

筑波大学 情報学群 情報メディア創成学類

卒業研究論文

導電性インクを用いた  
タッチパネルの拡張による  
持ち運び可能なバーチャルピアノ

野崎 陽奈子

指導教員 志築 文太郎, 川口 一画

2021年2月

## 概要

楽器に慣れ親しんでいる人は、外出先でも楽器を練習したいと思うことや、メロディが聞こえてきた時に無意識に指を動かしたくなること、良いメロディが思いついた時に楽器を弾きたくなることがある。しかし、身近に楽器がない状況は多い。特に据え置き型のピアノは、大きく重たいため、持ち運ぶことが困難である。この問題に対する解決策として、モバイルデバイスの画面上にて演奏可能なピアノアプリケーションが存在する。しかし、これは実際の鍵盤より鍵盤が小さく、また表示かつ操作できる鍵盤数が制限されるという問題がある。

また、高い導電性および回路パターンの十分な強度を確保するため特別に設計された導電性インク専用の用紙（以下シートとする）上に導電性インクを用いて図形を印刷し、タッチパネルに貼り付けることによりデバイスの操作範囲を拡張する手法が研究されている。この手法に着目し、本研究では、導電性インクを用いてシートに鍵盤の図を印刷し、モバイルデバイスのタッチパネルに貼り付けることによりバーチャルピアノを実現する手法を検討する。本研究ではまず、鍵盤を作製する際に適した印刷パターンを検討するために予備実験を行った。予備実験の結果を基に3オクターブの鍵盤を作製した。また、このシステムの性能を調査するための実験を行った。その結果、シートを跨がない鍵盤ではBPM=120という速いテンポでもほぼ100%反応した。また、ユーザが鍵盤に対し指を押し込んでから音が鳴り始めるまでの遅延は平均80.63msであり、試作システムは、今回の実験にて行ったタスクにおいては影響のない精度であることが分かった。

# 目次

<b>第1章</b>	<b>はじめに</b>	<b>1</b>
1.1	背景	1
1.2	目的とアプローチ	1
1.3	貢献	2
1.4	本論文の構成	2
<b>第2章</b>	<b>関連研究</b>	<b>3</b>
2.1	バーチャルピアノに関する研究	3
2.1.1	投影型の装置	3
2.1.2	カメラを用いた手法	3
2.1.3	タッチパネルを用いた手法	4
2.2	平面上にてタッチを行った手指を認識する研究	4
2.2.1	振動音響センサを用いた手法	5
2.2.2	内臓マイクを用いた手法	5
2.2.3	加速度センサを用いた手法	5
2.2.4	導電性インクを用いた手法	5
<b>第3章</b>	<b>本手法</b>	<b>6</b>
<b>第4章</b>	<b>予備実験</b>	<b>7</b>
4.1	開発環境	7
4.2	実験条件	7
4.2.1	重ね刷りの回数	8
4.2.2	実行環境	10
4.2.3	出力部の大きさや形状	11
4.2.4	接続部の太さ	13
4.2.5	入力部の模様	15
<b>第5章</b>	<b>試作システムの実装</b>	<b>17</b>
5.1	パターン	17
5.2	タッチした鍵盤の位置に応じて音を出力するアプリケーション	18
<b>第6章</b>	<b>評価実験</b>	<b>20</b>

6.1	実験参加者	20
6.2	単音による評価	20
6.2.1	設計	20
6.2.2	結果	21
6.2.3	議論	25
6.3	曲の演奏による評価	25
6.3.1	設計	26
6.3.2	結果	26
6.3.3	議論	26
<b>第7章</b>	<b>議論および今後の課題</b>	<b>27</b>
7.1	試作システムの改良	27
7.1.1	ボタン配置の修正	27
7.1.2	シートを跨いだ際の反応精度の向上	27
7.1.3	遅延がより少なくなる条件の調査	27
7.2	実験の拡張	28
7.2.1	実験参加者の追加	28
7.2.2	和音や両手を使用する曲での評価	28
<b>第8章</b>	<b>おわりに</b>	<b>29</b>
	謝辞	30
	参考文献	31
<b>付録A</b>	<b>実験に関する各種書類</b>	<b>34</b>
A.1	実験同意書	35
A.2	実験手順書	37
A.3	アンケート	40

# 目 次

3.1	本手法の構成.	6
4.1	実験に用いた1オクターブの鍵盤.	8
4.2	重ね刷りの回数ごとの反応回数.	9
4.3	実行環境ごとの反応回数.	10
4.4	実験に用いた出力部が円の1オクターブの鍵盤.	12
4.5	出力部の大きさと形状ごとの反応回数.	13
4.6	接続部の太さごとの正しい反応回数.	14
4.7	実験に用いた縦縞模様の鍵盤.	15
4.8	実験に用いた横縞模様の鍵盤.	16
5.1	作製した3オクターブの鍵盤.	18
5.2	作製した3オクターブの鍵盤のパターン.	18
5.3	作製したアプリケーション.	19
6.1	シートを跨いでいない各鍵盤において正しく音が鳴った回数 (4C-4B).	21
6.2	シートを跨いだ各鍵盤において正しく音が鳴った回数 (5C-5B).	21

# 表 目 次

4.1	重ね刷りの回数ごとの各鍵盤の反応回数. . . . .	9
4.2	実行環境ごとの各鍵盤の反応回数. . . . .	10
4.3	出力部の大きさごとの反応回数 (正方形). . . . .	11
4.4	出力部の大きさごとの反応回数 (円). . . . .	12
4.5	接続部の太さごとの各鍵盤の正しい反応回数. . . . .	14
6.1	シートを跨いでいない各鍵盤において, 人差し指の指先がシートに印刷された 鍵盤に触れ始めてから音が鳴り始めるまでの遅延時間 (ms) (4C-4B). . . . .	22
6.2	シートを跨いだ各鍵盤において, 人差し指の指先がシートに印刷された鍵盤に 触れ始めてから音が鳴り始めるまでの遅延時間 (ms) (5C-5B). . . . .	23
6.3	シートを跨いでいない各鍵盤において, 人差し指をシートに印刷された鍵盤に 対して押し込んでから音が鳴り始めるまでの遅延時間 (ms) (4C-4B). . . . .	24
6.4	シートを跨いだ各鍵盤において, 人差し指をシートに印刷された鍵盤に対して 押し込んでから音が鳴り始めるまでの遅延時間 (ms) (5C-5B). . . . .	24

# 第1章 はじめに

本論文では、導電性インクを用いたバーチャルピアノを述べる。本章では、まず背景として、ピアノ経験者が一時的にピアノのない環境にいる場合において気軽にピアノを演奏したい際の問題点を示す。次に本研究の目的とアプローチを示す。その後、本研究の貢献を示し、最後に本論文の構成を示す。

## 1.1 背景

楽器に慣れ親しんでいる人は、外出先でも楽器を練習したいと思うことや、メロディが聞こえてきた時に無意識に指を動かしたくなること、良いメロディが思いついた時に楽器を弾きたくなくなることがある。しかし、公共の場に楽器が設置されていることは少なく、簡単に借りることもできないため、身近に楽器がない状況は多い。特に通常88個の鍵盤を持つ据え置き型のピアノであるグランドピアノおよびアップライトピアノは、大きく重たい。具体的には、グランドピアノは、大きさが間口146–155 cm×奥行き149–227 cm×高さ99–102 cm、重量が255–410 kg、アップライトピアノは、大きさが間口147–156 cm×奥行き60–68 cm×高さ121または131 cm、重量が210–275 kgとなっている [YAM]。そのため、演奏者が日常的にグランドピアノおよびアップライトピアノを持ち運ぶことは不可能である。松末ら [MFM17] も、同様の状況を問題としてあげている。

この問題に対する解決策として、キーボードやロールアップピアノが存在する。これらの楽器は、グランドピアノおよびアップライトピアノと比較すると持ち運びが容易であり、ピアノ以外の楽器音を出せるものも存在する。しかし、これらは鍵盤数が多いほど大きさや重量が増すため、ピアノと同じ鍵盤数を持つものの持ち運びは容易ではない。また、スマートフォンやタブレットなどのモバイルデバイスの画面に鍵盤を表示し、画面上にて演奏可能なモバイルアプリケーションが存在する。しかし、これは実際の鍵盤より鍵盤が小さい、および表示かつ操作できる鍵盤数がモバイルデバイスのディスプレイサイズにより制限されるという問題がある。

## 1.2 目的とアプローチ

本研究の目的は、ユーザが任意の場所にて手軽にピアノを演奏するための、持ち運びが容易なバーチャルピアノを実現することである。このために本研究では、導電性インクを用いてモバイルデバイスのタッチパネルを拡張するアプローチを検討した。導電性インクを用い

てシートに鍵盤，デバイス上にてタッチイベントを発生させる正方形およびそれらを結ぶ導線の図（以下パターンとする）を印刷し，モバイルデバイスのタッチパネルに貼り付け，シート上の鍵盤に触れることにより演奏可能なバーチャルピアノを作製した．また，作製したシステムの性能調査を行った．

### 1.3 貢献

本研究の貢献は以下の通りである．

- 予備実験により，バーチャルピアノにおいて用いるパターンとして適した条件を明らかにした．
- 導電性インクを用いた持ち運びが容易なバーチャルピアノの実装方法を示した．
- 実験を通して試作システムの性能評価を行った．

### 1.4 本論文の構成

本論文の構成は以下の通りである．第1章では，本研究の背景，目的とアプローチ，および貢献を示した．第2章では，本研究に関連する研究を述べ，本研究の位置付けを示す．第3章では，本手法を述べる．第4章では，本手法の実装にあたって行った予備調査を述べる．第5章では，手法を実現するために作製した試作システムの実装を述べる．第6章では，試作システムを用いた精度に関する実験を述べる．第7章では，本研究に関する議論と今後の課題を述べる．第8章では，本研究の結論を述べる．



## 第2章 関連研究

本研究では，導電性インクを用いてシートに鍵盤のパターンを印刷し，そのシートをモバイルデバイスのタッチパネルに貼り付けることにより，デバイスの操作範囲を拡張するアプローチを検討する．これにより，持ち運び可能なバーチャルピアノを実現することを目的とする．本章では，バーチャルピアノに関する研究，および平面上にてタッチを行った手指を認識する研究を示し，本研究の位置付けを行う．

### 2.1 バーチャルピアノに関する研究

今まで行われてきたバーチャルピアノに関する様々な研究には，投影型の手法，カメラを用いた手法，およびタッチパネルを用いた手法がある．本節では，これらを順に述べる．

#### 2.1.1 投影型の装置

SERAFIM KEYBO [Ser] は，仮想的な鍵盤をレーザーにて机に投影する投影型の装置である．この手法では，本体上部の投影口から照射されるレーザーにてキーボードの「絵」を机に投影する．また，本体下部から各キーに対応する位置に向け赤外線レーザーを照射し，レーザーが塞がれたことを赤外線センサにて感知することにより，キーが押され入力が行われたと判定する．Xperia Touch [SON] は，壁や机に鍵盤を投影し，本体内蔵の赤外線とイメージセンサを用いて指が触れた位置を検知する．しかし，これらの手法では，持ち運びが容易な小さな投影装置を用いると1台の投影装置では表示できる鍵盤数が限られるため，88鍵を表示するためには複数の投影装置が必要である．また，1台で88鍵を表示しようとするると，持ち運びが困難な大きな装置にて遠くから投影する必要がある．

一方，本手法では，鍵盤のパターンが印刷されたシートを横につなげていくことのみにより鍵盤数を容易に拡張できるため，鍵盤数を拡張するために追加の電子機器を必要としない．

#### 2.1.2 カメラを用いた手法

村上・中島 [村上17] は，鍵盤の描かれた紙を机の上に置き，紙をタッチするユーザの指先の位置を深度センサ付きカメラにて検出し，対応する鍵盤の音を鳴らすことによりバーチャルピアノを実現した．これらの手法では，カメラにて手指を検知できる範囲が限られている

ため、限られた鍵盤数しか実現できない。一方、本手法では、原理としては88鍵の鍵盤の実現が可能であり、据え置き型のピアノと同じ数の鍵盤を用いて演奏できる。

また、竹川ら [竹川 11] は、各指の爪に貼り付けたカラーマーカをウェブカメラを用いて読み取り、画像処理を行うことにより運指の取得を行った。この手法は、プロジェクタなど持ち運びに困難な装置が必要であり、かつそれらを設置するための場所および手間を要する。一方、本手法では必要となるのはモバイルデバイス、A4サイズのシート、およびACアダプタのみであるため、持ち運びに困難な装置を必要としない。設置方法に関しても、ACアダプタを電源とモバイルデバイスに接続し、シートをモバイルデバイスに貼り付けるのみであるため、容易である。

さらには、仮想空間に鍵盤を配置し、実空間にて指を動かすことにより仮想空間上のピアノを演奏できる手法もある。Liangら [LWS<sup>+</sup>16] は、バーチャルピアノを演奏するユーザの指先を深度センサ付きカメラを使用して追跡し、指のタッチを検出した。Enkhtogtokhら [TSK<sup>+</sup>18] は、Leap Motionを用いて、y軸方向の指の速度差が閾値以上である場合、打鍵したと判定するシステムを作製した。Inwookら [HSK17] は、3D空間内に描画された鍵盤に、Leap Motionにて取得した指先が触れた場合に打鍵したと判定するシステムを作製した。演奏を行うテーブル上にハプティックディスプレイを設置し、そこから40kHzの超音波を出力することにより、ユーザに力触覚フィードバックを与えることが可能である。しかし、力触覚フィードバックは垂直方向のみであり、水平方向のフィードバックはないため、鍵盤全体に対する自分の手の位置および鍵盤に対する距離感が認識しづらいという問題がある。一方、本手法では鍵盤が実空間にあるため、ユーザは鍵盤全体に対する自分の手の位置を瞬時に把握できる。

### 2.1.3 タッチパネルを用いた手法

金杉・宮下 [金杉 18] は、タッチパネル上に表示された鍵盤の大きさや位置をピンチやスワイプ操作にて任意の範囲で変化させることにより、限られたディスプレイの範囲内での演奏を可能とするインタフェースを作製した。この手法では、ユーザは実際のピアノの演奏時に行わない操作を行う必要があり、かつ実際の鍵盤と鍵盤の大きさが異なるため、スムーズな演奏ができない。一方、本手法では、打鍵のみを用いて、実際の鍵盤と同じ大きさの鍵盤を演奏できる。

## 2.2 平面上にてタッチを行った手指を認識する研究

本研究においては、平面上にてタッチを行った手指を認識することによりバーチャルピアノを実現できるのではないかと考えた。本節では、振動音響センサを用いた手法、内臓マイクを用いた手法、加速度センサを用いた手法および導電性インクを用いた手法を述べる。

### 2.2.1 振動音響センサを用いた手法

Xiao ら [XLM+14] は、デバイスの底面四隅に設置した振動音響センサにて、テーブルをタップした時に生じる振動による波が各センサに到達する時間差を計算し、タッチした位置を検出した。この手法では、デバイスに対するタッチ位置の方向は高い精度で認識できるが、デバイスに対するタッチ位置の距離の認識精度は低い。また、ピアノ音の出力がシステムの精度を低下させる可能性がある。一方、本手法では周囲の音の影響を受けず、タッチした鍵盤を高い精度で認識できる。

### 2.2.2 内臓マイクを用いた手法

Kim ら [KBL+18] は、ユーザの表面への接触から発生する接触音を分析し、接触入力的位置を特定した。スマートフォンやタブレットに内蔵されているマイクのみを使用し、タッチ入力的位置を正確に識別できる。この手法では、マルチタッチに十分に対応していないため、片手による単音の曲しか演奏できない。また、また、ピアノ音の出力がシステムの精度を低下させる可能性がある。一方、本手法では周囲の音の影響を受けず、マルチタッチにも対応できる。

### 2.2.3 加速度センサを用いた手法

福本・外村 [福本 98] は、指輪型の加速度センサを各指の付け根に装着し、平面上にて打鍵動作を行った時に各指の付け根に生じる加速度から、どの指を用いて打鍵されたかを検出した。この手法では、打鍵した指は認識できるが、打鍵が行われた位置までは認識できないため、運指は把握できるが打鍵を行った鍵盤の把握ができない。一方、本手法では打鍵を行った鍵盤の把握が可能である。

### 2.2.4 導電性インクを用いた手法

加藤ら [加藤 16] は、細い導電性の線を縞模様状に印刷したシートを静電容量式のタッチパネル上に貼り付けることのみにより、タッチパネルを拡張できる手法を提案した。ユーザがシート上の一端において数本の線を1本の指で触れることにより、シートのもう一端、つまりタッチパネル上に貼り付けられた箇所においてタッチ入力を発生させられる。また、タッチだけでなくスクロール、スワイプ、ピンチ操作を実現する。

Chang ら [CKK+19, CTN+20] は、回路を2層にすることにより、シート上の限られたスペースに多数のタッチ点を配置した。また、切り紙の技法を用いて、2Dのシートから3D形状のキーを作製するための折り畳みと切断のパターンを設計した。

本研究においては、この手法を用いることによりバーチャルピアノが実現可能であると考えた。

## 第3章 本手法

本研究では，ExtensionSticker [加藤 16] および Kirigami Keyboard [CKK<sup>+</sup>19] を参考に，銀ナノ粒子インクを用いてタッチパネルディスプレイ上の鍵盤を拡張する手法を提案する．アプリケーション上にて，タップするとピアノ音の鳴るボタンを 88 個作製し，2次元に配置する．各ボタンには各鍵盤の音を割り振る．銀ナノ粒子インクを用いて鍵盤，接触点，およびそれらを結ぶ導線をシートに印刷し，そのシートをタッチパネル上に貼り付ける．この時，銀ナノ粒子インクを用いて印刷した接触点がアプリケーションのボタン上に重なるように両面テープを用いて貼り付ける．シートに印刷された鍵盤上にてユーザーがタッチ操作を行った際，タッチパネル上のシートが貼り付けられた箇所においてタッチ入力が発生し，アプリケーションのボタンが押されることにより音が鳴る．

この手法では，A4サイズのシートを並べていくことにより鍵盤を拡張できるため，それらを折り畳んでクリアファイル等に収納することにより容易に持ち運びができる．また，折り畳んだシートを広げてタブレットに貼り付けることのみにより設置できる．

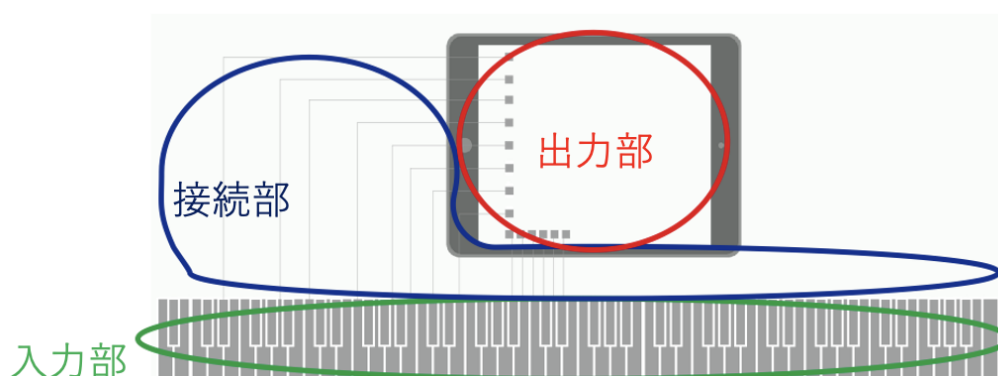


図 3.1: 本手法の構成.

なお，これ以降，銀ナノ粒子インクを用いて印刷するパターンのうち，ユーザーが触れる鍵盤部分を「入力部」，iPad上でタッチが発生する部分を「出力部」，および入力部と出力部を結ぶ導線を「接続部」と呼ぶ．

## 第4章 予備実験

提案手法の実装に先立ち、適した条件を調査するために、重ね刷りの回数、実行環境、出力部の大きさと形状、接続部の太さ、および入力部の模様について予備実験を行った。本章では、それらを順に述べる。

### 4.1 開発環境

予備実験にて使用したパターンの作製には、Adobe Illustrator 2020 を用いた。パターンは、銀ナノ粒子インク専用透明 PET 用紙（三菱製紙，NB-TP-3GU100）に銀ナノ粒子インク（三菱製紙，NBSIJ-MU01）を用いて印刷した。印刷にはプリンタ（EPSON PX-S160T）を使用した。シートをデバイスに貼り付けるための両面テープにはナイスタック（ニチバン株式会社 NW-10，厚さ 0.09 mm）を用いた。また、動作確認には iPad Pro（12.9 インチ，第 3 世代，iOS14.2）を使用した。

なお、銀ナノ粒子インク専用透明 PET 用紙は、表面に微細孔を有する塗工を施した、PET フィルムを支持体とする基材であり、銀ナノ粒子インクは、水を主体とする媒体に直径約 20nm 程度の銀ナノ粒子を分散させたインクである。

### 4.2 実験条件

以下の項目において適した条件を見つけるために予備実験を行った。

- 重ね刷りの回数
- 実行環境
- 出力部の大きさと形状
- 接続部の太さ
- 入力部の模様

なお、全ての項目において、接続部の長さは 38.5 mm とし、入力部は白鍵および黒鍵共に、鍵盤間に隙間を設けるために実際の鍵盤の大きさから幅を 2.0 mm 小さくした。なお、実際の鍵盤において白鍵は 23.0 mm×135.0 mm，黒鍵は 11.0 mm×95.0 mm である。また、ズレなく重ね刷りを行うために、プリンタの印刷設定は以下のようにした。

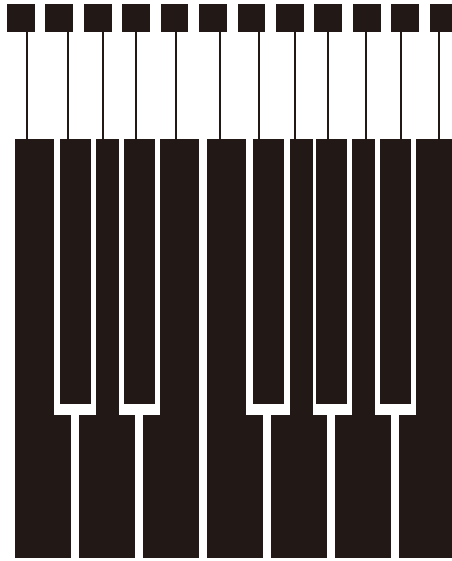


図 4.1: 実験に用いた1オクターブの鍵盤.

用紙種類 マット紙→EPSON フォットマット紙

印刷品質 きれい

#### 4.2.1 重ね刷りの回数

##### 設計

船越ら [FFMS20] らは、パイロットスタディにより、インクを2回刷りすることにより抵抗が減少すること、および3回刷り以上ではそれ以上の大幅な改善が見られないことを明らかにした。本手法にて使用するシートは船越ら [FFMS20] と異なるため、本手法にて使用するシートでも同様の反応が起きるのかを調査するために重ね刷りの回数による反応率の違いを調べた。

1枚のシートに1オクターブ(12音)の鍵盤(図4.1)を重ね刷りの回数を変えて印刷し、両面テープを用いてiPadのタッチパネルに貼り付けた。1-5回刷りの5枚のシートを用意し、反応を比較した。出力部は1辺が両面テープの幅と同じ10.0mmの正方形、接続部の太さは加藤ら [加藤 14] の実験において一番反応の良かった0.5mmにて統一した。Ohmic-Sticker [池松 19] に倣い、非タッチ時の流出電流値を安定させるためiPadを電源に接続した。各鍵盤の入力部を利き手の人差し指にて10回ずつタッチし、タッチイベントが発生した箇所を表示するアプリケーションであるMultiTouch Visualizer<sup>1</sup>を用いて、出力部においてタッチイベントが発生しているかどうかを確認した。

<sup>1</sup><https://apps.apple.com/jp/app/multitouch-visualizer/id376335100> (閲覧日: 2021年2月19日)

表 4.1: 重ね刷りの回数ごとの各鍵盤の反応回数.

	ド	ド#	レ	レ#	ミ	ファ	ファ#	ソ	ソ#	ラ	ラ#	シ	平均
1回刷り	0	0	10	10	10	10	0	10	10	10	10	10	7.5
2回刷り	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10.0
3回刷り	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10.0
4回刷り	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10.0
5回刷り	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10.0

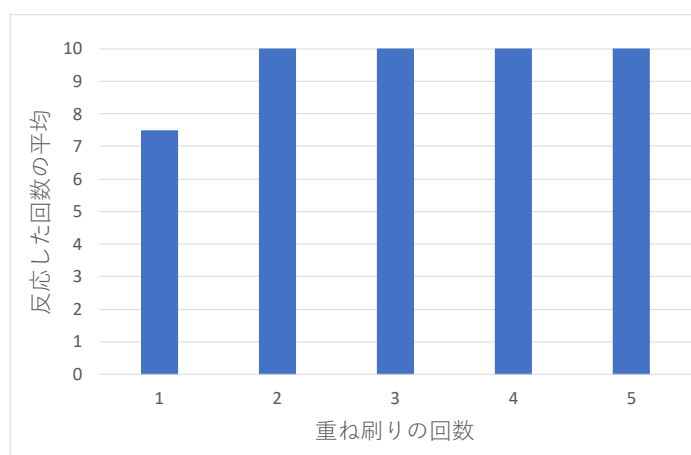


図 4.2: 重ね刷りの回数ごとの反応回数.

### 結果および考察

12 個の鍵盤をそれぞれ 10 回ずつタッチした時の各鍵盤の反応した回数, およびその平均回数を重ね刷りの回数ごとに算出した結果が表 4.1 および図 4.2 である. 2 回刷り以上の場合には全ての鍵盤において 10 回中 10 回反応したが, 1 回刷りでは全く反応の見られない鍵盤が 3 つあった. また, 別のシートを用いて印刷し直したところ, 反応の見られない鍵盤が変化したため, 1 回刷りではインクののりが悪い箇所が 25%程度の割合で生じるものと考えられる. また, 5 回刷りの場合はインクが乾くまでに 1 時間ほど時間を要した. よって, インクがきちんとおり, インクの乾きが早い重ね刷り回数の中で使用するインクの量が少ない 2 回刷りを, 以降の予備実験において採用するものとする.

なお, シートを貼り付けた直後は複数の鍵盤において常にタッチが発生している状態になっていた. そのため, シートを貼り付けた後, 流出電流値が安定するまでしばらく待つ必要がある.

表 4.2: 実行環境ごとの各鍵盤の反応回数.

	ド	ド#	レ	レ#	ミ	ファ	ファ#	ソ	ソ#	ラ	ラ#	シ	平均
何もしない	0	10	10	9	10	10	10	10	10	10	10	2	8.4
把持	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10.0
空中	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10.0
電源接続	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10.0

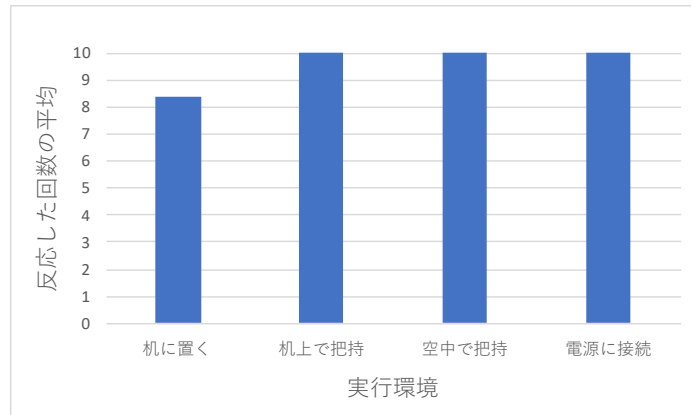


図 4.3: 実行環境ごとの反応回数.

## 4.2.2 実行環境

### 設計

Ohmic-Sticker [池松 19] にて, デバイスを人体および AC アダプタに接続した際に非タッチ時の流出電流値が安定するという記述があり, 具体的にそれがどのように反応に影響するのかを調査するために, 実行環境による反応率の違いを調べた.

1 枚のシートに 1 オクターブの鍵盤 (図 4.1) を 2 回刷りにて印刷し, 両面テープを用いて iPad のタッチパネルに貼り付けた. iPad を机の上に置いた状態, iPad を机の上にて片手を用いて把持した状態, iPad を空中にて把持した状態, iPad を電源に接続した状態の 4 つの条件にてタッチの反応を比較した. 出力部は 1 辺が両面テープの幅と同じ 10.0 mm の正方形, および接続部の太さは加藤ら [加藤 14] の実験において一番反応の良かった 0.5 mm にて統一した. 各鍵盤の入力部を左手の人差し指にて 10 回ずつタッチし, MultiTouch Visualizer を用いて出力部においてタッチイベントが発生しているかを確認した.

### 結果および考察

12 個の鍵盤をそれぞれ 10 回ずつタッチした時の各鍵盤の反応した回数, およびその平均回数を実行環境ごとに算出した結果が表 4.2 および図 4.3 である. iPad を机の上にて片手を



表 4.3: 出力部の大きさごとの反応回数 (正方形).

	ド	ド#	レ	レ#	ミ	ファ	ファ#	ソ	ソ#	ラ	ラ#	シ	平均
4mm	1	10	0	0	8	0	10	1	1	0	0	0	2.6
5mm	10	7	10	6	10	10	10	5	10	10	10	0	8.2
6mm	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10.0
7mm	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10.0
8mm	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10.0
9mm	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10.0
10mm	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10.0

用いて把持した状態, 空中にて把持した状態, および iPad を電源に接続した状態では全ての鍵盤において 10 回中 10 回反応したが, iPad を机においた状態では, 1 度も反応しなかった鍵盤, 2 回のみ反応した鍵盤, 9 回反応した鍵盤がそれぞれ 1 つずつあった. その他の鍵盤は 10 回中 10 回反応し, 全体では平均 84.2% の反応率であった.

ピアノの演奏を両手にて行った際にデバイスを把持することは困難であるため, 以降の予備実験では iPad を電源に接続する.

#### 4.2.3 出力部の大きさと形状

##### 設計

加藤ら [加藤 14] は, タッチ入力を行う箇所およびタッチイベントを発生させる箇所の形状を円にて統一し, 円の大きさの違いによる認識精度の差を評価する実験を行った. 本手法ではタッチ入力を行う箇所の大きさおよび形状が加藤ら [加藤 14] と異なるが, その場合でも同様の結果が得られるのか, また出力部の形状が円以外の場合に反応率がどう変化するかを調査するために出力部の大きさと形状による反応率の違いを調べた.

1 枚のシートに 1 オクターブの鍵盤を 2 回刷りにて印刷し, 両面テープを用いて iPad のタッチパネルに貼り付けた. 出力部を 1 辺 4.0 mm, 5.0 mm, 6.0 mm, 7.0 mm, 8.0 mm, 9.0 mm, 10.0 mm の正方形と直径 4.0 mm, 5.0 mm, 6.0 mm, 7.0 mm, 8.0 mm, 9.0 mm, 10.0 mm の円としてタッチの反応を比較した. 接続部の太さは加藤ら [加藤 14] の実験において一番反応の良かった 0.5 mm にて統一した. iPad を机の上に置き, 電源に接続した. 各鍵盤の入力部を左手の人差し指にて 10 回ずつタッチし, MultiTouch Visualizer を用いて出力部においてタッチイベントが発生しているかを確認した.

##### 結果および考察

12 個の鍵盤をそれぞれ 10 回ずつタッチした時の各鍵盤の反応した回数, およびその平均回数を出力部の大きさと形状ごとに算出した結果が表 4.3, 表 4.4 および図 4.5 である. 4.0 mm

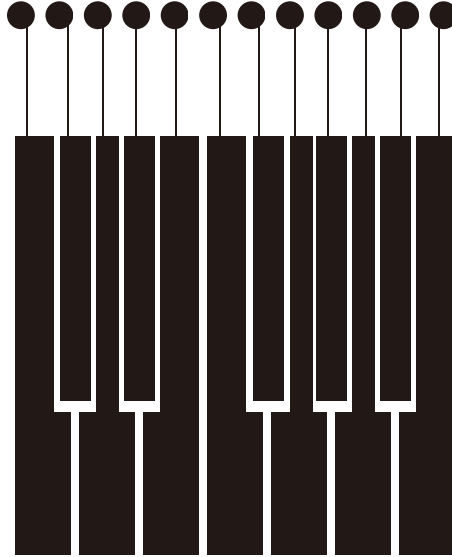


図 4.4: 実験に用いた出力部が円の 1 オクターブの鍵盤.

表 4.4: 出力部の大きさごとの反応回数 (円).

	ド	ド#	レ	レ#	ミ	ファ	ファ#	ソ	ソ#	ラ	ラ#	シ	平均
4mm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0
5mm	0	2	8	7	0	0	10	10	10	0	3	0	4.2
6mm	1	10	10	10	8	10	10	10	10	5	0	1	7.1
7mm	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10.0
8mm	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10.0
9mm	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10.0
10mm	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10.0

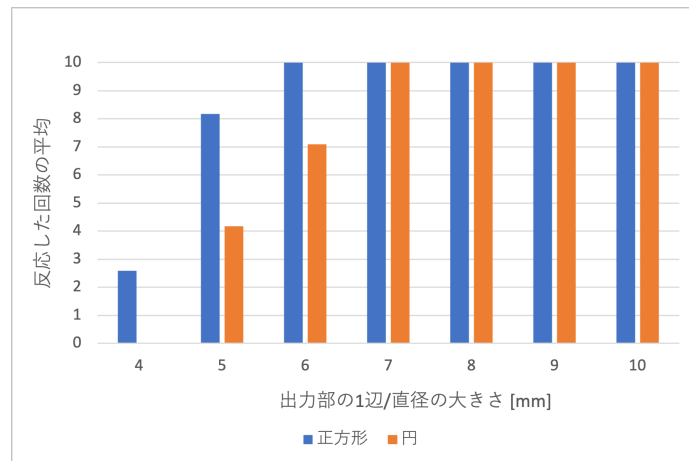


図 4.5: 出力部の大きさと形状ごとの反応回数.

に関しては、正方形では10回中1度も反応が見られなかった鍵盤が6つ、1度のみ反応した鍵盤が3つ、8回反応した鍵盤が1つ、および10回反応した鍵盤が2つであり、全体では平均25.8%の反応率であった。一方、円では全ての鍵盤において10回中1度も反応が見られなかった。5.0mmに関しては、正方形では10回中1度も反応が見られなかった鍵盤が1つ、5回、6回、7回反応した鍵盤がそれぞれ1つずつ、および10回反応した鍵盤が8つであり、全体では平均81.7%の反応率であった。一方、円では10回中1度も反応が見られなかった鍵盤が5つ、2回、3回、7回、8回反応した鍵盤がそれぞれ1つずつ、および10回反応した鍵盤が3つであり、全体では平均41.7%の反応率であった。6.0mmに関しては、正方形では全ての鍵盤において10回中10回反応した。一方、円では10回中1度も反応が見られなかった鍵盤が1つ、1回のみ反応した鍵盤が2つ、5回、8回反応した鍵盤がそれぞれ1つずつ、および10回反応した鍵盤が7つであり、全体では平均70.8%の反応率であった。以上より、出力部の形状は円より正方形の方が反応が良いこと、および出力部の大きさは大きい方が反応が良いことが分かった。

よって、以降の予備実験では出力部に1辺10.0mmの正方形を用いる。

#### 4.2.4 接続部の太さ

##### 設計

加藤ら [加藤 14] は、接続部の幅ごとの認識精度の差を評価する実験を行った。しかし、本手法は加藤ら [加藤 14] とタッチ入力を行う箇所およびタッチイベントを発生させる箇所の形状が異なるため、その場合でも同様の結果が得られるのかを調査するために接続部の太さによる反応率の違いを調べた。

1枚のシートに1オクターブの鍵盤を2回刷りにて印刷し、両面テープを用いてiPadのタッチパネルに貼り付けた。接続部の太さを0.5mm、1.0mm、1.5mm、2.0mmとして反応を比

表 4.5: 接続部の太さごとの各鍵盤の正しい反応回数.

	ト	ド#	レ	レ#	ミ	ファ	ファ#	ソ	ソ#	ラ	ラ#	シ	平均
0.5mm	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10.0
1mm	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	9	9.9
1.5mm	5	1	10	9	10	10	10	4	9	9	9	9	7.9
2mm	10	9	3	3	9	10	6	10	10	10	10	10	8.3

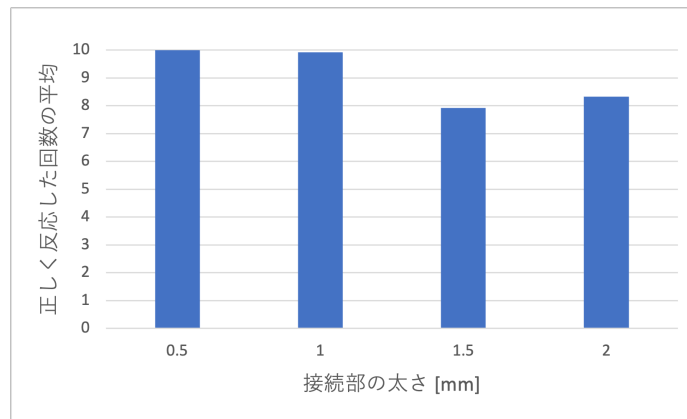


図 4.6: 接続部の太さごとの正しい反応回数.

較した. 出力部は1辺10.0mmの正方形にて統一した. iPadを机の上に置き, 電源に接続した. 各鍵盤の入力部を左手の人差し指にて10回ずつタッチし, MultiTouch Visualizerを用いて出力部においてのみタッチイベントが発生しているかを確認した.

### 結果および考察

12個の鍵盤をそれぞれ10回ずつタッチした時の各鍵盤の反応した回数, およびその平均回数を接続部の太さごとに算出した結果が表4.5および図4.6である. この項において, 出力部でのみ反応が見られた場合を「正しく反応した」とする. 接続部の太さが0.5mmの時は全ての鍵盤にて10回中10回正しく反応した. 1.0mmの時は1つの鍵盤にて10回中9回, その他の鍵盤では10回中10回正しい反応が見られ, 全体では平均99.2%の反応率であった. 1.5mmの時は1つの鍵盤にて10回中1回のみ正しく反応し, 4回, 5回正しく反応した鍵盤がそれぞれ1つずつ, 9回正しく反応が見られた鍵盤が5つ, および10回正しく反応した鍵盤が4つであり, 全体では平均79.2%の反応率であった. 2.0mmの時は10回中3回, 9回正しく反応した鍵盤がそれぞれ2つずつ, 6回正しく反応した鍵盤が1つ, 9回正しく反応が見られた鍵盤が5つ, および10回正しく反応した鍵盤が7つであり, 全体では平均83.3%の反応率であった.

接続部の太さが増えるにつれ, 反応しないことや出力部でなく接続部上にてタッチイベ

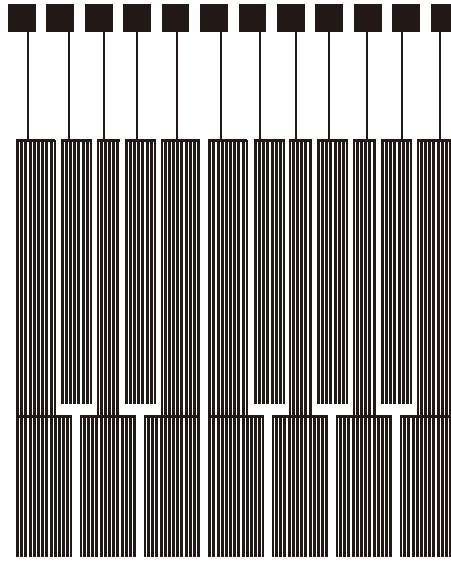


図 4.7: 実験に用いた縦縞模様の鍵盤.

ントが発生してしまうことが分かった. よって, 以降の予備実験では接続部の太さを 0.5 mm とする.

#### 4.2.5 入力部の模様

##### 設計

ExtensionSticker [加藤 16] のように入力部を縞模様にした時に反応率が変化するのかを調査するために入力部の模様による反応率の違いを調べた. 1 枚のシートに 1 オクターブの鍵盤を 2 回刷りにて印刷し, 両面テープを用いて iPad のタッチパネルに貼り付けた. 入力部の形状を単色塗り, 縦縞模様 (図 4.7) および横縞模様 (図 4.8) とし, 反応を比較した. 縦縞模様および横縞模様では, ExtensionSticker [加藤 16] での実験結果でタップ操作の反応が良かった, 線の太さ 1.0 mm, および線の間隔 0.5 mm を採用した. 出力部は 1 辺 10.0 mm の正方形, 接続部の太さは 0.5 mm にて統一した. iPad を机の上に置き, 電源に接続した. 各鍵盤の入力部を左手の人差し指にて 10 回ずつタッチし, MultiTouch Visualizer を用いて出力部においてのみタッチイベントが発生しているかを確認した.

##### 結果および考察

入力部の模様に関わらず全ての鍵盤において 10 回中 10 回反応した. 鍵盤の見た目を実物に近づけるため, および鍵盤の一部のインクののりが悪かった時にその反応なくなる可能性を下げるため, 入力部の模様には単色塗りを採用した.

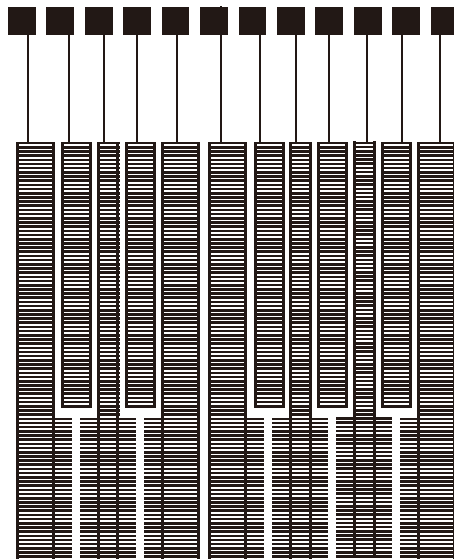


図 4.8: 実験に用いた横縞模様の鍵盤.

## 第5章 試作システムの実装

本手法を実現するにあたり性能を調査するために、88 鍵の一部である試作システムを作製した。実装には予備実験と同一の開発環境を用いた。またアプリケーションの作製には、ハードウェアに著者の PC である MacBook Pro (macOS Mojave 10.14.6), 統合開発環境に Xcode 12.2, および開発言語に Swift 5.3.1 を用いた。

### 5.1 パターン

予備実験の結果を基に、3 オクターブの鍵盤のパターンを作製した (図 5.1)。重ね刷りの回数には 2 回、接続部の太さには 0.5 mm, および入力部の模様には単色塗りを採用した。iPad Pro のタッチパネルに 88 個のボタンを配置可能な最大の大きさとして、出力部には 1 辺 8.0 mm の正方形を用いた。また、シート間の接続には 10.0 mm 幅の導電性アルミ箔テープを使用した。加藤ら [加藤 15] は、銀ナノ粒子インクを用いて印刷した線の太さが 1.0 mm 以上であると、その線上でタッチイベントが発生することがあることを明らかにした。導電性アルミ箔テープでも同様の減少が起きることが考えられるため、テープによる接続箇所にてタッチイベントが発生しないよう可能な限り 1.0 mm 以下の細さになるよう切って使用した。

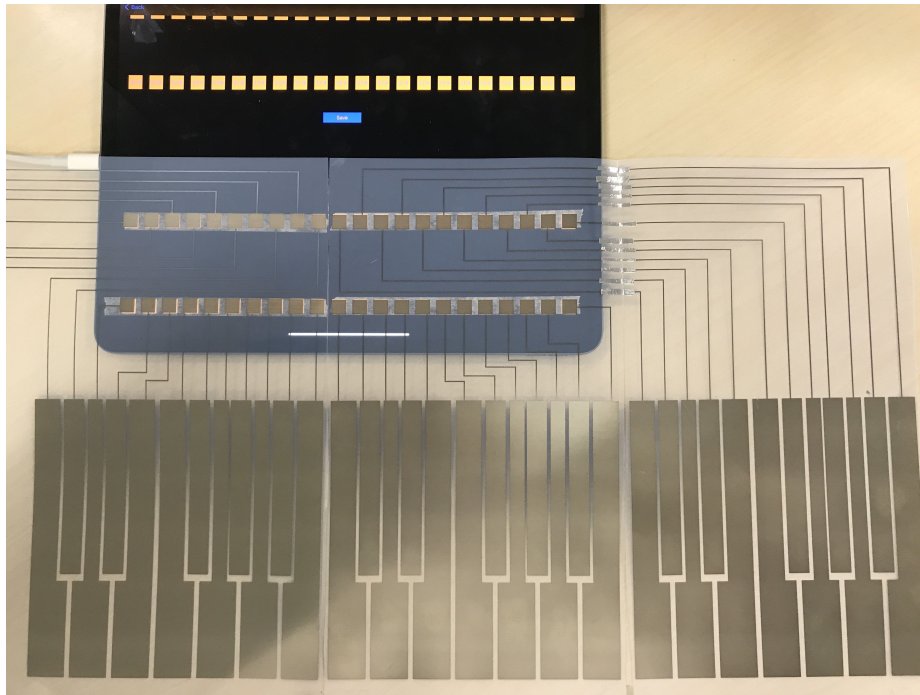


図 5.1: 作製した 3 オクターブの鍵盤.

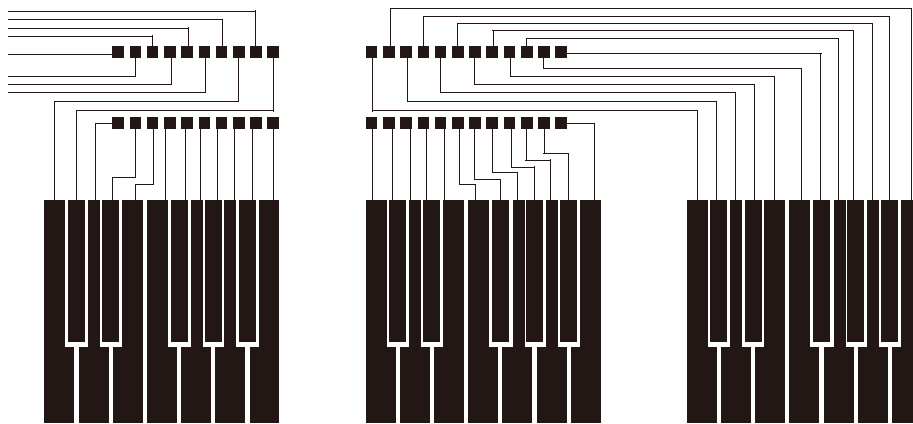


図 5.2: 作製した 3 オクターブの鍵盤のパターン.

## 5.2 タッチした鍵盤の位置に応じて音を出力するアプリケーション

タッチした鍵盤の位置に応じて音を出力するアプリケーションを作製した. アプリケーションでは, 4 行 22 列に 88 個のボタンを配置した (図 5.3). このうち試作システムにて使用したのは, 1 番下の 1 列およびその上の列の 14 個である. 各ボタンに対してタッチダウンイベント





## 第6章 評価実験

試作システムのタッチ判定精度およびタッチ反応速度を評価するための実験を行った。本実験では、村上ら [村上 17] に倣い、単音の打鍵および曲の演奏の2つのタスクを行った。本章では、単音による評価および曲の演奏による評価を述べる。なお、実験に用いた実験同意書、実験手順書、およびアンケートは付録に掲載する (A.1, A.2, A.3)。

### 6.1 実験参加者

実験参加者は、研究室内の学生1名 (22歳男性, ピアノ経験なし) であった。

### 6.2 単音による評価

本節では、単音による評価の実験設計、結果および議論を述べる。

#### 6.2.1 設計

試作システムの3オクターブの鍵盤のうち、導線がシート間を跨がない鍵盤を1オクターブ、導線がシート間を跨ぐ鍵盤を1オクターブの計2オクターブを使用した。実験参加者にBPM=60 (四分音符毎秒60回), 80, 100, 120の4つのテンポを用いて各鍵盤を5回ずつタッチしてもらった。打鍵には、右手の人差し指を用いた。右手は、ピアノの演奏において一般的にメロディラインを弾く手である。メトロノームを用いてテンポを実験参加者に提示し、メトロノームに合わせてタッチしてもらった。テンポは最初にBPM=60, 次にBPM=80というように徐々に速くした。指の移動による誤打鍵および精度の低下を防ぐため、次の音へ移動するタイミングにてひと呼吸おき、メトロノームに合わせて実験参加者のタイミングにて次の鍵盤をタッチしてもらった。テンポを切り替えるタイミングにて2-3分程度の休憩を挟んだ。システムの使用法と音が鳴ることを実験参加者が確認するため、最初に最大5分の練習時間を設けた。実験中iPadは電源に接続した。

実験参加者がタッチした鍵盤と出力された音を記録し、タッチの誤判定 (判定漏れ, 1回タッチで複数回の判定, 隣接鍵盤と誤判定した場合) の比率および遅延 (指がシートに触れ始めてから音が鳴り始めるまでの時間, 指を押し込んでから音が鳴り始めるまでの時間) を評価した。また、実験参加者の手元をiPhoneのスローモーションカメラ (240fps) にて撮影

し、撮影された動画を、Adobe Premiere Pro 2020 v14.0 を用いて再生し、それぞれの鍵盤をタッチしてから音が再生されるまでのフレーム数から遅延時間を計測した。

## 6.2.2 結果

タッチ判定精度およびタッチ反応速度の2つの評価項目にて分析を行った。なお、4C-4Bは導線がシートを跨いでいない鍵盤、5C-5Bは導線がシートを跨いだ鍵盤である。

### タッチ判定精度

各鍵盤について、音が正しく鳴った回数を図 6.1 および図 6.2 に示す。なお、図 6.1 ではシートを跨いでいない鍵盤の音が鳴った回数、図 6.2 ではシートを跨いだ鍵盤の音が鳴った回数を示す。

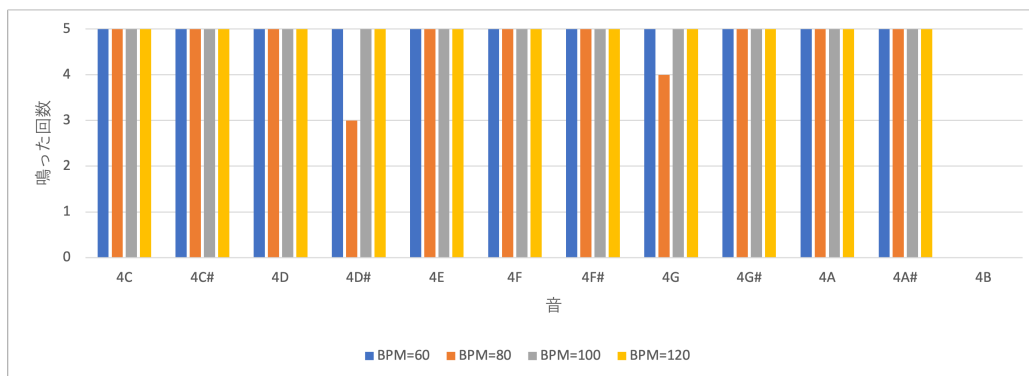


図 6.1: シートを跨いでいない各鍵盤において正しく音が鳴った回数 (4C-4B).

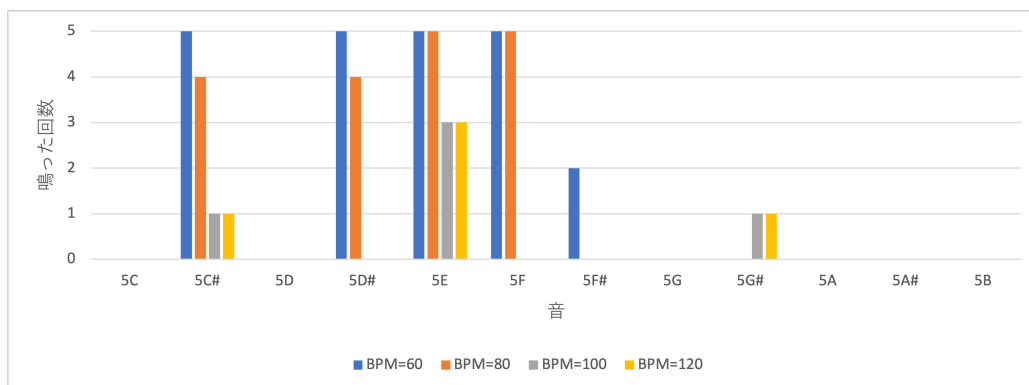


図 6.2: シートを跨いだ各鍵盤において正しく音が鳴った回数 (5C-5B).

導線がシートを跨いでいない鍵盤に関しては、4C-4D, 4E-4F#, および 4G#-4A#ほどのテンポにおいても5回中5回反応した。4D#および4GはBPM=80のテンポでのみ、反応した回数がそれぞれ3回、4回であり、その他のテンポでは5回中5回反応した。また、4Bは、どのテンポでも1度も反応が見られなかった。

導線がシートを跨いだ鍵盤に関しては、反応が見られた鍵盤は全てのテンポを通して5C#, 5D#-5F#, および5G#の6つであり、その中では5F#以外は複数のテンポで反応した。一方、5C, 5D, 5G, 5A-5Bはどのテンポでも反応が1度も見られなかった。また、テンポが速くなるにつれ、全体的に精度が下がった。実験参加者からは、「シートを跨ぐと反応が悪くなるのが気になる」というコメントをもらった。

### タッチ反応速度

人差し指の指先がシートに印刷された鍵盤に触れ始めてから音が鳴り始めるまでの遅延時間を計測した。結果を表6.1および表6.2に示す。

表 6.1: シートを跨いでいない各鍵盤において、人差し指の指先がシートに印刷された鍵盤に触れ始めてから音が鳴り始めるまでの遅延時間 (ms) (4C-4B).

	4C	4C#	4D	4D#	4E	4F
BPM=60平均	95.00	86.67	86.67	101.67	80.83	89.17
BPM=80平均	85.00	93.33	90.83	88.89	107.50	95.00
BPM=100平均	100.00	83.33	84.17	94.17	95.00	102.50
BPM=120平均	105.00	95.83	98.33	95.00	77.50	91.67
全体平均	96.25	89.79	90.00	96.53	90.21	94.58

	4F#	4G	4G#	4A	4A#	4B
BPM=60平均	93.33	93.33	96.67	101.67	94.17	反応なし
BPM=80平均	92.50	102.08	105.83	107.50	102.50	反応なし
BPM=100平均	100.83	98.33	96.67	105.83	105.00	反応なし
BPM=120平均	97.50	109.17	101.67	104.17	94.17	反応なし
全体平均	96.04	100.66	100.21	104.79	98.96	反応なし

表 6.2: シートを跨いだ各鍵盤において、人差し指の指先がシートに印刷された鍵盤に触れ始めてから音が鳴り始めるまでの遅延時間 (ms) (5C–5B).

	5C	5C#	5D	5D#	5E	5F
BPM=60平均	反応なし	134.17	反応なし	106.67	105.83	106.67
BPM=80平均	反応なし	130.21	反応なし	119.79	115.00	185.00
BPM=100平均	反応なし	120.83	反応なし	反応なし	105.56	反応なし
BPM=120平均	反応なし	125.00	反応なし	131.25	反応なし	反応なし
全体平均	反応なし	130.68	反応なし	115.91	109.29	145.83

	5F#	5G	5G#	5A	5A#	5B
BPM=60平均	125.00	反応なし	反応なし	反応なし	反応なし	反応なし
BPM=80平均	反応なし	反応なし	反応なし	反応なし	反応なし	反応なし
BPM=100平均	反応なし	反応なし	83.33	反応なし	反応なし	反応なし
BPM=120平均	127.78	反応なし	反応なし	反応なし	反応なし	反応なし
全体平均	126.67	反応なし	83.33	反応なし	反応なし	反応なし

BPM=60 に関しては、シートを跨いでいない鍵盤は平均 92.65 ms, シートを跨いだ鍵盤は平均 114.39 ms, 全体では平均 98.86 ms の遅延であった。BPM=80 に関しては、シートを跨いでいない鍵盤は平均 97.92 ms, シートを跨いだ鍵盤は平均 138.89 ms, 全体では平均 108.45 ms の遅延であった。BPM=100 に関しては、シートを跨いでいない鍵盤は平均 96.89 ms, シートを跨いだ鍵盤は平均 104.17 ms, 全体では平均 97.50 ms の遅延であった。BPM=120 に関しては、シートを跨いでいない鍵盤は平均 97.27 ms, シートを跨いだ鍵盤は平均 128.47 ms, 全体では平均 100.34 ms の遅延であった。

また、実際の鍵盤は、指が鍵盤に触れてからではなく、鍵盤を押し込んだ時に音が鳴るため、ユーザがバーチャルピアノの遅延として感じるのは指を押し込んでから音が鳴り始めるまでの時間である。そのため、指を押し込んでから音が鳴り始めるまでの遅延時間も計測した。結果を表 6.3 および表 6.4 に示す。

表 6.3: シートを跨いでいない各鍵盤において、人差し指をシートに印刷された鍵盤に対して押し込んでから音が鳴り始めるまでの遅延時間 (ms) (4C-4B).

	4C	4C#	4D	4D#	4E	4F
BPM=60平均	75.00	60.83	70.00	85.00	60.83	62.50
BPM=80平均	42.50	54.17	55.83	59.72	88.33	76.67
BPM=100平均	80.00	66.67	64.17	77.50	78.33	82.50
BPM=120平均	75.00	71.67	75.00	72.50	62.50	64.17
全体平均	68.13	63.33	66.25	76.16	72.50	71.46

	4F#	4G	4G#	4A	4A#	4B
BPM=60平均	66.67	70.83	79.17	71.67	67.50	反応なし
BPM=80平均	74.17	79.17	87.50	86.67	80.83	反応なし
BPM=100平均	84.17	81.67	87.50	99.17	96.67	反応なし
BPM=120平均	73.33	88.33	94.17	92.50	81.67	反応なし
全体平均	74.58	80.04	87.08	87.50	81.67	反応なし

表 6.4: シートを跨いだ各鍵盤において、人差し指をシートに印刷された鍵盤に対して押し込んでから音が鳴り始めるまでの遅延時間 (ms) (5C-5B).

	5C	5C#	5D	5D#	5E	5F
BPM=60平均	反応なし	115.83	反応なし	85.00	81.67	83.33
BPM=80平均	反応なし	112.50	反応なし	100.00	95.00	162.50
BPM=100平均	反応なし	112.50	反応なし	反応なし	88.89	反応なし
BPM=120平均	反応なし	108.33	反応なし	112.50	反応なし	反応なし
全体平均	反応なし	113.64	反応なし	95.45	88.46	122.92

	5F#	5G	5G#	5A	5A#	5B
BPM=60平均	100.00	反応なし	反応なし	反応なし	反応なし	反応なし
BPM=80平均	反応なし	反応なし	反応なし	反応なし	反応なし	反応なし
BPM=100平均	反応なし	反応なし	62.50	反応なし	反応なし	反応なし
BPM=120平均	108.33	反応なし	反応なし	反応なし	反応なし	反応なし
全体平均	105.00	反応なし	62.50	反応なし	反応なし	反応なし

BPM=60 に関しては、シートを跨いでいない鍵盤は平均 70.00 ms、シートを跨いだ鍵盤は

平均 92.23 ms, 全体では平均 76.35 ms の遅延であった。BPM=80 に関しては, シートを跨いでいない鍵盤は平均 72.04 ms, シートを跨いだ鍵盤は平均 118.75 ms, 全体では平均 84.05 ms の遅延であった。BPM=100 に関しては, シートを跨いでいない鍵盤は平均 81.67 ms, シートを跨いだ鍵盤は平均 88.33 ms, 全体では平均 82.22 ms の遅延であった。BPM=120 に関しては, シートを跨いでいない鍵盤は平均 77.35 ms, シートを跨いだ鍵盤は平均 109.72 ms, 全体では平均 80.53 ms の遅延であった。

### 6.2.3 議論

#### タッチ判定精度

4B は, 出力部をディスプレイの縁の近くに配置したために反応が悪かったと考えられる。また, 2つのシートに跨って印刷された導線がテープによって上手く接続できた鍵盤ではほぼ 100% 反応した。一方, 2つのシートに跨って印刷された導線がテープによって上手く接続できなかった鍵盤では全く反応しなかった。したがって, テープの接続方法について検討する必要がある。

#### タッチ反応速度

全体的に, シートを跨いだ鍵盤はシートを跨いでいない鍵盤と比較して遅延が 5–40 ms 大きかった。これは, 入力部から出力部までの距離が遠くなったために, 接続部の長さが長くなったことが原因であると考えられる。

また, ユーザがバーチャルピアノの遅延として認識するのは指を押し込んでから音が鳴り始めるまでの遅延であるが, その遅延は全体で平均 80.63 ms と, 人間の耳で遅延を認識することはできるが, 今回のタスクにおいては影響のない程度の遅延であった。テンポをより速くした際に影響が出てくる可能性はあるが, 少なくとも BPM=120 までのテンポでは特に支障のない遅延であった。

また, 鍵盤により遅延の少ないテンポは様々であり, 一番遅いテンポにおいて遅延が一番少ない鍵盤があった一方, 一番速いテンポにおいて遅延が一番少ない鍵盤も存在した。また, 中間のテンポにて遅延が一番少ない鍵盤も存在した。このことから, テンポが遅延の大きさに与える影響はほとんどないと考えられる。

## 6.3 曲の演奏による評価

本節では, 曲の演奏による評価の設計, 結果および議論について述べる。

### 6.3.1 設計

試作システムの 88 鍵の鍵盤のうち、導線がシート間を跨がない鍵盤を 1 オクターブ使用した。村上ら [村上 17] の評価実験の設計に倣い、1 オクターブの鍵盤を使用し、ピアノ経験がない人でも演奏可能な「きらきら星」の冒頭 14 音を実験参加者に BPM=60, 80, 100, 120 の 4 つのテンポで各々 5 回ずつ演奏してもらった。演奏には、ピアノの演奏において一般的にメロディラインを弾く右手を使用し、運指は 5 本全ての指を使う運指を指定して毎回同じ運指にて演奏してもらった。メトロノームを用いてテンポを実験参加者に提示し、メトロノームに合わせて演奏してもらった。テンポは最初に BPM=60 を 5 回、次に BPM=80 を 5 回というように、5 回ずつ徐々に速くした。テンポを切り替えるタイミングで 2-3 分程度の休憩を挟んだ。運指の確認のため、最初に最大 5 分の練習時間を設けた。実験中 iPad は電源に接続した。

実験参加者がタッチした鍵盤と出力された音を記録し、タッチの誤判定（判定漏れ、1 回タッチで複数回の判定、隣接鍵盤と誤判定した場合）の比率を評価した。

### 6.3.2 結果

全てのテンポ、全ての鍵盤において正しい音出力された。タッチの判定漏れ、1 回タッチで複数回の判定、および隣接鍵盤との誤判定は 1 度も発生しなかった。また、実験参加者から、「どの速さでも遅延は特に気にならなかった」、「実物大の鍵盤で演奏できるため弾きやすかった」というコメントをもらった。

### 6.3.3 議論

シートを跨がない鍵盤においては、反応精度および遅延の 2 つの側面から見て、BPM=120 という速いテンポでも充分曲の演奏が可能であることが分かった。また、実験参加者のコメントから、バーチャルピアノにおいて鍵盤の大きさは重要な要素であると考えられる。



## 第7章 議論および今後の課題

本章では、試作システムに関する議論および今後の課題を述べる。

### 7.1 試作システムの改良

本節では試作システムの改良を述べる。

#### 7.1.1 ボタン配置の修正

本研究にて作製した試作システムでは、iPadのディスプレイ上に、タッチの反応の良い出力部の大きさにて88個のボタンを配置するために、左右1列のボタンをディスプレイの縁の近くに配置した。しかし、システムの評価実験により、この位置のボタンの反応が悪いことが分かった。そこで、今後ボタンを全体的に現在より中央に寄せられるよう配置を修正する。

#### 7.1.2 シートを跨いだ際の反応精度の向上

本研究にて作製した試作システムでは、シートを跨いだ導線を導電性アルミ箔テープを用いて接続している。しかし、同じシートに同じ方法にて印刷した鍵盤間においてタッチ判定精度に差が出ることや、同じ方法にて別のシートに印刷した各鍵盤において、同じ音でもタッチ判定精度に差が出ることがある。これは、シート間の接続を手動にて行っているため、接続が安定しないことが原因であると考えられる。今後、シートを跨いでもタッチ判定精度が低下しないような接続方法やパターンを検討していく。

#### 7.1.3 遅延がより少なくなる条件の調査

今回、予備実験としてタッチの反応が良い条件を調査した。この結果を基にシステムを作製した。しかし、現在のシステムを用いて行った実験では演奏に影響はないが人間が知覚できる程度の遅延があった。今後は、遅延がより少なくなる条件についても調査を行い、その結果を基にシステムを改良していく。

## 7.2 実験の拡張

本節では実験の拡張について述べる.

### 7.2.1 実験参加者の追加

今回, 実験参加者が1名であった. 今後さらに実験参加者を募り, データ数を増やすことによって, 実験の精度を高める.

また今回, 実験参加者がピアノ未経験者のみであったため, 今後は, ピアノ経験者およびピアノ未経験者どちらに対しても実験を行いたい.

### 7.2.2 和音や両手を使用する曲での評価

今回行った実験では単音の打鍵および簡単な曲の演奏を用いて評価を行った. 今後は, 本格的な演奏が行えるかどうかを調べるため, 和音や両手を使用する曲を用いた評価を行う.

## 第8章 おわりに

本論文にて，ユーザが任意の場所において手軽にピアノを演奏するための，持ち運びが容易なバーチャルピアノを実現することを目的とした．そのために，導電性インクを用いてモバイルデバイスのタッチパネルを拡張する手法を提案した．この手法において適したインクのパターンを検討するために予備実験を行った．予備実験の結果を基に3オクターブの鍵盤を作製した．また，このシステムの性能を調査するための実験を行った．その結果，シートを跨がない鍵盤ではBPM=120という速いテンポでもほぼ100%反応した．また，ユーザが鍵盤に対し指を押し込んでから音が鳴り始めるまでの遅延は平均80.63msであり，試作システムは，今回の実験にて行ったタスクにおいては影響のない精度であることが分かった．今後は，システムの改良および実験の拡張を行う予定である．

## 謝辞

本研究を進めるにあたり，志築文太郎先生，高橋伸先生，川口一画先生には多大なご意見とご指導を頂きました。心から感謝いたします。特に，志築文太郎先生には，研究の進め方，論文執筆をはじめとした研究の基礎をご指導いただきました。さらに，研究の相談や研究生生活に関して多くのご助言を頂きました。ここに深く感謝の意を表します。

インタラクティブプログラミング研究室の同輩，先輩方には研究生生活においてお世話になりました。また，WAVEチームの皆様にはチームゼミにおけるご意見や論文の添削といった研究に関する多くの支援だけでなく，研究室においても多くのご助言を頂きました。深く感謝いたします。特に，三縄香織氏には研究方針や論文執筆など研究生生活全般において，また，齋藤圭汰氏および藤田俊氏には導電性インクを用いたタッチパネルの拡張という分野において多くのアドバイスを頂き大変お世話になりました。多大なご協力に心からお礼申し上げます。

最後に，学生生活においてお世話になった皆様，そして，私の学生生活を支えて頂いた家族に深く感謝申し上げます。

## 参考文献

- [CKK<sup>+</sup>19] Zekun Chang, Heeju Kim, Kunihiro Kato, Kazuya Saito, Tung D. Ta, Weiwei Jiang, Koya Narumi, Yoshinobu Miyamoto, and Yoshihiro Kawahara. Kirigami Keyboard: Inkjet Printable Paper Interface with Kirigami Structure Presenting Kinesthetic Feedback. In *Proceedings of Extended Abstracts of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '19, pp. 1–5, New York, NY, USA, 2019. Association for Computing Machinery.
- [CTN<sup>+</sup>20] Zekun Chang, Tung D. Ta, Koya Narumi, Heeju Kim, Fuminori Okuya, Dongchi Li, Kunihiro Kato, Jie Qi, Yoshinobu Miyamoto, Kazuya Saito, and Yoshihiro Kawahara. Kirigami haptic swatches: Design methods for cut-and-fold haptic feedback mechanisms. In *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '20, pp. 1–12, New York, NY, USA, 2020. Association for Computing Machinery.
- [FFMS20] Minto Funakoshi, S. Fujita, Kaori Minawa, and B. Shizuki. Silvercodes: Thin, flexible, and single-line connected identifiers inputted by swiping with a finger. In *HCI*, 2020.
- [HSK17] Inwook Hwang, Hyunki Son, and Jin Ryong Kim. AirPiano: Enhancing Music Playing Experience in Virtual Reality with Mid-Air Haptic Feedback. In *Proceedings of 2017 IEEE World Haptics Conference*, WHC '17, pp. 213–218, 2017.
- [KBL<sup>+</sup>18] Hyosu Kim, Anish Byanjankar, Yunxin Liu, Yuanchao Shu, and Insik Shin. Ubitap: Leveraging acoustic dispersion for ubiquitous touch interface on solid surfaces. In *Proceedings of the 16th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, SenSys '18, p. 211–223, New York, NY, USA, 2018. Association for Computing Machinery.
- [LWS<sup>+</sup>16] Hui Liang, Jin Wang, Qian Sun, Yong-Jin Liu, Junsong Yuan, Jun Luo, and Ying He. Barehanded Music: Real-Time Hand Interaction for Virtual Piano. In *Proceedings of the 20th ACM SIGGRAPH Symposium on Interactive 3D Graphics and Games*, I3D '16, pp. 87–94, New York, NY, USA, 2016. Association for Computing Machinery.

- [MFM17] Chika Matsusue, Kenji Funahashi, and Shinji Mizuno. Touch-typable vr piano that corrects positional deviation of fingering based on music theory. In *ACM SIGGRAPH 2017 Posters*, SIGGRAPH '17, New York, NY, USA, 2017. Association for Computing Machinery.
- [Ser] Serafim. SERAFIM KEYBO: 7ヵ国語+ピアノ鍵盤対応の投影式キーボード. <http://www.serafim-tech.com/ja/jp-product/580-serafim-keybo-world-s-most-advanced-projection-keyboard-ja.html>. 最終参照日：2021年2月19日.
- [SON] SONY. Xperia Touch G1109. <https://www.sonymobile.co.jp/product/smartproducts/g1109/>. 最終参照日：2021年2月19日.
- [TSK<sup>+</sup>18] Enkhtogtokh Togootogtokh, Timothy K. Shih, W. G. Kumara, Shih-Jung Wu, Shih-Wei Sun, and Hon-Hang Chang. 3D Finger Tracking and Recognition Image Processing for Real-Time Music Playing with Depth Sensors. *Multimedia Tools and Applications*, Vol. 77, No. 8, pp. 9233–9248, April 2018.
- [XLM<sup>+</sup>14] Robert Xiao, Greg Lew, James Marsanico, Divya Hariharan, Scott Hudson, and Chris Harrison. Toffee: Enabling ad hoc, around-device interaction with acoustic time-of-arrival correlation. In *Proceedings of the 16th International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices & Services*, Mobile-HCI '14, pp. 67–76, New York, NY, USA, 2014. Association for Computing Machinery.
- [YAM] YAMAHA. よくあるお問い合わせ (Q&A). [https://yamaha.custhelp.com/app/answers/detail/a\\_id/1763](https://yamaha.custhelp.com/app/answers/detail/a_id/1763). 最終参照日：2021年2月19日.
- [加藤 14] 加藤邦拓, 宮下芳明. 導電性インク複合機を用いたマルチタッチパターン生成手法. 情報処理学会研究報告. EC, エンタテインメントコンピューティング, Vol. 2014, No. 29, pp. 1–6, March 2014.
- [加藤 15] 加藤邦拓, 宮下芳明. 紙窓:カード内領域を独立したタッチパネルディスプレイのように扱うインタフェース. ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol. 17, No. 3, pp. 245–254, 2015.
- [加藤 16] 加藤邦拓, 宮下芳明. ExtensionSticker: タッチパネルを拡張するインタフェース. ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol. 18, No. 1, pp. 9–18, 2016.
- [金杉 18] 金杉季実果, 宮下芳明. マルチタッチジェスチャによって変形可能な鍵盤インタフェースの試作. 第26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 (WISS2018) 論文集, September 2018.

- [村上 17] 村上裕美, 中島克人. 深度センサを用いたバーチャル楽器演奏システム. 第 79 回全国大会講演論文集, 第 2017 巻, pp. 983–984. 情報処理学会, March 2017.
- [池松 19] 池松香, 福本雅朗, 椎尾一郎. Ohmic-Sticker: 静電容量方式タッチサーフェスを拡張する Force-to-Motion 方式入力機器. コンピュータ ソフトウェア, Vol. 36, No. 3, pp. 2–19, 2019.
- [竹川 11] 竹川佳成, 寺田努, 塚本昌彦. 運指認識技術を活用したピアノ演奏学習支援システムの構築. 情報処理学会論文誌, Vol. 52, No. 2, pp. 917–927, February 2011.
- [福本 98] 福本雅朗, 外村佳伸. 常装着型インタフェースと wireless fingering. Technical Report 35(1998-HI-078), NTT ヒューマンインタフェース研究所, NTT ヒューマンインタフェース研究所, May 1998.

## 付 録 A 実験に関する各種書類

本付録にて，実験に関する書類として実験同意書，実験手順書，およびアンケートを以下に示す．



## A.1 実験同意書

### 導電性インクを用いたバーチャルピアノの 性能評価実験のお願い

文責：野崎 陽奈子

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、野崎の研究「導電性インクを用いたバーチャルピアノ」の性能を調査することです。
- 実験中に、写真および動画の撮影、音声の録音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、その写真、動画および音声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、協力者の自由意志によるものであり、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。

令和 年 月 日

実験者 所属 \_\_\_\_\_ 署名 \_\_\_\_\_  
説明者 所属 情報学群 情報メディア創成学類 \_\_\_\_\_ 署名 \_\_\_\_\_

■ 研究対象者の必要性、研究への参加におけるリスクと安全性、危険回避の方法について

本実験の参加は任意であり、参加に同意しないことによる影響は一切ありません。また、実験参加者が与えたインフォームド・コンセントについて、いつでも不利益を受けることなく撤回することができます。本実験で用いるデバイスは、実験ごとに取り替えられるものは取り替え、他のものはアルコール除菌シートを用いて拭くことにより消毒し、実験参加者に清潔な状態にて提供します。その他実験に伴う心身上の苦痛及び不快な状態として、長時間の実験による拘束、およびそこから生じる疲労が考えられます。ただし、実験中は十分な休憩時間を設けるように最大限の配慮をいたします。なお、指定された速度で指を動かし続けるタスクを行うため、肉体的・精神的な疲労が予想されます。実験中は各条件の途中であっても、研究対象者の申出により自由に中断・休憩、もしくは参加を中止いただけます。

研究成果公表の際、実験参加者から得られたデータは個人を特定できないように加工して使用いたします。

<新型コロナウイルス感染症への対策>

令和2年5月4日付け新型コロナウイルス感染症対策専門家会議にて示された「新型コロナウイルス感染症対策の状況分析・提言」を参考に、下記の対策を実施します。

- 実験実施者および実験参加者は、実験日前14日間の健康状況観察を行い、発熱、風邪症状（咳・鼻水・のどの痛み・強い倦怠感・息苦しさ等）、ならびに明らかな誘因（舌の火傷・花粉症等）のない味覚・嗅覚障害等が無いことを確認します。
- 実験参加者が入室する前に、実験室への入退室ならびに実験の際に参加者が触れ得る箇所をアルコール等の消毒液にて消毒します。
- 実験中は実験室の換気を常時行います。
- 実験を実施するにあたって、実験実施者および実験参加者のマスクの着用ならびに手指の消毒を徹底します。また、手指の消毒のために、実験室に消毒設備を設置します。
- 実験実施者も実験室に入室し対応を行いますが、その際は手指の消毒やマスクの着用を徹底するとともに、実験参加者とは2m以上の距離を確保します。

## A.2 実験手順書

### 実験に関する説明

- iPad のディスプレイに貼られたシート上に印刷された鍵盤を用いて、指定した音および曲を弾いていただきます。
- まず、演奏方法を説明します。
  - 右手の指定された指を用いて、iPad のディスプレイに貼られたシート上に印刷された鍵盤をタッチします。
  - タッチが認識されると、その鍵盤に対応する音が iPad から出力されません。
  - 印刷されている鍵盤は、4C から 5B までの 2 オクターブです。  
なお、4C とは 88 鍵のピアノにおいて左から 4 番目のド、つまり中央のドのことで、5B はその 1 オクターブ上のシです。
  - 鍵盤の大きさは、実際のピアノの鍵盤の大きさから鍵盤間の隙間の分だけ小さい大きさになっています。

- 以下に実験のタスクを示します。

#### タスク 1

- 右手の人差し指を用いて 2 オクターブ (24 鍵) の鍵盤を、メトロノームに合わせて各鍵盤 5 回ずつ弾いていただきます。これを 1 セッションとします。
- 次の音に移るタイミングでひと呼吸おき、各自のタイミングでメトロノームに合わせて次の音を弾き始めてください。
- テンポを変えて 4 セッション行っていただきます。  
セッションごとに約 3 分間の休憩を取るものとします。
- 最初に約 5 分間の練習時間を設けます。  
練習時間中にメトロノームの音が聞こえるか確認をしてください。

#### タスク 2

- 「きらきら星」の冒頭 14 音を、右手の指定した運指にてメトロノームに合わせて弾いていただきます。
- 1 回弾き終わるごとにひと呼吸おき、各自のタイミングでメトロノーム

- に合わせてまた弾き始めてください。
- 1つのテンポにつき5回弾いていただき、これを1セッションとします。
  - テンポを変えて4セッション行っていただきます。  
セッションごとに約3分間の休憩を取るものとします。
  - 残り3回および1回のタイミングでアナウンスします。
  - 最初に約5分間の練習時間を設けます。  
練習時間中にメトロノームの音が聞こえるか確認をしてください。

#### 実験中の注意

- システムの性能上、タッチしたにもかかわらず音が鳴らないことがありますが、気にせず続けてください。  
音が鳴らなくても指定された回数打鍵を行ったら次の音に移ってください。
- メトロノームからずれた場合も停止および弾き直しはせず続けてください。  
ひと呼吸おいて次に弾き始める時にメトロノームに合うようにしてください。
- タスク2において、運指を間違えた場合も停止および弾き直しはせず続けてください。
- タスク2において、演奏途中で運指が分からなくなった場合は、その回は弾ける指で弾き、ひと呼吸おいているタイミングで確認してください。
- 使用しない指はシートに触れないようにしてください。
- 鍵盤以外の部分には触れないでください。
- メトロノームの音が聞こえない、運指が分からなくなったなど困ったことがあれば、次のひと呼吸おくタイミングで実験者に声をかけてください。
- 演奏中に思ったこと、考えたことは、休憩時間に口に出して言ってください。
- できる限りメトロノームに合わせて正しい運指にて正確に演奏してください。

きらきら星



## A.3 アンケート

2021/2/11 実験に関するアンケート

### 実験に関するアンケート

\*必須

参加者ID \*

回答を入力

年齢 \*

回答を入力

性別 \*

男

女


その他

利き手 \*

右

左

その他

 <https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSdhilOvtm0KhoTnxBDI7or0njQxzAGOhIWYMfbWWXksIOFFFQ/viewform> 1/2

**ピアノ経験はあるか \***

ピアノ教室に通っていたなど、曲の練習・演奏をしていた経験がある場合「ある」と選択してください。  
店や街中に置いてあるピアノに触ったことがある程度の場合は「なし」を選択してください。

ある

ない

次へ

Google フォームでパスワードを送信しないでください。

このフォームは 筑波大学システム情報工学研究科コンピュータサイエンス専攻インタラクティブプログラミング  
研究室 内部で作成されました。 [不正行為の報告](#)

Google フォーム



## 実験に関するアンケート

\*必須

### ピアノ経験に関する質問

経験のあるピアノの種類を全て選択してください \*

- グランドピアノ
- アップライトピアノ
- キーボード
- ピアノアプリ
- バーチャルピアノ

前の質問で経験があると答えたピアノのうち、経験年数が最多のピアノの種類とその経験年数を教えてください \*

例：グランドピアノを5年、アップライトピアノを1年、キーボードを半年、ピアノアプリを3ヶ月など

回答を入力





普段どのくらいの頻度でピアノに触れているか\*

昔は定期的に演奏していたが現在その習慣がない場合は「その他」を選択し、いつ頃までどのくらいの頻度で触れていたか記入してください（例：5年前までほぼ毎日触れていた）。

- ほぼ毎日
- 週3~4回
- 週1~2回
- 月に数回
- 年に数回
- その他:

バーチャルピアノの経験がある場合はどんなバーチャルピアノか\*

ない場合は「なし」と記述してください

回答を入力

戻る

次へ

Google フォームでパスワードを送信しないでください。

このフォームは 筑波大学システム情報工学研究科コンピュータサイエンス専攻インタラクティブプログラミング研究室 内部で作成されました。 [不正行為の報告](#)

Google フォーム



## 実験に関するアンケート

### 提案システムと既存手法の比較

以下、あなたが経験のあるピアノに関してのみ回答してください

#### グランドピアノ、アップライトピアノと比べて演奏しやすいと思ったか

	1	2	3	4	5	
そう思わない	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	そう思う

#### キーボードと比べて演奏しやすいと思ったか

	1	2	3	4	5	
そう思わない	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	そう思う

#### バーチャルピアノと比べて演奏しやすいと思ったか

	1	2	3	4	5	
そう思わない	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	そう思う

[戻る](#)[次へ](#)

Google フォームでパスワードを送信しないでください。

このフォームは 筑波大学システム情報工学研究科コンピュータサイエンス専攻インタラクティブプログラミング研究室 内部で作成されました。 [不正行為の報告](#)

## 実験に関するアンケート

\*必須

### 提案システムに関する質問

弾きやすかったか \*

1 2 3 4 5  
そう思わない       そう思う

ピアノアプリと比べて演奏しやすいと思ったか \*

1 2 3 4 5  
そう思わない       そう思う

音が鳴らないと感じたことはあったか \*

1 2 3 4 5  
感じなかった       感じた

弾いてから音が鳴るまでの遅延を感じたか \*

1 2 3 4 5  
感じなかった       感じた



このシステムを今後も使いたいと思ったか \*

1 2 3 4 5  
そう思わない ○ ○ ○ ○ ○ そう思う

このシステムの良い点を教えてください

回答を入力

このシステムの改善すべき点を教えてください

回答を入力

その他、感想などあれば教えてください

回答を入力

戻る

送信

Google フォームでパスワードを送信しないでください。

このフォームは 筑波大学システム情報工学研究科コンピュータサイエンス専攻インタラクティブプログラミング  
研究室 内部で作成されました。 [不正行為の報告](#)

Google フォーム

