する操作が発生した際に，それぞれのキーが同時に押下された時間は100 ms以上であった．そのため，Fキー，Jキーの順に連続に押下した際のみを開始符号と認識するように設定することにより，文字入力操作との競合を避けることができる．併せて調査したFキーおよびKキー，FキーおよびLキーの連続押下は調査中に同時に入力されることはなかった．そのため，これらのキーの連続押下に基づく開始符号は，文字入力操作との競合は起こらないと考えられる．

5.4.2　実験2：ポインティング操作の使用感評価

物理キーボードおよびマウスを用いた手法とFJKeyboardの使用感の比較を行うために評価実験を行った．以下に実験設計，実験環境，結果，および考察を述べる．



	Fキーのみ [ms]	同時 [ms]	Jキーのみ [ms]
T1	129	2	101
T2	170	8	170
T3	142	7	112

図 5.4: キーログ記録中に開始符号が発生した際の各キーの入力時間（A：F キーが押下されている期間，B：F キーおよび J キーが両方押下されている期間，C：J キーが謳歌されている期間．T1–T3 は発生した合計 3 回の各開始符号）

実験設計

研究室内の，21–23 歳の大学生および大学院生のボランティア 6 名を対象とし，制作した実験用プログラムを用いて FJKeyboard の評価を行った．以下に本実験におけるタスクを示す．実験における 1 試行は文字入力タスクとポインティングタスクからなり，50 試行を 1 セッションとした．実験協力者には，FJKeyboard である物理キーボードのみを用いる条件（キーボードのみ条件）ならびに，物理キーボードおよびマウスを用いる条件（キーボード＋マウス条件）をそれぞれ 1 セッション行ってもらった．なお，実験協力者を A および B のそれぞれ 3 人のグループに分け，A グループはキーボードのみ条件，キーボード＋マウス条件の順に行い，B グループはキーボード＋マウス条件，キーボードのみ条件の順に行った．また，はじめに実験協力者に FJKeyboard および，キーボードおよびマウスを用いる手法の両手法にて入力可能な練習プログラムを用いて 10 試行の練習を行ってもらった．なお，文字入力タスクにおいて実験協力者に示したフレーズは，MacKenzie ら [MS03] が示した 500 フレーズのセットからランダムに抽出した．実験に用いたプログラムの各タスクおよび各セッションにおける実験用プログラムの画面一覧を図 5.5 に示す．実験は静かな環境にて行われ，実験協力者には椅子に座って実験を行うように指示した．実験終了後，実験協力者には使用感評価のためのアンケートに回答してもらった．

使用機器

表 5.2 に実験に使用した機器一覧を示す．本実験において，物理キーボードに Microsoft 社製の Wedge Mobile Keyboard を用いた．本キーボードはキートップ周囲が斜めに加工されており，さらにキー間の隙間が 0.5mm 程度と狭いため，複数のキーをまたいで押下やす

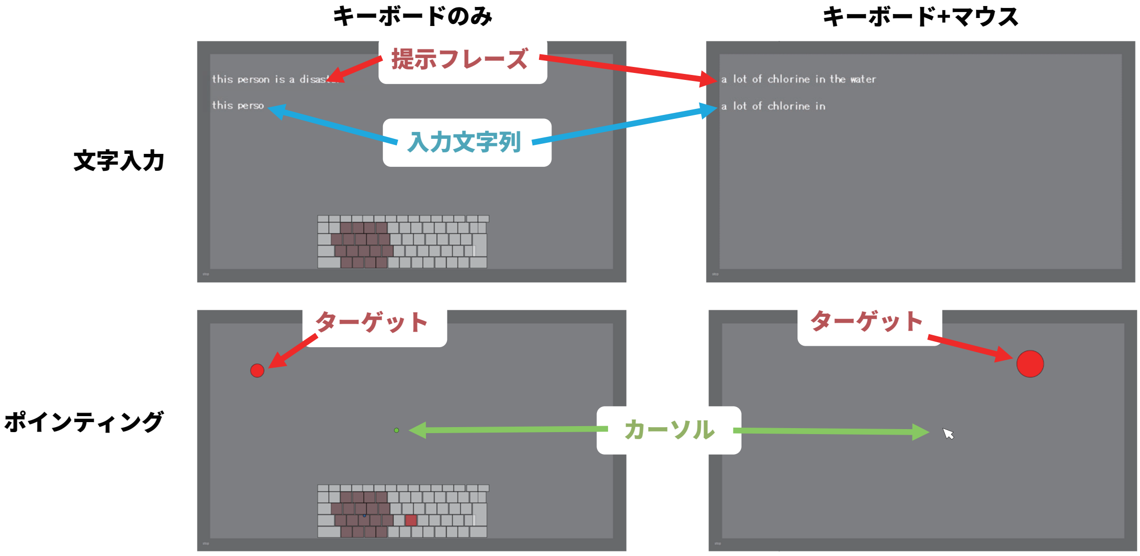


図 5.5: 各タスクおよび各セッションにおける実験用プログラムの画面一覧

いという特徴を有する．そのため複数のキーを押下することによりポインティング操作を行う，FJKeyboard に適していると考えられる．

表 5.2: 実験に使用した機器一覧

機器名	商品名	メーカー	備考
PC	VAIO Tap 20 (SVJ202)	SONY	Windows8.1 Pro Intel Core i7-3667U メモリ 8GB
マウス	VGP-WMS21	SONY	
キーボード	Wedge Mobile Keyboard	Microsoft	日本語配列

結果および考察

アンケートの結果を以下に示す．図 5.6 は，「どちらの操作の方が使いやすかったですか」という設問に対する回答の分布図である．なお，本設問は回答に「キーボードのみ」条件を 1 とし，「キーボード＋マウス」条件を 5 とした 1–5 の 5 段階評価を用いた．図 5.6 の結果より，キーボード＋マウス条件の方がより好まれていることが分かる．また，その理由について実験協力者に自由記述回答をしてもらったところ，キーボード＋マウス条件を好んだ実験協力者 5 名の内，3 名が「マウスの方が慣れているため」と述べ，2 名が「マウスの方が直感的である」と述べた．一方，キーボードのみ条件を好んだ実験協力者は「ターゲットまでの距離が短い場合はキーボードのみ条件の方が良かった」と述べた．

図 5.7 は，「キーボードのみ条件においてカーソルを思う通り動かせましたか」への回答の分布図である．なお，本設問は回答に「動かせた」を 1 とし，「動かせなかった」を 5 とした 1–5 の 5 段階評価を用いた．図 5.7 より，FJKeyboard の操作が難しいということが分かる．また，その理由について実験協力者に自由記述回答をしてもらった．その結果，物理キーボードのみを用いたポインティング操作は「大まかな操作はやりやすかったが，微調

整が難しい」,「ポインタの速度を一定にしたほうが使いやすい」,「移動スピードを調整しづらかった」という意見を得た.

また,「キーボードのみ条件はアイズフリー操作可能ですか」という設問に対しては，全実験協力者が可能だと回答した．このことから，FJKeyboard は物理キーボードの触覚フィードバックに基づくアイズフリー操作が可能であるという仮説の裏付けを得た.

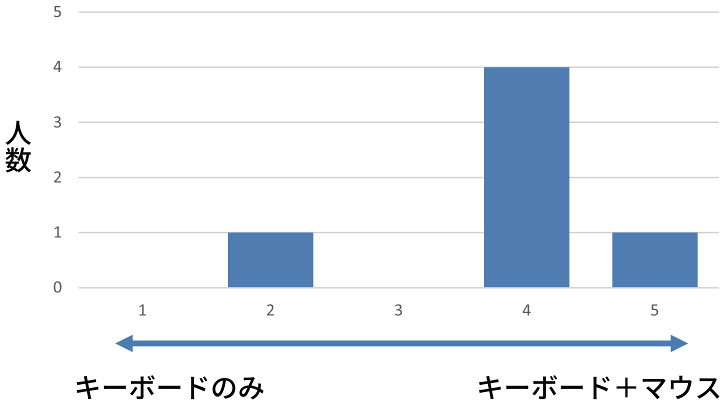


図 5.6: アンケート結果「どちらの操作の方が使いやすかったか」

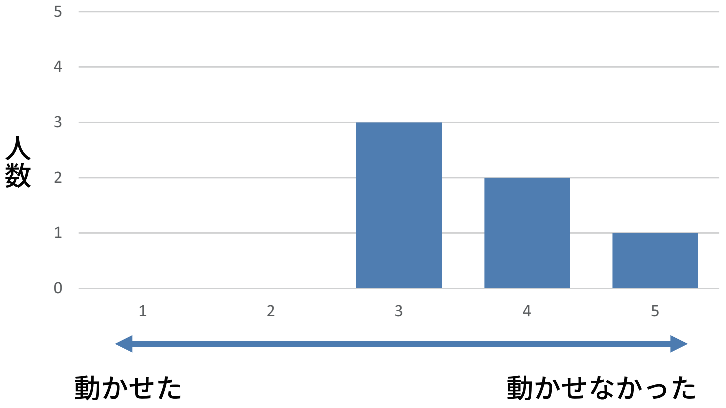


図 5.7: アンケート結果「キーボードのみ条件において、カーソルを思う通り動かせましたか」

5.5　まとめ

本章にて，F キー，J キーの順の連続押下に基づく開始符号および物理キーボードを用いたポインティング手法を示した．この開始符号の設計に際しては，開始符号が普段の文字入力操作においてどの程度の頻度にて出現するかキーロガーを用いた調査を行い，開始符号における F キー，J キーの押下時間の設計を行った.

FJKeyboard にて，F キー，J キーを用いた開始符号をポインティング操作以外に，F キーおよび K キーを用いた開始符号をジェスチャ操作に割り当てることにより，種々の操作を

一つの物理キーボード上にて行うことが可能になる．また，例えばJキーを押下した状態にてポインティング操作を行っている際に，Iキーおよび O キーの同時押下，ならびにKキーおよびLキーの同時押下を交互に行うことにより，スクロール操作入力が可能となる．このようにキーの組み合わせ次第によって機能の拡張が容易である点が本 FJKeyboard の利点である．

第6章　JoyKey：4×3の格子状にジョイスティックを有する片手把持キーボード

日本語のかな文字入力手法の一つに，図6.1に示すタッチパネル端末向けの片手入力手法であるフリック入力がある．かな文字は10種類の子音+5種類の母音からなる文字であり，一つの文字を表すのに一つの子音＋一つの母音が用いられる．フリック入力は日本語の入力に4×3のキーマトリクスを用いている．合計12個のキーの内，10個のキーは日本語の子音に対応しており，子音キーを上下左右にフリックもしくはタップすることにより母音を決定することができる．

そこで，このフリック入力を行うための物理キーボードである「JoyKey」を開発した（図6.2）．タッチパネル端末上の入力手法と異なり，JoyKeyを用いることによりユーザは物理的な手掛かりが得られるためアイズフリー操作が可能となる．また，広く用いられているフリック入力のレイアウトを利用しているため，すでにフリック入力に慣れ親しんだユーザは新たに習熟を要することなく，本キーボードを利用できる．JoyKeyは図6.2に示すように，文字入力操作を行うキーボードモード以外に，ポインティング操作を行うマウスモード，ゲーム操作に用いるゲームコントローラモードといった目的に用いることができる．

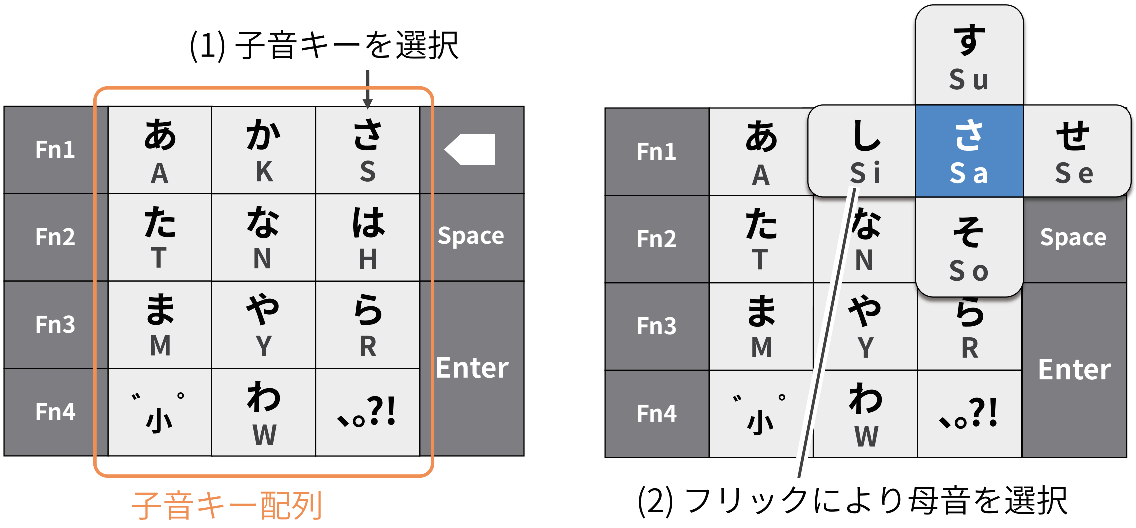


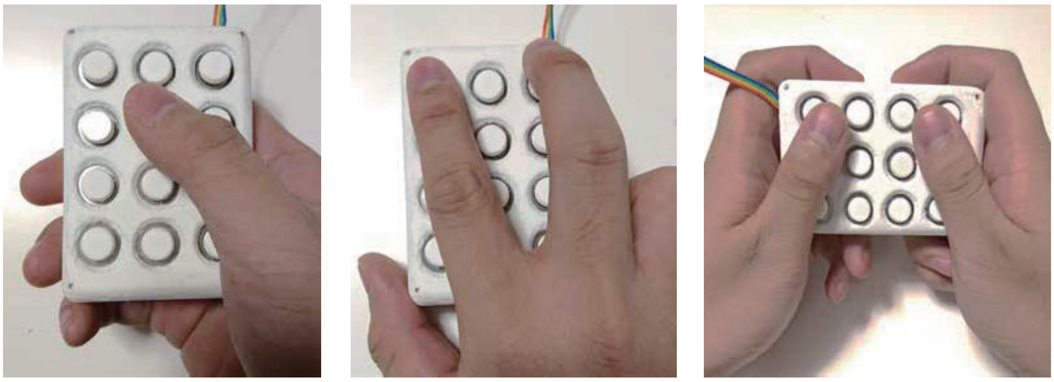
図6.1: フリック入力のレイアウト

6.1　本章の構成

本章の構成は以下の通りである．6.2節にてJoyKeyの研究を行うにあたって参考にした研究について述べ，JoyKeyと先行研究の差異を述べる．6.3節にてJoyKeyのキーレイアウトおよび，何度か試行錯誤した実装の過程を述べ，最終的に完成したキーボードの工夫点お

Vowels	**Consonants**																		
	Basic letter											Voiced letter				P-sound	Small letter		
	A	K	S	T	N	H	M	Y	R	W	-	K*(G)	S*(Z)	T*(D)	H*(B)	H**(P)	A*	Y*	T**
a	あ	か	さ	た	な	は	ま	や	ら	わ		が	ざ	だ	ば	ぱ	ぁ	ゃ	
i	い	き	し	ち	に	ひ	み		り			ぎ	じ	ぢ	び	ぴ	ぃ		
u	う	く	す	つ	ぬ	ふ	む	ゆ	る			ぐ	ず	づ	ぶ	ぷ	ぅ	ゅ	っ
e	え	け	せ	て	ね	へ	め		れ			げ	ぜ	で	べ	ぺ	ぇ		
o	お	こ	そ	と	の	ほ	も	よ	ろ	を		ご	ぞ	ど	ぼ	ぽ	ぉ	ょ	
-											ん								
-											ー								

表 6.1: 日本語のかな文字表



(a) キーボード　(b) マウスモード　(c) ゲームコントローラ

図 6.2: JoyKey の利用方法（a：キーボードモード，b：マウスモード，c：ゲームコントローラモード）

よび構造を述べる．6.4 節にてアイズフリー/ノンアイズフリー条件下における，JoyKey およびタッチパネル上のソフトウェアキーボードの比較実験を述べる．6.5 節にて JoyKey の文字入力以外に，カーソル操作およびゲームコントローラに用いるためのキーレイアウトを述べる．6.6 節にてまとめを述べる．また，付録 D に JoyKey の実験に用いた書類を示す．

6.2　関連研究

JoyKey の関連研究を述べる．

6.2.1　日本語かな文字入力手法

JoyKey は日本語かな文字入力として広く用いられているフリック入力を基に設計されている．本節にて，フリック入力に加え，3 種類の広く用いられている日本語かな文字入力手法を述べる．

フルキーボード

アルファベットを入力するパソコン用のフルキーボードは一般的に QWERTY 配列と呼ばれる配列になっており，各キーが 1 文字のアルファベットに対応している．日本語に置いても同様に，「かな入力」では，図 6.3 に示すような，各キーが 1 文字のかな文字に対応するキーボードを用いて日本語かな文字入力を行える．かな入力では，例えば「Q」，「W」，「E」，「R」，「T」，「Y」は，それぞれかな文字の「た」，「て」，「い」，「す」，「か」，「ん」に対応する．また，かな文字以外にも「ローマ字入力」では，表 6.1 に示すかな文字が子音＋母音のアルファベットで表記できる性質を利用し，QWERTY 配列のキーボードを用いてかな文字入力を行うことができる．これらの入力手法は随時切り替えることができる．

図 6.3: かな文字入力対応の QWERTY 配列フルキーボード（JIS 配列）

マルチタップ入力

日本のタッチパネルをそなえていない携帯電話端末において，物理キーボードを文字入力に使う場合がある．一般的に，図 6.4 に示すような 3×4 の配列のキーボードを使う場合が多い．このような配列では，キーが 12 個しかないため，そのうちの 10 個のキーを日本語の子音 10 音に対応させ，ユーザは子音キーを連続押下することにより母音を選択する．また，濁音や半濁音のようなかな文字は，濁点・半濁点を選択するキー

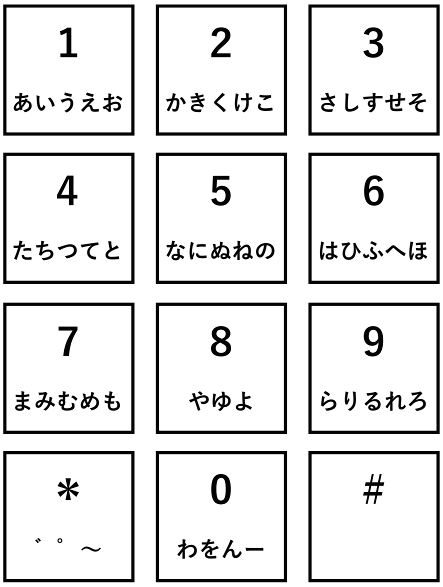


図 6.4: マルチタップ入力用のキー配列

を押すことにより選択する．例えばかな文字の「ぎ」を入力する場合は，か行の子音キーを 2 回（か → き），濁音キーを 1 回（き → ぎ）押下することにより選択する．

ポケベル入力

日本において，ポケットベル（ポケベル）がコミュニケーション方法として広く用いられた．かな文字やアルファベットに対応しておらず，数字しか入力できないポケットベルにおいては，表 6.2 に示す対応表を用いてかな文字やアルファベットの入力を行った．各文字は 2 つの数字の組み合わせによって表現され，例えばかな文字の「し」は数字の「3（子音：さ）」と「2（母音：い）」を組み合わせることにより表現できる．

First input	**Second input**									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
1	あ	い	う	え	お	A	B	C	D	E
2	か	き	く	け	こ	F	G	H	I	J
3	さ	し	す	せ	そ	K	L	M	N	O
4	た	ち	つ	て	と	P	Q	R	S	T
5	な	に	ぬ	ね	の	U	V	W	X	Y
6	は	ひ	ふ	へ	ほ	Z	?	!	-	/
7	ま	み	む	め	も	¥	&			
8	や		ゆ		よ	*	#			
9	ら	り	る	れ	ろ	1	2	3	4	5
0	わ		を		ん	6	7	8	9	0

表 6.2: ポケベル入力における文字対応表

6.2.2　物理キーボードの多用途化を行う研究

FlickBoard [TCY$^+$15] はタッチセンサを埋め込んだシリコンカバーをフルキーボードに被せ，キーボード表面をなぞる操作をポインティング操作に用いている．Keyboard Clawing [KST13b] はアクティブ音響センシング技術を用いてキートップをひっかいた際のタッチ位置ならびにフリック方向の検出し入力に用いる手法である．Dietz らはキーボードの打鍵圧力を検出する手法 [DEWB09] を提案している．また Gu らは，幅がキーボードサイズの圧力センサーを用いた手法 [GHH$^+$13] を提案している．Zhang らはキーボードの打鍵間隔からジェスチャの検出を行う手法 GestKeyboard [ZL14] を提案している．Taylor らによって 64 個のフォトリフレクタを用いてキーボード上の空中ジェスチャ検出を行う Type-hover-swipe in 96 bytes [TKH$^+$14] が提案されている．このようにキーボードデバイスにポインティングあるいは，ジェスチャ操作を付与するというインタフェースの研究は数多く行われている．

6.2.3　ジョイスティックを用いた文字入力手法

Wobbrock らは EdgeWrite [WMK03] に基づく文字入力手法 [WMA04] を提案した．TwoStick [KIG07] はゲームコントローラに搭載された 2 つのジョイスティックを用いて文字入力する手法である．TwoStick では，入力領域を 3×3 のゾーンに分割し，各ゾーンをさらに 3×3 のエリアに分割する．全て合わせると 81 箇所の分割されたエリアはそれぞれが 1 つの文字に対応する．ユーザはゲームコントローラの片方のジョイスティックを用いてゾーンを選択し，もう片方のジョイスティックを用いてエリアの選択を行う．IToNe [GKM08] はゲームコントローラに搭載された 2 つのジョイスティックを用いて日本語入力を行う手法である．IToNe では片方のジョイスティックを用いて子音を選択肢，もう片方のジョイスティックを用いて母音の選択を行う．Wilson および Agrawala はゲームコントローラに搭載された 2 つのジョイスティックを用いて 2 分割されたソフトウェアキーボードから文字の選択を行う手法 [WA06] を提案している．Isokoski および Raisamo は 2 つのジョイスティックを用いた Quickwriting [Per98] の文字入力精度について調査している [IR04]．

6.3　実装

JoyKey は片手操作可能なフリック入力に基づくハードウェアキーボードである．JoyKey は 3 × 4 のキーマトリクスからなるキーボードである．それぞれのキーは XY 軸方向の移動量を計測可能なジョイスティック，およびタクトスイッチから成る．まず，JoyKey の使用感を調査するためのプロトタイプを製作し，その後プロトタイプの問題を解決するために完成版の実装を行った．実装について詳しく述べる．

6.3.1　JoyKey のキーレイアウト

フリック入力を行うためのアプリケーションである．ユーザは図 6.2a に示すように，利き手に JoyKey を把持し，親指にてキーの操作を行う．3 × 4 のキーは図 6.5 のように子音に対応しており，左下（10 番目）および右下（12 番目）のキーはカンマ，ピリオドや感嘆符などの入力に利用する．また，図 6.1 の右列に配置されている改行やバックスペースといったキーは図 6.5 のように複数のキーを同時に押下することにより行う．例えば，改行は右列のキーをすべて同時押しし，スペースは最下段のキーをすべて同時押し，カーソルの移動は右上のキーを用いるといった割り当てを行う．

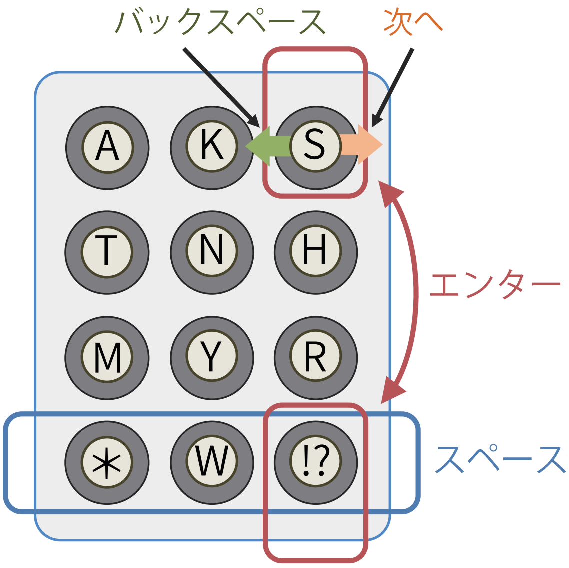


図 6.5: JoyKey のキーレイアウト

6.3.2 プロトタイプ

はじめに行った Joykey のプロトタイプについて述べる．

システム構成

本システムは縦 4 列 × 横 3 列に配置されたプッシュボタン +2 軸アナログジョイスティック（プッシュボタンの上にジョイスティックが重なるように配置），およびセンサデータ解析用の Arduino から構成される．実装したシステムの写真を図 6.6 に，構成を図 6.7 に示す．

本システムはプッシュボタンを用いてキーを押下したことを検出し，押下されたキーに対応した 2 軸アナログジョイスティックの分圧されたアナログ出力を読み取ることにより，ユーザがどちらの方向に指をフリックしたのか，またはプッシュのみなのかを検出する．現在はセンサデータを全て Arduino から PC へと送信し，PC 上のプログラムを用いてジェスチャの検出を行っている．

回路およびプログラムの構成

FlickBoard は Arduino，キーボードデバイス，マルチプレクサから構成される．マルチプレクサとは，複数の入出力ポートおよび信号ポートを備え，読み出したい入出力ポートのアドレスを指定すると，その入出力ポートと信号ポートを接続する素子である．マルチプレクサを用いることにより，Arduino Micro のアナログピン数（アナログ専用 5 ピン+デジタル兼用 6 ピン）以上の検出が可能となる．図 6.8 に実装したデバイスの回路図を，図 6.9 に Arduino Micro 上のプログラムのフローチャートを示す．

また，ジェスチャー検出の流れを以下に示す．

1. キーマトリックス上の任意のボタン n を押下する．
2. Arduino Micro は rduino はボタン n に対応したアナログジョイスティックのデータを検出するために，マルチプレクサにアドレスを指定する信号を印加する．

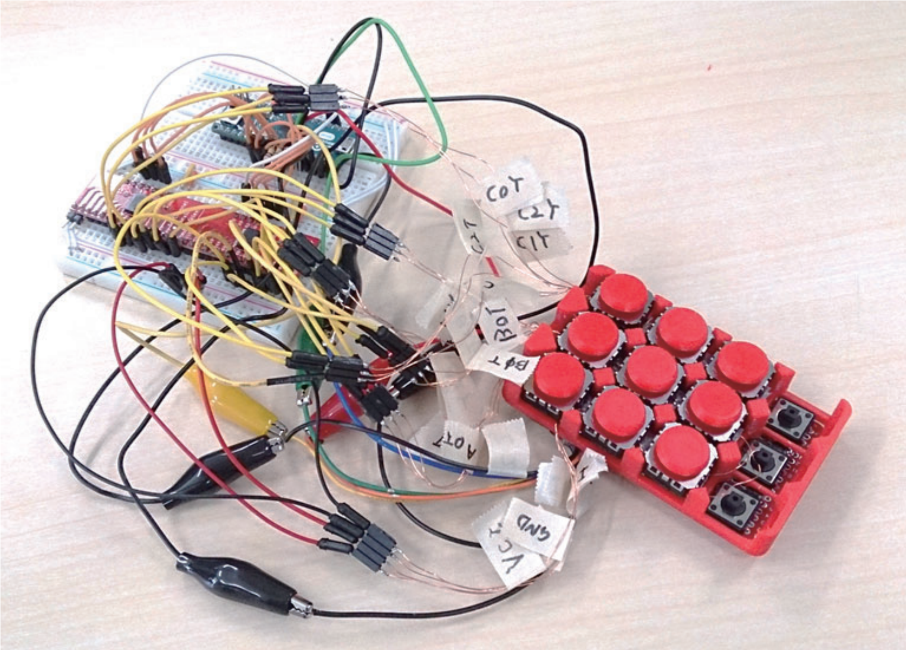


図 6.6: 実装したデバイスの写真

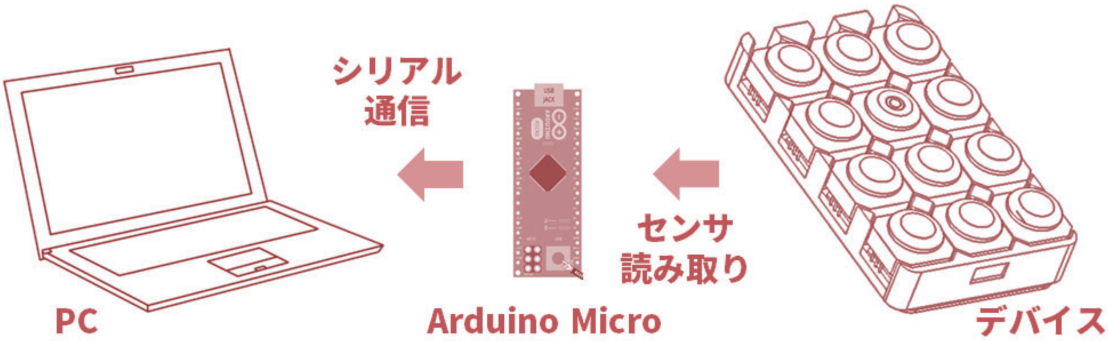


図 6.7: 実装したデバイスの構成

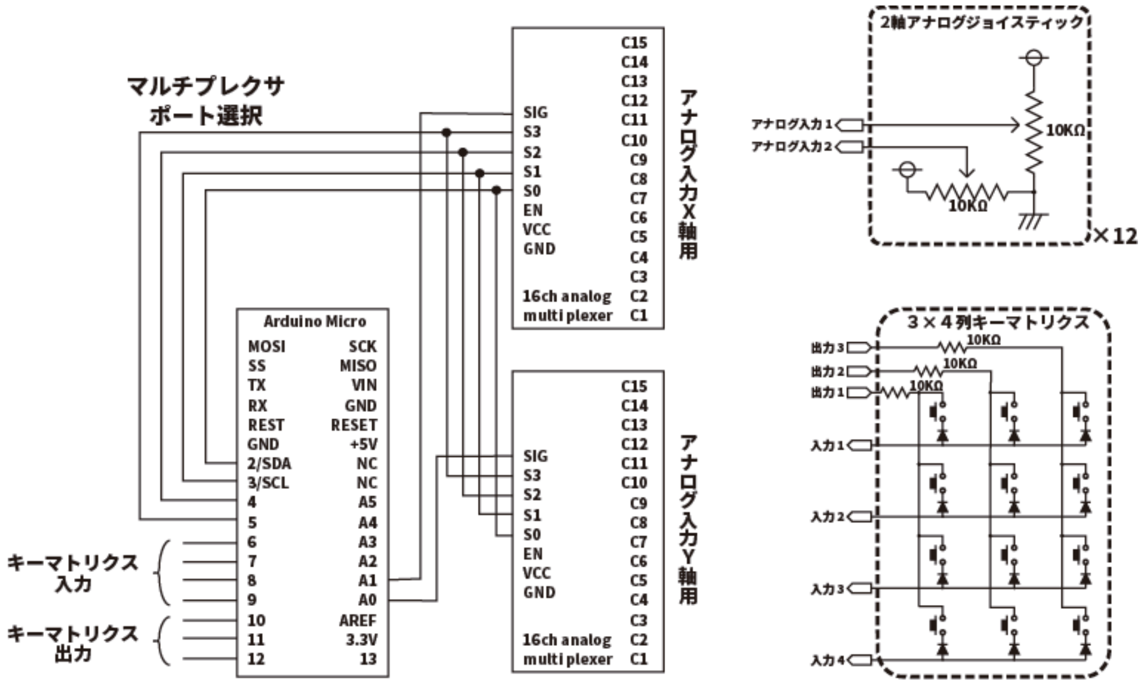


図 6.8: デバイスの回路図

3. 対応する X，Y 軸両方のアナログ信号を検出する．
4. 検出したそれぞれのデータを PC へ送信する．
5. PC は受信したデータを解析し，どの子音キーが押されてるのかを判別する．また-127〜128 までの 256 段階に変換されたアナログジョイスティックの X，Y 軸アナログ値を基に，一定のしきい値以上（しきい値は中心を 0 とし，96 以上離れた場合とした）上下左右に動いていた場合，フリックされたと判断し，対応する母音の判別および，PC ディスプレイへの表示を行った．

ハードウェアの実装

本デバイスを制作するにあたって，上下左右にスライドする動作を再現するためにジョイスティックをプッシュボタンの上に配置する必要があった．そのため，ジョイスティックを固定するための支柱を 3DCAD ソフトを用いて設計し，3D プリンタを用いて印刷した．また，併せてジョイスティック用のボタンカバーの設計および印刷を行った．デバイスの構造を図 6.10 に示す．

実行結果

実際に制作したシステムを用いて，キー入力の判別を行った際の写真を図 6.11 に示す．判別を行ったところ，“あ”，“さ”，“た”，“は”，“ま”，“ら” 行は問題なく判別できた．しかし，“か” 行など一部のキーにおいて誤作動を起こしたり，反応しない場合が見られた．また，入力の際にかかる遅延は体感できるほど生じなかった．

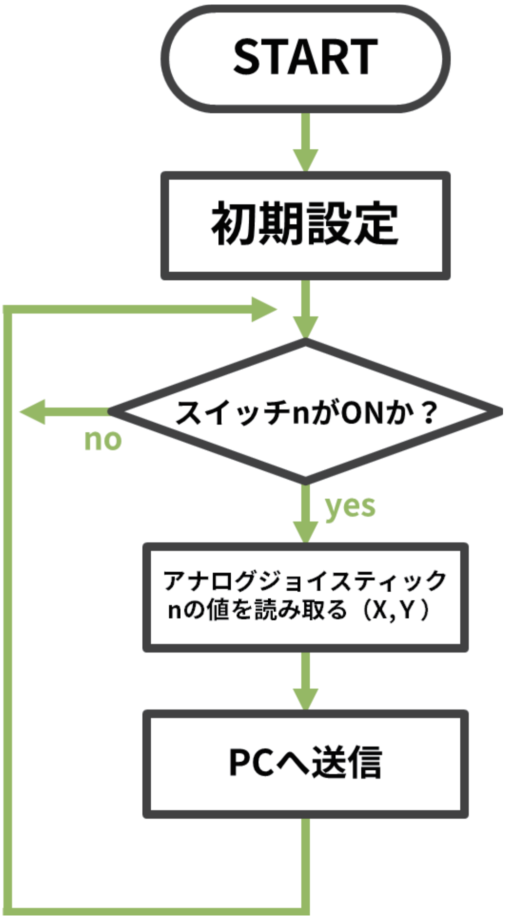


図 6.9: Arduino Micro 上のプログラムのフローチャート

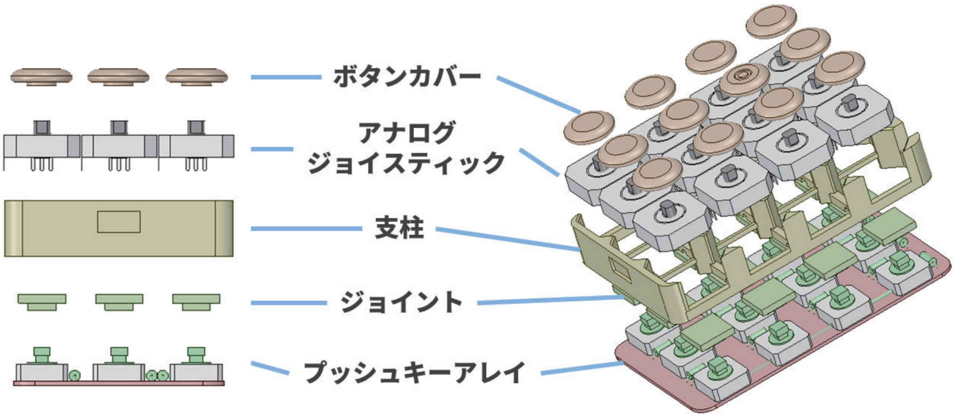


図 6.10: デバイスの構造

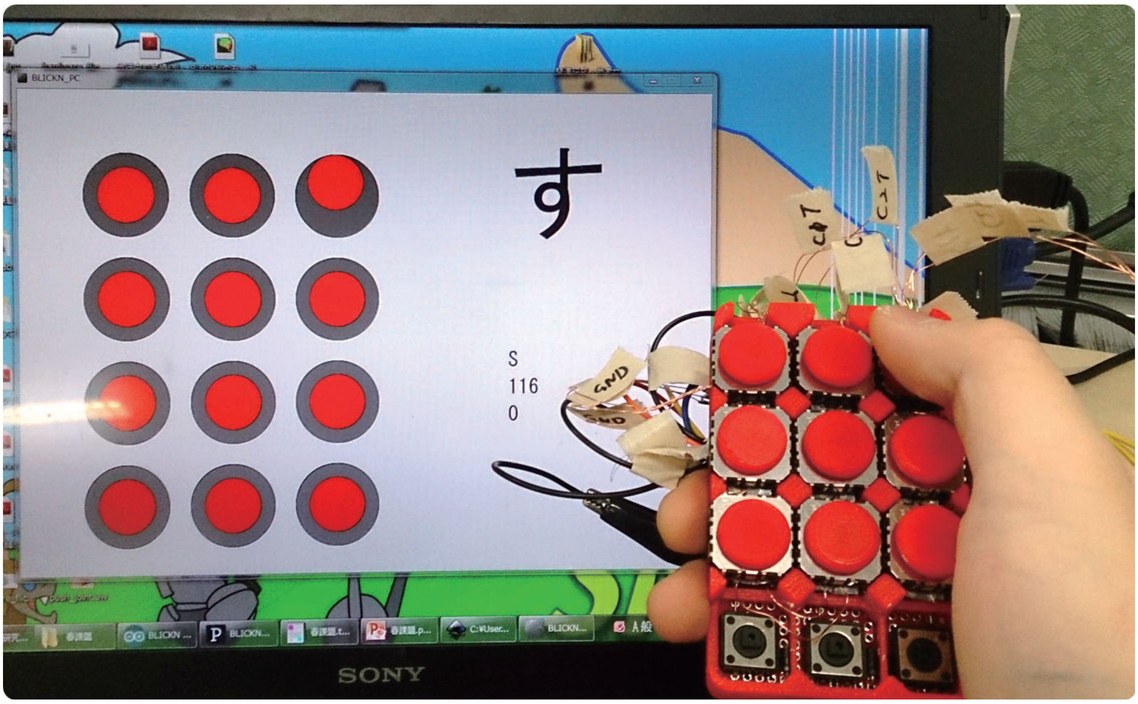


図 6.11: 実際にデバイスを用いてキー入力の判別を行った際の写真

6.3.3　完成版

プロトタイプの問題点をふまえ，JoyKey のさらなる設計を行い，完成版を製作した．

ジョイスティック配線の単純化

JoyKey に用いているジョイスティック（台湾 TOP-UP INDUSTRY 社製，JT8P-3.2T）は端子を 6 極有しており，端子割り当ては X，Y 軸用の可変抵抗それぞれに電源，信号，グランドの 3 極となっている．過去の実装においてジョイスティック 12 個× 2 軸+電源およびグランド用に 26 本の UEW 線を用いて，空中配線していたため，キーの一部が断線してしまった際に修繕が難しくなってしまう問題があった．そこで，この問題を解決するために，変換基盤を用いたジョイスティックの配線の単純化，ならびにコネクタを用いてメイン回路に接続する手法を試みた．

ジョイスティック変換基板の概要を図 6.12 に示す．図 6.12 に示すように，変換基板を用いることにより 6 極の端子を 4 極に減らすことができる．また，変換後は可変抵抗を 2 つ直列に接続した回路となり，信号端子の出力は以下の式を用いて表すことができる．

$$V_{S1} = \frac{R+R_1}{2R}V_{CC} \tag{6.1}$$

$$V_{S2} = \frac{R_2}{2R}V_{CC} \tag{6.2}$$

ATTINY85 および I2C 通信を用いた，メイン回路の単層化

これまで，12 個のプッシュスイッチの ON/OFF 検出用のキーマトリクス回路基板および，ジョイスティック+マルチプレクサ用の基板を用いて実装を行っていた．そのため回路

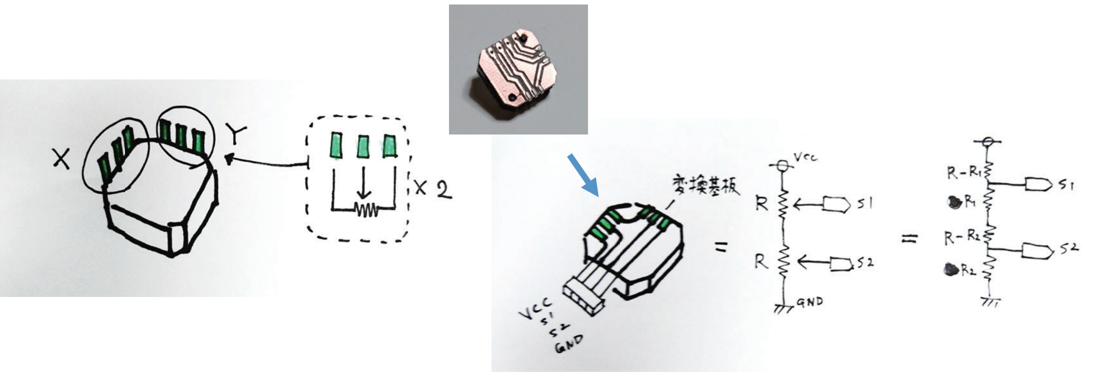


図 6.12: 変換基板の概要

や配線の複雑化の要因となっていた．参号機はこの問題を解決するために，図 6.13 に示すように各ジョイスティックおよびプッシュスイッチごとに Atmel 社製 ATTINY85 マイコンを一基搭載し，計 12 基の ATTINY85 マイコンを I2C 通信を用いて通信用の Arduino マイコンに接続するように設計した．設計した回路の回路図を図 6.14 に，パターン図を図 6.15 に，ならびに実装した回路を図 6.16 に示す．図 6.16 の回路は回路 CAD ソフトウェアである EAGLE を用い，パターンの掘削には CNC フライス盤（オリジナルマインド社製，Kitmill Qt）を用いて製作した．

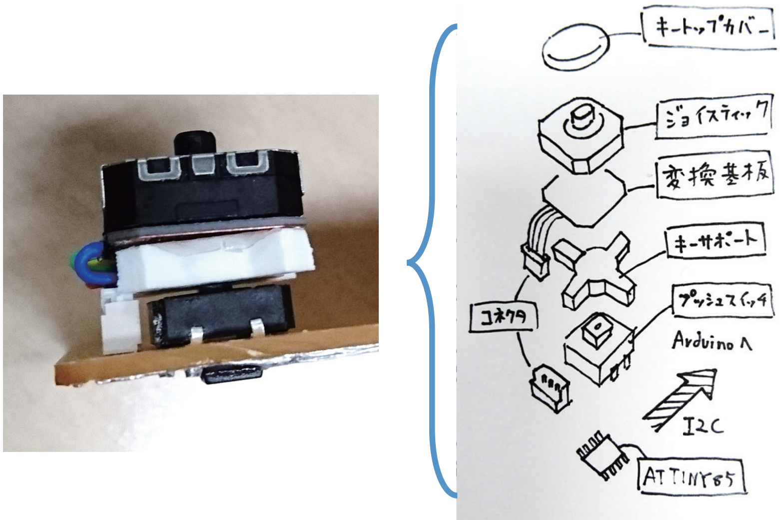


図 6.13: 各キーの構造

完成版の構造

前節まで述べたとおり，プロトタイプの問題点である膨大な配線数による断線トラブル等の問題の解決，ならびに入力読み取りにかかる計算処理を分散させるために，12 個のキーにはそれぞれマイコン（Atmel 社製，ATTiny85）を一基搭載した．各マイコンはジョイスティックの 2 軸の可変抵抗の出力電圧のアナログデジタル変換やスイッチの ON/OFF 読み取りに利用され，それらは I2C 通信によって Arduino Nano に接続されている．実装した Joykey 完成版の写真を図 6.17 に，完成版の内部構造を図 6.18 に示す．

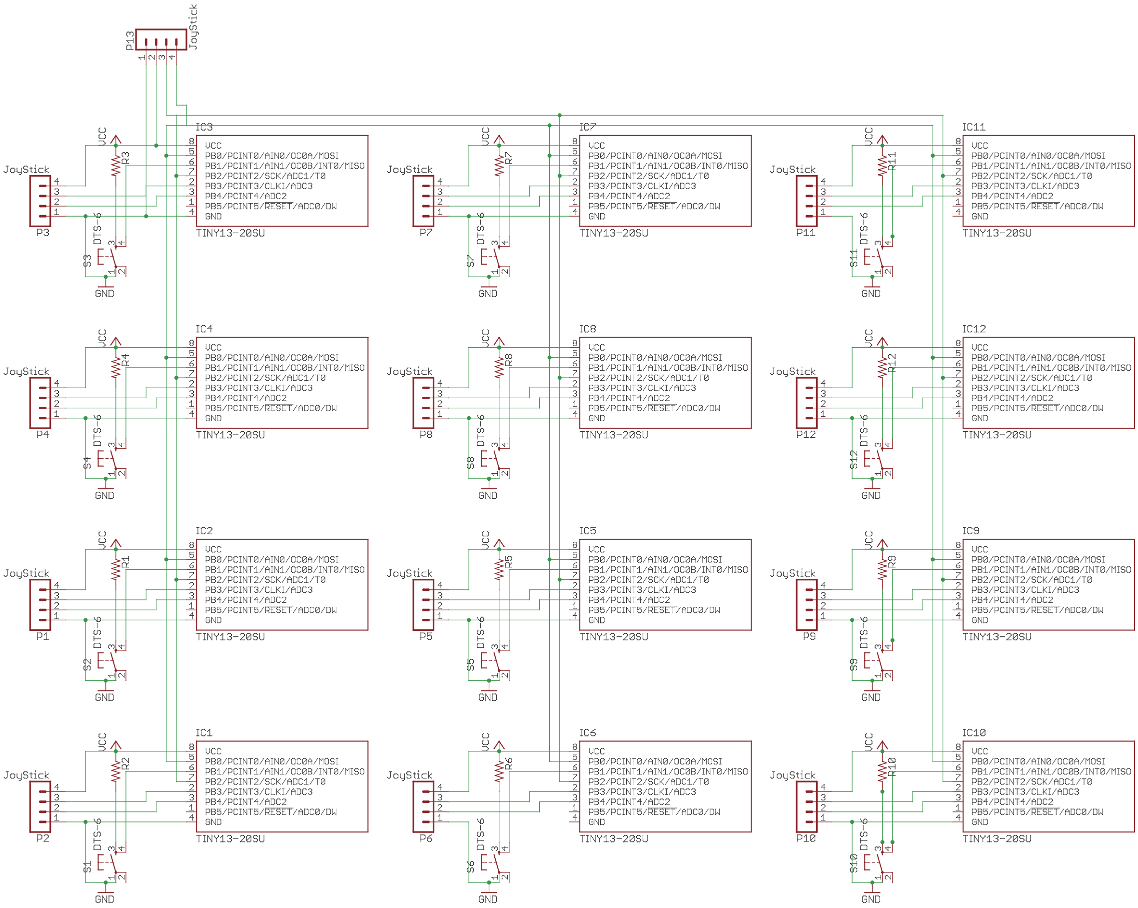


図 6.14: メイン回路の回路図

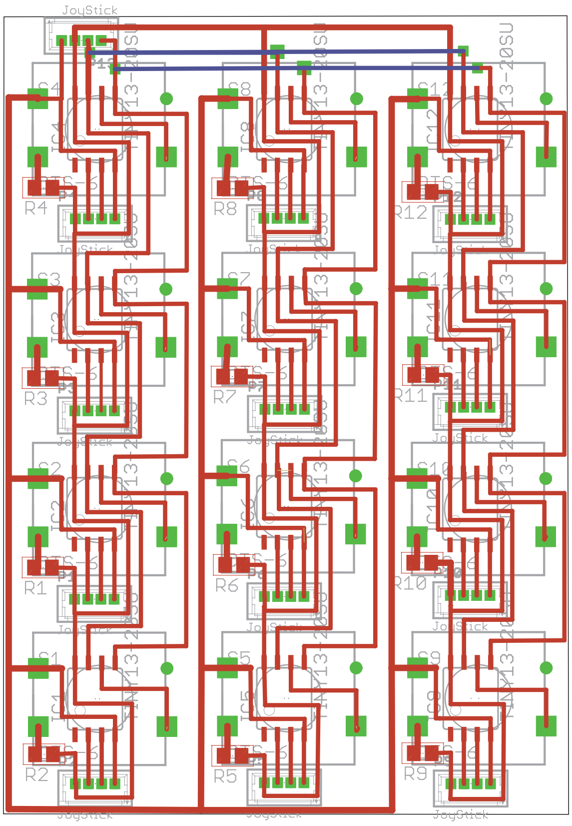


図 6.15: メイン回路のパターン図

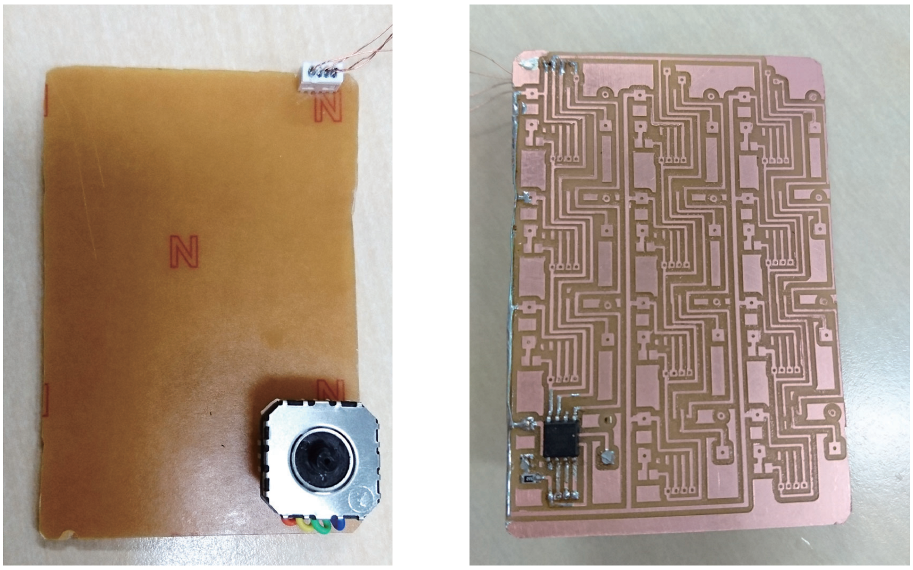


図 6.16: 完成版のメイン回路

また，プロトタイプと同様にキーの構造を設計する際に，タクトスイッチの上にジョイスティックを載せる構造とした．これはキーを押下した際の触覚フィードバックをユーザに与えるためである．また傾けるタイプのジョイスティックではなく水平スライドするジョイスティックを用いたのは，従来のフリック入力がタッチパネル端末の画面を水平にフリックする操作を用いるためである．

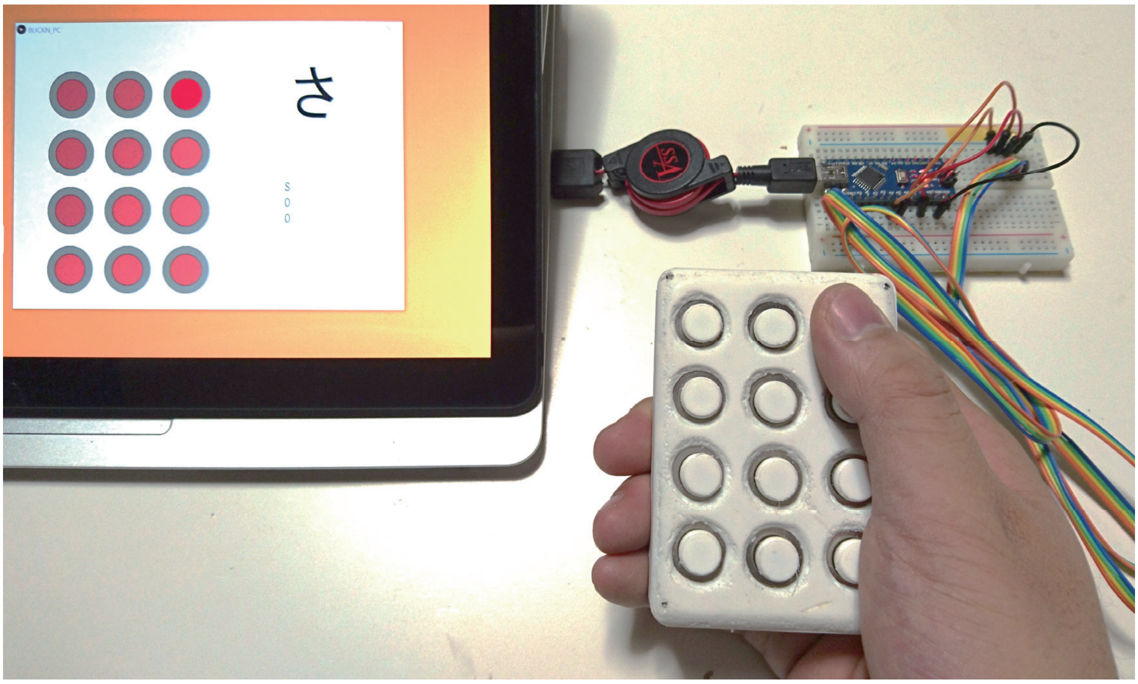


図 6.17: JoyKey 完成版

6.4　実験

広く用いられているタッチパネルを用いたソフトウェアキーボードのフリック入力とJoyKeyの入力精度ならびに速度を比較するための実験を行った．また，本実験は手元を見てもよいノンアイズフリー条件および手元を隠したアイズフリー条件にて評価を行った．

6.4.1　実験協力者

大学生および大学院生6名（23–24歳，男性）に実験協力してもらった．全ての実験協力者が右利きであった．すべての実験協力者がスマートフォンの使用経験があった（24–106ヶ月，平均67.17ヶ月）．全ての実験協力者がスマートフォンを用いたフリック入力に慣れ親しんでいた．実験中はすべての入力を利き手にて行ってもらった．

6.4.2　実験設計

実験は2種類のキーボードを比較するために，JoyKeyを用いて文字入力を行うJoyKey条件ならびにスマートフォンのタッチパネル上にて操作するソフトウェアキーボードを用いるソフトウェアキーボード条件の2条件にて行った．JoyKey条件の際は，JoyKeyをPCに

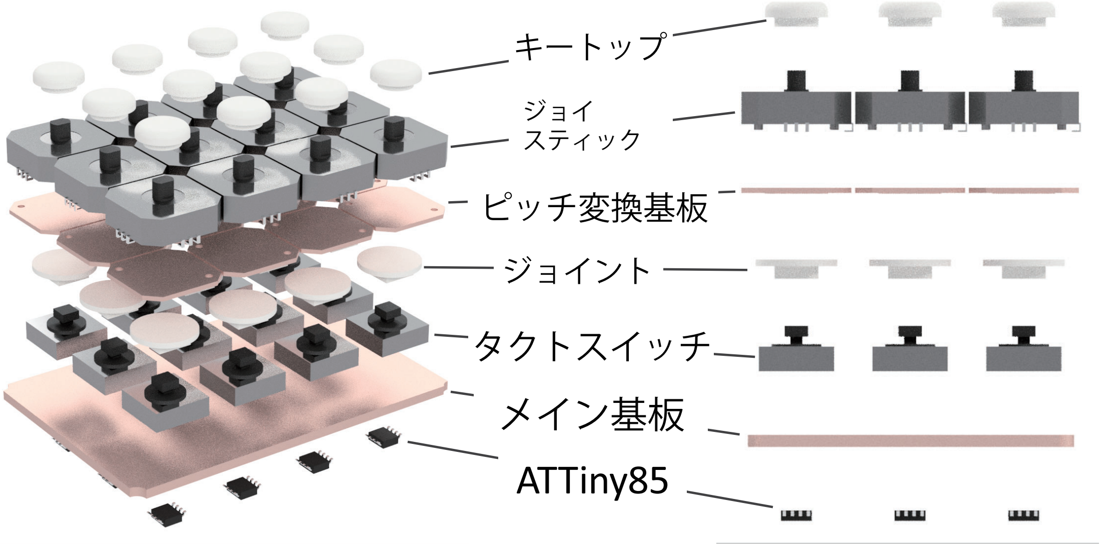


図 6.18: JoyKey 完成版の内部構造

接続して実験を行った．ソフトウェアキーボード条件の際は，スマートフォンとして Xperia Z5 Compact E5823 (Android OS 6.0.1, 4.6 インチ，解像度：720px × 1280) 上にて Google 日本語入力 [Goo] を用いた．また，スマートフォンのフリック入力は，Intel Remote Keyboard アプリケーション [Int] を用いて wifi 経由で PC にキーボードイベントを送信することにより行われた．

入力速度および入力精度を評価するためのタイピングゲームを実装した．タイピングゲームは Processing 言語で記述され，VAIO Z VJZ13A1（OS: Windows 10 Pro 64bit, CPU: Intel Core i7-5557U 3.10GHz, memory: 16.0GB）上にて動かした．タイピングゲームはランダムにかな文字の単語を一つ提示し，ユーザが単語を入力し，エンターを押すまでの時間，バックスペースの回数，文字の誤りを計測した．また，日本語の単語は日常的に使われる 3–7 文字のあいさつ，曜日，月，親族の呼び名，教科名，果物，野菜，食べ物，飲み物，花，地名，乗り物，衣服に関する名詞を利用した．

6.4.3　実験手順

実験は 2 つのキーボード条件（JoyKey 条件ならびにソフトウェアキーボード条件）および 2 つの視認条件（アイズフリー条件ならびにノンアイズフリー条件）の下で行われた．

実験は，カウンターバランスをとるために，実験協力者を 3 人ずつ 2 つのグループに分け，片方のグループは JoyKey 条件 → ソフトウェアキーボード条件の順に実験を行い，もう片方のグループは逆の順番にて行った．また，各キーボード条件において，実験協力者はノンアイズフリー条件 → アイズフリー条件の順に実験を行った．

実験協力者はまず，それぞれのキーボードに慣れるまで，キー入力の練習を行った．実験協力者は前節にて述べたタイピングアプリケーションに表示された単語を入力した．これを 1 試行とする．10 試行を 1 セットとし，5 セットを 1 セッションとした．実験条件ごとに 1 セッションずつ行い，疲れによる結果への影響を減らすために，実験協力者はセッション間に 1 分以上の休憩を行った．また実験協力者が疲れた場合は，1 セットごとに適宜休憩をとった．総試行回数は，1200 試行（=6 名 × 2 キーボード条件 × 2 視認条件 × 5 セット

図 6.19: 実験に用いたソフトウェアキーボードのサイズ

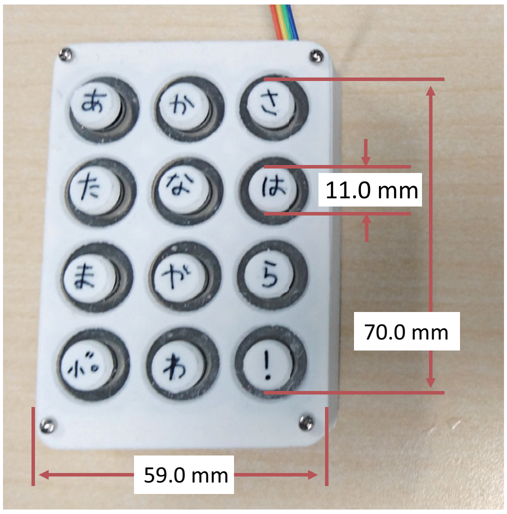
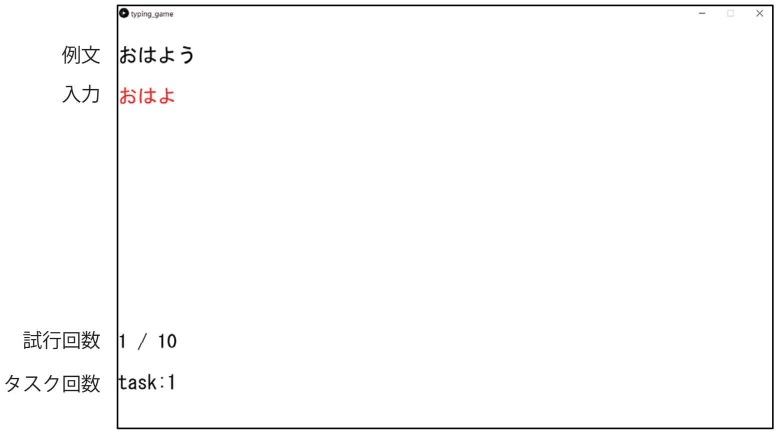


図 6.20: 実験に用いた JoyKey のサイズ



例文 おはよう

入力 おはよ

試行回数 1 / 10

タスク回数 task:1

図 6.21: 評価用タイピングアプリケーション

× 10 試行）であった．また，全てのセッション終了後，実験協力者に下記のアンケートに 5 段階のリッカート尺度（1：簡単–5：難しい）にて回答してもらった．

- ノンアイズフリー条件において，JoyKey の操作は簡単でしたか？
- アイズフリー条件において，JoyKey の操作は簡単でしたか？
- ノンアイズフリー条件において，ソフトウェアキーボードの操作は簡単でしたか？
- アイズフリー条件において，ソフトウェアキーボードの操作は簡単でしたか？

事前説明からアンケート回答まで 60 分程度の時間を要した．

図 6.22: 各条件における実験の様子（a: JoyKey（ノンアイズフリー条件），b: JoyKey（アイズフリー条件），c: ソフトウェアキーボード（ノンアイズフリー条件），d: ソフトウェアキーボード（アイズフリー条件）

6.4.4　結果と考察

文字入力時間（KPM = Kana Per Minutes）の結果を図 6.23 に，1 文字入力あたりのバックスペースの入力回数を図 6.24 に示す．また，各条件間の有意差検定には Scheffe の検定を用いた．図 6.23 の結果より，JoyKey 条件の平均文字入力時間はアイズフリー条件にて 24.95KPM（SD = 2.23），ノンアイズフリー条件にて 25.67KPM（SD = 3.80）であった．また，ソフトウェアキーボード条件の平均文字入力時間はアイズフリー条件にて 55.52KPM（SD = 8.06），ノンアイズフリー条件にて 20.71KPM（SD = 5.69）であった．図 6.24 の結果より，JoyKey 条件の平均バックスペース入力回数はアイズフリー条件にて 0.269 回（SD = 0.116），ノンアイズフリー条件にて 0.299 回（SD = 121）であった．また，ソフトウェ

アキーボード条件の平均バックスペース入力回数はアイズフリー条件にて 0.048 回（SD = 0.036），ノンアイズフリー条件にて 1.208 回（SD = 0.772）であった．図 6.23 より，JoyKey は 2 つの視認条件間で入力速度およびバックスペース回数があまり変わらなかったのに対し，ソフトウェアキーボードでは 2 つの視認条件間で有意にアイズフリー条件の方が入力速度が落ち，バックスペース回数が増えていることが分かる．

入力速度の実験結果に対して，Levene 検定を用いたところ，等分散性が認められたため（$p = 0.092 > 0.05$），繰り返しのある二元配置分散分析を行った．その結果，相互作用が見られたため（$p = 0.000 < 0.05$），Scheffe 検定を用いて事後分析を行った．その結果，ソフトウェアキーボード条件におけるノンアイズフリー条件とその他の条件間に有意差が認められた．

バックスペース回数の実験結果に対して，Levene 検定を用いたところ，等分散性が認めらなかったれたため（$p = 0.019 < 0.05$），Kruskal-Wallis 検定を用いて有意差検定を行った．その結果，ソフトウェアキーボード条件にて視認条件間に有意差が認められた（$\chi^2 = 18.42$, $df = 3$, $p = 0.000$）．

これらの実験結果から，ソフトウェアキーボード条件にて，アイズフリー条件はノンアイズフリーより優位に劣るということが示された．これは，タッチパネルのソフトウェアキーボードを用いる場合，物理的な触覚フィードバックがないため，どこに触れているかわからず，文字入力が難しくなったためと考えられれる．一方，Joykey 条件にて，視認条件間で特に違いは見られなかった．これは，物理キーボードの触覚フィードバックにより，手元を見ずとも触れている位置がわかるためと考えられる．

また，実験後に各条件の入力が簡単であったか，5 段階にて評価してもらった結果を図 6.25 に示す．ソフトウェアキーボード条件において，ノンアイズフリー条件は全ての実験協力者が簡単に入力できたと回答したのに対し，アイズフリー条件においてすべての実験協力者が難しいと回答した．一方, JoyKey 条件においては 2 つの視認条件ともに近い結果であり，半数以上の実験協力者が簡単であったと回答している．

これらの実験結果より，ソフトウェアキーボード条件はアイズフリー操作を行うことが難しいのに対し，JoyKey 条件はアイズフリー条件においても十分に文字入力ができることがわかった．

6.5 アプリケーション

JoyKey は 12 個のジョイスティックおよびスイッチを有するキーボードである．このキー群を用いて，文字入力以外に以下の 2 つの操作を行うことができる．

6.5.1 カーソル操作

ユーザは図 6.26b のように JoyKey を利き手に把持し，左上のキーのジョイスティックを動かすとカーソルを操作することができる．また 1 番目のキーを押下するとクリック，2 番目のキーを上下に動かすとスクロール操作，3 番目のキーを押下すると右クリックを行うことができる．一般的に拡大縮小には Ctrl + スクロールボタンが用いられるが，JoyKey では二つのキーを挟んだり，開いたりする操作を拡大縮小操作に用いることができる．

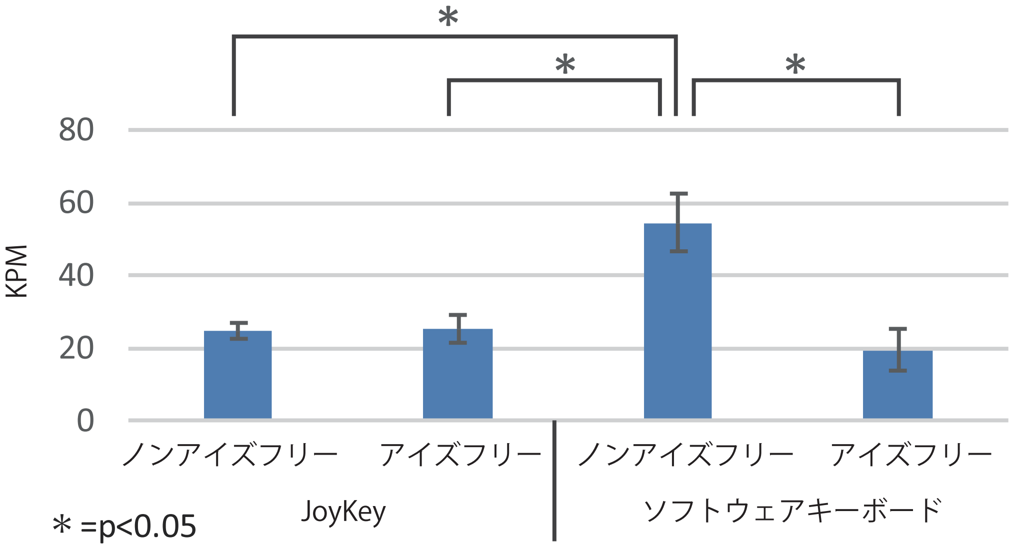


図 6.23: 各条件における文字入力速度（KPM：1 分あたりに入力された文字数，エラーバーは標準偏差）

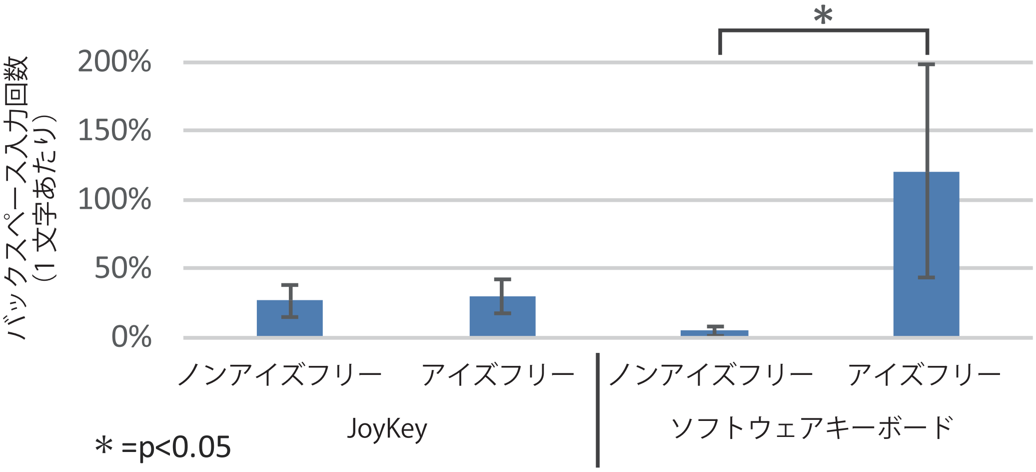


図 6.24: 各条件における 1 文字あたりのバックスペース入力回数（エラーバーは標準偏差）

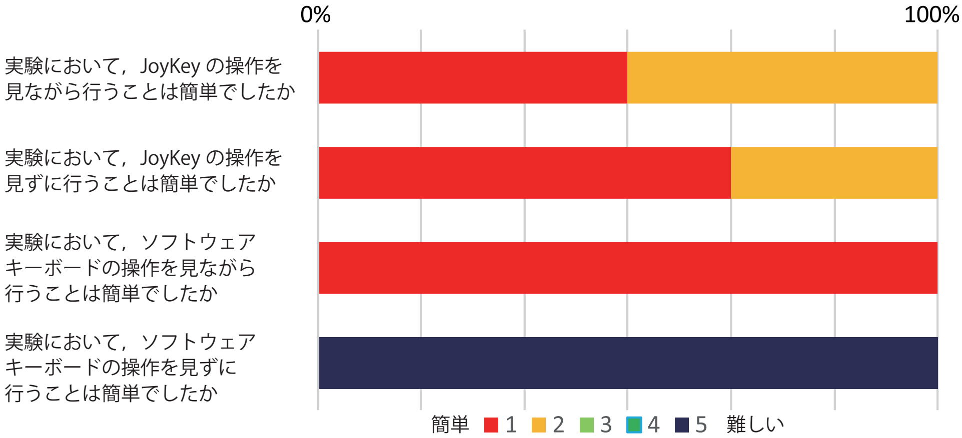


図 6.25: アンケートの結果

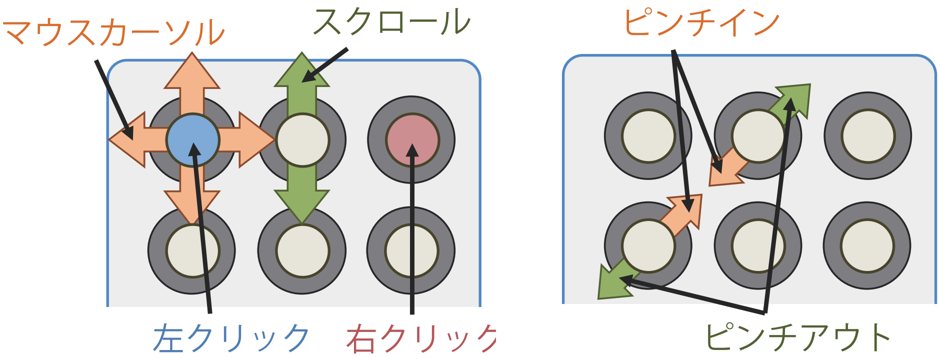


図 6.26: マウスモード

6.5.2　ゲームコントローラ

図 6.27c のように JoyKey を両手で把持し，左手側のジョイスティックおよび右手側のキーをコマンド入力ボタンとして利用する．

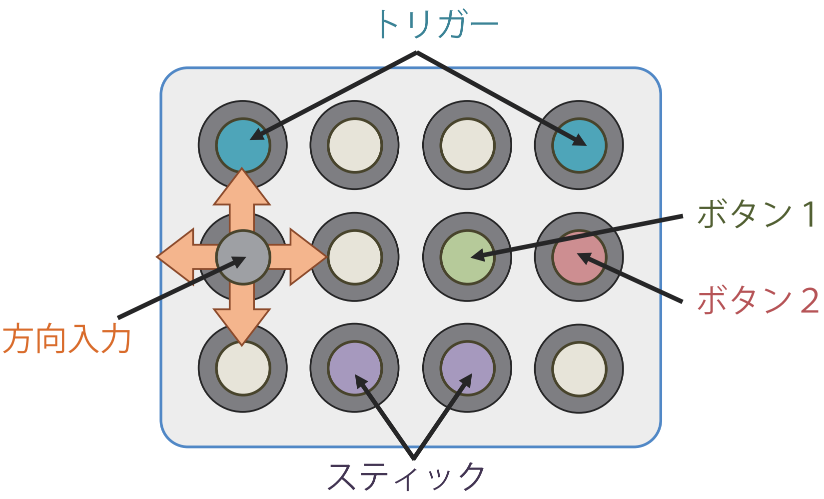


図 6.27: ゲームコントローラモード

6.6　まとめ

本章にて，ジョイスティックおよびタクトスイッチを 3×4 のキーマトリクス状に配置し，フリック入力を用いた日本語入力が可能なキーボードである JoyKey を示した．実験により JoyKey およびタッチパネルのソフトウェアキーボードを，2 つの視認条件下で用いた日本語のフリック入力の際の入力時間およびバックスペースの入力回数を評価した．その結果，ソフトウェアキーボードはアイズフリー条件においてユーザがタッチパネル上のどこに触れているかが分からず，入力精度が悪くなった．一方，JoyKey では触覚フィードバックによりユーザが触れている場所が分かるため，この問題は起こらなかった．

第7章　議論

本研究にて得られた知見および今後の発展について議論する．

7.1　デザイン手法

本節にて，これまでに述べた5つのセンシング手法の着想から，センシング多様性に寄与する新しいセンシング手法を発見・設計するためのデザイン手法について述べる．

1. **ドメインの拡張を行う**

   単純な応答のみを返すセンサであっても，時間ドメインや空間ドメインを組み合わせることにより情報量を増やすことができ，ユーザの振る舞い認識に活用できる場合がある．例えばMonoTouchは，指がタッチしたかどうかという単純なON/OFF情報を，モールス信号を模した平面的な電極を作製し，ON/OFF情報の時間的変化を観察することにより，スワイプ方向の判別を行った．また，JoyKeyは平面的なスライドを計測できるジョイスティックを空間的に拡張（アレイ上に配置）することにより，情報量を増やした．このように本デザイン手法は既存センシング手法の多目的化に寄与すると考えられる．

2. **総当り的にセンサの応答を観察する**

   様々な場面（環境，時間，デバイス等）にて，様々な振る舞い（押す，なぞる，振る，握るなど）を総当り的に行った際に，センサが特定の応答をすることがある．例えばBaroTouchは，総当り的にスマートフォン内蔵のセンサ応答を観察していたところ，気圧センサの応答がタッチパネル押下時に一瞬変化することを発見した．また，Grovは導電繊維編み込み手袋をオシロスコープに接続することにより発見した．このように本デザイン手法は既存センシング手法の多目的化に寄与すると考えられる．

3. **センサ間の類似性を見つける**

   入力インタフェースの目的（センシングしている振る舞い）が異なるセンシング手法であっても，センサ自体の応答が類似している場合がある．例えばFJKeyboardは，キーボードとタッチパネルは解像度が異なるものの，押下した位置を計測する装置であるという類似性を見出すことにより発見した．このように本デザイン手法は既存センシング手法の多目的化に寄与すると考えられるが，もともとの目的と両立させるためには，目的間の切り替え（FJKeyboardの場合は開始符号）を設計する必要がある．

4. **別のセンシング手法に置き換える**

   すでに利用されている入力インタフェースを，異なるセンシング手法にて再現できる場合がある．例えばJoyKeyはすでにタッチパネル端末にて利用されているフリック入力をジョイスティックのキーアレイにて再現した研究である．その結果，基のフリック入力を再現しただけでなく，物理的な手掛かりによるアイズフリー操作や，把持の

仕方を変えることによってマウスやゲームコントローラを再現できることを発見した．また，Gorv は VR アプリケーションやモーションキャプチャに利用されているデータグローブを，導電繊維を用いたセンシング手法にて再現した研究である．その結果，指同士の接触や把持物体認識という既存のデータグローブが併せて計測できなかった目的への拡張が発見された．このように本デザイン手法は基となる入力インタフェースを再現するだけでなく，別の目的への応用が期待される．

7.2 明示的なインタフェースと暗黙的なインタフェース

入力インタフェースにはユーザが明確な目的や主体的な意思を持って入力を行う「明示的なインタフェース」と，ユーザが意図を持たずに入力を行う「暗黙的なインタフェース」が存在する．ここで，意思というのは，ユーザが「自分は今入力を行っている」という自覚を指す．

例えば，コンピュータへの文字入力を行うためにキーボードを打鍵するというのは，ユーザが「自分は今文字入力のためにキーボードを打鍵している」を持っているため明示的なインタフェースである．一方，スマートバンドのようなウェアラブルセンサにより心拍数を常時モニタリングし健康管理に役立てる場合は，ユーザの心拍の動きという振る舞いをコンピュータに入力してるため，一種の入力インタフェースといえる．しかし，ユーザは「今，心拍数を入力している」という自覚をもたずとも入力が完遂している．こういった暗黙的なインタフェースはライフログにおいてよく用いられる．

本研究にて，単一のセンサのラベリングを増やすことによりセンシング多様性に寄与する方法について示した．ラベリングが増えるほど，同一センサが多数の用途を同時に担うことができる．そのため，明示的なインタフェースと暗黙的なインタフェースを同居できる場合がある．例えば，キーボードを打鍵している際に，スイッチの押し込まれ具合を認識できれば，その打鍵時の押下圧力を取得できる．この打鍵時の押下圧力はユーザによって異なったり，ユーザの気分や体調によって変わると考えられる．つまり，ユーザはキーボードを打鍵することにより，文字入力という明示的なインタフェースと，ユーザ認証や気分や体調ライフログの記録といった暗黙的なインタフェースを同時に利用できる．このように単一センサが多用途化することは，一石二鳥なインタフェースの構築に寄与すると考えられる．

7.3 入力インタフェースの未来

入力インタフェースは，図 1.1 に示すようにセンサを備えており，目的に応じてセンサ応答を処理し，人の振る舞いに応じてラベリングすることにより，コンピュータを操作している．この時，ユーザが入力インタフェースを利用する際に必要なコスト（学習コスト，設計コスト，金銭的コスト，身体的・精神的負荷，入力時間）をより低くする（操作を覚えやすい，入力インタフェースが作りやすい，安く作れる，楽に使える，素早く入力できる）ことが求められている．将来的に，このコストは図 7.1 に示すように，ゼロに近づいていくと考えられる．そのためには，新しいセンサの発見や，センサの新しい用途の発見およびその用途に応じたラベリング処理の設計による，センシング手法の多様性（本論文ではセンシング多様性と呼ぶ）の確保が必要となる．

また，ユーザの行動やライフログを基にユーザの次の行動を推測する手法が研究されている [HMS17, 竹内月]．こういった手法はユーザの将来の振る舞いを推測し，先んじて結果

を出力できるため学習コストや身体的・精神的負荷が低く，入力時間がマイナスとなる．これを実現するためには，なるべく多くのユーザの振る舞いを，様々な場面にてセンシングしておく必要がある．そのためには，非常に多くのセンサを組み合わせることになるが，金銭的コストが高くなってしまう．そこで，本論文にて示したセンサの役割の拡張（多用途化）は，省センサにてセンシング多様性やコストゼロ及びコストマイナスなインタフェースに貢献すると考えられる．

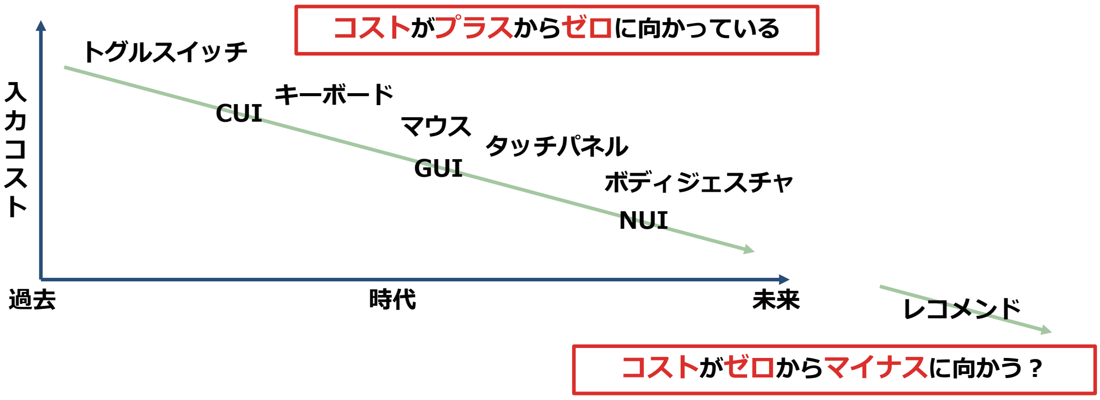


図 7.1: 入力コストの低下とインタフェースの発展

第8章　結論

8.1　結論

本研究では，センシング多様性を確保に寄与するべく，以下に示す5つのセンシング手法を示した.

1. **MonoTouch: 複数ジェスチャ認識が可能な単一電極タッチセンサ**
   MonoTouchはタップ, 上下左右スワイプを判別可能な静電容量式の単一電極タッチセンサである．MonoTouchの電極はジェスチャごとに応答が異なるように設計された電極パターンを有しており, 3Dプリントが可能である．本研究にてMonoTouchを実装し，実験によりジェスチャの認識精度を評価した．その際，複数の導電部に指がまたがることにより判別精度が落ちる問題が生じたため，この問題を解決するための電極パターンの工夫を発見し，その効果を検証した．また，電極の導電部および非導電部の幅とジェスチャ認識精度の関係を調査し，デザイン指針を示した.

2. **BaroTouch：防水タッチパネル端末に内蔵された気圧センサを用いた押下圧力取得手法**
   BaroTouchは防水機能を有し, 気圧センサを内蔵しているタッチパネル端末において, 指の押下圧力を取得する手法である．BaroTouchでは, 画面を押下した際に端末表面がたわみ, 内部の気圧が上昇する現象を, 気圧センサを用いて計測することにより押下圧力を取得することができる．BaroTouchにおいて周囲の環境や端末の気密性の違いによって気圧センサの応答が異なるという問題を発見し，その問題を解決するためのアルゴリズムを示した．実装したBaroTouchを用いて，様々な条件下におけるBaroTouchの感圧特性を評価し，ユーザによる押し分け精度評価を行った.

3. **Grov：導電繊維編み込み手袋を用いた手形状認識手法**
   Grovは導電繊維が編み込まれた手袋をセンサの一部として用いることにより，指の曲げ具合，指同士の接触並びに接触位置といった手形状に加え，把持物体の認識を同時にリアルタイムで行う手法である．またGrovは，小型・軽量・安価に実装可能であり，柔軟であるため壊れにくく，洗濯することもできる．本研究にてGrovの実装を行い，手形状の認識精度を評価し，手形状を認識可能であることを示した．また把持物体の認識手法を示した．さらにGrovを用いたアプリケーションを容易に実装するためのSDKを実装した.

4. **FJKeyboard：キーボード上における2つのキーの連続押下を開始符号とする操作手法**
   FJKeyboardは既存のQWERTY配列の物理キーボードのみを用いて，文字入力操作，ポインティング操作，ジェスチャ操作を行う手法である．FJKeyboardにおいて各操作の切り替えは，ユーザがキーボードのFキーおよびJキーもしくはKキーを連続押下し，JキーもしくはKキーを押下したままFキーから指を離しという開始符号を入力することにより行われる．FJKeyboardは物理キーボードのみを用いるため，他デ

バイスを併用する場合に比べ設置に必要となる面積が小さく，かつデバイスの持ち替えを必要としない点において優れている．本研究にて開始符号の妥当性についてキーロガーを用いた実験により示した．また，FJKeyboard の実装を行い，その入力速度および入力精度，使用感を調査した．

5. **JoyKey：4×3 の格子状にジョイスティックを有する片手把持キーボード**
   JoyKey はスマートフォンにおいて広く用いられているフリック入力を行うための片手把持キーボードである．JoyKey を実装し，入力速度，入力精度および使用感をタッチパネルのソフトウェアキーボードと比較した．その結果，ソフトウェアキーボードはアイズフリーだと著しく入力精度が落ちる一方，JoyKey はアイズフリーにて文字入力が可能であることを示した．さらに JoyKey は，持ち方を変えることにより，文字入力操作以外に画面のカーソルを操作するためのマウスとして用いたり，ビデオゲームを操作するためのゲームコントローラとして用いることができる．

5 つのセンシング手法は，いずれも同種類（単一）のセンサを多用途に用いる手法である．

また，これらのセンシング手法を発見するに至った着想のプロセスから，これから新しいセンシング手法を発見しセンシング多様性を確保するための指針となるデザイン手法をまとめた．

8.2　本研究の貢献

本論文の貢献は以下のとおりである．

1. 静電容量方式のタッチセンサを用いて，タップに加えてスワイプジェスチャを判別する方法「MonoTouch」を発見した．
2. 防水端末内蔵の気圧センサにて押下圧力を取得する手法「BaroTouch」を発見した．
3. 導電繊維編み込み手袋を用いた，指の曲げ/指の接触/把持物体を認識可能なデータグローブ「Grov」を発見した
4. フルキーボードを用いて, 瞬時に入力可能な開始符号によって, 文字入力操作, ポインティング操作ならびにジェスチャ操作を自由に切り替えながら入力する方法「FJKeyboard」を発見した．
5. フリック入力に加えてマウス，ゲームコントローラとしても利用可能な片手把持キーボード「JoyKey」を発見した．
6. 1–5 の手法を実装し，その妥当性を評価した．
7. 1–5 の手法を発見した過程から得られた，発見に至るプロセスをまとめ，単一センサの多用途化のためのデザイン手法を示した．

謝辞

5年間の博士前期課程ならびに博士後期課程の修学ならびに研究活動にあたり，生活面から研究に至るまで丁寧かつ親身に面倒を見ていただいた志築文太郎教授になによりの感謝の意を表します．ありがとうございました．志築先生の熱心なご指導により，研究者として必要な研究能力が身についただけでなく，常日頃より相手のことを思いやることがヒューマンコンピュータインタラクション分野において大切であることを学びました．来年度より，私も一指導者として教育ならびに研究指導に携わることになりますが，その際は先生のように自ら考え，挑戦する志を育むような学生を育てるべく邁進していく所存です，

また，高橋伸准教授，嵯峨智准教授，ヴァシラケ シモナ助教，川口一画助教には普段の研究やゼミ活動および春合宿など，様々な場面にて，多くのご助言・ご指導をいただきました．心より感謝いたします．

さらに，このような素晴らしい学びの機会を得たのは，ひとえにIPLABがあったためです．IPLABを創設した田中二郎教授には大変お世話になりました．IPLABで多くの素晴らしい仲間と巡り合うことができましたのも，田中先生のご尽力あってのことだと理解しております．

生まれてから22年過ごした神戸を離れ，つくばに来てはや6年経ちました．当初は右も左も分からず不安でしたが，素晴らしい仲間に巡り会えたおかげですぐに馴染むことができました．その仲間達と協力・切磋琢磨して多くの挑戦を行い，多くの経験を積むことができました．たった6年という月日でしたが，研究発表・コンテスト・起業・未踏・インターンシップ…と枚挙に暇がないほどの本当に多くの経験を積むことができました．

IPLABの先輩・同期・後輩の皆様方，特にWAVEチームの皆さまには本当にお世話になりました．IPLABの皆様とは，研究における協調や議論だけでなく，日常の会話においても学ぶことが多く，本当に素晴らしい知見・経験を持った方が多く，とても楽しい研究生活を送ることができました．ありがとうございました．皆さまのさらなるご健勝を心よりお祈りしております．

博士後期1年次の際には未踏事業に採択され，十分な研究資金を得ることができました．未踏事業は大変素晴らしい事業であり，おかげさまで多分野にわたる非常にレベルの高いクリエータの方々と知り合うことができました．今後もより事業が盛り上がることを心より願っております．また，未踏において，忙しい中時間を割いて私のプロジェクトを熱く・丁寧に指導してくださった藤井 彰人PMには大変お世話になりました．おかげさまで素晴らしい成果を出すことができ，その内容は余すことなく本博士論文に盛り込むことができました．心より感謝申し上げます．

未踏を通して出会った門本淳一郎君には，Grovの研究を手伝っていただきました．多岐に渡るレベルの高いスキルを持つ門本淳一郎君のおかげで，成し得たことは多く，一緒にグラスゴーに行って大変なデモ発表を行った経験は忘れません．

また博士後期課程の4年間では，さまざまな機関のインターンシップに参加し，実に多くの研究テーマに取り組むことができました．インターンシップに際し，私を受け入れてくださり，ご指導いただいた，真鍋宏幸先生，山田渉様，山中祥太様，福本雅朗様，岩崎健一郎様，玉城絵美先生，岩本拓也様には本当にお世話になりました．おかげさまで，様々な貴

重な経験を得ることができ，研究者として視野を拡げることができました．厚く御礼申し上げます．

本博士論文の審査に際しては，主査として志築文太郎教授，副査として井野秀一教授，田中二郎教授，庄野和宏准教授，蜂須拓助教に引き受けていただき，予備審査の際に様々なご意見と知見を頂戴いたしました．深く感謝申し上げます．

本論文の研究に際し，とても多くの方々に実験に協力していただきました．本研究の趣旨を理解し快く協力していただいた，実験協力者の方々に厚く御礼申し上げます．

上に述べた方々以外にも，本当に多くの企業の方々，研究者の方々，先生方に議論いただいたおかげで，研究をより深いものにすることができました．厚く御礼申し上げます．

多くの素晴らしい方々に出会い，議論し，指導賜り，挑戦して得た経験はかけがえのないものです．来年度より，私は母校である神戸市立工業高等専門学校に帰り，自立した研究者として，教員として，そして一人の先達として，後輩たちの指導にあたることになります．その際には，6 年間で得た経験を余すことなく伝え，未来の研究者・エンジニアの糧になるよう努めたく思います．

最後になりましたが，難聴の障害を持ってるにも関わらず，私をここまで育ててくださった両親に心より感謝いたします．

参考文献

[5DT] 5DT. Virtual Reality Hardware. `https://5dt.com/5dt-data-glove-ultra/`（2021 年 1 月 4 日閲覧）.

[AST16] Shuhei Aoyama, Buntarou Shizuki, and Jiro Tanaka. ThumbSlide: An Interaction Technique for Smartwatches using a Thumb Slide Movement. In *Proceedings of the 2016 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '16, pp. 2403–2409, New York, NY, USA, 2016. ACM.

[Bad] Paul Badger. Capacitive Sensing Library. `http://playground.arduino.cc/Main/CapacitiveSensor`.

[BCO+12] Xiaojun Bi, Ciprian Chelba, Tom Ouyang, Kurt Partridge, and Shumin Zhai. Bimanual Gesture Keyboard. In *Proceedings of the 25th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '12, p. 137–146, New York, NY, USA, 2012. Association for Computing Machinery.

[BKS+15] Srijan Bhattacharya, Siladitya Khan, Tanmoy Sil, Bikash Bepari, and Subhasis Bhaumik. IPMC Based Data Glove for Finger Motion Capturing. In *Proceedings of the 2015 Conference on Advances In Robotics*, AIR '15, pp. 51:1–51:6, New York, NY, USA, 2015. ACM.

[BPDW13] Gilles Bailly, Thomas Pietrzak, Jonathan Deber, and Daniel J. Wigdor. Métamorphe: Augmenting hotkey usage with actuated keys. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '13, p. 563–572, New York, NY, USA, 2013. Association for Computing Machinery.

[Cap] CaptoGlove LLC. CaptoGlove. `https://www.captoglove.com/`（2021 年 1 月 4 日閲覧）.

[CCH+15] Liwei Chan, Yi-Ling Chen, Chi-Hao Hsieh, Rong-Hao Liang, and Bing-Yu Chen. CyclopsRing: Enabling Whole-Hand and Context-Aware Interactions Through a Fisheye Ring. In *Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '15, pp. 549–556, New York, NY, USA, 2015. ACM.

[CL11] Chih-Chung Chang and Chih-Jen Lin. LIBSVM: A Library for Support Vector Machines. *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology*, Vol. 2, No. 3, pp. 27:1–27:27, May 2011.

[CMPT11] Gabe Cohn, Daniel Morris, Shwetak N. Patel, and Desney S. Tan. Your Noise is My Command: Sensing gestures using the body as an antenna. In *Proceedings* *of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '11, pp. 791–800, New York, NY, USA, 2011. ACM.

[CS12] Beginner's Mind Collective and David Shaw. Makey Makey: Improvising tangible and nature-based user interfaces. In *Proceedings of the Sixth International Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interaction*, TEI '12, pp. 367–370, New York, NY, USA, 2012. ACM.

[DEWB09] Paul H. Dietz, Benjamin Eidelson, Jonathan Westhues, and Steven Bathiche. A practical pressure sensitive computer keyboard. In *Proceedings of the 22nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '09, pp. 55–58, New York, NY, USA, 2009. ACM.

[DP14] Artem Dementyev and Joseph A. Paradiso. WristFlex: Low-Power Gesture Input with Wrist-Worn Pressure Sensors. In *Proceedings of the 27th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '14, pp. 161–166, New York, NY, USA, 2014. ACM.

[DSD03] Laura Dipietro, Angelo M. Sabatini, and Paolo Dario. Evaluation of an Instrumented Glove for Hand-Movement Acquisition. *Journal of rehabilitation research and development*, Vol. 40, No. 2, pp. 179–189, 2003.

[DSD08] Laura Dipietro, Angelo M. Sabatini, and Paolo Dario. A Survey of Glove-Based Systems and Their Applications. *Transactions on Sysems, Man, and Cybernetics, Part C*, Vol. 38, No. 4, pp. 461–482, July 2008.

[FLW12] Leah Findlater, Ben Lee, and Jacob Wobbrock. Beyond QWERTY: Augmenting touch screen keyboards with multi-touch gestures for non-alphanumeric input. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '12, p. 2679–2682, New York, NY, USA, 2012. Association for Computing Machinery.

[GCBD13] Guido Gioberto, James Coughlin, Kaila Bibeau, and Lucy E. Dunne. Detecting Bends and Fabric Folds Using Stitched Sensors. In *Proceedings of the 2013 International Symposium on Wearable Computers*, ISWC '13, pp. 53–56, New York, NY, USA, 2013. ACM.

[GHH$^+$13] Jiseong Gu, Seongkook Heo, Jaehyun Han, Sunjun Kim, and Geehyuk Lee. Longpad: A touchpad using the entire area below the keyboard of a laptop computer. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '13, pp. 1421–1430, New York, NY, USA, 2013. ACM.

[Gig] Gigazine. iphone 6sで新たに搭載された「3d touch」はこうやって使うよレビュー. `https://gigazine.net/news/20150925-iphone-6s-3d-touch/`（2021年1月4日閲覧）.

[GKM08] Kentaro Go, Hayato Konishi, and Yoshisuke Matsuura. IToNe: A Japanese text input method for a dual joystick game controller. In *CHI '08 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '08, pp. 3141–3146, New York, NY, USA, 2008. ACM.

[Goo] Google Japan Inc. Google Japanese text entry. （2021 年 1 月 4 日閲覧）.

[GSO+14] Nan-Wei Gong, Jürgen Steimle, Simon Olberding, Steve Hodges, Nicholas Edward Gillian, Yoshihiro Kawahara, and Joseph A. Paradiso. Printsense: A versatile sensing technique to support multimodal flexible surface interaction. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '14, pp. 1407–1410, New York, NY, USA, 2014. ACM.

[GWP12] Mayank Goel, Jacob Wobbrock, and Shwetak Patel. Gripsense: Using built-in sensors to detect hand posture and pressure on commodity mobile phones. In *Proceedings of the 25th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '12, pp. 545–554, New York, NY, USA, 2012. ACM.

[Han05] Jefferson Y. Han. Low-cost multi-touch sensing through frustrated total internal reflection. In *Proceedings of the 18th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '05, pp. 115–118, New York, NY, USA, 2005. ACM.

[HB11] Christian Holz and Patrick Baudisch. Understanding touch. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '11, pp. 2501–2510, New York, NY, USA, 2011. ACM.

[HBAD11] Chris Harrison, Hrvoje Benko, and Wilson. Andrew D. OmniTouch: Wearable Multitouch Interaction Everywhere. In *Proceedings of the 24th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '11, pp. 441–450, New York, NY, USA, 2011. ACM.

[HBJ08] Eve Hoggan, Stephen A. Brewster, and Jody Johnston. Investigating the effectiveness of tactile feedback for mobile touchscreens. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '08, p. 1573–1582, New York, NY, USA, 2008. Association for Computing Machinery.

[HH08] Chris Harrison and Scott E. Hudson. Scratch Input: Creating large, inexpensive, unpowered and mobile finger input surfaces. In *Proceedings of the 21st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '08, pp. 205–208, New York, NY, USA, 2008. ACM.

[HIB+07] Steve Hodges, Shahram Izadi, Alex Butler, Alban Rrustemi, and Bill Buxton. ThinSight: Versatile multi-touch sensing for thin form-factor displays. In *Proceedings of the 20th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '07, pp. 259–268, New York, NY, USA, 2007. ACM.

[HIWB14] 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. ACM.

[HL11a] Seongkook Heo and Geehyuk Lee. Force gestures: Augmented touch screen gestures using normal and tangential force. In *CHI '11 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '11, pp. 1909–1914, New York, NY, USA, 2011. ACM.

[HL11b] Seongkook Heo and Geehyuk Lee. Forcetap: Extending the input vocabulary of mobile touch screens by adding tap gestures. In *Proceedings of the 13th International Conference on Human Computer Interaction with Mobile Devices and Services*, MobileHCI '11, pp. 113–122, New York, NY, USA, 2011. ACM.

[HMS17] Yuuki Horiuchi, Yasutoshi Makino, and Hiroyuki Shinoda. Computational foresight: Forecasting human body motion in real-time for reducing delays in interactive system. In *Proceedings of the 2017 ACM International Conference on Interactive Surfaces and Spaces*, ISS '17, p. 312–317, New York, NY, USA, 2017. Association for Computing Machinery.

[HSH11] Chris Harrison, Julia Schwarz, and Scott E. Hudson. TapSense: Enhancing finger interaction on touch surfaces. In *Proceedings of the 24th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '11, pp. 627–636, New York, NY, USA, 2011. ACM.

[HSP$^+$08] Paul Holleis, Albrecht Schmidt, Susanna Paasovaara, Arto Puikkonen, and Jonna Häkkilä. Evaluating capacitive touch input on clothes. In *Proceedings of the 10th International Conference on Human Computer Interaction with Mobile Devices and Services*, MobileHCI '08, pp. 81–90, New York, NY, USA, 2008. ACM.

[HSP12] Chris Harrison, Munehiko Sato, and Ivan Poupyrev. Capacitive fingerprinting: Exploring user differentiation by sensing electrical properties of the human body. In *Proceedings of the 25th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '12, pp. 537–544, New York, NY, USA, 2012. ACM.

[HTM11] Chris Harrison, Desney Tan, and Dan Morris. Skinput: Appropriating the Skin as an Interactive Canvas. *Commun. ACM*, Vol. 54, No. 8, p. 111–118, August 2011.

[HW12] Sungjae Hwang and Kwang. Yun Wohn. PseudoButton: Enabling Pressure-sensitive Interaction by Repurposing Microphone on Mobile Device. In *Proceedings of the 30th Annual ACM Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '12, pp. 1565–1570, New York, NY, USA, 2012. ACM.

[HWW13] Christopher-Eyk Hrabia, Katrin Wolf, and Mathias Wilhelm. Whole hand modeling using 8 wearable sensors: Biomechanics for hand pose prediction. In *Proceedings of the 4th Augmented Human International Conference*, AH '13, pp. 21–28, New York, NY, USA, 2013. ACM.

[HXH12] Chris Harrison, Robert Xiao, and Scott Hudson. Acoustic Barcodes: Passive, durable and inexpensive notched identification tags. In *Proceedings of the 25th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '12, pp. 563–568, New York, NY, USA, 2012. ACM.

[Iiy] Iiyama. ProLite T1531SAW. `http://www.iiyama.co.jp/products/touchpanel/15/PLT1531SAW/index.html`（2021 年 1 月 4 日閲覧）.

[Int] Intel Corpolation. Intel Remote Keyboard User Guide.（2021年1月4日閲覧）.

[IR04] Poika Isokoski and Roope Raisamo. Quikwriting as a multi-device text entry method. In *Proceedings of the Third Nordic Conference on Human-computer Interaction*, NordiCHI '04, pp. 105–108, New York, NY, USA, 2004. ACM.

[KADY07] R. C. King, L. Atallah, A. Darzi, and G. Z. Yang. An HMM Framework for Optimal Sensor Selection with Applications to BSN Sensor Glove Design. In *Proceedings of the 4th Workshop on Embedded Networked Sensors*, EmNets '07, pp. 58–62, New York, NY, USA, 2007. ACM.

[KHI$^+$12] David Kim, Otmar Hilliges, Shahram Izadi, Alex D. Butler, Jiawen Chen, Iason Oikonomidis, and Patrick Olivier. Digits: Freehand 3D Interactions Anywhere Using a Wrist-Worn Gloveless Sensor. In *Proceedings of the 25th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '12, pp. 167–176, New York, NY, USA, 2012. ACM.

[KIG07] Thomas Költringer, Poika Isokoski, and Thomas Grechenig. TwoStick: Writing with a game controller. In *Proceedings of Graphics Interface 2007*, GI '07, pp. 103–110, New York, NY, USA, 2007. ACM.

[KMA08] Jonghwa Kim, Stephan Mastnik, and Elisabeth André. EMG-Based Hand Gesture Recognition for Realtime Biosignal Interfacing. In *Proceedings of the 13th International Conference on Intelligent User Interfaces*, IUI '08, pp. 30–39, New York, NY, USA, 2008. ACM.

[KRL12] Hwan Kim, Yea-kyung Row, and Geehyuk Lee. Back Keyboard: A physical keyboard on backside of mobile phone using qwerty. In *CHI '12 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '12, pp. 1583–1588, New York, NY, USA, 2012. ACM.

[KSI10] Jun Kato, Daisuke Sakamoto, and Takeo Igarashi. Surfboard: Keyboard with microphone as a low-cost interactive surface. In *Adjunct Proceedings of the 23nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '10, p. 387–388, New York, NY, USA, 2010. Association for Computing Machinery.

[KST13a] Toshifumi Kurosawa, Buntarou Shizuki, and Jiro Tanaka. Keyboard Clawing: Input method by clawing key tops. In Masaaki Kurosu, editor, *Human-Computer Interaction. Interaction Modalities and Techniques*, pp. 272–280, Berlin, Heidelberg, 2013. Springer Berlin Heidelberg.

[KST13b] Toshifumi Kurosawa, Buntarou Shizuki, and Jiro Tanaka. Keyboard Clawing: Input method by clawing key tops. In *Proceedings of 15th International Conference on Human-Computer Interaction*, HCII '13, pp. 272–280, Nevada, 2013. ACM.

[KZ07] Per Ola Kristensson and Shumin Zhai. Command strokes with and without preview: Using pen gestures on keyboard for command selection. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '07, p. 1137–1146, New York, NY, USA, 2007. Association for Computing Machinery.

[LBHH15] Gierad Laput, Eric Brockmeyer, Scott E. Hudson, and Chris Harrison. Acoustruments: Passive, acoustically-driven, interactive controls for handheld devices. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '15, pp. 2161–2170, New York, NY, USA, 2015. ACM.

[Lea] Leap Motion Inc. Leap Motion. `https://www.leapmotion.com/`（2021 年 1 月 4 日閲覧）.

[LEG] LEGO. Mindstorms. `https://www.lego.com/en-us/mindstorms/`（2021 年 1 月 4 日閲覧）.

[LSFI13] Suzanne Low, Yuta Sugiura, Kevin Fan, and Masahiko Inami. Cuddly: Enchant your soft objects with a mobile phone. In *SIGGRAPH Asia 2013 Emerging Technologies*, SA '13, pp. 5:1–5:2, New York, NY, USA, 2013. ACM.

[LXH16] Gierad Laput, Robert Xiao, and Chris Harrison. ViBand: High-Fidelity Bio-Acoustic Sensing Using Commodity Smartwatch Accelerometers. In *Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '16, pp. 321–333, New York, NY, USA, 2016. ACM.

[LYX+15] Gierad Laput, Chouchang Yang, Robert Xiao, Alanson Sample, and Chris Harrison. EM-Sense: Touch recognition of uninstrumented, electrical and electromechanical objects. In *Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software & Technology*, UIST '15, pp. 157–166, New York, NY, USA, 2015. ACM.

[MEL] MELLOTT'S VR. MEASURAND SHAPEHAND. `https://www.mellottsvrpage.com/index.php/measurand-shapehand/`（2021 年 1 月 4 日閲覧）.

[MPP+08] Joe Marshall, Tony Pridmore, Mike Pound, Steve Benford, and Boriana Koleva. *Pressing the Flesh: Sensing Multiple Touch and Finger Pressure on Arbitrary Surfaces*, pp. 38–55. Springer, Berlin, Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2008.

[MS03] I. Scott MacKenzie and R. William Soukoreff. Phrase sets for evaluating text entry techniques. In *CHI '03 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '03, p. 754–755, New York, NY, USA, 2003. Association for Computing Machinery.

[MSBA12] Sam Miller, Andy Smith, Sina Bahram, and Robert St. Amant. A Glove for Tapping and Discrete 1D/2D Input. In *Proceedings of the 2012 ACM International Conference on Intelligent User Interfaces*, IUI '12, pp. 101–104, New York, NY, USA, 2012. ACM.

[NIH+13] Kosuke Nakajima, Yuichi Itoh, Yusuke Hayashi, Kazuaki Ikeda, Kazuyuki Fujita, and Takao Onoye. Emoballoon. In *Proceeding of the 10th International Conference on Advances in Computer Entertainment - Volume 8253*, ACE 2013, pp. 182–197, New York, NY, USA, 2013. Springer-Verlag New York, Inc.

[NKOK14] Yuriko Nakai, Shinya Kudo, Ryuta Okazaki, and Hiroyuki Kajimoto. Tangential force input for touch panels using bezel-aligned elastic pillars and a transparent sheet. In *Proceedings of the Adjunct Publication of the 27th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST'14 Adjunct, pp. 111–112, New York, NY, USA, 2014. ACM.

[note] note = `https://io9.gizmodo.com/this-sleek-gesture-control-armband-can-now-be-used-to-p-1527839462`（2021 年 1 月 4 日閲覧）GIZMODO.

[NWI14] Takehiro Niikura, Yoshihiro Watanabe, and Masatoshi Ishikawa. Anywhere Surface Touch: Utilizing Any Surface as an Input Area. In *Proceedings of the 5th Augmented Human International Conference*, AH '14, pp. 39:1–39:8, New York, NY, USA, 2014. ACM.

[OST13] Makoto Ono, Buntarou Shizuki, and Jiro Tanaka. Touch & Activate: Adding Interactivity to Existing Objects using Active Acoustic Sensing. In *Proceedings of the 26th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '13, pp. 31–40, New York, NY, USA, 2013. ACM.

[OST14] Makoto Ono, Buntarou Shizuki, and Jiro Tanaka. A rapid prototyping toolkit for touch sensitive objects using active acoustic sensing. In *Proceedings of the Adjunct Publication of the 27th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '14 Adjunct, pp. 35–36, New York, NY, USA, 2014. ACM.

[OST15] Makoto Ono, Buntarou Shizuki, and Jiro Tanaka. Sensing touch force using active acoustic sensing. In *Proceedings of the Ninth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*, TEI '15, pp. 355–358, New York, NY, USA, 2015. ACM.

[PB37] Wilder Penfield and Edwin Boldrey. Somatic motor and sensory representation in the cerebral cortex of man as studied by electrical stimulation1. *Brain*, Vol. 60, No. 4, pp. 389–443, 12 1937.

[PDD14] Anna Peshock, Julia Duvall, and Lucy E. Dunne. Argot: A Wearable One-Handed Keyboard Glove. In *Proceedings of the 2014 ACM International Symposium on Wearable Computers: Adjunct Program*, ISWC '14 Adjunct, pp. 87–92, New York, NY, USA, 2014. ACM.

[Per98] Ken Perlin. Quikwriting: Continuous stylus-based text entry. In *Proceedings of the 11th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '98, pp. 215–216, New York, NY, USA, 1998. ACM.

[PH14] Esben Warming Pedersen and Kasper Hornbæk. Expressive touch: Studying tapping force on tabletops. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '14, pp. 421–430, New York, NY, USA, 2014. ACM.

[PN13] Roshan Lalintha Peiris and Ryohei Nakatsu. TempTouch: A novel touch sensor using temperature controllers for surface based textile displays. In *Proceedings of* *the 2013 ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces*, ITS '13, pp. 105–114, New York, NY, USA, 2013. ACM.

[PR50] Wilder Penfield and Theodore Rasmussen. The Cerebral Cortex of Man: A Clinical Study of Localization of Function. *Journal of the American Medical Association*, Vol. 144, No. 16, pp. 1412–1412, 12 1950.

[PSLS12] Ivan Poupyrev, Philipp Schoessler, Jonas Loh, and Munehiko Sato. Botanicus Interacticus: Interactive plants technology. In *ACM SIGGRAPH 2012 Emerging Technologies*, SIGGRAPH '12, pp. 4:1–4:1, New York, NY, USA, 2012. ACM.

[RP09] Ilya Rosenberg and Ken Perlin. The UnMousePad: An interpolating multi-touch force-sensing input pad. *ACM Trans. Graph.*, Vol. 28, No. 3, pp. 65:1–65:9, July 2009.

[RRF04] Volker Roth, Kai Richter, and Rene Freidinger. A pin-entry method resilient against shoulder surfing. In *Proceedings of the 11th ACM Conference on Computer and Communications Security*, CCS '04, pp. 236–245, New York, NY, USA, 2004. ACM.

[RS06] Jun Rekimoto and Carsten Schwesig. Presenseii: Bi-directional touch and pressure sensing interactions with tactile feedback. In *CHI '06 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '06, pp. 1253–1258, New York, NY, USA, 2006. ACM.

[SHH$^+$15] Valkyrie Savage, Andrew Head, Björn Hartmann, Dan B. Goldman, Gautham Mysore, and Wilmot Li. Lamello: Passive acoustic sensing for tangible input components. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '15, pp. 1277–1280, New York, NY, USA, 2015. ACM.

[SKW$^+$11] Yuta Sugiura, Gota Kakehi, Anusha Withana, Calista Lee, Daisuke Sakamoto, Maki Sugimoto, Masahiko Inami, and Takeo Igarashi. Detecting shape deformation of soft objects using directional photoreflectivity measurement. In *Proceedings of the 24th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '11, pp. 509–516, New York, NY, USA, 2011. ACM.

[SLW$^+$11] Yuta Sugiura, Calista Lee, Anusha Withana, Yasutoshi Makino, Masahiko Inami, and Takeo Igarashi. PINOKY: A ring that animates your plush toys. In *SIGGRAPH Asia 2011 Emerging Technologies*, SA '11, pp. 14:1–14:1, New York, NY, USA, 2011. ACM.

[SO13] Oliver Schoenleben and Antti Oulasvirta. Sandwich Keyboard: Fast ten-finger typing on a mobile device with adaptive touch sensing on the back side. In *Proceedings of the 15th International Conference on Human-computer Interaction with Mobile Devices and Services*, MobileHCI '13, pp. 175–178, New York, NY, USA, 2013. ACM.

[SON] SONY. MESH. `http://meshprj.com/jp/`（2021年1月4日閲覧）.

[SPH12] Munehiko Sato, Ivan Poupyrev, and Chris Harrison. Touché: Enhancing touch interaction on humans, screens, liquids, and everyday objects. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '12, pp. 483–492, New York, NY, USA, 2012. ACM.

[SPI] SPICE. COBRA GLOVES. `http://www.mocap.jp/igs/`（2021 年 1 月 4 日閲覧）.

[SV16] 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. ACM.

[TCY$^+$15] Ying-Chao Tung, Ta Yang Cheng, Neng-Hao Yu, Chiuan Wang, and Mike Y. Chen. Flickboard: Enabling trackpad interaction with automatic mode switching on a capacitive-sensing keyboard. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '15, pp. 1847–1850, New York, NY, USA, 2015. ACM.

[The] The Peregrine. The Peregrine Glove. `http://theperegrine.com/`（2021 年 1 月 4 日閲覧）.

[TKH$^+$14] Stuart Taylor, Cem Keskin, Otmar Hilliges, Shahram Izadi, and John Helmes. Type-Hover-Swipe in 96 Bytes: A Motion Sensing Mechanical Keyboard. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '14, p. 1695–1704, New York, NY, USA, 2014. Association for Computing Machinery.

[TLW$^+$15] Ao Tang, Ke Lu, Yufei Wang, Jie Huang, and Houqiang Li. A Real-Time Hand Posture Recognition System Using Deep Neural Networks. *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology*, Vol. 6, No. 2, pp. 21:1–21:23, March 2015.

[TMR09] Emi Tamaki, Takashi Miyaki, and Jun Rekimoto. Brainy Hand: An Ear-Worn Hand Gesture Interaction Device. In *CHI '09 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '09, pp. 4255–4260, New York, NY, USA, 2009. ACM.

[TS16] Yu-Chih Tung and Kang G. Shin. Expansion of human-phone interface by sensing structure-borne sound propagation. In *Proceedings of the 14th Annual International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services*, MobiSys '16, pp. 277–289, New York, NY, USA, 2016. ACM.

[VCC$^+$09] Daniel Vogel, Matthew Cudmore, Géry Casiez, Ravin Balakrishnan, and Liam Keliher. Hand occlusion with tablet-sized direct pen input. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '09, pp. 557–566, New York, NY, USA, 2009. ACM.

[WA06] Andrew D. Wilson and Maneesh Agrawala. Text entry using a dual joystick game controller. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '06, pp. 475–478, New York, NY, USA, 2006. ACM.

[WB11] Raphael Wimmer and Patrick Baudisch. Modular and deformable touch-sensitive surfaces based on time domain reflectometry. In *Proceedings of the 24th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '11, pp. 517–526, New York, NY, USA, 2011. ACM.

[WBHP12] Karl Willis, Eric Brockmeyer, Scott Hudson, and Ivan Poupyrev. Printed Optics: 3D printing of embedded optical elements for interactive devices. In *Proceedings of the 25th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '12, pp. 589–598, New York, NY, USA, 2012. ACM.

[WKH+16] Gerard Wilkinson, Ahmed Kharrufa, Jonathan Hook, Bradley Pursglove, Gavin Wood, Hendrik Haeuser, Nils Y. Hammerla, Steve Hodges, and Patrick Olivier. Expressy: Using a wrist-worn inertial measurement unit to add expressiveness to touch-based interactions. In *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '16, pp. 2832–2844, New York, NY, USA, 2016. ACM.

[WMA04] Jacob O. Wobbrock, Brad A. Myers, and Htet Htet Aung. Joystick text entry with date stamp, selection keyboard, and EdgeWrite. In *CHI '04 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '04, pp. 1550–1550, New York, NY, USA, 2004. ACM.

[WMK03] Jacob O. Wobbrock, Brad A. Myers, and John A. Kembel. EdgeWrite: A stylus-based text entry method designed for high accuracy and stability of motion. In *Proceedings of the 16th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '03, pp. 61–70, New York, NY, USA, 2003. ACM.

[YHR14] Sang Ho Yoon, Ke Huo, and Karthik Ramani. Plex: Finger-worn Textile Sensor for Mobile Interaction During Activities. In *Proceedings of the 2014 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing: Adjunct Publication*, UbiComp '14 Adjunct, pp. 191–194, New York, NY, USA, 2014. ACM.

[ZH15] Yang Zhang and Chris Harrison. Tomo: Wearable, Low-Cost Electrical Impedance Tomography for Hand Gesture Recognition. In *Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '15, pp. 167–173, New York, NY, USA, 2015. ACM.

[ZK12] Shumin Zhai and Per Ola Kristensson. The Word-Gesture Keyboard: Reimagining keyboard interaction. *Communications of the ACM. ACM*, Vol. 55, No. 9, pp. 91–101, September 2012.

[ZL14] Haimo Zhang and Yang Li. Gestkeyboard: Enabling gesture-based interaction on ordinary physical keyboard. In *Proceedings of the 32nd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '14, pp. 1675–1684, New York, NY, USA, 2014. ACM.

[高田 16] 高田崚介, 林威, 安藤宗孝, 志築文太郎, 高橋伸. BaroTouch：防水タッチパネル端末に内蔵された気圧センサを用いた押下圧力取得手法. 第24回インタラク

ティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ（WISS 2016）論文集, WISS'16, pp. 9–14, 日本, 2016. 日本ソフトウェア科学会.

[真鍋月] 真鍋宏幸, 稲村浩. 1 つのタッチセンサを用いたマルチタッチジェスチャ認識手法. 情報処理学会論文誌, 2015 年 4 月.

[竹内月] 竹内俊貴, 田村洋人, 鳴海拓志, 谷川智洋, 廣瀬通孝. ライフログとスケジュールに基づいた未来予測提示によるタスク管理手法. 情報処理学会論文誌, Vol. 55, No. 11, pp. 2441–2450, 2014 年 11 月.

[中島 13] 中島康祐, 伊藤雄一, 林勇介, 池田和章, 藤田和之, 尾上孝雄. Emoballoon : ソーシャルタッチインタラクションのための柔らかな風船型インタフェース (< 特集 > アート&エンタテインメント 3). 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 18, No. 3, pp. 255–265, 2013.

付 録A　MonoTouch関連

第 2 章の MonoTouch にて用いた書類を付録として以下に示す.

A.1　実験説明書

実験に関する説明

□ 開発したタッチセンサ MonoTouch（以下, MonoTouch）を用いて，タッチジェスチャを行っていただきます.

□ 行っていただくタッチジェスチャは，タップ，上スワイプ，下スワイプ，左スワイプ，右スワイプ（以下, 5 ジェスチャ）です.

□ ４種類の MonoTouch を用いて実験を行っていただきます.

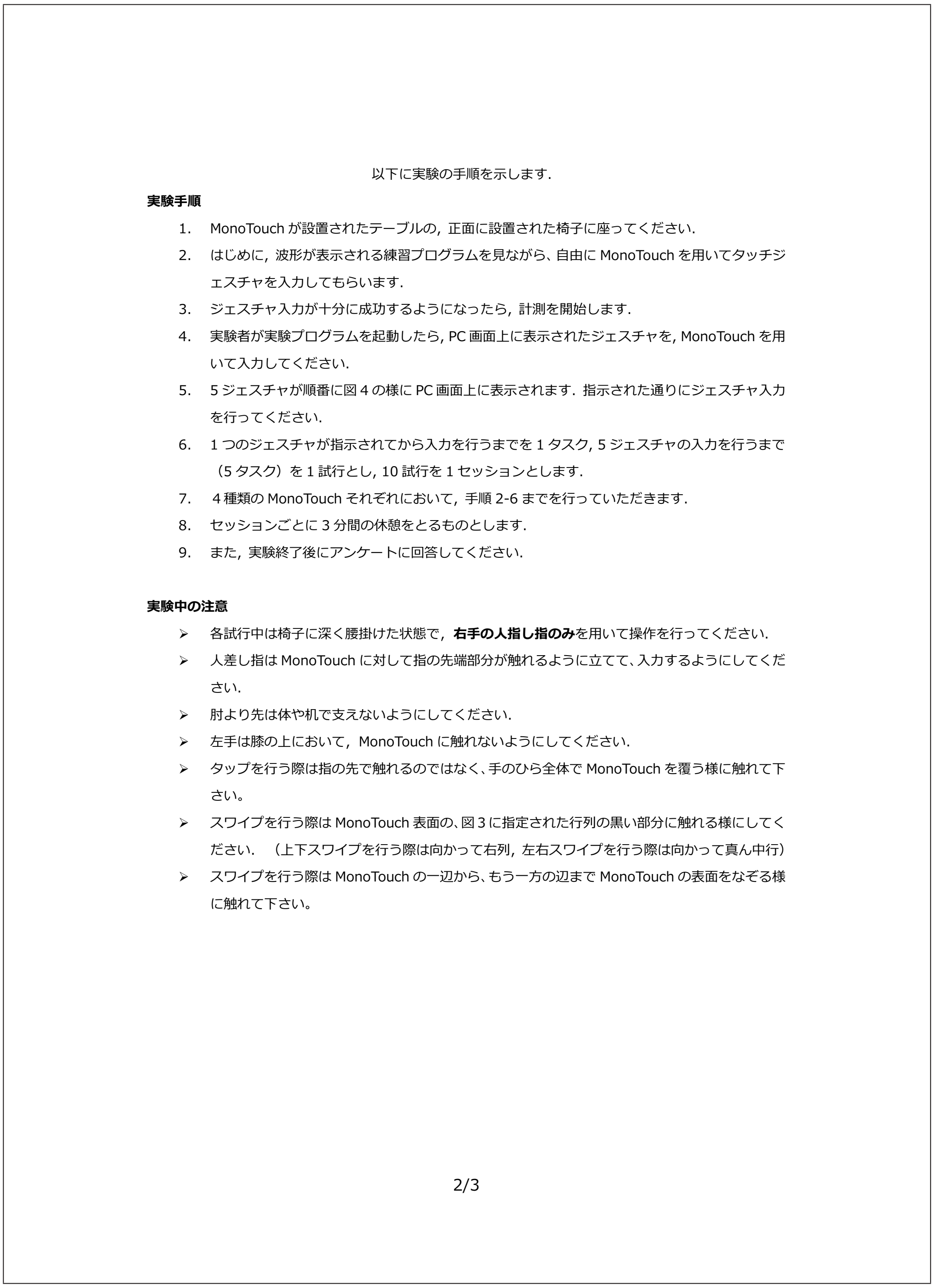
□ まず，MonoTouch について説明します.

図 1. MonoTouch 用電極の外観

MonoTouch とは、複数ジェスチャ認識が可能な単一電極からなるタッチセンサのことです。
表面を指でタップ（指で触れてから離す）したり、スワイプ（指で表面をなぞる）したりすると、
ジェスチャごとに図 2 の様なセンサ応答が現れ、ジェスチャの判別を行うことができます。

図 2. 各タッチジェスチャとセンサ応答

1/3



以下に実験の手順を示します.

実験手順

1. MonoTouch が設置されたテーブルの，正面に設置された椅子に座ってください.
2. はじめに，波形が表示される練習プログラムを見ながら、自由に MonoTouch を用いてタッチジェスチャを入力してもらいます.
3. ジェスチャ入力が十分に成功するようになったら，計測を開始します.
4. 実験者が実験プログラムを起動したら, PC 画面上に表示されたジェスチャを, MonoTouch を用いて入力してください.
5. 5 ジェスチャが順番に図 4 の様に PC 画面上に表示されます．指示された通りにジェスチャ入力を行ってください.
6. 1 つのジェスチャが指示されてから入力を行うまでを 1 タスク, 5 ジェスチャの入力を行うまで（5 タスク）を 1 試行とし, 10 試行を 1 セッションとします.
7. ４種類の MonoTouch それぞれにおいて，手順 2-6 までを行っていただきます.
8. セッションごとに 3 分間の休憩をとるものとします.
9. また，実験終了後にアンケートに回答してください.

実験中の注意

- 各試行中は椅子に深く腰掛けた状態で，**右手の人指し指のみ**を用いて操作を行ってください.
- 人差し指は MonoTouch に対して指の先端部分が触れるように立てて、入力するようにしてください.
- 肘より先は体や机で支えないようにしてください.
- 左手は膝の上において，MonoTouch に触れないようにしてください.
- タップを行う際は指の先で触れるのではなく、手のひら全体で MonoTouch を覆う様に触れて下さい。
- スワイプを行う際は MonoTouch 表面の、図 3 に指定された行列の黒い部分に触れる様にしてください．（上下スワイプを行う際は向かって右列，左右スワイプを行う際は向かって真ん中行）
- スワイプを行う際は MonoTouch の一辺から、もう一方の辺まで MonoTouch の表面をなぞる様に触れて下さい。

2/3

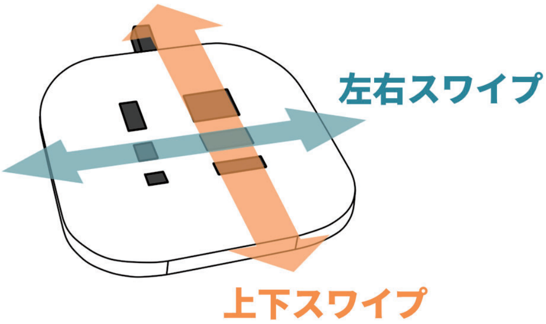


図３．上下左右スワイプを行う、電極の範囲

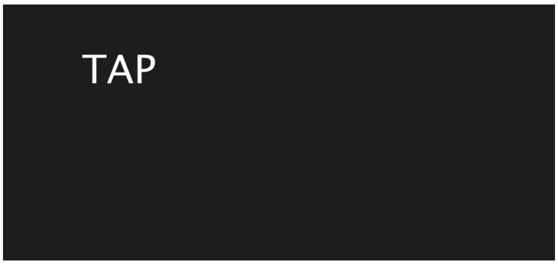
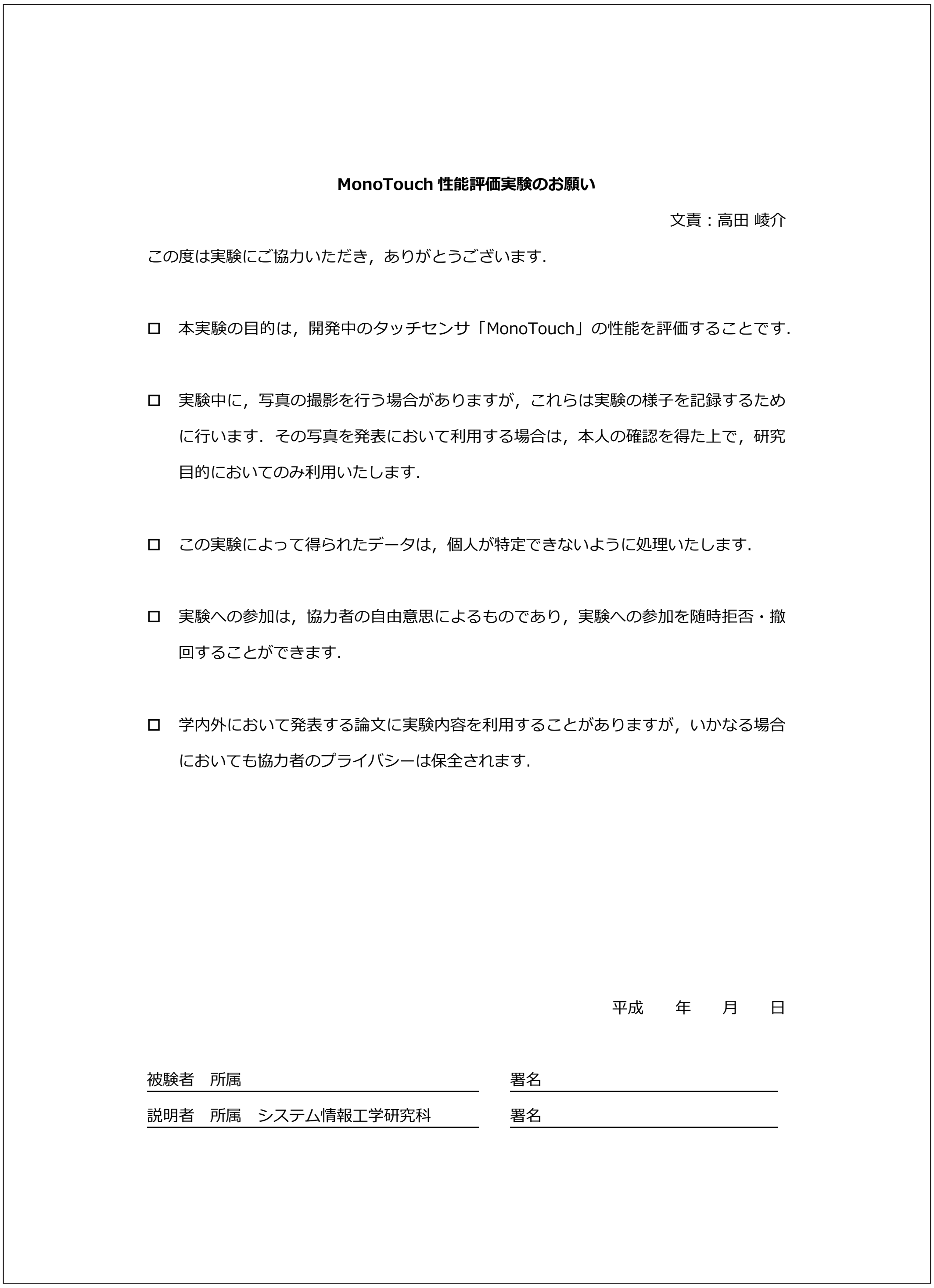

TAP

図４．実験中の画面構成

A.2 実験同意書



MonoTouch 性能評価実験のお願い

文責：高田 峻介

この度は実験にご協力いただき，ありがとうございます．

□ 本実験の目的は，開発中のタッチセンサ「MonoTouch」の性能を評価することです．

□ 実験中に，写真の撮影を行う場合がありますが，これらは実験の様子を記録するために行います．その写真を発表において利用する場合は，本人の確認を得た上で，研究目的においてのみ利用いたします．

□ この実験によって得られたデータは，個人が特定できないように処理いたします．

□ 実験への参加は，協力者の自由意思によるものであり，実験への参加を随時拒否・撤回することができます．

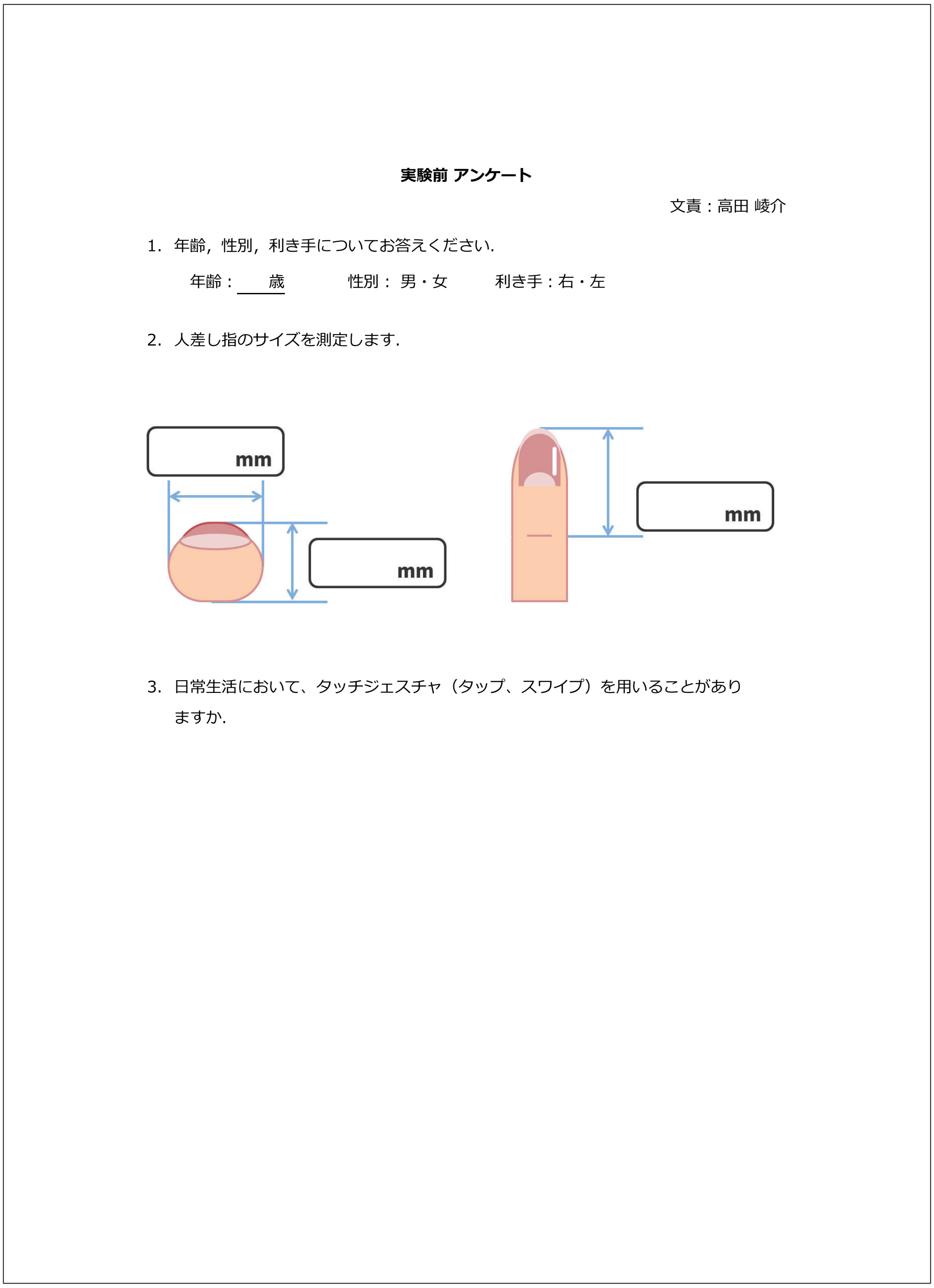
□ 学内外において発表する論文に実験内容を利用することがありますが，いかなる場合においても協力者のプライバシーは保全されます．

平成　　年　　月　　日

被験者　所属＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿　署名＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿

説明者　所属　システム情報工学研究科＿＿＿　署名＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿

A.3　実験前アンケート



実験前 アンケート

文責：高田 峻介

1. 年齢，性別，利き手についてお答えください．

年齢：＿＿歳　　性別： 男・女　　利き手：右・左

2. 人差し指のサイズを測定します．

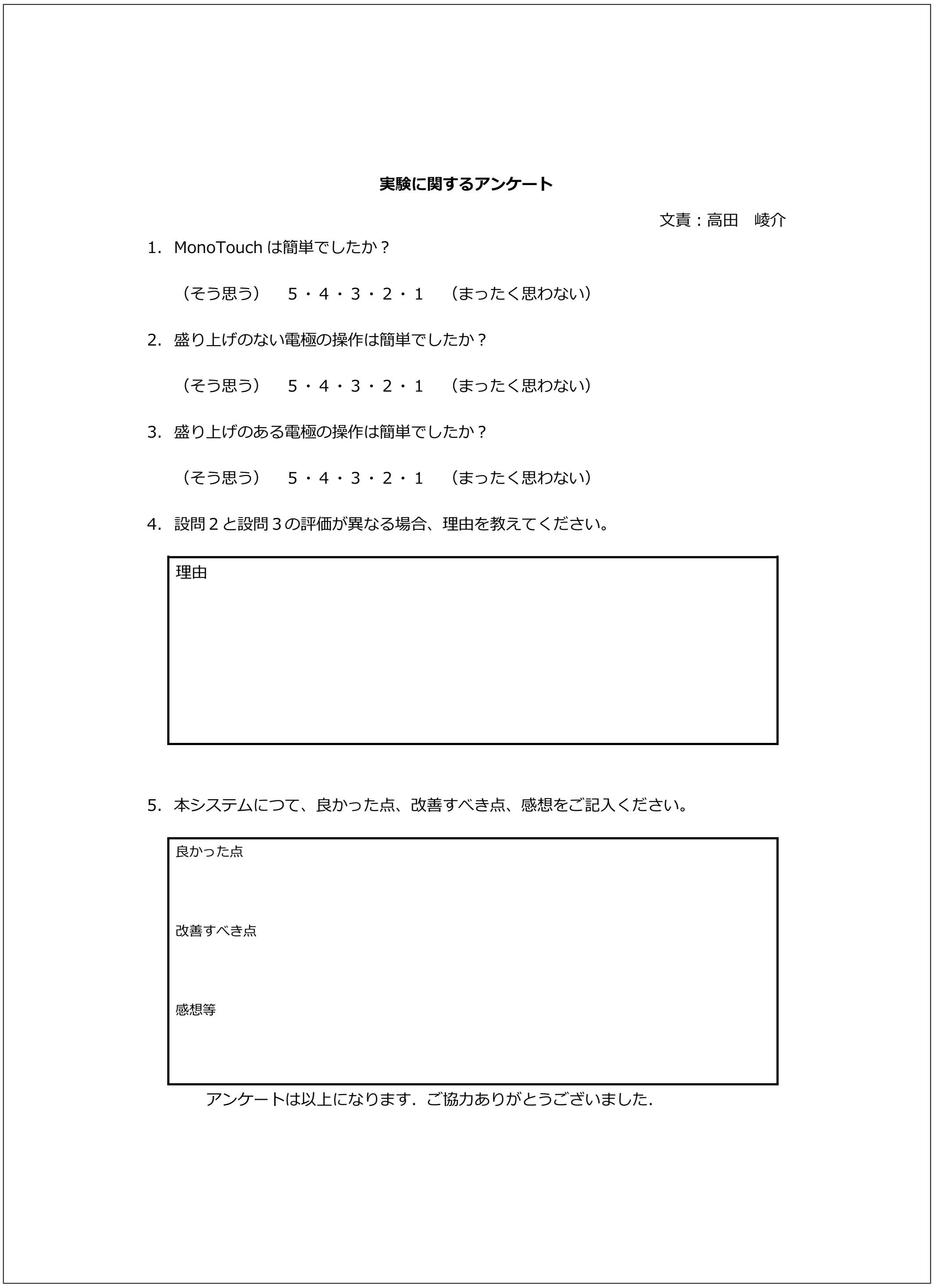
mm

mm

mm

3. 日常生活において、タッチジェスチャ（タップ、スワイプ）を用いることがありますか.

A.4　実験後アンケート



実験に関するアンケート

文責：高田　峻介

1. MonoTouch は簡単でしたか？

（そう思う）　５・４・３・２・１　（まったく思わない）

2. 盛り上げのない電極の操作は簡単でしたか？

（そう思う）　５・４・３・２・１　（まったく思わない）

3. 盛り上げのある電極の操作は簡単でしたか？

（そう思う）　５・４・３・２・１　（まったく思わない）

4. 設問２と設問３の評価が異なる場合、理由を教えてください。

理由

5. 本システムにつて、良かった点、改善すべき点、感想をご記入ください。

良かった点

改善すべき点

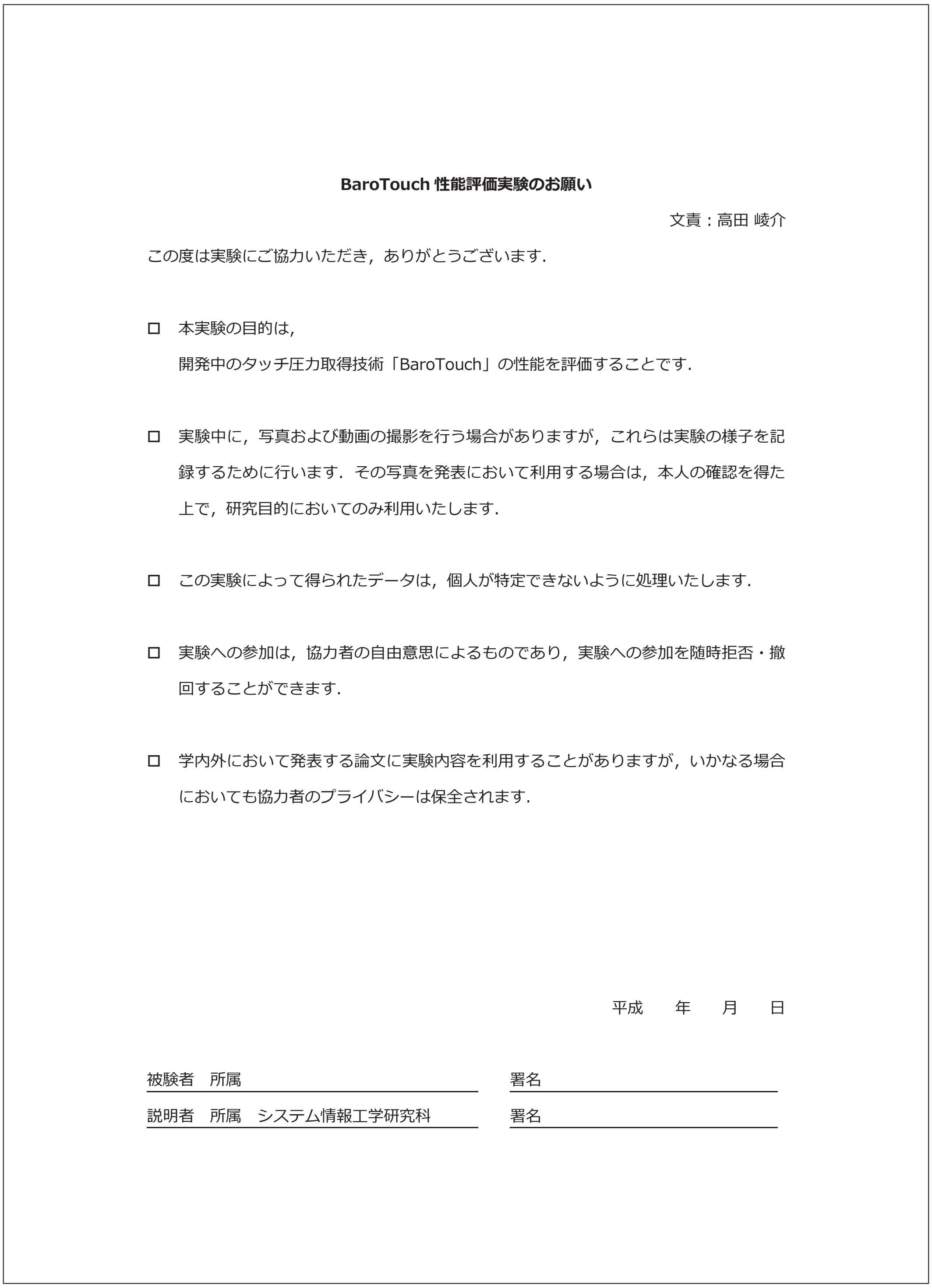
感想等

アンケートは以上になります．ご協力ありがとうございました．

付 録B　BaroTouch関連

第 3 章の BaroTouch にて用いた書類を付録として以下に示す.

B.1　実験 2–実験同意書



BaroTouch 性能評価実験のお願い

文責：高田 崚介

この度は実験にご協力いただき，ありがとうございます.

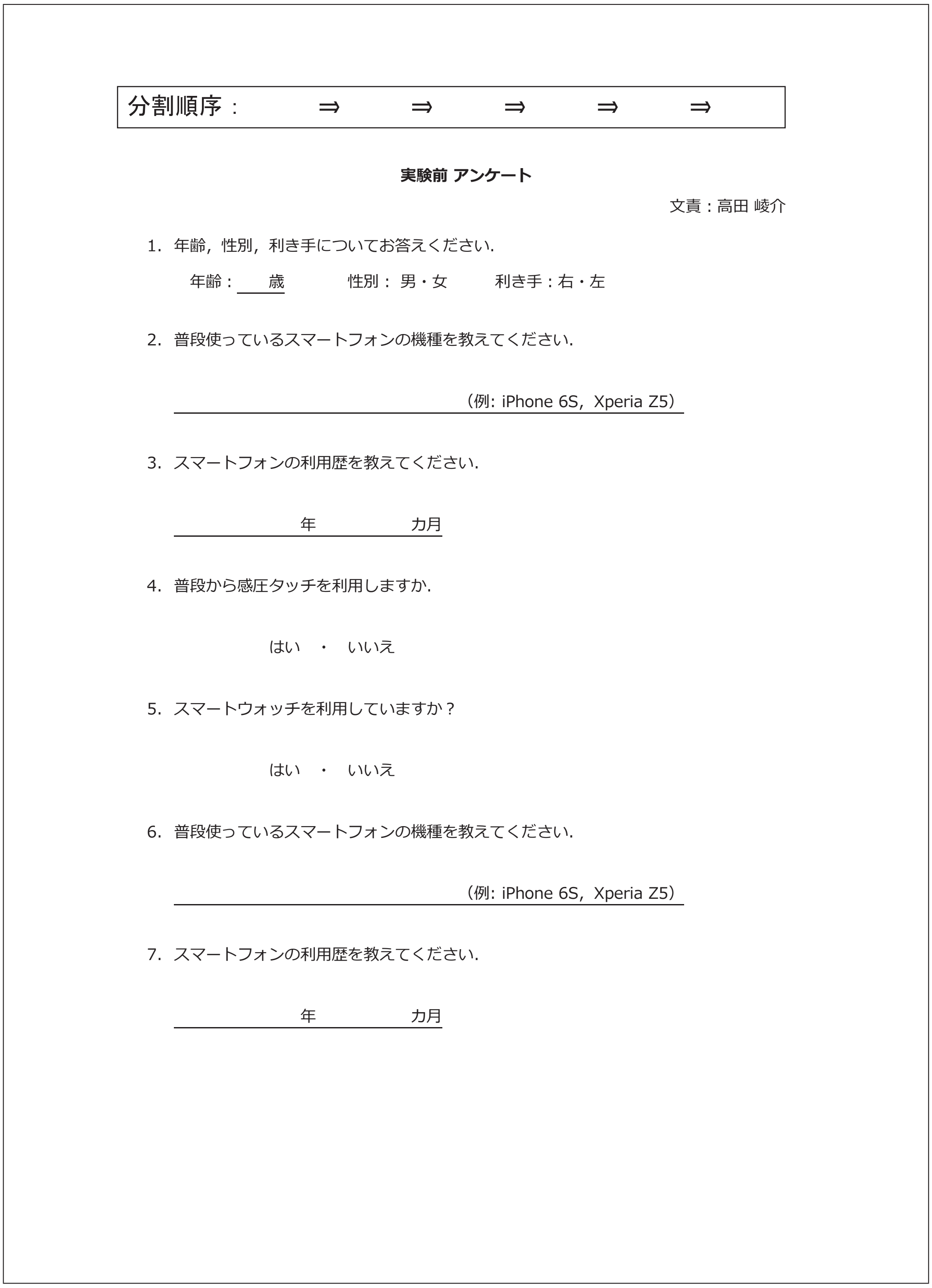
- □ 本実験の目的は，
  開発中のタッチ圧力取得技術「BaroTouch」の性能を評価することです.
- □ 実験中に，写真および動画の撮影を行う場合がありますが，これらは実験の様子を記録するために行います．その写真を発表において利用する場合は，本人の確認を得た上で，研究目的においてのみ利用いたします.
- □ この実験によって得られたデータは，個人が特定できないように処理いたします.
- □ 実験への参加は，協力者の自由意思によるものであり，実験への参加を随時拒否・撤回することができます.
- □ 学内外において発表する論文に実験内容を利用することがありますが，いかなる場合においても協力者のプライバシーは保全されます.

平成　　年　　月　　日

被験者　所属 ________________　署名 ________________

説明者　所属　システム情報工学研究科　署名 ________________

B.2 実験 2–実験前アンケート



分割順序：　⇒　⇒　⇒　⇒　⇒

実験前 アンケート

文責：高田 崚介

1. 年齢，性別，利き手についてお答えください.

　年齢：＿＿歳　　性別： 男・女　　利き手：右・左

2. 普段使っているスマートフォンの機種を教えてください.

　＿＿＿＿＿＿（例: iPhone 6S，Xperia Z5）

3. スマートフォンの利用歴を教えてください.

　＿＿＿＿年＿＿＿＿カ月

4. 普段から感圧タッチを利用しますか.

　はい　・　いいえ

5. スマートウォッチを利用していますか？

　はい　・　いいえ

6. 普段使っているスマートフォンの機種を教えてください.

　＿＿＿＿＿＿（例: iPhone 6S，Xperia Z5）

7. スマートフォンの利用歴を教えてください.

　＿＿＿＿年＿＿＿＿カ月

8. （設問 4 で YES と答えた場合）感圧タッチ機能の利用歴を教えてください.

＿＿＿＿＿＿＿＿年＿＿＿＿＿＿カ月

9. 室内の気圧値を測定します.

＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿hPa

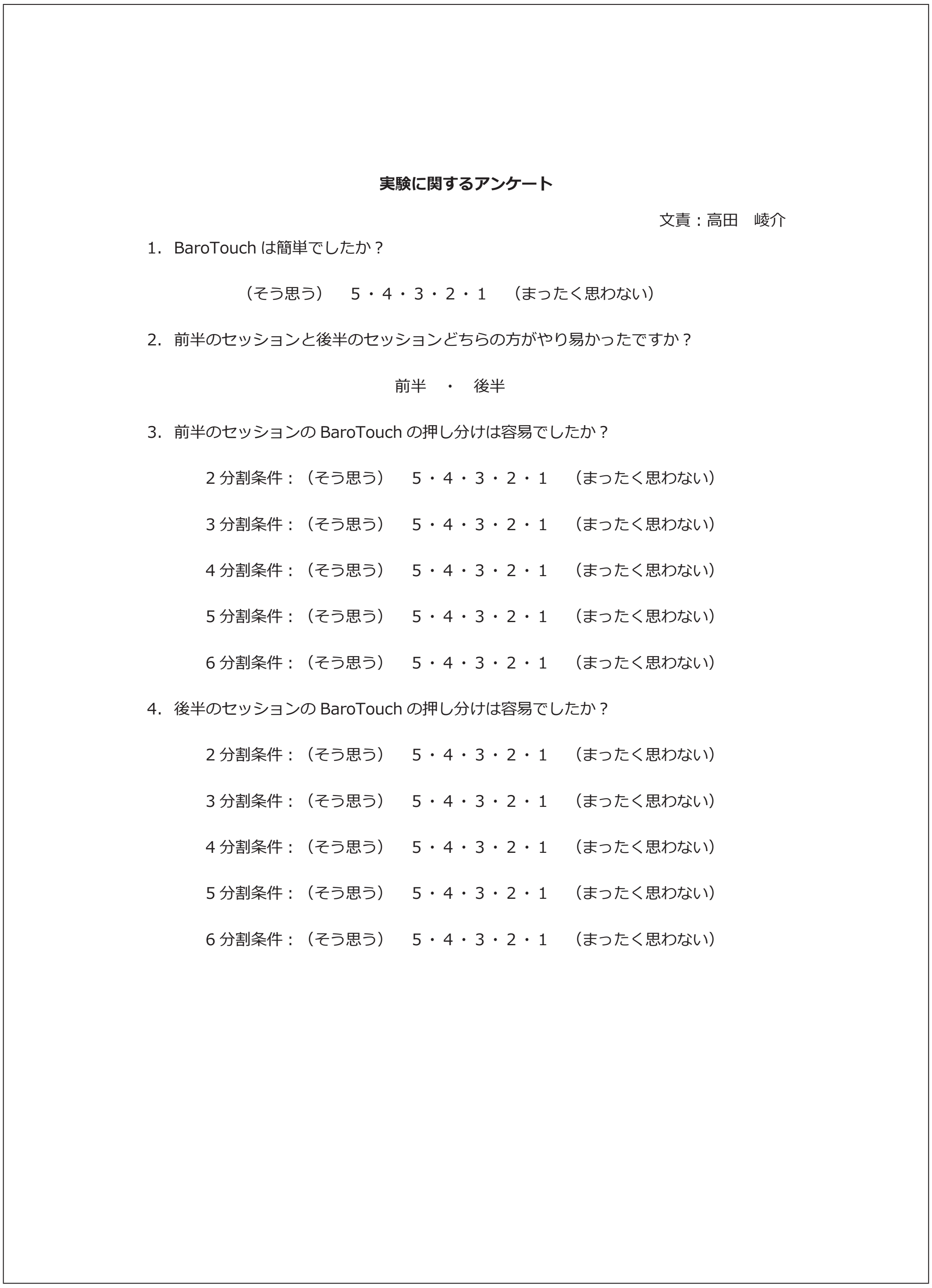
10. ピンチ力計を用いて指圧を測定します.

＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿KG

11. 実験開始時刻および終了時刻

＿＿＿＿時＿＿＿＿分 ～ ＿＿＿＿時＿＿＿＿分

B.3 実験 2–実験後アンケート



実験に関するアンケート

文責：高田　崚介

1. BaroTouch は簡単でしたか？

（そう思う）　5・4・3・2・1　（まったく思わない）

2. 前半のセッションと後半のセッションどちらの方がやり易かったですか？

前半　・　後半

3. 前半のセッションの BaroTouch の押し分けは容易でしたか？

2 分割条件：（そう思う）　5・4・3・2・1　（まったく思わない）

3 分割条件：（そう思う）　5・4・3・2・1　（まったく思わない）

4 分割条件：（そう思う）　5・4・3・2・1　（まったく思わない）

5 分割条件：（そう思う）　5・4・3・2・1　（まったく思わない）

6 分割条件：（そう思う）　5・4・3・2・1　（まったく思わない）

4. 後半のセッションの BaroTouch の押し分けは容易でしたか？

2 分割条件：（そう思う）　5・4・3・2・1　（まったく思わない）

3 分割条件：（そう思う）　5・4・3・2・1　（まったく思わない）

4 分割条件：（そう思う）　5・4・3・2・1　（まったく思わない）

5 分割条件：（そう思う）　5・4・3・2・1　（まったく思わない）

6 分割条件：（そう思う）　5・4・3・2・1　（まったく思わない）

5. 本システムにつて、良かった点、改善すべき点、感想をご記入ください。

良かった点

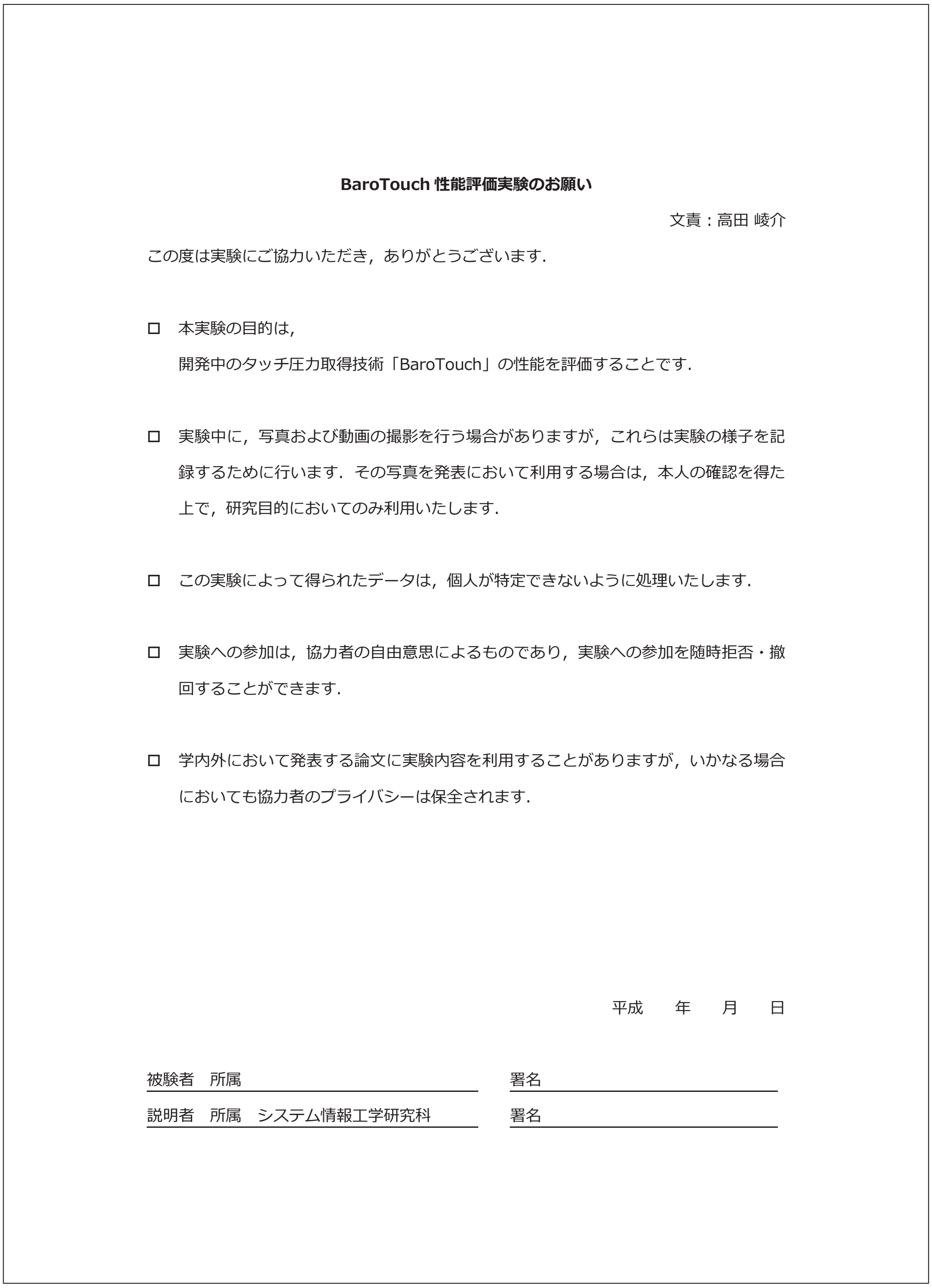
改善すべき点

感想等

アンケートは以上になります．ご協力ありがとうございました．

※実験担当者へ，実験終了日時間違いなく記述のこと．

B.4　実験 3–実験同意書



BaroTouch 性能評価実験のお願い

文責：高田 峻介

この度は実験にご協力いただき，ありがとうございます．

□　本実験の目的は，
開発中のタッチ圧力取得技術「BaroTouch」の性能を評価することです．

□　実験中に，写真および動画の撮影を行う場合がありますが，これらは実験の様子を記録するために行います．その写真を発表において利用する場合は，本人の確認を得た上で，研究目的においてのみ利用いたします．

□　この実験によって得られたデータは，個人が特定できないように処理いたします．

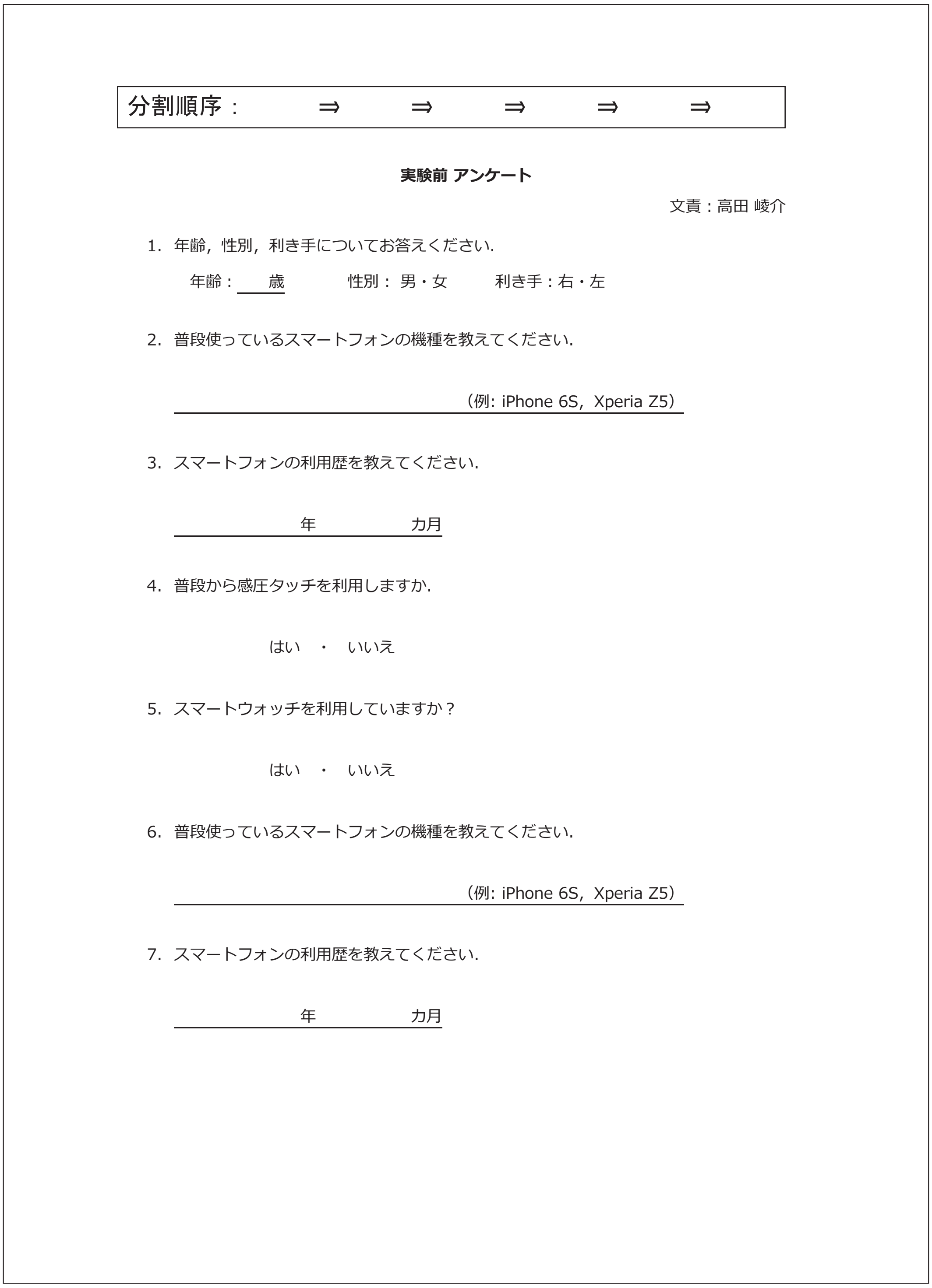
□　実験への参加は，協力者の自由意思によるものであり，実験への参加を随時拒否・撤回することができます．

□　学内外において発表する論文に実験内容を利用することがありますが，いかなる場合においても協力者のプライバシーは保全されます．

平成　　年　　月　　日

被験者　所属　　署名
説明者　所属　システム情報工学研究科　　署名

B.5　実験 3–実験前アンケート



分割順序：　⇒　⇒　⇒　⇒　⇒

実験前 アンケート

文責：高田 崚介

1. 年齢，性別，利き手についてお答えください．

   年齢：＿＿歳　　性別：男・女　　利き手：右・左

2. 普段使っているスマートフォンの機種を教えてください．

   ＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿（例: iPhone 6S，Xperia Z5）

3. スマートフォンの利用歴を教えてください．

   ＿＿＿＿＿＿年＿＿＿＿カ月

4. 普段から感圧タッチを利用しますか．

   はい　・　いいえ

5. スマートウォッチを利用していますか？

   はい　・　いいえ

6. 普段使っているスマートフォンの機種を教えてください．

   ＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿（例: iPhone 6S，Xperia Z5）

7. スマートフォンの利用歴を教えてください．

   ＿＿＿＿＿＿年＿＿＿＿カ月

8. （設問 4 で YES と答えた場合）感圧タッチ機能の利用歴を教えてください.

　　年　　カ月

9. 室内の気圧値を測定します.

　　hPa

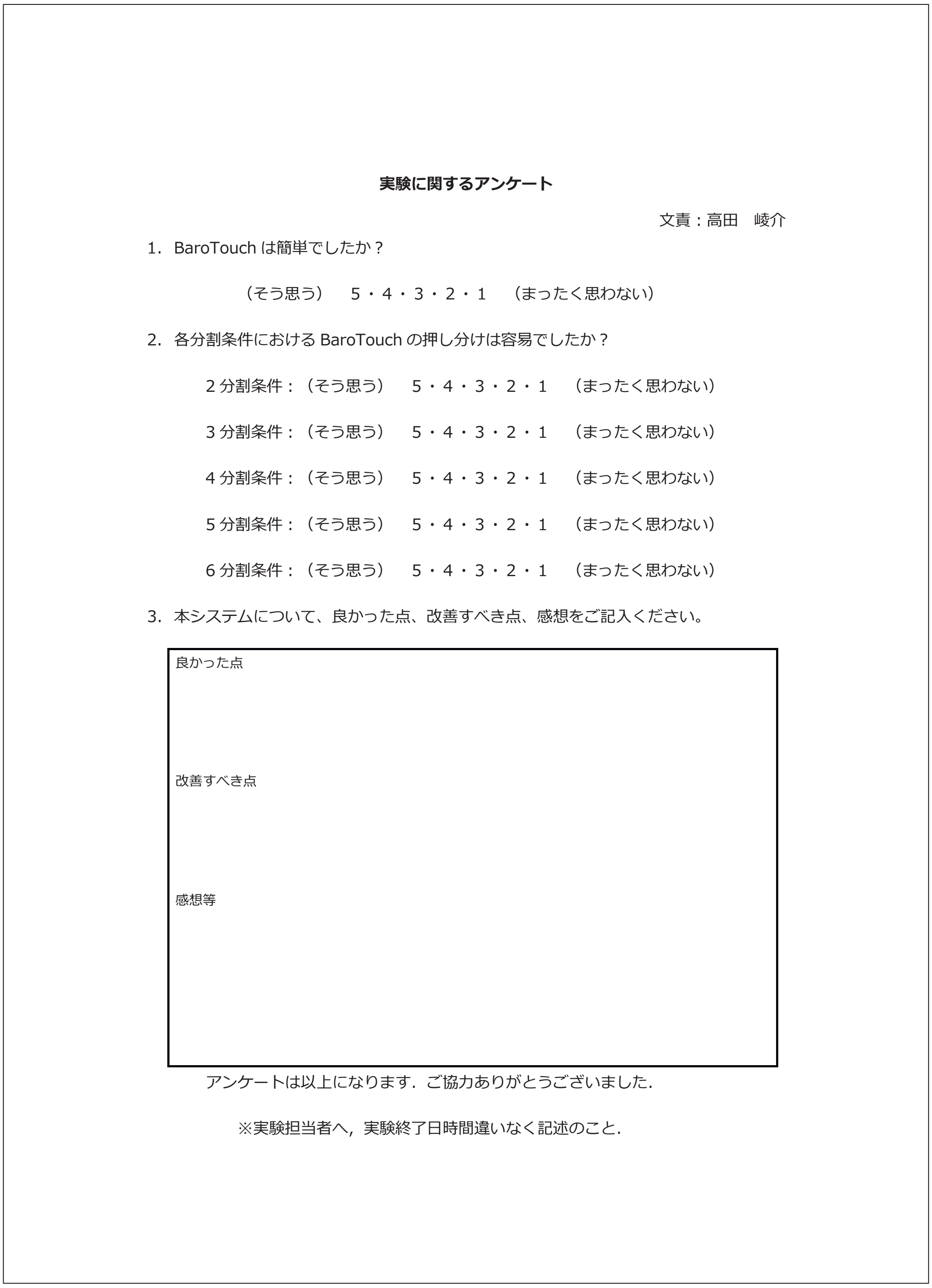
10. ピンチ力計を用いて指圧を測定します.

　　KG

11. 実験開始時刻および終了時刻

　　時　　分　～　　時　　分

B.6　実験 3–実験後アンケート



実験に関するアンケート

文責：高田　崚介

1. BaroTouch は簡単でしたか？

（そう思う）　5・4・3・2・1　（まったく思わない）

2. 各分割条件における BaroTouch の押し分けは容易でしたか？

2 分割条件：（そう思う）　5・4・3・2・1　（まったく思わない）

3 分割条件：（そう思う）　5・4・3・2・1　（まったく思わない）

4 分割条件：（そう思う）　5・4・3・2・1　（まったく思わない）

5 分割条件：（そう思う）　5・4・3・2・1　（まったく思わない）

6 分割条件：（そう思う）　5・4・3・2・1　（まったく思わない）

3. 本システムについて、良かった点、改善すべき点、感想をご記入ください。

良かった点

改善すべき点

感想等

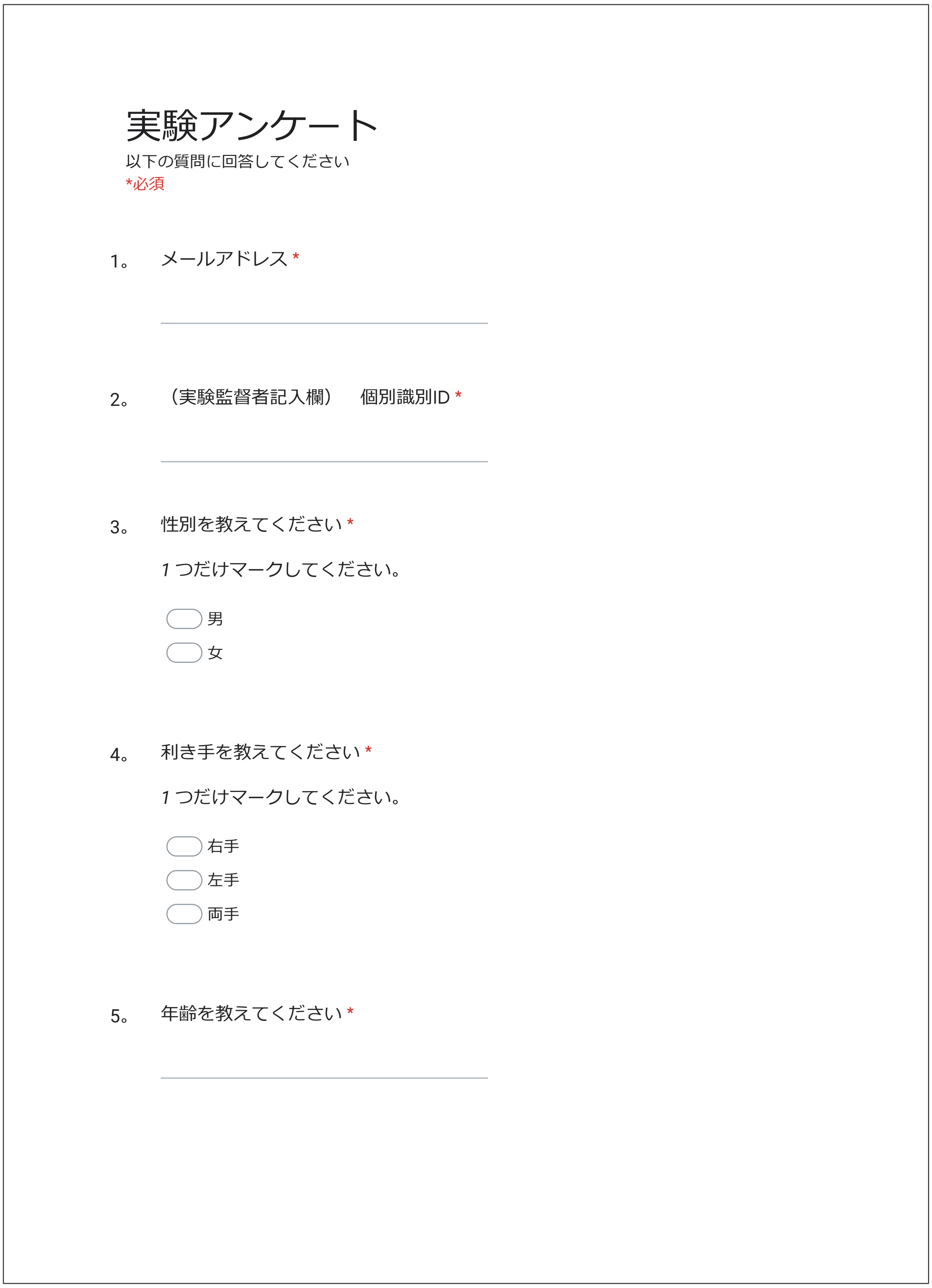
アンケートは以上になります．ご協力ありがとうございました．

※実験担当者へ，実験終了日時間違いなく記述のこと．

付 録C　FJKeyboard関連

第5章のFJKeyboardにて用いた書類を付録として以下に示す.

C.1　実験アンケート



実験アンケート

以下の質問に回答してください

*必須

1。　メールアドレス *

2。　（実験監督者記入欄）　個別識別ID *

3。　性別を教えてください *

1 つだけマークしてください。

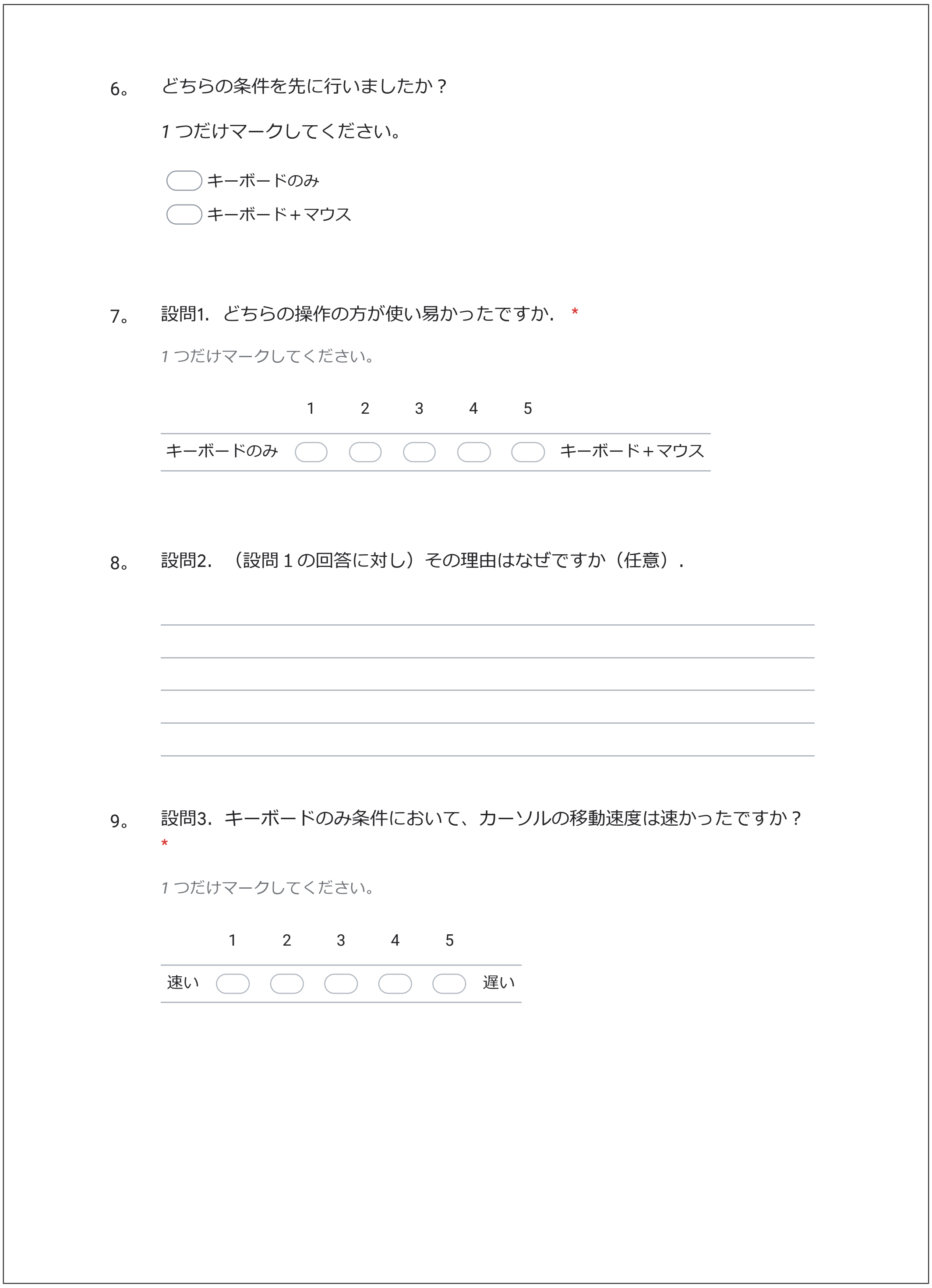
○ 男
○ 女

4。　利き手を教えてください *

1 つだけマークしてください。

○ 右手
○ 左手
○ 両手

5。　年齢を教えてください *



6。 どちらの条件を先に行いましたか？

1 つだけマークしてください。

○ キーボードのみ
○ キーボード＋マウス

7。 設問1．どちらの操作の方が使い易かったですか． *

1 つだけマークしてください。

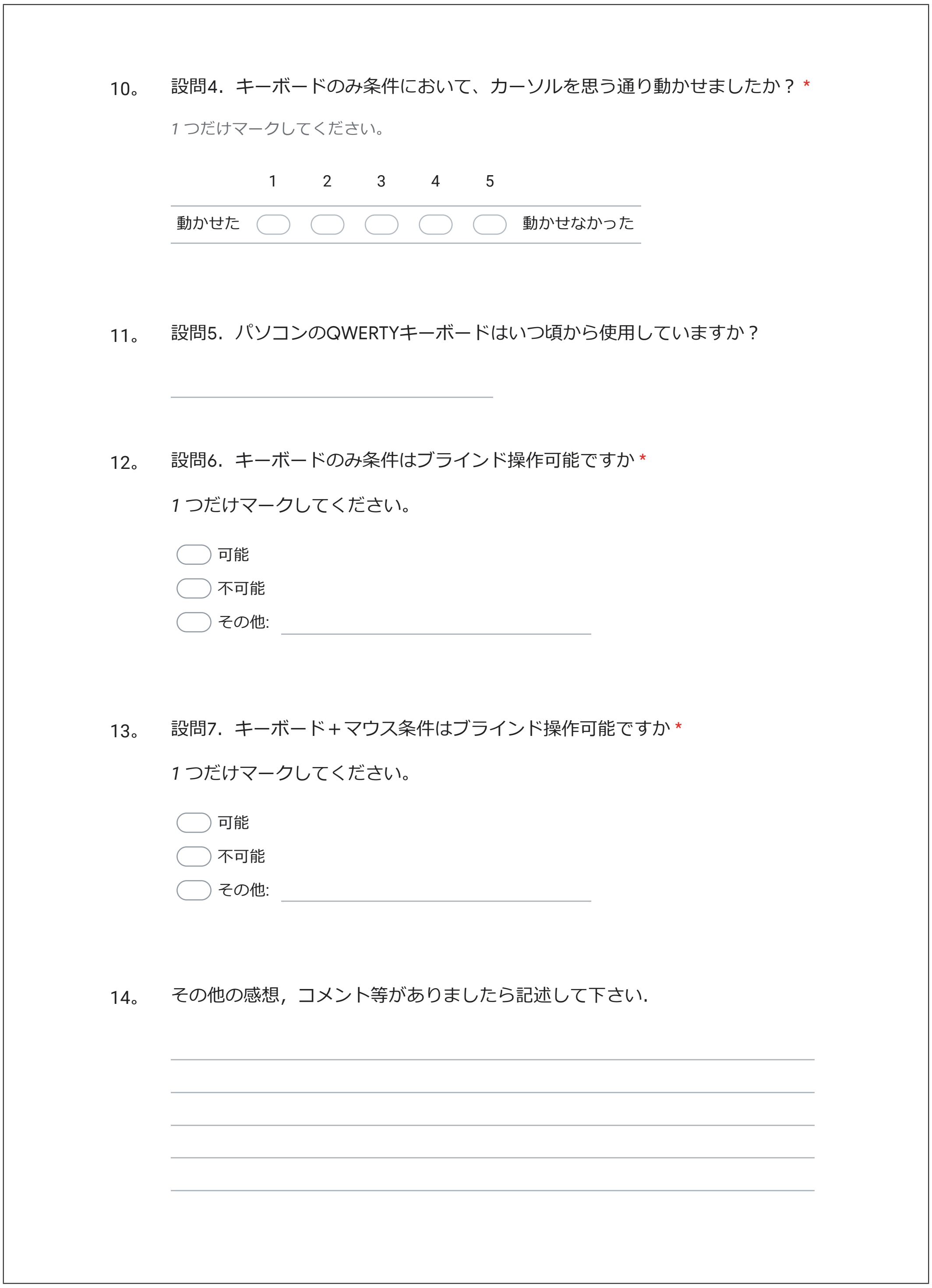
	1	2	3	4	5	
キーボードのみ	○	○	○	○	○	キーボード＋マウス

8。 設問2．（設問 1 の回答に対し）その理由はなぜですか（任意）．

9。 設問3．キーボードのみ条件において、カーソルの移動速度は速かったですか？ *

1 つだけマークしてください。

	1	2	3	4	5	
速い	○	○	○	○	○	遅い



10。 設問4．キーボードのみ条件において、カーソルを思う通り動かせましたか？ *

1 つだけマークしてください。

	1	2	3	4	5	
動かせた	□	□	□	□	□	動かせなかった

11。 設問5．パソコンのQWERTYキーボードはいつ頃から使用していますか？

____

12。 設問6．キーボードのみ条件はブラインド操作可能ですか *

1 つだけマークしてください。

□ 可能
□ 不可能
□ その他: ______________________________

13。 設問7．キーボード＋マウス条件はブラインド操作可能ですか *

1 つだけマークしてください。

□ 可能
□ 不可能
□ その他: ______________________________

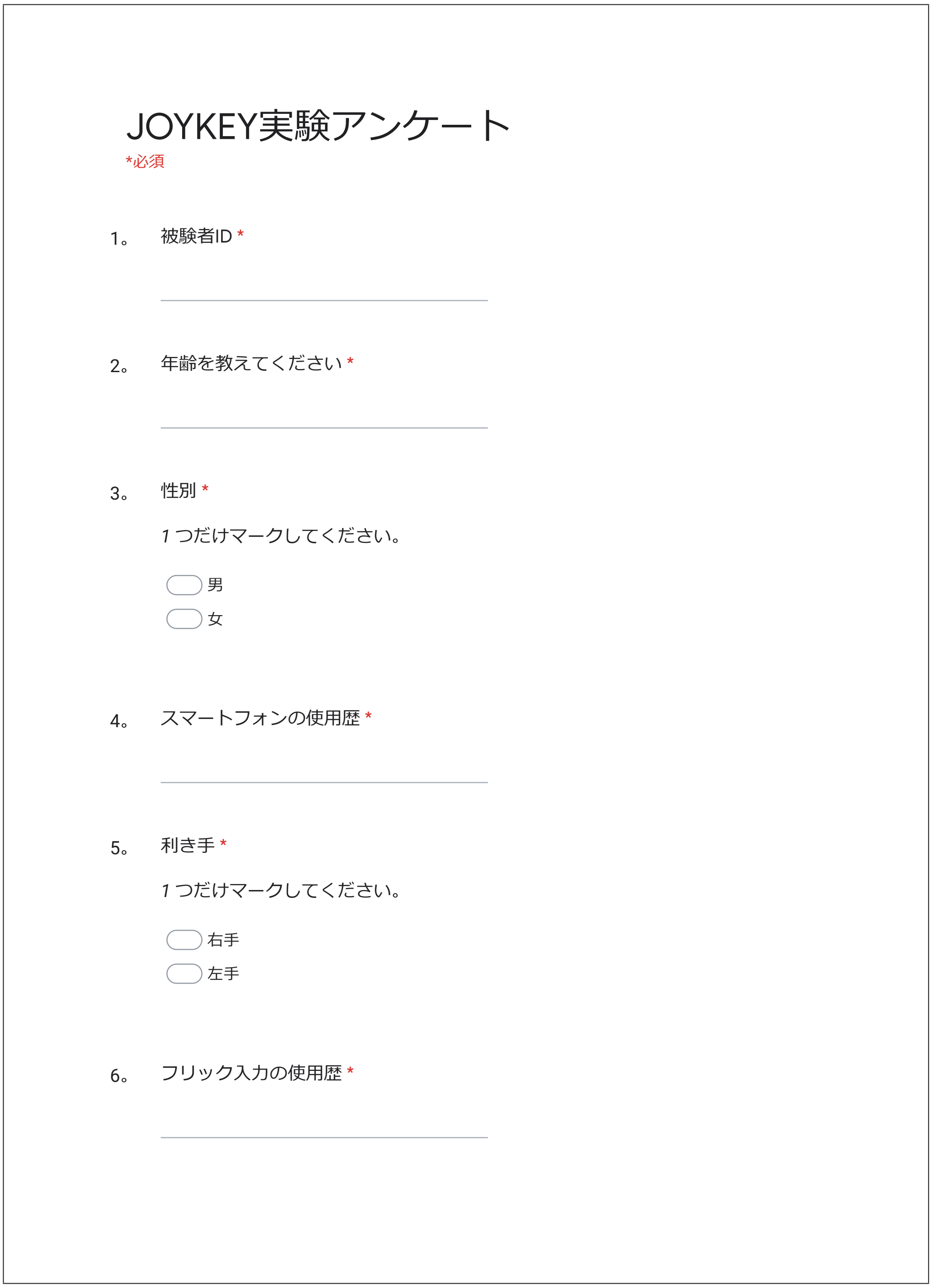
14。 その他の感想，コメント等がありましたら記述して下さい．

____
____
____
____
____

付 録 D　JoyKey 関連

第 6 章の JoyKey にて用いた書類を付録として以下に示す.

D.1　実験アンケート



JOYKEY実験アンケート

*必須

1。 被験者ID *

2。 年齢を教えてください *

3。 性別 *

1 つだけマークしてください。

○ 男
○ 女

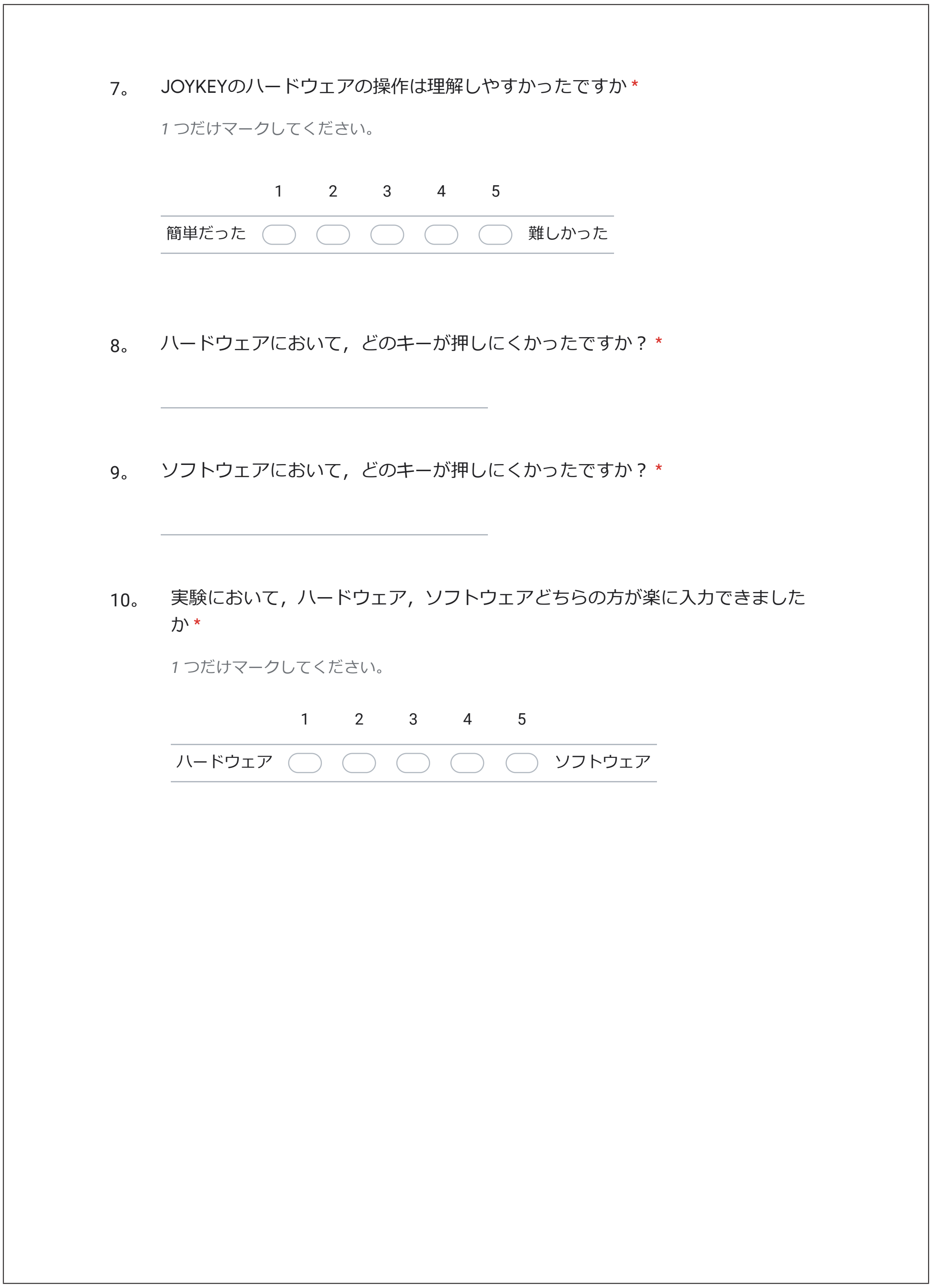
4。 スマートフォンの使用歴 *

5。 利き手 *

1 つだけマークしてください。

○ 右手
○ 左手

6。 フリック入力の使用歴 *



7。 JOYKEYのハードウェアの操作は理解しやすかったですか *

1 つだけマークしてください。

	1	2	3	4	5	
簡単だった	○	○	○	○	○	難しかった

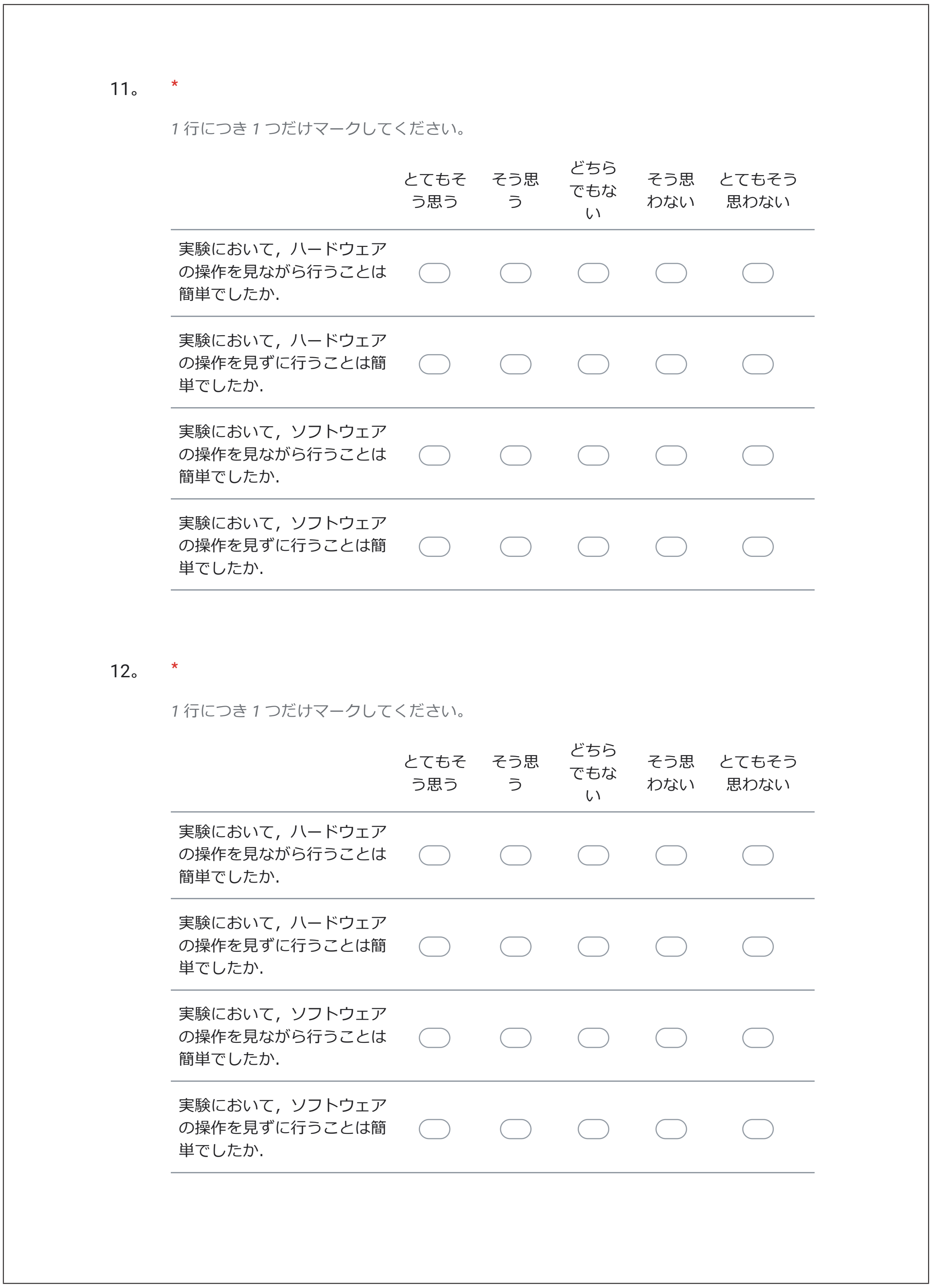
8。 ハードウェアにおいて，どのキーが押しにくかったですか？ *

9。 ソフトウェアにおいて，どのキーが押しにくかったですか？ *

10。 実験において，ハードウェア，ソフトウェアどちらの方が楽に入力できましたか *

1 つだけマークしてください。

	1	2	3	4	5	
ハードウェア	○	○	○	○	○	ソフトウェア



11。 *

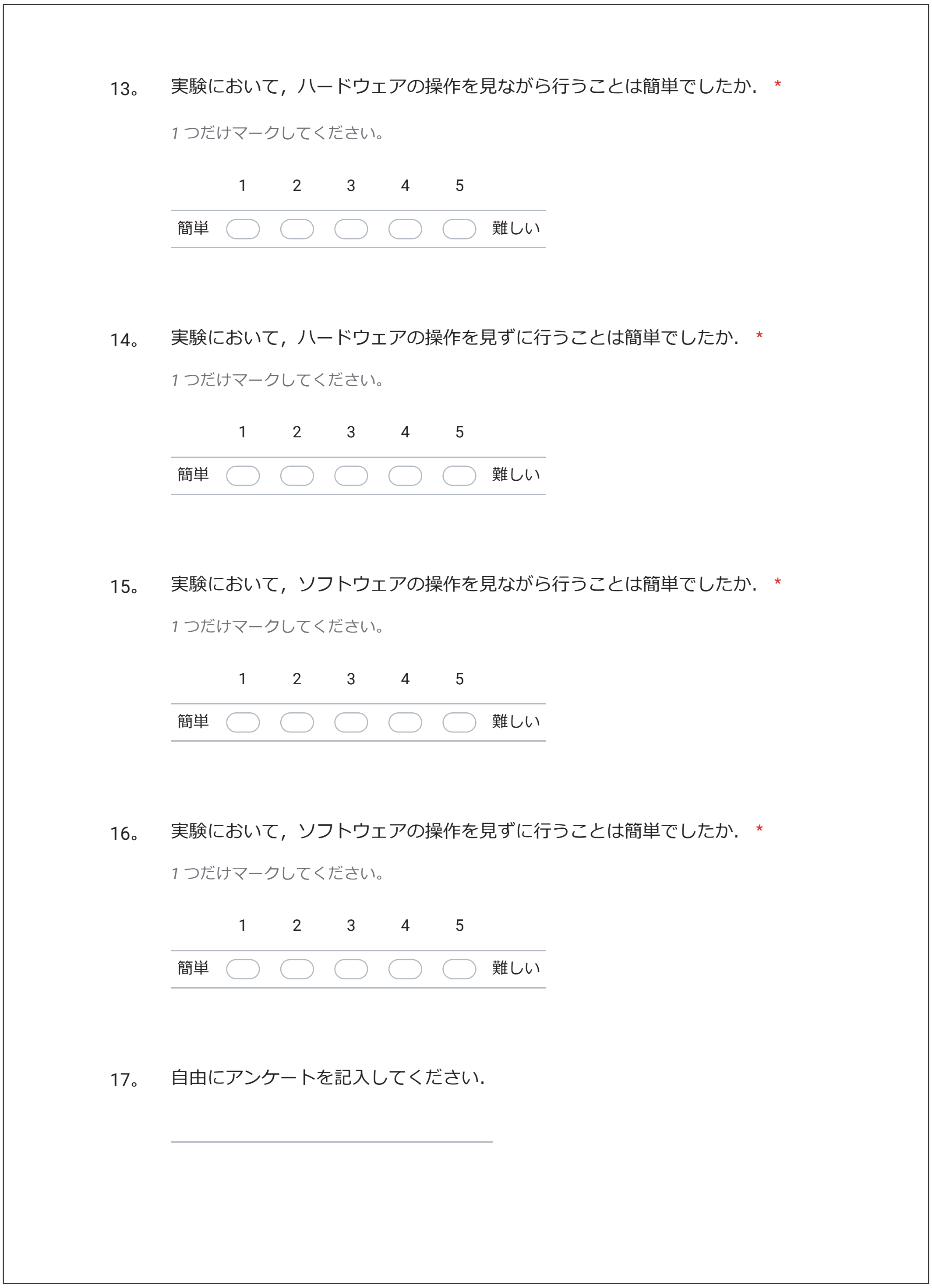
1 行につき 1 つだけマークしてください。

	とてもそう思う	そう思う	どちらでもない	そう思わない	とてもそう思わない
実験において，ハードウェアの操作を見ながら行うことは簡単でしたか.	○	○	○	○	○
実験において，ハードウェアの操作を見ずに行うことは簡単でしたか.	○	○	○	○	○
実験において，ソフトウェアの操作を見ながら行うことは簡単でしたか.	○	○	○	○	○
実験において，ソフトウェアの操作を見ずに行うことは簡単でしたか.	○	○	○	○	○

12。 *

1 行につき 1 つだけマークしてください。

	とてもそう思う	そう思う	どちらでもない	そう思わない	とてもそう思わない
実験において，ハードウェアの操作を見ながら行うことは簡単でしたか.	○	○	○	○	○
実験において，ハードウェアの操作を見ずに行うことは簡単でしたか.	○	○	○	○	○
実験において，ソフトウェアの操作を見ながら行うことは簡単でしたか.	○	○	○	○	○
実験において，ソフトウェアの操作を見ずに行うことは簡単でしたか.	○	○	○	○	○



13。 実験において，ハードウェアの操作を見ながら行うことは簡単でしたか． *

1 つだけマークしてください。

	1	2	3	4	5	
簡単	○	○	○	○	○	難しい

14。 実験において，ハードウェアの操作を見ずに行うことは簡単でしたか． *

1 つだけマークしてください。

	1	2	3	4	5	
簡単	○	○	○	○	○	難しい

15。 実験において，ソフトウェアの操作を見ながら行うことは簡単でしたか． *

1 つだけマークしてください。

	1	2	3	4	5	
簡単	○	○	○	○	○	難しい

16。 実験において，ソフトウェアの操作を見ずに行うことは簡単でしたか． *

1 つだけマークしてください。

	1	2	3	4	5	
簡単	○	○	○	○	○	難しい

17。 自由にアンケートを記入してください．

著者論文リスト

参考論文

本論文の主内容は, 下記 (1)–(16) として公表済みおよび出願済みである.

- 公表済み論文

(1) 高田 峻介, 門本 淳一郎, 志築 文太郎 “導電繊維を用いた手形状および把持物体認識可能なデータグローブ”, インタラクション 2019 論文集, 東京, 2019 年 3 月, pp.795–797.

(2) Ryosuke Takada, Buntarou Shizuki and Shin Takahashi, “BaroTouch: A Technique for Touch Force Sensing using a Waterproof Device’s Built-in Barometer”, Journal of Information Processing, Vol.60, No.2, IPSJ, Feb., 2019, pp.106–115.

(3) Ryosuke Takada, Junichiro Kadomoto, Buntarou Shizuki, “A Sensing Technique for Data Glove Using Conductive Fiber”, Proc. of the 2019 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, Glasgow, UK, May., 2019, 4 pages.

(4) 高田 峻介, 志築 文太郎, 高橋 伸, “導電繊維編み込み手袋を用いた手形状認識手法”, 日本ソフトウェア科学会論文誌, コンピュータソフトウェア, 35 巻, 3 号, 2018 年 7 月, p. 3_45–3_56.

(5) 高田 峻介, 志築 文太郎, 高橋 伸, “GROVE：導電繊維編み込み手袋を用いた手形状計測手法”, 第 25 回インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ（WISS 2017）論文集, 山梨, 2017 年 12 月, pp.77–82.

(6) Ryosuke Takada, Buntarou Shizuki and Shin Takahashi, “JoyKey: One handed hardware keyboard with 3x4 matrix slide keys”, Proc. of 18th International Conference on Human-Computer Interaction, Vancouver, Canada, July, 2017, pp.266–279.

(7) Ryosuke Takada, Toshiyuki Ando, Buntarou Shizuki, Shin Takahashi, “A Technique for Touch Force Sensing using a Waterproof Device’s Built-in Barometer”, Proc. of the 2017 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, Denver, CO, USA, May, 2017, pp.2140–2146.

(8) 高田 峻介, 志築 文太郎, 高橋 伸, “導電繊維編み込み手袋を用いた指の曲げ計測手法”, 情報処理学会研究報告. HCI, ヒューマンコンピュータインタラクション研究会報告, 2017-HCI-171, 沖縄, 2017 年 1 月, 6 ページ.

(9) 高田 峻介, 林 威, 安藤 宗孝, 志築 文太郎, 高橋 伸, “BaroTouch：防水端末に内蔵された気圧センサを用いた押下圧力取得手法”, 第 24 回インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ（WISS 2016）論文集, 滋賀, 2016 年 12 月, pp.9–14.

(10) 高田 峻介, 林 威, 安藤 宗孝, 志築 文太郎, 高橋 伸, “防水タッチパネル端末に内蔵された気圧センサを用いたタッチ圧力取得手法”, 情報処理学会研究報告. HCI, ヒューマンコンピュータインタラクション研究会報告, 2016-HCI-169, 山口, 2016 年 8 月, 7 ページ.

(11) 高田 峻介, 志築 文太郎, 高橋 伸, “キーボード上における 2 つのキーの連続押下を開始符号とする操作手法”, 情報処理学会研究報告. HCI, ヒューマンコンピュータインタラクション研究会報告, 2016-HCI-168, 岩手, 2016 年 6 月, 6 ページ.

(12) Ryosuke Takada, Buntarou Shizuki, Jiro Tanaka, “MonoTouch: Single capacitive touch sensor that differentiates touch gestures”, Proc. of the 2016 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, San Jose, CA, USA, May, 2016, pp.2736–2743.

(13) 高田 峻介, 志築 文太郎, 田中 二郎, “MonoTouch：複数ジェスチャ判別が可能な単一電極タッチセンサ”, 第 23 回インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ（WISS 2015）論文集, 大分, 2015 年 12 月, pp.91–96.

(14) 高田 峻介, 志築 文太郎, 田中 二郎, “MonoTouch：複数ジェスチャ認識が可能な単一電極からなるタッチセンサ”, ヒューマインインタフェースシンポジウム 2015 論文集, 北海道, 2015 年 9 月, pp.49–52.

(15) 高田 峻介, “GROVE: 導電繊維を用いた安価なデータグローブの開発”, インタラクション 2015 論文集, 東京, 2015 年 3 月, pp.944–945.

- 出願済み特許

(16) 高田 峻介, “入力部材”, 特願 2018-99360, 2018 年 5 月.

その他の論文

- 公表済み論文

(1) Ryosuke Takada, Toshiya Isomoto, Wataru Yamada, Hiroyuki Manabe, Buntarou Shizuki, “ExtensionClip: Touch Point Transfer Device linking Both Sides of a Smartphone for Mobile VR Environments”, Proc. of the 2018 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, Montreal QC, Canada, Apr., 2018, 6 pages.

(2) Yuki Kubo, Ryosuke Takada, Buntarou Shizuki, Shin Takahashi, “Exploring Context-Aware User Interfaces for Smartphone-Smartwatch Cross-Device Interaction”, Proc. of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies (IMWUT), Vol.1, Issue 3, Article No.69, Sept., 2017, 21 pages.6 pages.

(3) Yuki Kubo, Ryosuke Takada, Buntarou Shizuki, Shin Takahashi, “SynCro: Context-Aware User Interface System for Smartphone–Smartwatch Cross-Device Interaction”, Proc. of the 2017 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems. Denver, CO, USA, May, 2017, pp.1794–1801.

(4) Keigo Shima, Kazusa Onishi, Ryosuke Takada, Takuya Adachi, Buntarou Shizuki and Jiro Tanaka, “Investigating accuracy of tilting operation on wrist-worn devices with touchscreens”, Proc. of the 2016 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems. San Jose, CA, USA, May, 2016, pp.2605–2711.

(5) Keigo Shima, Ryosuke Takada, Kazusa Onishi, Takuya Adachi, Buntarou Shizuki and Jiro Tanaka, “AirFlip-Undo: quick undo using a double crossing in-air gesture in hover zone”, Adjunct Proc. of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software & Technology. Charlotte, NC, USA, Nov, 2015, pp.97–98.

- 査読のない発表論文

(6) 高田 峻介, 礒本 俊弥, 山田 渉, 真鍋 宏幸, 志築 文太郎, “プロペラを用いた頭部装着型歩行牽引デバイス”, インタラクション 2019 論文集, 東京, 2019 年 3 月, pp.236–237.

(7) 高田 峻介, 礒本 俊弥, 山田 渉, 真鍋 宏幸, 志築 文太郎, “ドローンを用いたウェアラブルな歩行牽引デバイスの構築”, 情報処理学会研究報告. HCI, ヒューマンコンピュータインタラクション研究会報告, 2018-HCI-176, 沖縄, 2018 年 1 月, 6 ページ.

(8) 久保 勇貴, 高田 峻介, 志築 文太郎, 高橋 伸, “コンテキストに応じたスマートウォッチ・スマートフォン併用時の UI の検討”, 情報処理学会研究報告. HCI, ヒューマンコンピュータインタラクション研究会報告, 2017-HCI-171, 沖縄, 2017 年 1 月, 8 ページ.

(9) 久保 勇貴, 高田 峻介, 志築 文太郎, 高橋 伸, “コンテキストに基づくスマートウォッチ及びスマートフォンを用いたクロスデバイスインタラクション”, 第 24 回インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ（WISS 2016）論文集, 滋賀, 2016 年 12 月, pp.205–206.

(10) 高田 崚介, 奥村 彩水, 木邑 和馬, 神武 里奈, 寻田 一貴, 山路 大樹, 鶴田 真也, “PoiPet: ペットボトルゴミの分別を促進するインタラクティブなゴミ箱”, インタラクション 2016 論文集, 東京, 2016 年 3 月, pp.850–854.

(11) 高田 崚介, 山路 大樹, 寻田 一貴, 鶴田 真也, 早川 悠, “PINCH: ハンガー型屋外干し支援システム”, インタラクション 2016 論文集, 東京, 2016 年 3 月, pp.855–858.

(12) 大西 主紗, 高田 崚介, 島 佳吾, 阿達 拓也, 志築 文太郎, 田中 二郎, “腕に装着した超小型タッチパネル端末に対する傾け操作の精度評価”, 情報処理学会研究報告. HCI, ヒューマンコンピュータインタラクション研究会報告, 2015-HCI-165, 大分, 2015 年 11 月, 8 ページ.

(13) 田辺 健, 高田 崚介, 藪内 聖也, 上村 康輔, “ワイヤレス糸電話を用いた遠隔コミュニケーションの提案”, インタラクション 2015 論文集, 東京, 2015 年 3 月, pp.774–777.

(14) 田辺 健, 高田 崚介, 藪内 聖也, 上村 康輔, “ワイヤレス糸電話を用いた遠隔コミュニケーションの提案”, 産学官金技術フォーラム’14, vol.19, 兵庫, 2014 年 11 月, 2 ページ.

(15) 田辺 健, 高田 崚介, 藪内 聖也, 上村 康輔, “ワイヤレス糸電話”, 第 19 回大会論文集, vol.19, 愛知, 2014 年 9 月.

(16) 高田 崚介, 若林 茂, “手袋型デバイスを用いた自然的インタフェースの研究”, ヒューマンインタフェース学会研究報告集, Vol.16, 京都, 2014 年 3 月, pp.33–34.

(17) 高田 崚介, 若林 茂, “手袋型デバイスを用いた自然的インタフェース”, 2014 年度 JSiSE 学生研究発表会, 大阪, 2014 年 3 月, 2 ページ.

(18) 高田 崚介, 若林 茂, “手袋型デバイスを用いた自然的インタフェース”, 産学官技術フォーラム’13, vol.18, 兵庫, 2013 年 11 月, 2 ページ.

(19) 高田 崚介, 若林 茂, “手袋型デバイスを用いた自然的インタフェースの研究”, 電気学会 関西支部 高専卒業研究発表会, 大阪, 2013 年 3 月, 2 ページ.