

筑波大学大学院博士課程  
理工情報生命学院  
システム情報工学研究群修士論文

振動および光を提示するグローブ型デバイスを用いたピアノの練習効果の調査

野崎 陽奈子  
修士（工学）  
（情報理工学位プログラム）

指導教員 志築 文太郎

2023年3月

## 概要

ピアノは子どもの習い事として普及しているほか、大人になってから趣味として始める人も多く、余暇にピアノを演奏することは老若男女問わず人気が高い。しかし、ピアノ初心者にとって独学で演奏技術を向上させることは困難であり、習熟効率の低さから練習途中で挫折する人も多い。また、ピアノはその大きさおよび重量から持ち運びおよび設置に労力を必要とするため、練習場所が制限される。本研究では、ピアノ初心者の場所を問わない練習において効果的な練習方法を示すことを目的とした。そのために、場所を問わないピアノの練習に振動および光が与える効果を調査した。また、調査のために、場所を問わず振動および光を提示できるグローブ型デバイスを作製した。さらに、練習用アプリケーション、グローブ型デバイス、および紙媒体により構成される練習システムを開発した。開発した練習システムを用いて、ピアノがない環境においてピアノ初心者が片手のみを用いて演奏可能な短いフレーズの練習を行う際に振動および光が与える効果を調査するための実験を行った。実験の結果、振動および光両方の提示により多くの人に対して運指およびリズムの習得を早める効果があること、ならびに振動および光両方の提示は練習者に比較的好まれる練習方法であることが示された。

# 目次

<b>第1章</b>	<b>はじめに</b>	<b>1</b>
1.1	ピアノの種類	1
1.2	光または映像を用いてピアノ初心者の練習を支援する方法およびピアノを用いる練習の課題	2
1.3	ピアノを模したデバイス	3
1.4	触覚刺激を用いたピアノの受動的練習	3
1.5	目的とアプローチ	3
1.6	貢献	4
1.7	本論文の構成	4
<b>第2章</b>	<b>関連研究</b>	<b>5</b>
2.1	ピアノの練習支援を行う方法	5
2.1.1	光または映像を用いて曲の情報を提示する方法	5
2.1.2	練習者のレベルまたは興味に合わせた練習曲を提示する方法	6
2.1.3	コンピュータを用いてピアノ練習の指導を行う方法	6
2.1.4	振動を用いたピアノの受動的練習	7
2.2	振動を用いてピアノ以外の楽器の練習支援を行う方法	7
<b>第3章</b>	<b>試作システム</b>	<b>9</b>
3.1	試作システムの概要	9
3.2	デモ発表において得られた課題点	11
3.3	デバイスの改善案	11
<b>第4章</b>	<b>鍵盤楽器を用いないピアノ練習システム</b>	<b>12</b>
4.1	練習システムの概要	12
4.2	練習システムにより提示される情報	12
4.2.1	ピアノ音	12
4.2.2	振動	14
4.2.3	光	14
4.2.4	楽譜	14
4.3	練習用アプリケーション	14
4.4	グローブ型デバイス	15

<b>第5章 実験1</b>	<b>18</b>
5.1 参加者	18
5.2 実験条件および実験環境	18
5.3 手順	20
5.4 結果	22
5.4.1 音のミス数	22
5.4.2 リズムのミス数	23
5.4.3 SUS	23
5.4.4 NASA-TLX	23
5.4.5 その他のアンケート	25
練習しやすかった条件	25
今後練習に用いたい条件	25
5.5 考察	25
5.5.1 成績	26
楽譜の有無	26
運指の記載	26
練習回数	26
テストでの演奏回数	27
練習からテストまでのイメージトレーニング	27
フレーズの難易度	27
5.5.2 主観評価	28
<b>第6章 実験2</b>	<b>29</b>
6.1 参加者	29
6.2 実験条件および実験環境	29
6.3 手順	31
6.4 結果	34
6.4.1 音の正解数	34
6.4.2 リズムの正解数	34
6.4.3 SUS	38
6.4.4 NASA-TLX	40
6.4.5 その他のアンケート	40
練習しやすかった条件	40
今後練習に用いたい条件	42
6.5 考察	42
6.5.1 成績	42
6.5.2 主観評価	43
<b>第7章 議論および今後の課題</b>	<b>44</b>

7.1	追加で実施すべき調査	44
7.1.1	複雑な曲の練習における効果の調査	44
7.1.2	場所を問わない練習における効果の調査	44
7.1.3	練習者の習熟度による効果の違いの調査	44
7.2	練習システムの改良	45
7.2.1	振動を提示する強度および場所の検討	45
7.2.2	振動および光を提示するタイミングの検討	45
7.2.3	グローブ型デバイスへの機能の追加	45
7.2.4	練習システムの小型化	46
<b>第8章</b>	<b>おわりに</b>	<b>48</b>
	謝辞	49
	参考文献	50
<b>付録A</b>	<b>実験の際に用いた各種書類</b>	<b>57</b>
A.1	実験1の手順書	58
A.2	実験2の手順書	60
A.3	実験2における譜読みの説明書	62
A.4	SUSおよび自由記述から成るアンケート	63
A.5	参加者および実験全体に関するアンケート	68

# 目次

3.1	鍵盤型デバイスを用いた練習方法の手順. 練習者が振動を感じた鍵の指を用いて打鍵すると, 対応する音が出力される. . . . .	10
3.2	振動の提示および打鍵を認識するための鍵盤型デバイス. . . . .	10
4.1	練習システムを用いて練習する様子. . . . .	13
4.2	練習システムの構成要素, 提示方法, 提示情報およびそれに対する初心者の理解のしやすさ, ならびに刺激感覚. ◎, ○および△は, 各提示情報における初心者に対する音, リズム, および運指の理解のしやすさを表す. . . . .	13
4.3	練習用アプリケーションの画面. . . . .	15
4.4	提示される情報を選択する様子. . . . .	16
4.5	振動および光を提示するためのグローブ型デバイス. . . . .	16
4.6	作製したグローブ型デバイスの回路図. . . . .	17
5.1	実験1において練習するフレーズ. 楽譜における1-5はそれぞれ図5.2におけるC-Gに対応する. . . . .	19
5.2	指および音の対応. . . . .	19
5.3	実験1の流れ. . . . .	21
5.4	実験1における条件ごとの音のミスの平均回数. a) テスト1の成績. b) テスト2の成績. . . . .	22
5.5	実験1における条件ごとのリズムのミスの平均回数. a) テスト1の成績. b) テスト2の成績. . . . .	23
5.6	実験1における条件ごとのSUSスコアの平均. . . . .	24
5.7	実験1における条件ごとのNASA-TLXのスコアの平均. . . . .	24
6.1	実験2において練習するフレーズ. . . . .	30
6.2	実験2の流れ. . . . .	32
6.3	実験2における条件ごとの音の正解数の推移. . . . .	35
6.4	実験2における条件ごとの各参加者の音の正解数の推移に対し求めた近似直線. グラフ中の式は, 平均の近似直線の式を表す. . . . .	36
6.5	実験2における条件ごとのリズムの正解数の推移. . . . .	37
6.6	実験2における条件ごとの各参加者のリズムの正解数の推移に対し求めた近似直線. グラフ中の式は, 平均の近似直線の式を表す. . . . .	39

6.7	実験2における条件ごとの SUS スコアの平均. . . . .	41
6.8	実験2における条件ごとの NASA-TLX のスコアの平均. . . . .	41
7.1	グローブ型デバイスの改良案. a) 別の色の LED を追加した様子. b) 別の場所へ振動アクチュエータを追加した様子. c) 手のひら側にローラを追加した様子. . . . .	46
7.2	楽譜を紙ではなくスマートフォンにより提示すること, グローブおよび PC 間の有線による USB 接続をグローブおよびスマートフォン間の Bluetooth による無線接続に変更すること, ならびにピアノ音, 振動, および光の制御を PC ではなくスマートフォンにより行うことにより小型化されたシステムを用いて練習する様子. . . . .	47

# 表目次

5.1	実験1の各条件において提示する情報. . . . .	20
5.2	実験1において各条件を練習しやすかった順に回答してもらった際の順位および人数. . . . .	25
5.3	実験1において各条件を今後ピアノの練習を行う際に用いたい順に回答してもらった際の順位および人数. . . . .	25
6.1	実験2の各条件において提示する情報. . . . .	29
6.2	練習およびテストの間に行ってもらうしりどりのテーマ. . . . .	33
6.3	実験2の各テストにおける条件ごとの音の正解数の平均. . . . .	38
6.4	実験2における条件ごとの音の正解数の平均の変化量. . . . .	38
6.5	実験2の各テストにおける条件ごとのリズムの正解数の平均. . . . .	40
6.6	実験2における条件ごとのリズムの正解数の平均の変化量. . . . .	40
6.7	実験2において各条件を練習しやすかった順に回答してもらった際の順位および人数. . . . .	41
6.8	実験2において各条件を今後練習に用いたい順に回答してもらった際の順位および人数. . . . .	42



# 第1章 はじめに

ピアノは、88 鍵（7 オクターブ以上）と広い音域を持つ、打鍵の強弱およびペダルとの組み合わせにより多様な音色を出すことができる、ならびに同時に複数の音を鳴らすことができるという特徴を持つため、1 人で幅広い演奏表現が可能である。さらに、弦を押さえる場所または弦の押さえ方が少しでも異なると、想定と異なる音が鳴ってしまうことのある弦楽器、および音を鳴らすことさえ難しい管楽器とは異なり、ピアノは正しい位置の鍵盤を押すだけによって誰でも同じ音を鳴らすことができる。このような理由から、ピアノは子どもの習い事として普及している [文部] ほか、大人になってから趣味として始める人も多く、余暇にピアノを演奏することは老若男女問わず人気が高い [大和 03]。しかし、ピアノの演奏には譜読み、指示された鍵への正確な打鍵、適切な運指（指の運び方、つまり、その音をどの指を用いて弾くべきか）、打鍵の強弱、およびテンポのコントロールなど様々な技術が要求され、これらの技術の習得には長期間の基礎的な練習が必要である。このため、ピアノ演奏には多大な時間および労力を必要とする [福家 15, 竹川 16]。大人になってから趣味としてピアノを始めた人の中には、仕事が忙しく定期的に時間を取ることができない、またはできるだけお金をかけたくないなどの理由から、習い事ではなく独学で取り組む人も多い。また、習い事として始めた人でも、レッスンの時間は限られており、それ以外の時間は独学で練習をする必要がある。しかし、ピアノ初心者にとって独学で演奏技術を向上させることは困難であり、モチベーションを持ってピアノを始めた初心者の中には、なかなか曲が弾けるようにならず、その習熟効率の低さから練習途中で挫折する人も多い [松原 06]。そこで、ピアノ初心者の練習を支援する方法が求められている。

本章ではまず、ピアノを用いて初心者の練習を支援する方法、およびピアノを用いた練習の課題を述べる。次に、ピアノを用いずに演奏可能なピアノを模したデバイス、および触覚刺激を用いたピアノの受動的練習を述べる。その後、本研究の目的とアプローチ、および貢献を述べ、最後に、本論文の構成を述べる。

## 1.1 ピアノの種類

ピアノは、音の出し方から大きく2種類に分類される。1つは、指先で鍵盤を押し、その力でハンマーを動かし弦を叩いて音を出す「アコースティックピアノ」、つまり従来のピアノである。もう1つは、アコースティックピアノをデジタル化したものであり、スピーカから、録音されたアコースティックピアノの音を出す「電子ピアノ」である。

アコースティックピアノは、弦を張る方向によってさらに2種類に分類される。1つは、弦

を地面に対し水平に張った「グランドピアノ」であり、これがピアノ本来の形である。グランドピアノは、大きさが間口（横幅）146–155 cm×奥行き 149–227 cm×高さ 99–102 cm、重量が 255–410 kg となっている [YAMa]。もう 1 つは、弦を地面に対し垂直に張った縦型の「アップライトピアノ」である。アップライトピアノは、グランドピアノと比較するとコンパクトであり、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 [YAMa]。

また、電子ピアノは、スピーカから音を鳴らしており、弦が不要であるため、アップライトピアノと比較し、よりコンパクトさを実現している。アップライトピアノと形状が似ている据え置き型の電子ピアノは、大きさが間口 135–147 cm×奥行き 31–61 cm×高さ 79–104 cm、重量が 37–87 kg となっている [YAMb]。電子ピアノの中には、脚を取り除くことにより持ち運びを可能とした「電子キーボード」がある。電子キーボードは、大きさが間口 111–134 cm×奥行き 29–38 cm×高さ 14–17 cm、重量が 37–87 kg となっている [YAMb]。

## 1.2 光または映像を用いてピアノ初心者の練習を支援する方法およびピアノを用いる練習の課題

ピアノ初心者の練習支援を行う既存のデバイスとして、CASIO および YAMAHA などの楽器メーカーから、次に弾くべき鍵を光によって指示する電子キーボード [CAS, YAMc] が販売されている。また、プロジェクタまたはカメラなどの外部機器を用いてピアノの鍵盤上またはその周辺に次に弾くべき鍵の輪郭、運指、または手本映像を投影することにより練習支援を行った研究がある [樋川 06, 竹川 11, RRW<sup>+</sup>14, 山田 15]。このように光または映像を用いて鍵盤上に曲の情報（主に次に弾くべき鍵の位置、以降、鍵盤位置）を提示する方法は、ピアノ初心者の練習に役立つことが示されている。これらの方法を用いた練習にはピアノが必要不可欠である。しかし、グランドピアノ、アップライトピアノ、および据え置き型の電子ピアノは、1.1 節において述べたように大きく重たいため、持ち運びおよび設置が困難である。電子キーボードは、これらの楽器と比較してコンパクトであり持ち運びは可能であるが、小さく収納することができない、および 1.1 節において述べた楽器の大きさより大きな平面がないと使用できないという課題がある。さらに、プロジェクタまたはカメラなど大掛かりな装置が必要な場合は、持ち運びおよび設置はより困難となる。このため、光または映像を用いて鍵盤上またはその周辺に鍵盤位置を提示する方法 [CAS, YAMc, 樋川 06, 竹川 11, RRW<sup>+</sup>14, 山田 15] は、人々が練習を行える場所が制限される。そこで、場所を問わずピアノの練習を行えるようにするためには、ピアノを使わず練習を行える方法が必要となる [MFM17, 金杉 18, NMTS21]。本研究では、主な提示情報を鍵盤位置ではなく運指とし、鍵盤上またはその周辺ではなく指先を光らせて情報を提示することにより、場所を問わず光を用いた支援が可能となると考えた。

### 1.3 ピアノを模したデバイス

場所を問わずピアノを演奏するために、バーチャルピアノが開発されてきた。バーチャルピアノとは、ピアノを用いずに演奏可能な、ピアノを模したデバイスである。バーチャルピアノには、投影型の装置 [SON], カメラを用いた手法 [村上 17, 竹川 11, LWS<sup>+</sup>16, TSK<sup>+</sup>18, HSK17, 丁慶 11, 田中], およびタッチパネルを用いた手法 [金杉 18, NMITS21] などがある。しかし、投影型の装置、およびカメラを用いた手法は検出精度が低い、ならびにタッチパネルを用いた手法は表示する鍵盤の領域を切り替えるために演奏時にない動作を行う必要がある。このため、バーチャルピアノは本格的な演奏および練習支援には向かず、演奏を楽しむためのデバイスとしての特色が強い。本研究では、ピアノを模したデバイスではなく、練習支援のためのデバイスを用いる。

### 1.4 触覚刺激を用いたピアノの受動的練習

ピアノを使わないピアノの練習方法として、触覚刺激を用いた受動的練習に着目した研究が行われてきた [HDS08, HSD<sup>+</sup>10, KS10, SES15, PT19, DPB21, GTD<sup>+</sup>22]。受動的練習とは、練習者が練習にはほとんど注意を払わないにもかかわらず、身体に繰り返し触覚刺激または聴覚刺激のような情報が与えられることにより自然と行われる受け身な練習である。この方法を用いることにより、人々は読書、ゲーム、および勉強など他の作業を行いながら運動技能を習得できる。触覚刺激を用いたピアノの受動的練習 [HDS08, HSD<sup>+</sup>10, KS10, SES15, PT19, DPB21, GTD<sup>+</sup>22] では、手に装着したグローブから振動を提示されることにより練習できるため、場所を問わず練習が可能である。これまでの研究では、ピアノの受動的練習に触覚刺激を用いた際の練習効果が調査されており、振動を用いた受動的練習はピアノのフレーズの練習に役立つことが示されている [HDS08, HSD<sup>+</sup>10, KS10]。本研究では、受動的練習と異なり、自ら考え習得のために積極的に働きかける能動的練習に対して振動を用いた際の練習効果を調査する。

### 1.5 目的とアプローチ

本研究の目的は、ピアノ初心者の場所を問わない練習において効果的な練習方法を示すことである。本研究では、ピアノ演奏において求められる技術 [竹川 11, 竹川 16] のうち、曲を弾くために初心者が初期段階で身につけるべき技術として譜読み（特に音およびリズム）、指示された鍵への正確な打鍵、適切な運指、およびテンポのコントロールを挙げる。その中でもピアノを使わずに練習が可能と考えられる、譜読み（特に音およびリズム）、適切な運指、およびテンポのコントロールの3つの技術、つまり、音、リズム、および運指に着目し、これらの習得のために効果的な練習方法を示すことを目的とする。そのためのアプローチとして、場所を問わないピアノの練習に振動および光を与える効果を調査する。また、調査のために、場所を問わず振動および光を提示できるグローブ型デバイスを作製した。さらに、練習用アプリケーション、グローブ型デバイス、および紙媒体を用いて、練習する曲の音、リ

リズム，および運指の3つの情報を提示する練習方法および練習システムを開発した．このシステムを用いて曲を練習してもらい，その上達度を計測することにより，振動および光がピアノの練習に与える効果を調査した．

この調査により，場所を問わず曲の情報を提示できる振動および光がピアノの練習に効果的であることが分かれば，場所を問わずピアノの練習を支援できるようになると考える．

## 1.6 貢献

本研究の貢献は以下の通りである．

- 場所を問わず振動および光を提示できるグローブ型デバイスを作製した．
- 練習用アプリケーション，グローブ型デバイス，および紙媒体を用いて，練習する曲の音，リズム，および運指の3つの情報を提示する練習システムを開発した．
- 場所を問わないピアノの練習に振動および光が与える効果を調査した．
- 実験の結果，振動および光両方の提示により多くの人に対して音およびリズムの習得を早める効果があること，ならびに振動および光両方の提示は練習者に比較的好まれる練習方法であることを示した．

## 1.7 本論文の構成

本論文の構成は以下の通りである．第1章においては，本研究の背景，目的とアプローチ，および貢献を示す．第2章においては，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章においては，振動を提示するために試作したシステムを述べる．第4章においては，本研究のアプローチである，振動および光が場所を問わないピアノの練習に与える効果の調査を行うために開発した練習システムを述べる．第5章においては，振動および光が場所を問わないピアノの練習に与える効果について調査した1度目の実験を述べる．第6章においては，第4章の実験において得られた課題を修正し再度行った，振動および光が場所を問わないピアノの練習に与える効果について調査した2度目の実験を述べる．第7章においては，実験および練習システムの改善点について議論し，今後の展望を述べる．第8章においては，本研究の結論を述べる．

## 第2章 関連研究

本研究では、ピアノ初心者の場所を問わないピアノの練習に振動および光が与える効果を調査する。そこで本章では、ピアノの練習支援を行う方法および振動を用いてピアノ以外の楽器の練習支援を行う方法を示し、本研究を位置付ける。

### 2.1 ピアノの練習支援を行う方法

本節では、ピアノの練習支援を行う方法として、光または映像を用いて曲の情報を提示する方法、練習者のレベルまたは興味に合わせた練習曲を提示する方法、コンピュータを用いてピアノ練習の指導を行う方法、および振動を用いたピアノの受動的練習を述べる。

#### 2.1.1 光または映像を用いて曲の情報を提示する方法

楽器メーカーから、光または映像を用いて曲の情報を鍵盤上またはその周辺に提示することにより、ピアノ初心者の練習支援を行う製品が販売されている。CASIO および YAMAHA などの楽器メーカーから販売されている電子キーボード [CAS, YAMc] には鍵盤が光るモードがあり、電子キーボードに内蔵されている曲の中から練習者が曲を選択すると、鍵盤が赤く光り、鍵盤位置およびリズムが提示される。また、河合楽器製作所から、ピアノ独習ソフトウェア [河合] が発売されている。これは、ディスプレイの画面上部から、画面下部に表示された鍵盤および手に向かって音符に見立てた帯およびその中に表示された運指番号が流れてくることにより、練習者に鍵盤位置および運指を提示する。これら電子キーボードおよびソフトウェアには J-POP のヒット曲、アニメ、およびクラシックなど多数の曲が内蔵されており、楽譜が読めない、または鍵盤位置が分からない場合でも、幅広い曲が演奏可能である。

また、プロジェクタまたはカメラなどの外部機器を用いて鍵盤上またはその周辺に曲の情報を投影することにより、ピアノ初心者の練習支援を行った研究がある。竹川ら [竹川 11, 竹川 12] および Rogers ら [RRW+14] は、ピアノ上部にプロジェクタを設置し、次に弾く鍵の輪郭、運指、および楽譜などを鍵盤およびその周辺に投影するシステムを構築した。樋川ら [樋川 06] は、ピアノ上部にプロジェクタおよびカメラを設置し、練習者が途中で演奏を停止した際にディスプレイまたは鍵盤上に手本映像を提示するシステムを構築した。山田ら [山田 15] は、ディスプレイの画面右側から、画面左側に表示された鍵盤および手に向かって音符に見立てた帯およびその中に表示された運指番号が流れてくることにより、練習者に鍵盤位置および運指を提示する練習システムを開発した。このシステムでは、電子キーボードの前にディ

スプレイを設置し、ディスプレイ上部に設置した Web カメラを用いて鍵盤および練習者の手の映像を取得し、ディスプレイに表示する。

これらの方法は、共通して、主に鍵盤位置を光または映像を用いて提示する。このように光または映像を用いて鍵盤位置を提示する方法は、ピアノ初心者の練習に役立つことが示されている。これらの方法では、ピアノまたはそれに加えプロジェクタまたはカメラなどの外部機器が必要である。しかし、1.1 節において述べたように、ピアノは大きく重たいため、持ち運びおよび設置が困難である。さらに、プロジェクタまたはカメラなど大掛かりな装置が必要な場合は、持ち運びおよび設置はより困難となる。このため、これらの方法は、人々が練習を行える場所が制限される。本研究では、主な提示情報を鍵盤位置ではなく運指とし、鍵盤上またはその周辺ではなく指先を光らせて情報を提示することにより、場所を問わず光を用いた支援が可能となると考えた。しかし、これまで、光を用いて指先へ運指を提示した際の練習効果は調査されてない。そこで本研究では、指先に設置した光が練習に与える効果を調査する。

### 2.1.2 練習者のレベルまたは興味に合わせた練習曲を提示する方法

練習者のレベルまたは興味に合わせた練習曲を生成し、集中的にトレーニングする方法がある。松原ら [松原 06] は、練習者の演奏データをもとに、練習者が弾きたい曲を弾けるようになるために必要と考えられる練習曲を、既存の楽曲から提示するシステムを開発した。Kitamura ら [KM06] は、ピアノ初心者の演奏データをもとに、練習者の苦手な要素を克服する練習曲を自動的に生成するシステムを開発した。大島ら [大島 07] は、蓄積した練習者の演奏データをもとに、練習者の苦手な要素を克服する練習曲を練習者の弾きたい曲から生成するシステムを提案した。藤田ら [藤田 08] は、オーケストラのような複数のパートにより構成される楽譜に対して自動予約を行い、練習者の習熟度を考慮したピアノの練習曲を生成するシステムを開発した。福田ら [福田 17] は、練習者の演奏データをもとに、練習者の弾きたい曲の中から練習者が苦手だと思われる箇所を判断し簡略化することにより、練習者のレベルに合った曲を提示するシステムを開発した。

しかし、これらのシステムを使った練習にはピアノが必要であり、ピアノを使った練習を行える場所が制限されるという課題の解決には至っていない。本研究では、持ち運びが容易なデバイスおよび練習システムを用いることにより、振動および光が練習に与える効果を調査する。

### 2.1.3 コンピュータを用いてピアノ練習の指導を行う方法

近年、ICT (Information and Communication Technology) 技術の発展およびコロナ禍の影響により、遠隔コミュニケーションシステムが普及している。ピアノレッスンに関しても、Skype を利用した遠隔ピアノレッスンである Cafetalk [株式会社 b] および Zoom を利用した遠隔ピアノレッスンであるエルバ [株式会社 a] など、オンラインで受講できるサービスがある。

また、指導者の代わりにコンピュータを用いてピアノ練習の指導を行う研究がある。Dannenbergら [DSJ+90] は、ピアノ初心者の演奏データを解析し、リズムおよび音のミスなどの改善点を音声および楽譜への描画により指示するシステムを開発した。山田ら [山田 11] は、練習者の提出したピアノ演奏動画およびその音声を自動的にチェックし、間違いと思われる箇所について楽譜を通して練習者にアドバイスをを行い、さらに間違えている部分のみを抽出して練習者の演奏および模範演奏を聞き比べられるシステムを提案した。

しかし、これらのサービスおよびシステムを使った練習にはピアノが必要であり、ピアノを使った練習を行える場所が制限されるという課題の解決には至っていない。本研究では、持ち運びが容易なデバイスおよび練習システムを用いることにより、振動および光が練習に与える効果を調査する。

#### 2.1.4 振動を用いたピアノの受動的練習

ピアノを用いずにピアノの練習支援を行う方法として、振動を用いた受動的練習に着目した研究が行われてきた。振動を用いたピアノの受動的練習では、練習者が小型振動モータを取り付けたグローブを装着し、ゲームまたは読書など他の作業を行いながら新しい曲を練習する [HDS08, HSD+10, KS10, SES15, PT19, DPB21, GTD+22]。練習者には、PCから流れる曲に合わせて、振動を用いて運指およびリズムが提示される。この手法は、手に装着したグローブから振動を提示されることにより練習できるため、場所を問わず練習が可能である。これまでの振動を用いたピアノの受動的練習における研究では、振動を用いたピアノの練習における片手の短いフレーズの練習効果 [HDS08, HSD+10, KS10]、両手および和音のメロディの練習効果 [SES15]、ピアノ音の有無による練習効果の違い [SES15]、および片手の短いフレーズの記憶性（一度習得したものをどれだけ覚えているか） [DPB21] などが調査されてきた。しかし、これまでは、ピアノを使わない練習において振動を用いた能動的練習の練習効果の調査は行われてこなかった。

本研究では、ピアノを使わないピアノ練習における効果的な練習方法を示す。そのために、振動を用いたピアノの能動的練習における練習効果を調査した。

## 2.2 振動を用いてピアノ以外の楽器の練習支援を行う方法

振動を用いてピアノ以外の楽器の練習支援を行う方法がある。Hollandら [HBDH10] は、ドラム初心者の両手首および両足首に振動モータを内蔵したバンドを装着し、課題フレーズに同期して振動モータを動作させることによりリズムを練習するシステムを構築した。また、実験により、振動により、楽器音の有無に関わらず複雑なリズムパターンを習得できることを示した。菅家ら [菅家 16] は、打楽器の練習においてフレーズを正しく演奏する感覚を身体に内在化させるために、楽譜、楽器音、および指先に提示される振動により練習者に曲の情報を提示するシステムを構築した。また、実験により、提案システムを用いた際に課題フレーズの習得にかかる時間を短縮できる傾向があることを示した。Grindlay [Gri08] は、振動がド

ラムのリズムの練習に与える効果を調査した。その結果、振動は音のタイミングおよび速度の両方を思い出すのに大きく役立つことを示した。

これらの研究により、振動は打楽器のリズムの練習に役立つことが示されている。本研究では、ピアノのリズムおよび運指の練習のために振動を用い、その効果を調査する。



## 第3章 試作システム

本研究では、場所を問わないピアノの練習に振動および光を与える効果を調査する。そのために、まず、振動を提示する鍵盤型デバイスを用いたシステムを試作した。また、試作したシステムを用いて、第29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（WISS2021）においてデモ発表を行った。本章では、試作システムの概要、デモ発表において得られた課題点、およびデバイスの改善案を述べる。

### 3.1 試作システムの概要

鍵盤型デバイスを用いた練習方法の手順を図3.1に示す。デバイスは、5つの鍵から成る鍵盤である（図3.2）。練習者は、練習を行いたい方の手の各指を各鍵の上に置く。練習したい曲のリズムに合わせて、その音を弾くべき指が置かれている鍵の内部に配置された振動アクチュエータが順に短く振動する。これにより、練習する曲のリズムおよび運指を触覚を通して提示できる。振動を感じた練習者は、振動が提示された鍵上にある指を用いて打鍵する。練習者は振動が提示された鍵と同じ鍵に対して打鍵する。また、練習者が正しく指を動かしているかを検知するために圧力センサを用いた。ピアノ演奏における打鍵では、指を下ろす前に上げる動作を伴う。そのため、鍵盤上部の指を置く箇所に圧力センサを設置した。圧力センサが打鍵を感知すると、PCはその指に対応するピアノ音を出力する。これにより、練習者が正しく指を動かしているかをフィードバックする。

振動アクチュエータには、偏心モータであるLBV10B-009（日本電産コパル電子株式会社）を用いた。振動提示時には、振動アクチュエータに5Vを印加し、提示時間を250msとした。また鍵盤を3Dプリンタ（Ultimaker3 Extended）にてPLAフィラメントを用いて作製した。各鍵の大きさは、ピアノの白鍵と同じ大きさ（23mm×150mm×25mm）とした。各鍵の位置は調整できるが、使用時にはピアノと同様に各鍵の隙間がほとんどないように配置した。振動アクチュエータを配置するために、中を縁3mmの空洞にした。圧力センサにはMF01A-N-221-A11（TAIWAN ALPHA ELECTRONIC CO., LTD.）を用いた。振動アクチュエータおよび圧力センサは、PCとUSB接続されたマイクロコントローラ（Arduino Uno）により制御される。

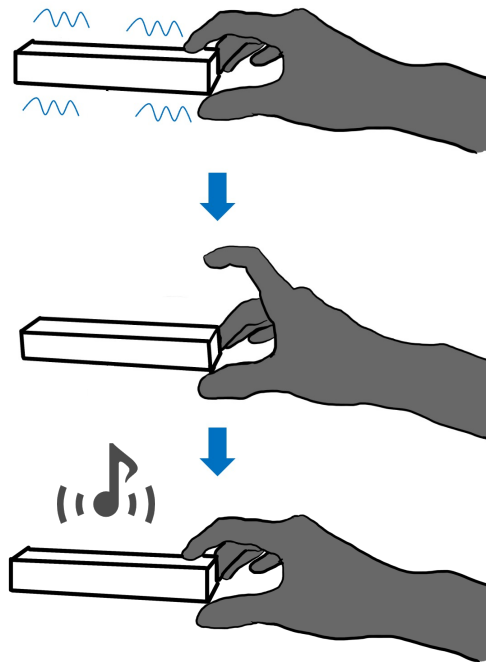


図 3.1: 鍵盤型デバイスを用いた練習方法の手順。練習者が振動を感じた鍵の指を用いて打鍵すると、対応する音が入力される。

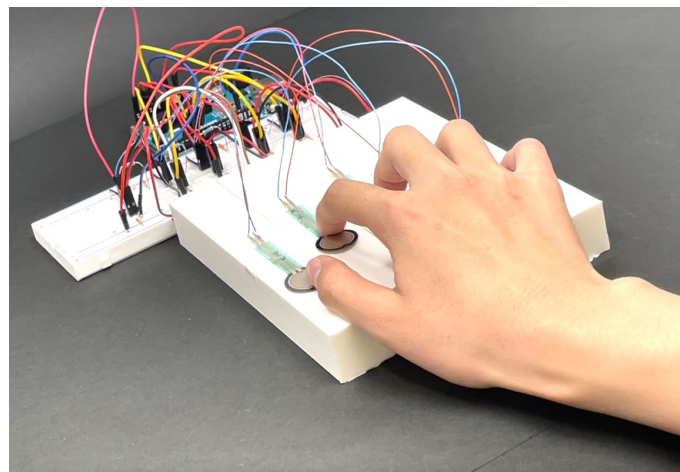


図 3.2: 振動の提示および打鍵を認識するための鍵盤型デバイス。

## 3.2 デモ発表において得られた課題点

デモ発表において、参加者に試作システムを用いて「きらきら星」の冒頭 14 音を練習してもらった。その際に多く得られた課題点を以下に示す。

課題 1 どの指に振動が与えられているのか分からない時がある。

課題 2 薬指および小指など力が弱い指で圧力センサを反応させるのが難しい。

課題 3 圧力センサの反応に苦戦している間に振動に置いていかれてしまう。

課題 4 打鍵時に圧力センサの真上に指を下ろすのが難しい。

課題 5 手の位置および形が固定されるため不自由である。

## 3.3 デバイスの改善案

3.2 節において述べた課題を解決するため、デバイスを鍵盤型からグローブ型に改良することを考えた。3.2 節の課題 1 は、各鍵の距離が近く、振動が隣の鍵に伝わっていたことが原因であると考えられる。デバイスをグローブ型にした場合、各指の間には隙間が設けられる。このため、振動アクチュエータをグローブに取り付けることにより、他の指に振動が伝わりにくくなり、振動が提示された指を識別しやすくなると考えた。

また、課題 2 および 3 を解決するため、圧力センサをなくし、ピアノ音を振動と同じタイミングにて出力することを考えた。試作システムでは運指が正しいか識別するために圧力センサを用いている。しかし、課題 2 および 3 は圧力センサの打鍵の認識精度により生じる課題である。打鍵の認識精度が低いことにより、曲に集中できず、逆に練習の妨げになってしまっている。そこで本研究では、振動を用いたピアノの受動的練習 [HDS08, HSD<sup>+</sup>10, KS10, SES15, PT19, DPB21, GTD<sup>+</sup>22] を参考にした。振動を用いたピアノの受動的練習では、ピアノ音および振動を同時に提示しており、この方法で練習効果があることが示されている。このため、本研究においても圧力センサをなくし、ピアノ音を振動と同じタイミングにて出力するのが良いと考えた。

さらに、デバイスをグローブ型にし、圧力センサをなくすことによって、課題 4 および 5 も解決できると考えた。課題 4 および 5 は、鍵盤および圧力センサの位置が固定されており、その上に指を置く必要があることが原因である。デバイスを鍵盤型からグローブ型にし、圧力センサをなくすことにより、手指が自由に動かせるようになるため、これらの課題も解決される。

## 第4章 鍵盤楽器を用いないピアノ練習システム

第3章において検討した改善案を反映し、場所を問わず振動および光を提示できるグローブ型デバイスを作製した。また、練習用アプリケーション、グローブ型デバイス、および紙媒体を用いて、練習する曲の音、リズム、および運指の3つの情報を提示する練習システムを開発した。

本章では、練習システムの概要、練習システムにより提示される情報、練習用アプリケーション、およびグローブ型デバイスを述べる。

### 4.1 練習システムの概要

前準備として、練習者は、グローブ型デバイスの装着、音声を再生可能な機器の準備、および楽譜の準備を行う。練習者は、練習用アプリケーションを用いて、練習したい曲および練習に用いる方法を選択する。練習者が曲を再生すると、練習者が選択した方法を用いて、音、リズム、および運指が提示され、練習者はそれらをもとに自由に手指を動かして曲を練習できる(図4.1)。

### 4.2 練習システムにより提示される情報

本システムは、練習用アプリケーション、グローブ型デバイス、および紙媒体により構成される。図4.2に、練習システムの構成要素、各要素により提示される曲の情報(提示情報)およびそれに対する初心者の理解のしやすさ、各要素が曲の各情報を提示するために用いる方法(提示方法)、ならびに各情報が刺激する感覚(刺激感覚)を示す。練習用アプリケーションはピアノ音、グローブ型デバイスは振動および光、ならびに紙媒体は楽譜を用いてピアノ音、リズム、運指、またはこれらの組み合わせを提示できる。練習者は提示情報をもとに曲を練習する。

#### 4.2.1 ピアノ音

ピアノ音は、聴覚を通じた練習支援を可能とする。練習する曲の音を再生することにより、自分が演奏する際のイメージトレーニングを行うことができる。ピアノ音は音声を再生する機器があれば聴くことができ、ピアノ奏者も外出時のピアノの練習として用いる情報であるため、本システムにおいても採用する。本システムでは、練習用アプリケーションを通してピアノ

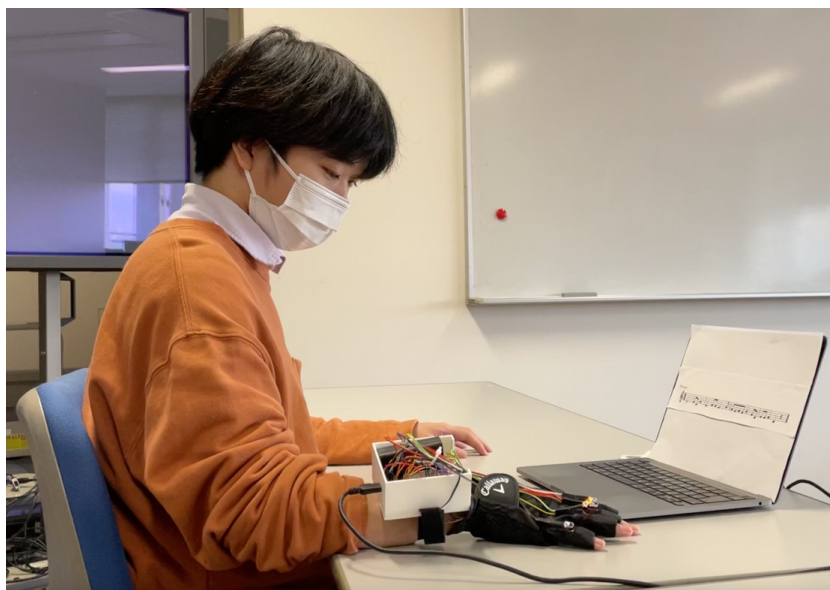


図 4.1: 練習システムを用いて練習する様子.

構成要素		アプリ	グローブ型デバイス	紙	
提示方法		ピアノ音	振動	光	楽譜
提示情報 および 理解の しやすさ	音 (音程)	△	—	—	○
	リズム (音の長さ)	◎	◎	◎	○
	運指 (弾く指)	—	◎	◎	—
刺激感覚					

図 4.2: 練習システムの構成要素，提示方法，提示情報およびそれに対する初心者の理解のしやすさ，ならびに刺激感覚. ◎，○および△は，各提示情報における初心者に対する音，リズム，および運指の理解のしやすさを表す.

ノ音を提示する。なお、アプリケーションの実行にはPC (MacBook Pro (13-inch, M1, 2020))を用いる。本システムにおいてはピアノ音により、音およびリズムを聴覚を通して提示する。ピアノ音により、ピアノ初心者はリズムを容易に理解できる。また、初心者には少ないと思われるが、絶対音感がある人であれば音も理解できる。

#### 4.2.2 振動

振動は、触覚を通じた練習支援を可能とする。これまでの研究 [HDS08, HSD<sup>+</sup>10, KS10, SES15, PT19, DPB21, GTD<sup>+</sup>22] により、振動を用いた運指およびリズムの提示はピアノの受動的練習に効果的であることが示されている。そのため本研究においては、能動的練習においても振動が役立つと考えた。本システムでは、振動の提示にグローブ型デバイスを用いる。本システムにおいては振動により、運指およびリズムを触覚を通して提示する。振動により、ピアノ初心者はリズムおよび運指を容易に理解できる。

#### 4.2.3 光

光は、視覚を通じた練習支援を可能とする。これまでの手法 [CAS, YAMc, 竹川 11, RRW<sup>+</sup>14, 山田 15] により、鍵盤を光らせることによる鍵盤位置、運指、およびリズムなどの曲の情報の提示は、ピアノの練習に効果的であることが示されている。本研究においては、鍵盤ではなく指先を光らせることにより、持ち運びの問題を気にすることなく曲の情報を提示できると考えた。本システムでは、光の提示にグローブ型デバイスを用いる。本システムにおいては光により、運指およびリズムを視覚を通して提示する。振動により、ピアノ初心者はリズムおよび運指を容易に理解できる。

#### 4.2.4 楽譜

楽譜は光と同様に、視覚を通じた練習支援を可能とする。楽譜は曲全体の情報を一度に提示できるため、ピアノ奏者の外出時の練習にも多く用いられる。振動を用いたピアノの受動的練習 [HDS08, HSD<sup>+</sup>10, KS10, SES15, PT19, DPB21, GTD<sup>+</sup>22] においては練習する曲に意識を向けないため楽譜を用いることはできなかったが、本研究では能動的練習を対象とするため、楽譜を用いる。楽譜は、紙媒体または情報端末により提示でき、本システムでは紙を用いる。本システムにおいては楽譜により、音およびリズムを視覚を通して提示する。楽譜により、譜読みができる人は音およびリズムを理解できる。

### 4.3 練習用アプリケーション

練習用アプリケーションを、開発環境として Xcode 12.5.1, および開発言語として Swift 5.4.2 を用いて実装した。アプリケーションの画面を図 4.3 に示す。練習者は、練習する曲および練

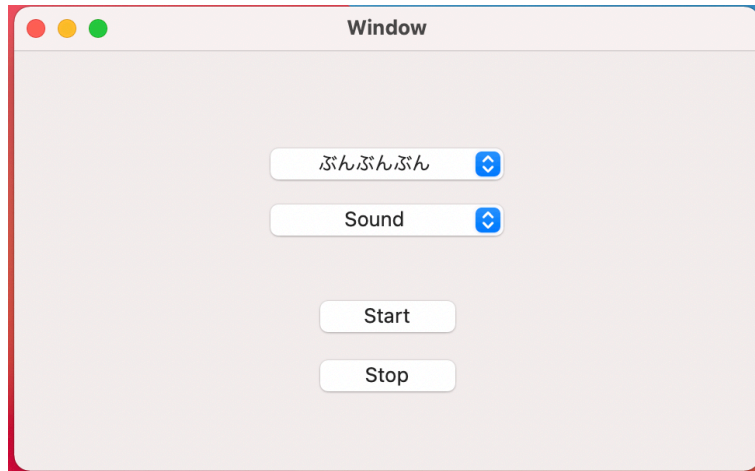


図 4.3: 練習用アプリケーションの画面.

習方法をアプリケーションを用いて選択できる (図 4.4). 練習方法は, ピアノ音, 光, および振動の組み合わせから選択する. 練習する曲および練習方法を選択した後, スタートボタンを押すことにより, ピアノ音が再生される. また, Arduino Nano とのシリアル通信により, 振動アクチュエータおよび LED を制御している. 練習方法として振動, 光, またはその両方を選択した場合には, ピアノ音の再生と同時に振動アクチュエータおよび LED が動作し, 振動, 光, またはその両方が提示される.

#### 4.4 グローブ型デバイス

振動および光を提示するためのグローブ型デバイスを図 4.5 に示す. また, 作製したデバイスの回路図を図 4.6 に示す. デバイスは, Huang ら [HDS08,HSD<sup>+</sup>10] の実験にて用いられた触覚刺激提示グローブをもとに作製した. また, デバイスは, ゴルフグローブ, マイクロコントローラ (Arduino Nano) を含む回路, 5つの振動アクチュエータ, および5つの LED から構成される. 振動アクチュエータおよび LED は, PC と USB 接続されたマイクロコントローラにより制御される. なお, Huang ら [HDS08,HSD<sup>+</sup>10] が用いた触覚刺激提示グローブと同様に, ユーザがグローブを装着した状態においても指先の感覚を保つため, および指先を動かしやすいするために指先部分の空いたゴルフグローブ (Callaway, 5318118) を使用した. それぞれの振動アクチュエータはグローブの各指の第 1 関節および第 2 関節の間に, LED はグローブの各指の第 2 関節に取り付けた. 手が動かしくくなることを防ぐため, 回路はリストバンド型のケースに収納し, 腕に装着した. 触覚刺激をユーザの指に提示するための振動アクチュエータとして, 標準電圧が 3V である偏心モータ (T.P.C, FM34F) を用いた. また, 視覚刺激を提示するために黄色の LED (OptoSupply, OSY5RU5A31E-NO) を使用した.

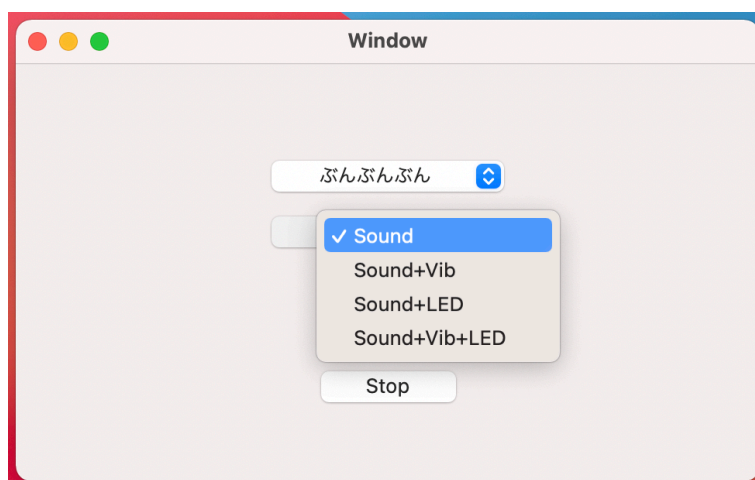


図 4.4: 提示される情報を選択する様子.



図 4.5: 振動および光を提示するためのグローブ型デバイス.



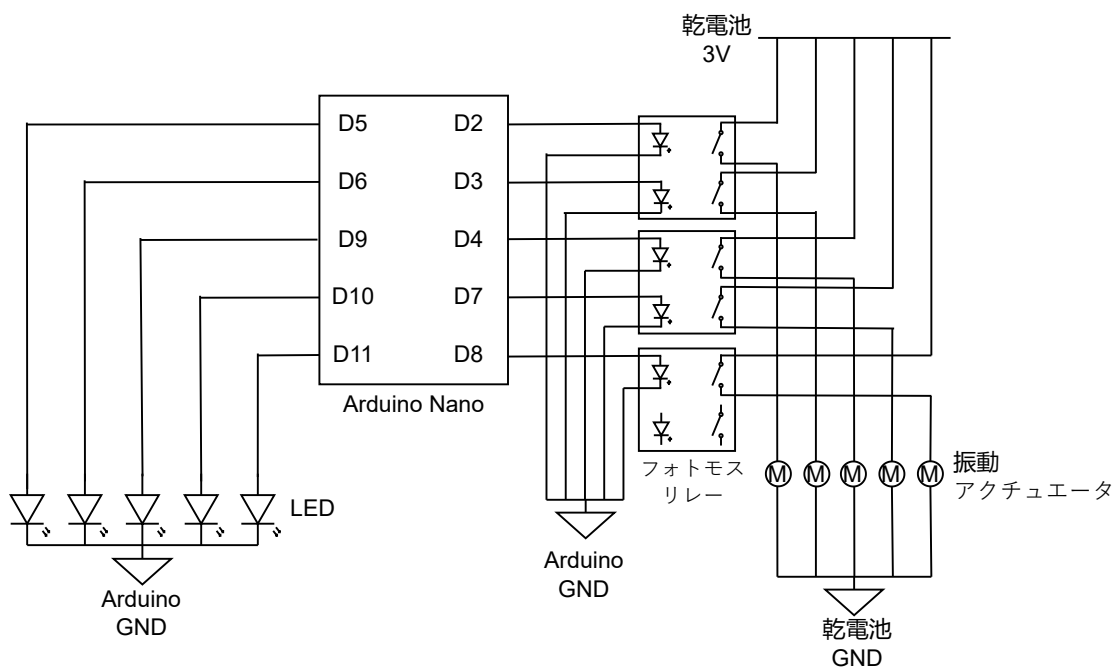


図 4.6: 作製したグローブ型デバイスの回路図.

## 第5章 実験1

ピアノがない環境における，片手のみを用いて演奏可能な短いフレーズの練習に振動および光が与える効果を調査するための実験を行った．

### 5.1 参加者

参加者は，研究室内の学生4名であった（男性3名，平均年齢23歳，全員右利き）．ピアノおよびその他の楽器の経験を問うアンケートを行ったところ，1名は幼稚園児時に3年間ピアノ経験があり，1名は小学生時に音楽の授業でピアノの経験があり，4名は小学生時の音楽の授業でリコーダの経験があった．また，譜読みのレベルは，音については，1名は全く読めない，1名は1音ずつ下から数えれば読める，および2名は今回のフレーズで使用する音の範囲であれば下から数えずとも1音ずつ時間をかければ読めるが，読みながら楽器の演奏ができるほどすらは読めないというレベルであった．リズムについては，1名は全く分からない，2名は音の長短は感覚である程度分かる，および1名は分かる」と回答した．

### 5.2 実験条件および実験環境

実験には第4章の練習システムを使用し，ピアノ音はPCにより実行した練習用アプリケーション，振動および光はグローブ型デバイス，ならびに楽譜は紙を用いて提示した．実験参加者には，表5.1に示す4条件での練習を行うように指示した．条件は，振動および光の有無の組み合わせ（振動および光共に無し，振動のみ有り，光のみ有り，振動および光共に有り）により4つとなっている．ピアノ音は全ての条件において共通して提示し，楽譜は光と同時に見ることはできないため，光を提示しない条件において楽譜を提示する．つまり，条件1ではピアノ音および楽譜，条件2ではピアノ音，振動および楽譜，条件3ではピアノ音および光，ならびに条件4ではピアノ音，振動および光を提示する．また，条件1ではグローブ型デバイスを装着せず，条件2-4ではグローブ型デバイスを右手に装着して練習する．

実験に使用するフレーズは，図5.1に示す4種類である．なお，参加者へのフレーズへの親しみやすさを均等にするため，各フレーズは，参加者に対して初見のものとなるように著者が作成した．フレーズの作成には，Donchevら[DPB21]の実験を参考にした．各フレーズは，初心者向けの難易度で長さが同じ（20音）でありながら，互いが練習に影響を与えないように設計された．手の横移動により練習の難易度が高まることを防ぐため，フレーズはC（ド），D（レ），E（ミ），F（ファ），およびG（ソ）の5つのキーのみを用いた．これらのキーを図

Phrase1

2 3 1 5 2 4 4 3 5 4 3 4 3 5 3 1 3 3 4 1

Phrase2

1 5 4 2 3 5 4 1 2 4 5 4 2 5 5 4 2 3 5 1

Phrase3

4 2 1 1 4 1 3 4 2 2 1 3 1 5 1 2 3 4 2 1

Phrase4

3 4 2 3 1 3 2 3 4 5 2 4 3 5 5 4 4 2 3 1

図 5.1: 実験 1 において練習するフレーズ. 楽譜における 1-5 はそれぞれ図 5.2 における C-G に対応する.

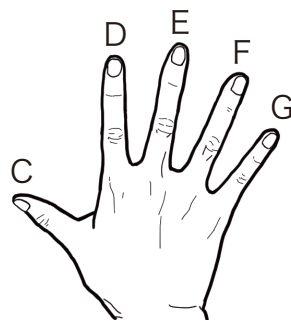


図 5.2: 指および音の対応.

表 5.1: 実験 1 の各条件において提示する情報.

	ピアノ音	振動	光	楽譜
条件 1	○			○
条件 2	○	○		○
条件 3	○		○	
条件 4	○	○	○	

5.2 に示すように各指に割り当てた。ピアノでは右手がメロディを演奏することが多いため、右手用のフレーズとした。実験において譜読みができないピアノ初心者も対象としていることから、参加者の譜読みの補助のため、楽譜には運指を載せた。

### 5.3 手順

実験の流れを図 5.3 に示す。

まず、参加者に練習後のテストで用いる電子キーボードを使用してもらい、1 度提示される各条件でのフレーズに対し、ピアノ音および運指に対応した鍵盤の位置の確認を行うよう指示した。次に、電子キーボードから指を外し、電子キーボードのない状態で練習を開始する。実験参加者には練習期間として各条件で 6 度フレーズを提示した。フレーズの提示回数は、著者が所属する研究室内での予備調査から決定した。具体的には、幼少期にピアノを習っていた人および暗記が得意な人に 4 種類のフレーズを練習してもらったところ、6 度で覚えることができなかつたため、本実験の結果においても練習効果に差が出ると考え決定した。6 度の練習終了後、練習終了からテスト開始までの時間を条件間で統一するため、電子キーボードを用いずに 2 分間自由に手を動かシイメージトレーニングできる期間を設けた。その間に条件 2-4 ではグローブを外してもらった。

その後、電子キーボードを用いて楽譜を見ずに各条件で練習したフレーズを 3 回演奏するよう指示した。これをテスト 1 とする。何かしらのトラブルで 1 回目うまく弾けない、または偶然 1 回うまく弾けてしまう可能性があるため、3 回の演奏を指示した。その後、再度各条件で 2 度フレーズを提示する。テスト 1 の際と同様に 2 分間のイメージトレーニング期間を挟んだ後、参加者にはフレーズを 3 回演奏するよう指示した。これをテスト 2 とする。

テスト 2 の後、実験参加者には実行した条件に対して、ユーザビリティを評価するための SUS [Bro96] および自由記述から成るアンケート、ならびに作業負荷を評価するための NASA-TLX [HS88] の回答を指示した。回答終了後、約 5 分間の休憩を挟み次の条件へ移行した。条件およびフレーズの組み合わせならびに実行順は、順序効果を打ち消すため、ラテン方格に従い実験参加者ごとに決定した。全条件終了後、参加者には、年齢、性別および音楽経験などの参加者情報、ならびに練習しやすかつた条件および好みの条件など条件間の比較を行うアンケートを回答するよう指示した。実験の所要時間は、平均約 90 分であった。

各条件における練習効果の測定

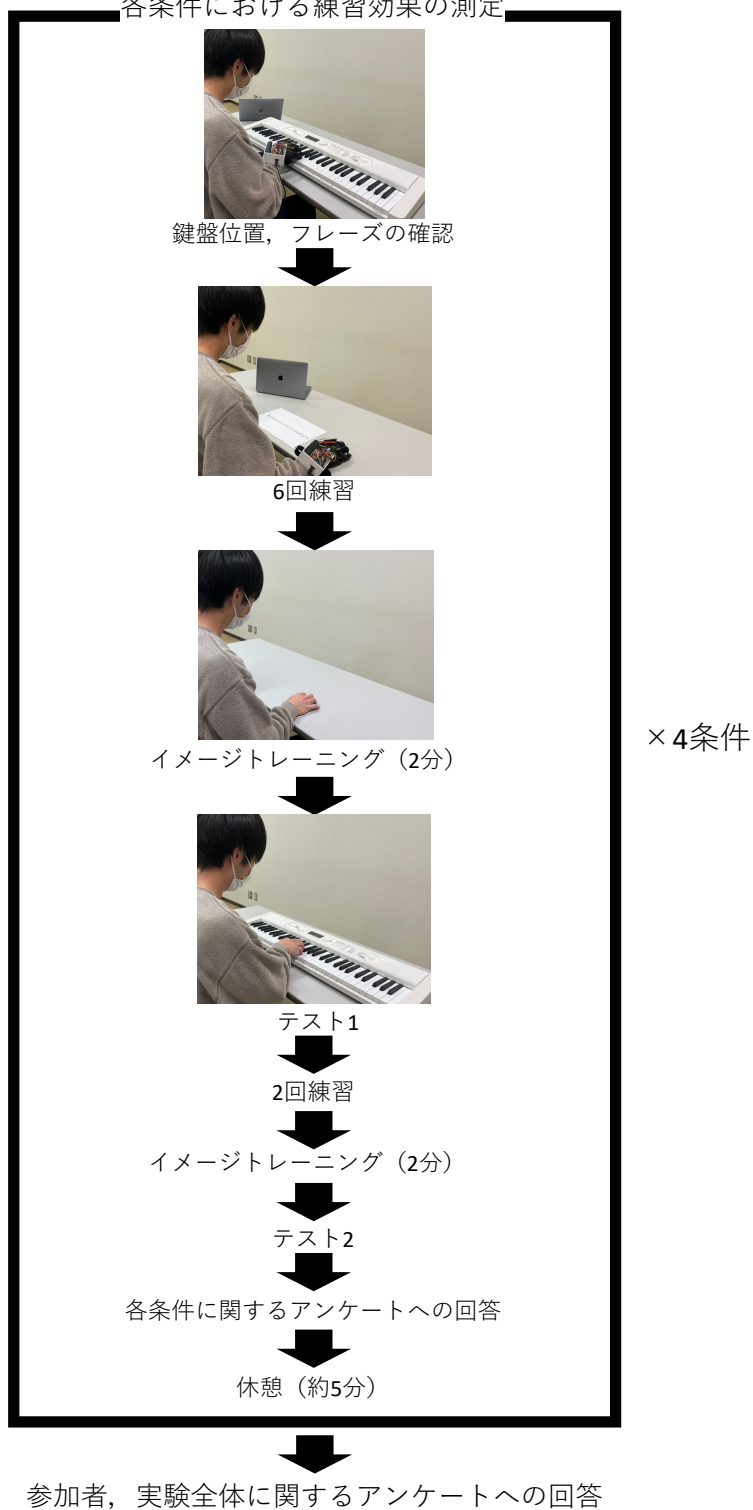


図 5.3: 実験 1 の流れ.

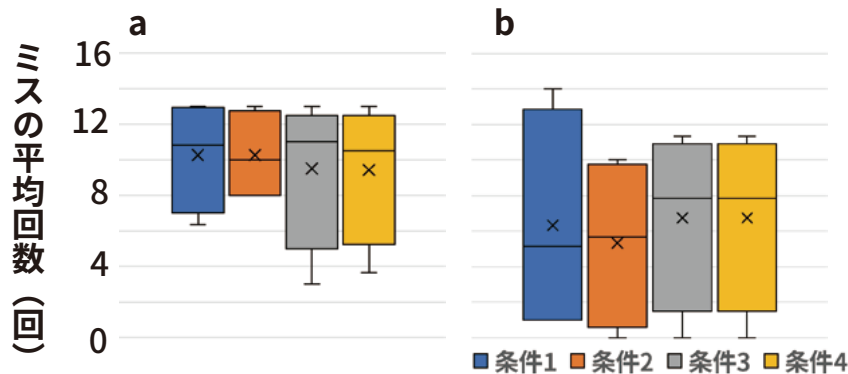


図 5.4: 実験 1 における条件ごとの音のミスの平均回数. a) テスト 1 の成績. b) テスト 2 の成績.

## 5.4 結果

実験により明らかになった各条件の音のミス数, リズムのミス数, SUS のスコア, NASA-TLX のスコア, ならびにその他のアンケートの結果を示す. また, 各条件の音の精度, リズムの精度, SUS のスコアおよび NASA-TLX のスコアの分析結果を述べる. 統計解析において, 有意水準は 0.05 とした.

### 5.4.1 音のミス数

テスト 1 および 2 における各 3 回の演奏について, 音のミスの回数を計測した. Huang ら [HSD<sup>+</sup>10] の解析方法に基づき, 参加者の演奏したフレーズおよび正しいフレーズを比較した際に音符の置換, 挿入, または削除のいずれかがある場合にミスを 1 回と計測した.

テスト 1 の各条件における参加者ごとのミスの平均回数は, 条件 1 が 10.25 (SD=2.75) 回, 条件 2 が 10.25 (SD=2.28) 回, 条件 3 が 9.50 (SD=3.84) 回, および条件 4 が 9.42 (SD=3.49) 回であった (図 5.4a). フリードマン検定を行った結果, 有意差は見られなかった.

テスト 2 の 3 回の演奏についても同様に, 音のミスの回数を計測した. 各条件における参加者ごとのミスの回数の平均は, 条件 1 が 6.33 (SD=5.58) 回, 条件 2 が 5.33 (SD=4.26) 回, 条件 3 が 6.75 (SD=4.35) 回, および条件 4 が 6.75 (SD=4.35) 回であった (図 5.4b). この結果に対して, Shapiro-Wilk 検定を行った結果, 正規性が示された. 一元配置分散分析を行った結果, 有意差は見られなかった.

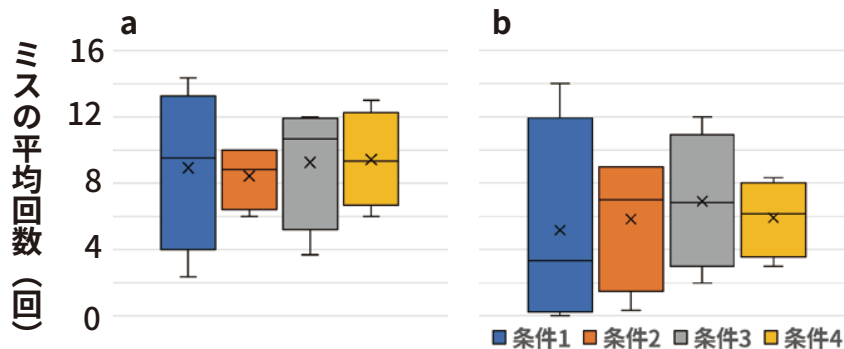


図 5.5: 実験 1 における条件ごとのリズムのミスの平均回数. a) テスト 1 の成績. b) テスト 2 の成績.

#### 5.4.2 リズムのミス数

テスト 1 および 2 における各 3 回の演奏について、リズムの回数を計測した。リズムのミスの回数は音と同様に計測した。

テスト 1 の各条件における参加者ごとのミスの平均回数は、条件 1 が 8.92 (SD=4.30) 回、条件 2 が 8.42 (SD=1.69) 回、条件 3 が 9.25 (SD=3.34) 回、および条件 4 が 9.42 (SD=2.52) 回であった (図 5.5a)。この結果に対して、Shapiro-Wilk 検定を行った結果、正規性が示された。一元配置分散分析を行った結果、有意差は見られなかった。

テスト 2 の 3 回の演奏についても同様に、リズムのミスの回数を計測した。各条件における参加者ごとのミスの回数の平均は、条件 1 が 5.17 (SD=5.53) 回、条件 2 が 5.83 回 (SD=3.57)、条件 3 が 6.92 (SD=3.59) 回、および条件 4 が 5.92 (SD=1.99) 回であった (図 5.5b)。この結果に対して、Shapiro-Wilk 検定を行った結果、正規性が示された。一元配置分散分析を行った結果、有意差は見られなかった。

#### 5.4.3 SUS

各条件における SUS スコアの平均は、条件 1 が 75.63 (SD=18.74)、条件 2 が 70.00 (SD=27.21)、条件 3 が 80.63 (SD=11.78)、条件 4 が 70.00 (SD=19.69) であった (図 5.6)。この結果に対して、Shapiro-Wilk 検定を行った結果、非正規性が示された。フリードマン検定を行った結果、有意差は見られなかった。

#### 5.4.4 NASA-TLX

各条件における NASA-TLX スコアの平均は、条件 1 が 77.08 (SD=9.55)、条件 2 が 72.00 (SD=5.97)、条件 3 が 62.25 (SD=17.29)、条件 4 が 63.83 (SD=19.12) であった (図 5.7)。こ

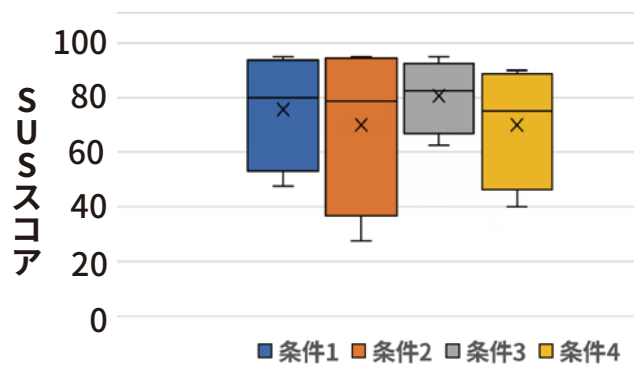


図 5.6: 実験 1 における条件ごとの SUS スコアの平均.

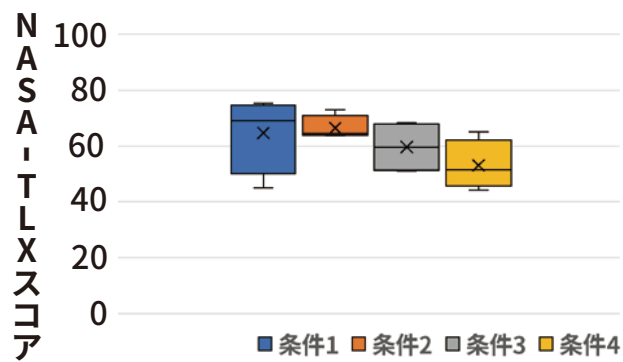


図 5.7: 実験 1 における条件ごとの NASA-TLX のスコアの平均.



表 5.2: 実験 1 において各条件を練習しやすかった順に回答してもらった際の順位および人数.

	1 番目	2 番目	3 番目	4 番目
条件 1	0 人	1 人	1 人	2 人
条件 2	2 人	0 人	1 人	1 人
条件 3	0 人	2 人	2 人	0 人
条件 4	2 人	1 人	0 人	1 人

表 5.3: 実験 1 において各条件を今後ピアノの練習を行う際に用いたい順に回答してもらった際の順位および人数.

	1 番目	4 番目
条件 1	0 人	2 人
条件 2	1 人	1 人
条件 3	0 人	0 人
条件 4	3 人	1 人

の結果に対して, Shapiro-Wilk 検定を行った結果, 非正規性が示された. フリードマン検定を行った結果, 有意差は見られなかった.

#### 5.4.5 その他のアンケート

本項では, SUS および NASA-TLX 以外のアンケートの結果を示す.

##### 練習しやすかった条件

実験の最後のアンケートにおいて, 各条件を練習しやすかった順に回答してもらった. 練習しやすいと回答した人数が最も多かったのは条件 2 および 4 (2 名) であり, 練習しにくいと回答した人数が最も多かったのは条件 1 (2 名) であった (表 5.2).

##### 今後練習に用いたい条件

実験の最後のアンケートにおいて, 今後ピアノの練習を行う際に最も用いたい条件および最も用いたくない条件を回答してもらった. 練習に用いたいと回答した人数が最も多かったのは条件 4 (3 名) であり, 練習に用いたくないと回答した人数が最も多かったのは条件 1 (2 名) であった (表 5.3).

## 5.5 考察

本節では, 実験結果より考えられる考察を述べる.

### 5.5.1 成績

5.4.1 節および 5.4.2 節より、テストにおいて成績の良い条件は人によって異なり、2 条件間の成績に有意差も見られなかったため、今回の実験では練習効果の高い条件を明らかにすることはできなかった。この原因として考えられる課題を以下に述べる。

#### 楽譜の有無

実験のアンケートにおいて条件 1 または 2 を支持した参加者からは、「楽譜によって全体の流れを見ることができて練習しやすかった」、「楽譜および振動により音および指の対応付けがしやすかった」「楽譜を見て指を動かした後にフィードバックとして振動が与えられることにより、直感的にミスに気づくことができた、「楽譜には全体の流れを見る、および直前の覚えられなかった際に振り返る効果があり、光には音および指を対応付ける効果があったため、両方あると補い合えて良いと感じた」という意見があった。また、私は当初、参加者は楽譜および光のどちらか片方しか見ることができないと考え、光に集中してもらうために条件 3 および 4 では楽譜を提示しなかったが、参加者と議論を行った際に、基本的には光を見て、流れが分からなくなった際に楽譜を見るというように双方を使い分ける方法が可能であることが分かった。さらに、光はその音が流れるタイミングでしか情報を提示できないが、楽譜は次の音に移った後および 1 度フレーズが流れ終わってから次にフレーズが流れ始めるまでの間にも音およびリズムを確認することができるため、情報の提示時間が平等でなかったと考えられる。このため、楽譜の有無を条件間で統一する必要がある。

#### 運指の記載

今回の実験では音楽未経験者も対象としているため、譜読みの補助のために運指を記載した。しかし、参加者の中に音楽的要素ではなく運指の数字の羅列でフレーズを覚えている人が見られた。今回用いたフレーズは手の横移動がなく指および音が一対一対応であるため数字の羅列を覚えていれば音は弾けてしまうが、これは手の横移動が発生した際に応用が効かない音楽的でない覚え方であるため、数字で覚えられないようにする必要がある。しかし、音を記載しても似たような現象が起きる可能性があるため、譜読みの方法を事前に教え、練習には補助のない楽譜を用いるのが良いと考える。

#### 練習回数

予備実験の結果から、練習回数 6 度で大部分の人がある程度弾けるようになるが何回かミスするため結果に差が出ると予想した。しかし、実際に実験を行ってみると 6 度では半分ほどしか覚えられない人も多かった。そこで追加で練習を 2 度増やし 8 度の結果も計測したが、計画性のない練習回数になってしまった。テストを 2 回行ったため、1 回テストを挟んだ後に再度練習を行った際の効果も算出しようとしたが、テストを挟んだ後の練習は 1 セットかつ 2

度しか行わなかったため、その条件による効果と言えるほどの結果は出せなかった。また、6度の練習後で初めてテストを行ったため、その人が元々どの程度弾けて練習による成果がどの程度あるかまで計測できていなかった。そのため、まず最初にテストを行って最初のレベルを計測し、さらに全体的な練習回数を増やし、それを数回ずつに分けてテストの回数を増やすことで、同じタイミングでのミス回数だけでなく練習を繰り返すことでの成績の伸びも計測できると考える。

## テストでの演奏回数

今回のテストでは、1回では何かしらの理由で思い通りに弾けない可能性およびデータがうまく取れない可能性を考え、3回演奏してもらった。しかし、1回目の結果がその時点での実力と比較して極端に低い様子はなく、逆に3回演奏したことによりテストの中で練習が行われてしまっている可能性が見られた。本実験はピアノを使わずに練習を行うことを想定しているため、電子キーボードを使ったテストで練習が行われてしまうのは意図に反する。先述したようにテストの回数を増やすのであればこの影響がさらに大きくなると考えられる。そのため、テスト時の演奏回数は1回に減らすのが良いと考える。

## 練習からテストまでのイメージトレーニング

今回の実験では、グローブの装着の有無に関わらず練習終了からテスト開始までの時間を条件間で統一するために、練習終了後に2分間自由に手を動かしイメージトレーニングできる期間を設け、条件2-4ではその間にグローブを外してもらった。しかし、グローブを外しながらでは手を自由に動かさず、意識もグローブを外すことに向くため、条件1と比較して条件2-4ではイメージトレーニングの質が低かったことが想定される。練習終了からテスト開始までのフレーズへの集中度を条件間で統一するためには、身体を使わず頭を使うタスクを行ってもらい、フレーズから意識を背けさせるのが良いと考える。なお、この際のタスクは特定のフレーズの想起に繋がらないよう音楽的要素を持たない必要がある。

## フレーズの難易度

今回の実験において用いた4つのフレーズは、初心者向けの難易度となるよう著者が作成した。また、フレーズが似ていることにより覚えやすさに影響を与えてしまうことを防ぐため、類似のフレーズが存在しないようにした。しかし、実験の結果、フレーズによって成績に差があった。例えば、テスト1の音およびリズムのミスの回数が最も多かったのはフレーズ3で、それぞれ平均11.75回および11.67回であり、最も少なかったのはフレーズ4で、それぞれ平均7.50回および7.17回であった。テスト2においても、フレーズ1および4に対し、フレーズ2および3のミスの回数が音およびリズムともに多かった。さらに、アンケートからも、フレーズ4が最も覚えやすく、フレーズ2および3が覚えにくいという意見があった。これは、ピアノ経験がある著者およびピアノ経験がほとんどない実験参加者の間で難易度の

感じ方に差があったためであると考えられる。このため、フレーズの難易度がピアノ初心者にとっても同レベルになるようフレーズを作成し直す必要がある。

### 5.5.2 主観評価

NASA-TLX のスコアは、条件3が最も良く、ほとんど変わらないスコアで条件4が2番目に良く、条件1が最も悪かった。この結果から、光およびグローブ型デバイスが練習の際の作業負担を軽減する可能性が示唆された。アンケートから、「光がある場合は、楽譜および指を交互に見る必要がなかったため、精神的負担が少なかった」、「光がある場合は、楽譜だけの場合よりどの指を動かすのか直感的に分かった」という意見があったため、光は楽譜と比較した際に、練習に向ける意識が少なくてすむため、負担が軽減したと考えられる。

練習しやすさの評価は、条件2および4が最も高く、条件1が最も低かった。この結果から、振動およびグローブ型デバイスが練習をしやすくする可能性が示唆された。これは、振動は受動的練習でも使われるように、提示された4つの情報の中で最も少ない意識で感じられること、および振動は身体に残るため記憶につながりやすいことが一因であると考えられる。

練習に用いたい度合いの評価は、条件4が最も高く、条件1が最も低かった。この結果から、グローブ型デバイスが練習において好まれる可能性が示唆された。これは、グローブ型デバイスにより提示される振動または光が、瞬時に楽譜を読むことができない参加者のフレーズ理解の助けになったためであると考えられる。

## 第6章 実験2

実験1において得られた課題を改善するため、ピアノがない環境における、片手のみを用いて演奏可能な短いフレーズの練習に振動および光が与える効果を調査するための実験を再度行った。

### 6.1 参加者

参加者は、研究室内の学生8名であった（男性8名、平均年齢22.88歳、全員右利き）。なお、参加者は実験1に参加していない学生とした。ピアノおよびその他の楽器の演奏経験を問うアンケートを行ったところ、5名は中学校までの音楽の授業での経験のみ、1名はそれに加えギターおよびピアノを趣味で1-2年前に約1ヶ月、1名は中学生の時にピアノを習い事として約10ヶ月、および1名は高校生の時に音楽の授業でギターを3ヶ月演奏していたと回答した。また、譜読みのレベルは、8名とも時間をかけて基準となる音（例えば中央のド）から数えれば読めるが演奏しながらは読めないと回答した。

### 6.2 実験条件および実験環境

実験1と同じく、実験には第4章の練習システムを使用し、ピアノ音はPCにより実行した練習用アプリケーション、振動および光はグローブ型デバイス、ならびに楽譜は紙を用いて提示した。実験参加者には、表6.1に示す4条件での練習を行うように指示した。条件は、振動および光の有無の組み合わせ（振動および光共に無し、振動のみ有り、光のみ有り、振動および光共に有り）により4つとなっている。ピアノ音および楽譜は全ての条件において共通して提示する。つまり、条件1ではピアノ音および楽譜、条件2ではピアノ音、振動およ

表 6.1: 実験2の各条件において提示する情報。

	ピアノ音	振動	光	楽譜
条件1	○			○
条件2	○	○		○
条件3	○		○	○
条件4	○	○	○	○

Phrase1



Phrase2



Phrase3



Phrase4



図 6.1: 実験 2 において練習するフレーズ.

び楽譜，条件3ではピアノ音，光および楽譜，ならびに条件4ではピアノ音，振動，光および楽譜を提示する。また，条件1ではグローブ型デバイスを装着せず，条件2-4ではグローブ型デバイスを右手に装着して練習する。

実験に使用するフレーズは，図6.1に示す4種類である。なお，実験1と同じく，参加者へのフレーズへの親しみやすさを均等にするため，各フレーズは，参加者に対して初見のものとなるように著者が作成した。フレーズの作成には，Donchevら [DPB21] の実験を参考にした。各フレーズは，初心者向けの難易度かつ長さが同じ（20音）でありながら，互いが練習に影響を与えないために，音の流れおよびリズムが類似しないように設計された。手の横移動により練習の難易度が高まることを防ぐため，フレーズはC（ド），D（レ），E（ミ），F（ファ），およびG（ソ）の5つのキーのみを用いた。これらのキーを図5.2に示すように各指に割り当てた。ピアノでは右手がメロディを演奏することが多いため，右手用のフレーズとした。

### 6.3 手順

実験の流れを図6.2に示す。

まず参加者に，今回練習するフレーズに登場する音およびリズムを説明し，譜読みの方法を覚えてもらった。

次に，条件ごとにフレーズの練習を行う。まず，実験者がメトロノームに合わせてフレーズを弾いたデモ演奏動画を参加者に1度見てもらうことにより，フレーズのイメージ付けおよび鍵盤の位置の確認を行うよう指示した。その際，参加者には，楽譜を見ながら自由に指を動かしてもらった。次に，最初の習熟度を計測するために，プレテストとして，電子キーボードを用いて楽譜を見ずにフレーズを1回演奏するよう指示した。プレテストの後，参加者は，電子キーボードから指を外し，電子キーボードのない状態で練習を開始する。参加者には練習として各条件において3度フレーズを提示した。練習の間，参加者は自由に身体を動かすことができた。3度のフレーズの提示後，練習終了からテスト開始までの時間およびフレーズへの集中度を条件間で統一するため，与えられたテーマについて2分間，参加者1名でしりとりを行ってもらった。5セッション×4条件=20回のしりとりのテーマを表6.2に示す。しりとりのテーマおよび順序は全ての参加者間において統一した。また，しりとりを行っている間に，条件2-4ではグローブを外してもらった。その後，テストとして，電子キーボードを用いて楽譜を見ずに各条件において練習したフレーズを1回演奏するよう指示した。練習およびテストから成るセッションを5回繰り返す。5セッション終了後，実験参加者には実行した条件に対して，ユーザビリティを評価するためのSUS [Bro96] および自由記述から成るアンケート，ならびに作業負荷を評価するためのNASA-TLX [HS88] の回答を指示した。回答終了後，3分以上の休憩を挟み次の条件へ移行した。条件およびフレーズの組み合わせならびに実行順は，順序効果を打ち消すため，ラテン方格に従い実験参加者ごとに決定した。

全条件終了後，参加者には，年齢，性別，および音楽経験などの参加者情報，ならびに練習しやすかった条件および好みの条件など条件間の比較を行うアンケートを回答するよう指示した。実験の所要時間は，平均約180分であった。

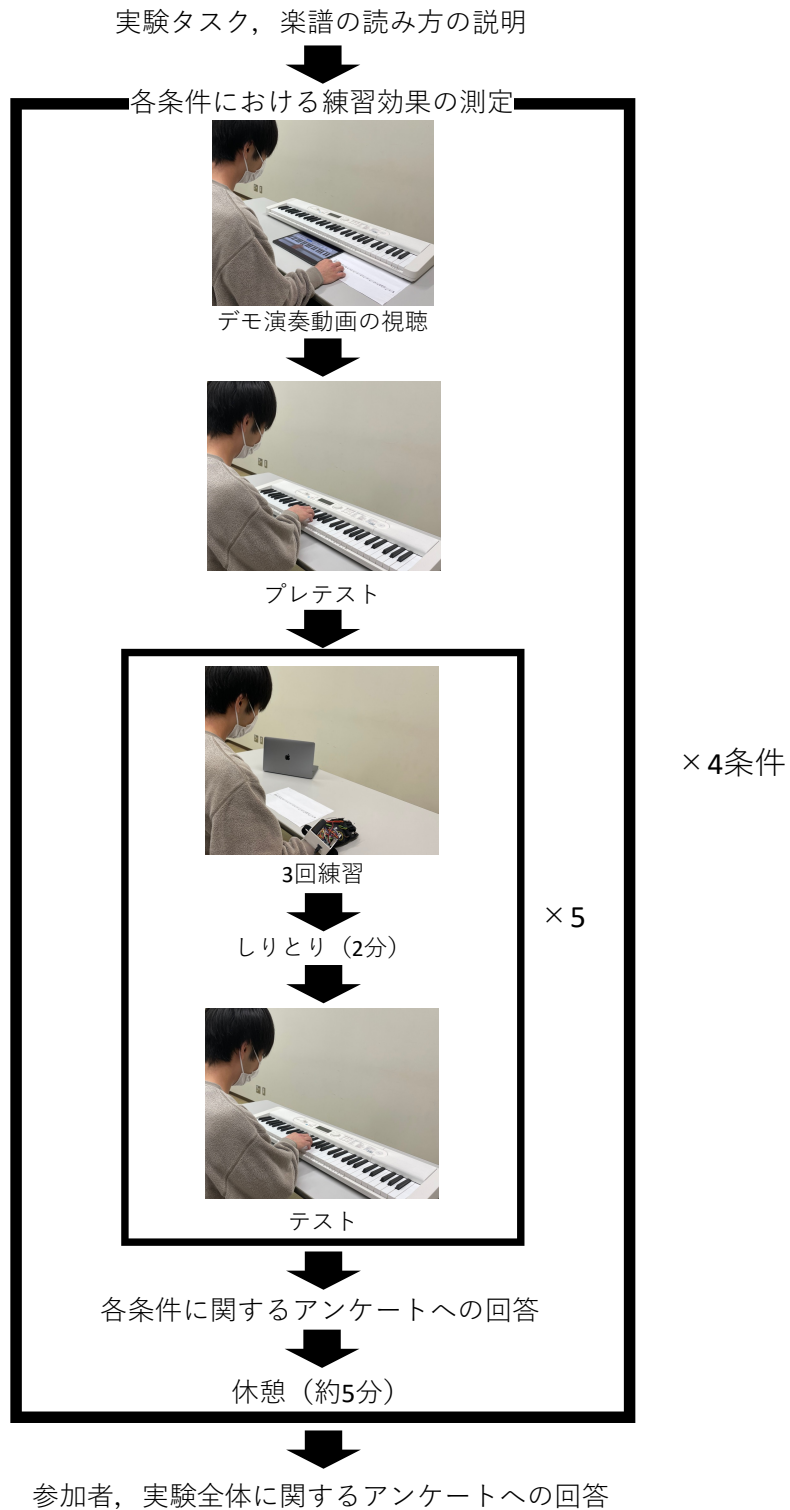


図 6.2: 実験 2 の流れ.



表 6.2: 練習およびテストの間に行ってもらいしりどりのテーマ.

セッション数-回数	テーマ
1-1	テーマなし
1-2	英語のスペル
1-3	4文字の単語
1-4	漢字
1-5	食べ物
2-1	飲み物
2-2	動物
2-3	習い事
2-4	家にあるもの
2-5	日本の地名
3-1	世界の地名
3-2	作品（本，映画，ドラマ，およびアニメなど）のタイトル
3-3	学校にあるもの
3-4	キャラクターの名前
3-5	歴史用語
4-1	日本人の苗字
4-2	日本人の名前
4-3	有名人（芸能人，政治家，および歴史上の人物など）の名前
4-4	季節用語
4-5	濁点を含む単語

## 6.4 結果

実験により明らかになった各条件の音およびリズムの正解数、SUSのスコア、NASA-TLXのスコア、ならびにその他のアンケートの結果を示す。また、SUSのスコアおよびNASA-TLXのスコアの分析結果を述べる。統計解析において、有意水準は0.05とした。

### 6.4.1 音の正解数

プレテストを含む計6回のテストでの演奏における音の正解数を計測した。なお、実験1においてはミス数を計測したが実験2においては正解数を計測したのは、実験1はある程度弾けるようになると想定される回数練習した後にテストを行ったのに対し、実験2は成績の推移を見るためにほとんど弾けない段階でもテストを行ったため、ミスではなく弾けないことが多々あったことから、ミス数ではなく正解数を計測するのが妥当であると考えたためである。8人の参加者および平均の成績の推移を図6.3に示す。なお、今回の実験において練習したフレーズは鍵盤と指が一对一对応であったため、音の正解数は運指の正解数でもある。振動および光により提示できるのは音ではなく運指の情報であるため、以降音を運指と読みかえる。図6.3より、条件4, 3, 1, 2の順に参加者間の成績の個人差が小さいことが分かる。これより、振動および光両方、ならびに光の提示は、運指の習得において多くの人に同様の効果をもたらす可能性が示唆された。

また、各テストにおける条件ごとの音の正解数の平均を表6.3に示す。表6.3より、3, 4, 5, および6回目の音の正解数の平均は条件4が最も高く、次いで条件3が2番目に高く、条件1が3番目に高く、条件2が最も低かった。これより、振動および光両方、ならびに光のみの提示は運指の習得に効果があるが、振動のみでは逆に妨げになる可能性が示唆された。

図6.3の各参加者の成績の推移に対し近似直線を求めたグラフを図6.4に示す。グラフ中の式は、平均の近似直線の式を表す。図6.3より、条件3, 4, 1, 2の順に平均の近似曲線の傾きが大きいことが分かる。これより、振動および光両方、ならびに光のみの提示は運指の練習効果を高めるが、振動のみでは逆に妨げになる可能性が示唆された。

さらに、図6.3の各条件における平均の成績の変化量をテスト1-2, テスト2-3, テスト3-4, テスト4-5, およびテスト5-6の間において算出した(表6.4)。表6.4より、1-2回目および2-3回目では条件4の変化量が最も大きかった。また、1-2回目, 2-3回目, 3-4回目, および4-5回目では条件3の変化量は条件1より大きかった。これより、振動および光両方、ならびに光のみの提示により運指の習得を早める効果がある可能性が示唆された。また、表6.4より、2-3回目および3-4回目では条件2の変化量が最も小さかった。これより、振動のみの提示により運指の習得を遅める可能性が示唆された。

### 6.4.2 リズムの正解数

プレテストを含む計6回のテストでの演奏におけるリズムの正解数を計測した。8人の参加者および平均の成績の推移を図6.5に示す。図6.5より、条件4, 3, 1, 2の順に参加者間の

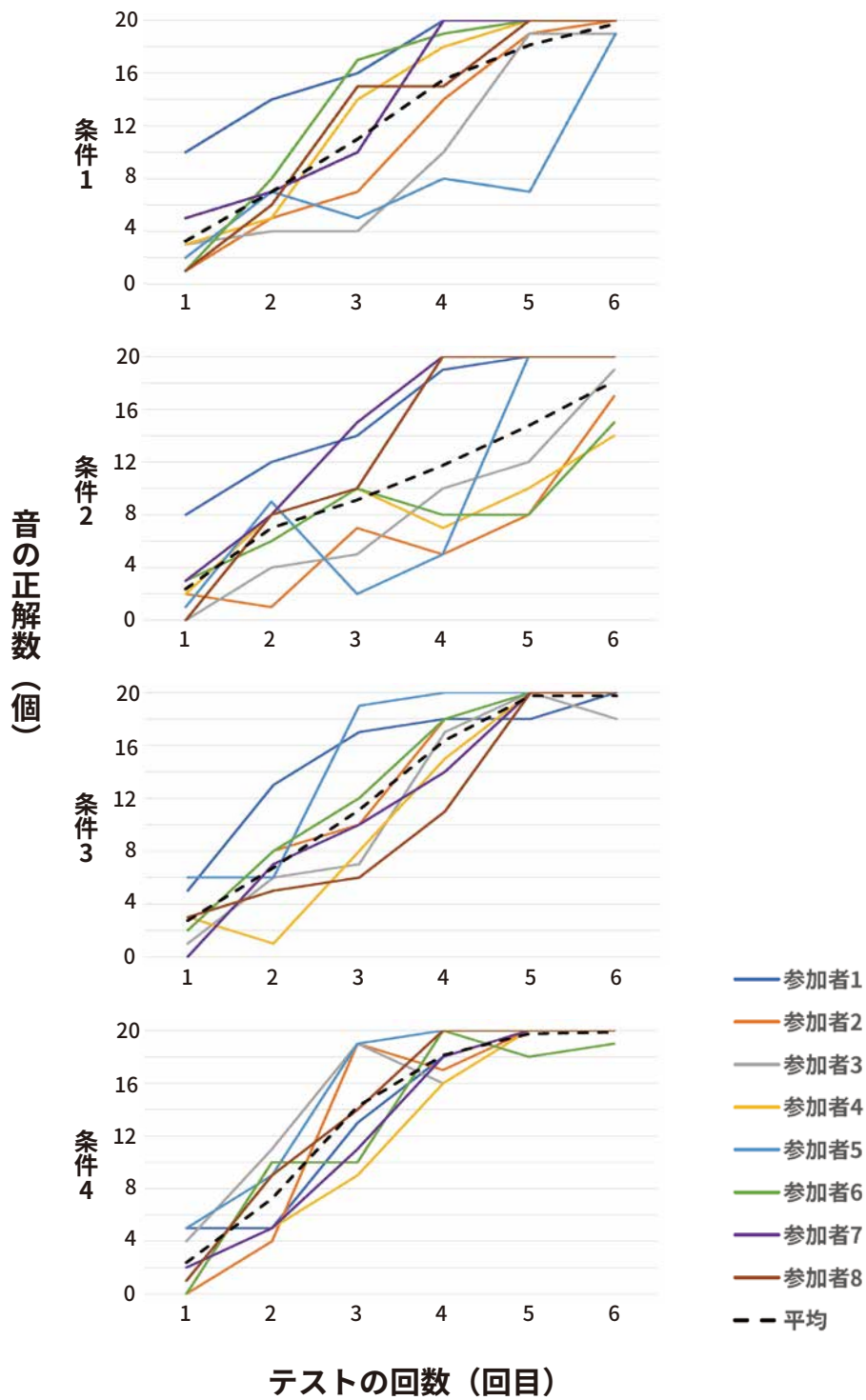


図 6.3: 実験 2 における条件ごとの音の正解数の推移.

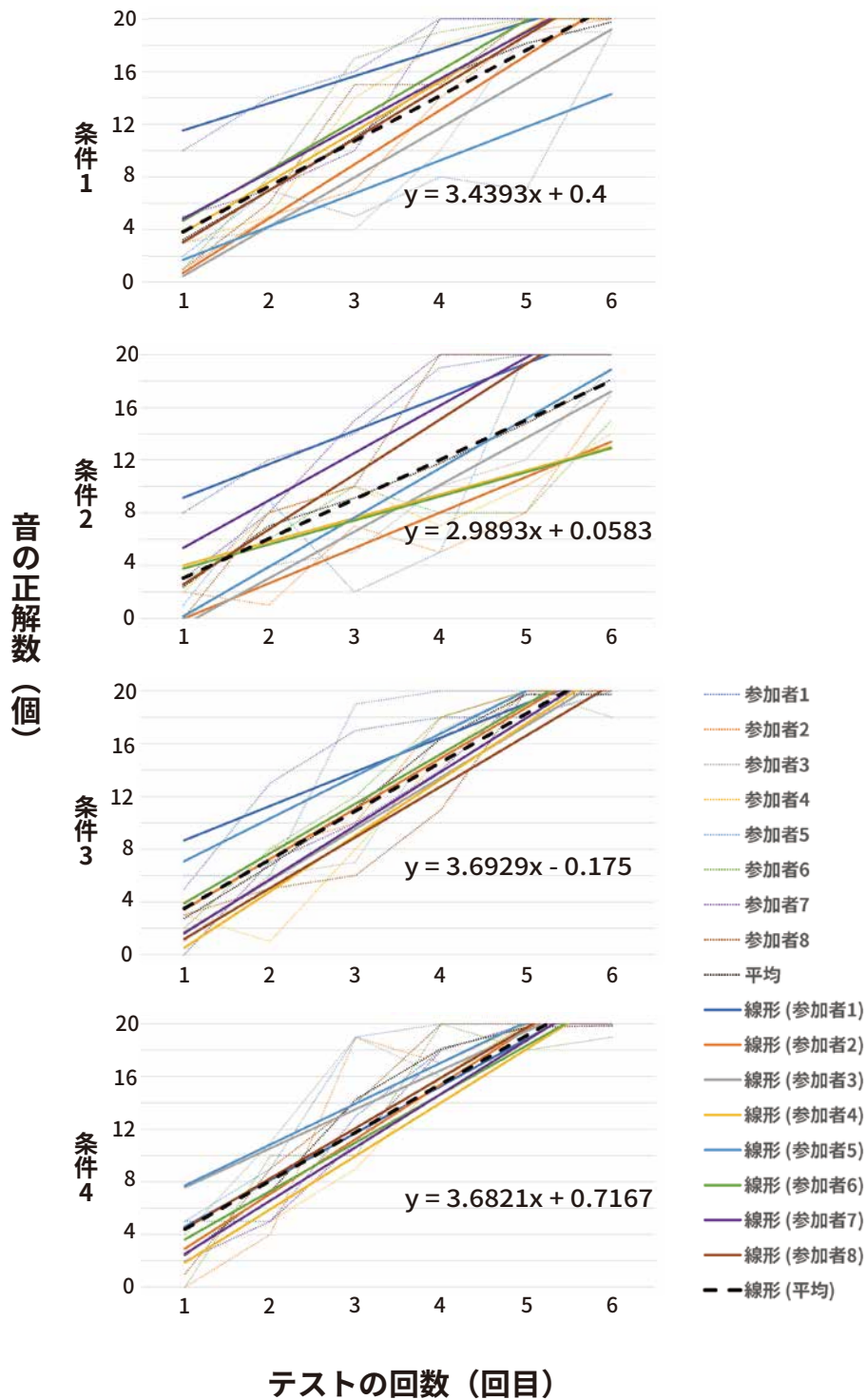


図 6.4: 実験 2 における条件ごとの各参加者の音の正解数の推移に対し求めた近似直線。グラフ中の式は、平均の近似直線の式を表す。

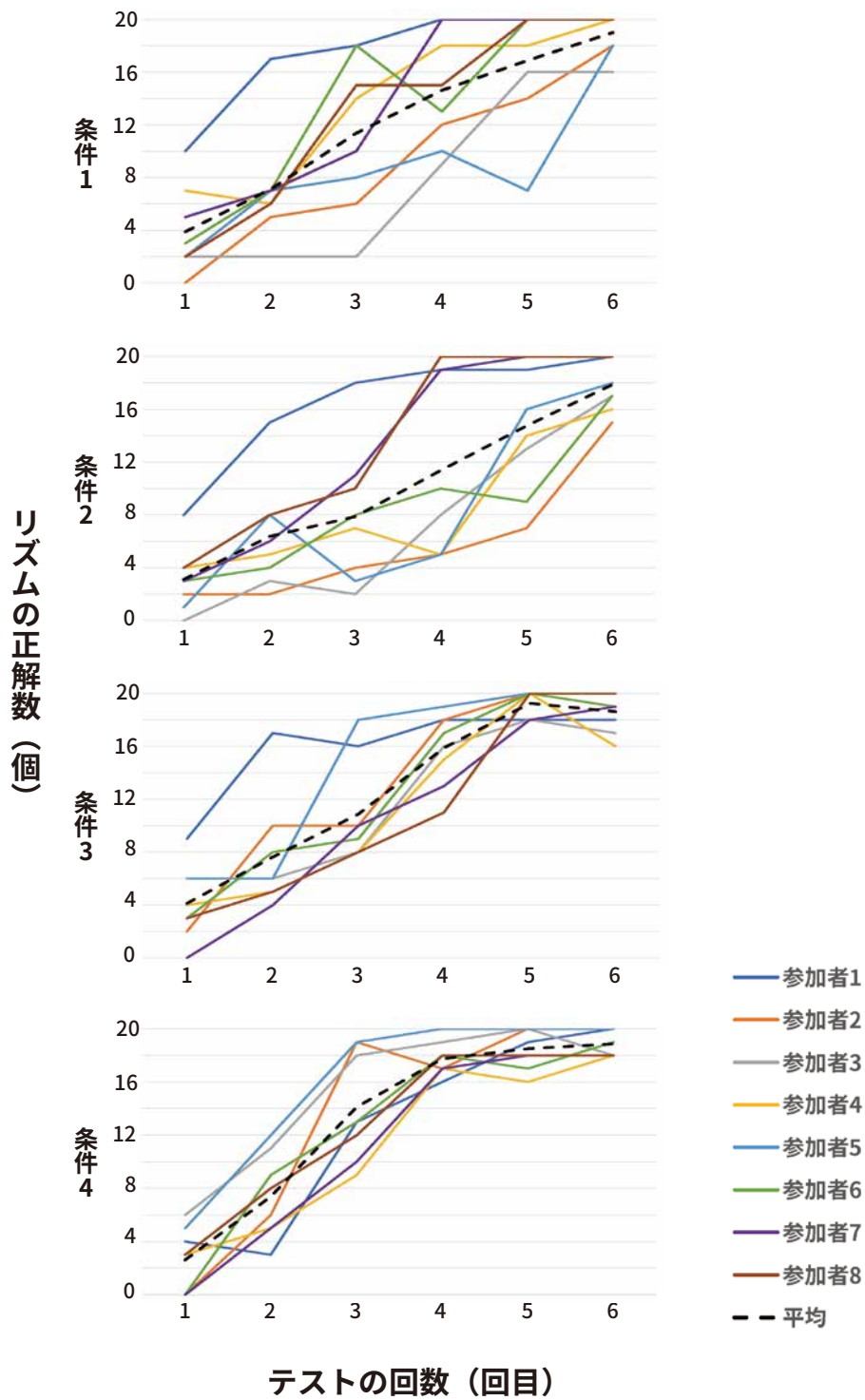


図 6.5: 実験 2 における条件ごとのリズムの正解数の推移.

表 6.3: 実験 2 の各テストにおける条件ごとの音の正解数の平均.

	1 回目	2 回目	3 回目	4 回目	5 回目	6 回目
条件 1	3.25	7.00	11.00	15.50	18.13	19.75
条件 2	2.38	7.00	9.13	11.75	14.75	18.13
条件 3	2.75	6.75	11.13	16.38	19.75	19.75
条件 4	2.38	7.25	14.25	18.13	19.75	19.88

表 6.4: 実験 2 における条件ごとの音の正解数の平均の変化量.

	1-2 回目	2-3 回目	3-4 回目	4-5 回目	5-6 回目
条件 1	3.75	4.00	4.50	2.63	1.63
条件 2	4.63	2.13	2.63	3.00	3.38
条件 3	4.00	4.38	5.25	3.38	0.00
条件 4	4.88	7.00	3.88	1.63	0.13

成績の個人差が小さいことが分かる。これより、振動および光両方、ならびに光のみの提示は、リズムの習得において多くの人に同様の効果をもたらす可能性が示唆された。

また、各テストにおける条件ごとのリズムの正解数の平均を表 6.5 に示す。表 6.5 より、3 および 4 回目のリズムの正解数の平均は条件 4 が最も高く、2-5 回目は条件 1 以上の正解数であった。また、2 回目以降は条件 2 が最も成績が低かった。これより、振動および光両方の提示はリズムの習得に効果があるが、振動のみでは妨げになる可能性が示唆された。

図 6.5 の各参加者の成績の推移に対し近似直線を求めたグラフを図 6.6 に示す。グラフ中の式は、平均の近似直線の式を表す。図 6.6 より、条件 4, 3, 1, 2 の順に平均の近似曲線の傾きが大きいことが分かる。これより、振動および光両方、ならびに光のみの提示はリズムの練習効果を高めるが、振動のみでは逆に妨げになる可能性が示唆された。

さらに、図 6.5 の各条件における平均の成績の変化量をテスト 1-2, テスト 2-3, テスト 3-4, テスト 4-5, およびテスト 5-6 の間において算出した (表 6.6)。表 6.6 より、1-2 回目および 2-3 回目では条件 4 の変化量が最も大きい。これより、振動および光両方の提示によりリズムの習得を早める効果がある可能性が示唆された。一方で 1-2 回目、および 2-3 回目では条件 2 の変化量が最も小さい。これより、振動のみの提示によりリズムの習得を遅める可能性が示唆された。

### 6.4.3 SUS

各条件における SUS スコアの平均は、条件 1 が 65.94 (SD=20.91), 条件 2 が 65.31 (SD=17.79), 条件 3 が 78.13 (SD=10.59), 条件 4 が 75.00 (SD=9.68) であった (図 6.7)。これより、光のみまたは振動および光両方の提示により練習の際のユーザビリティを向上させる一方、振動のみで

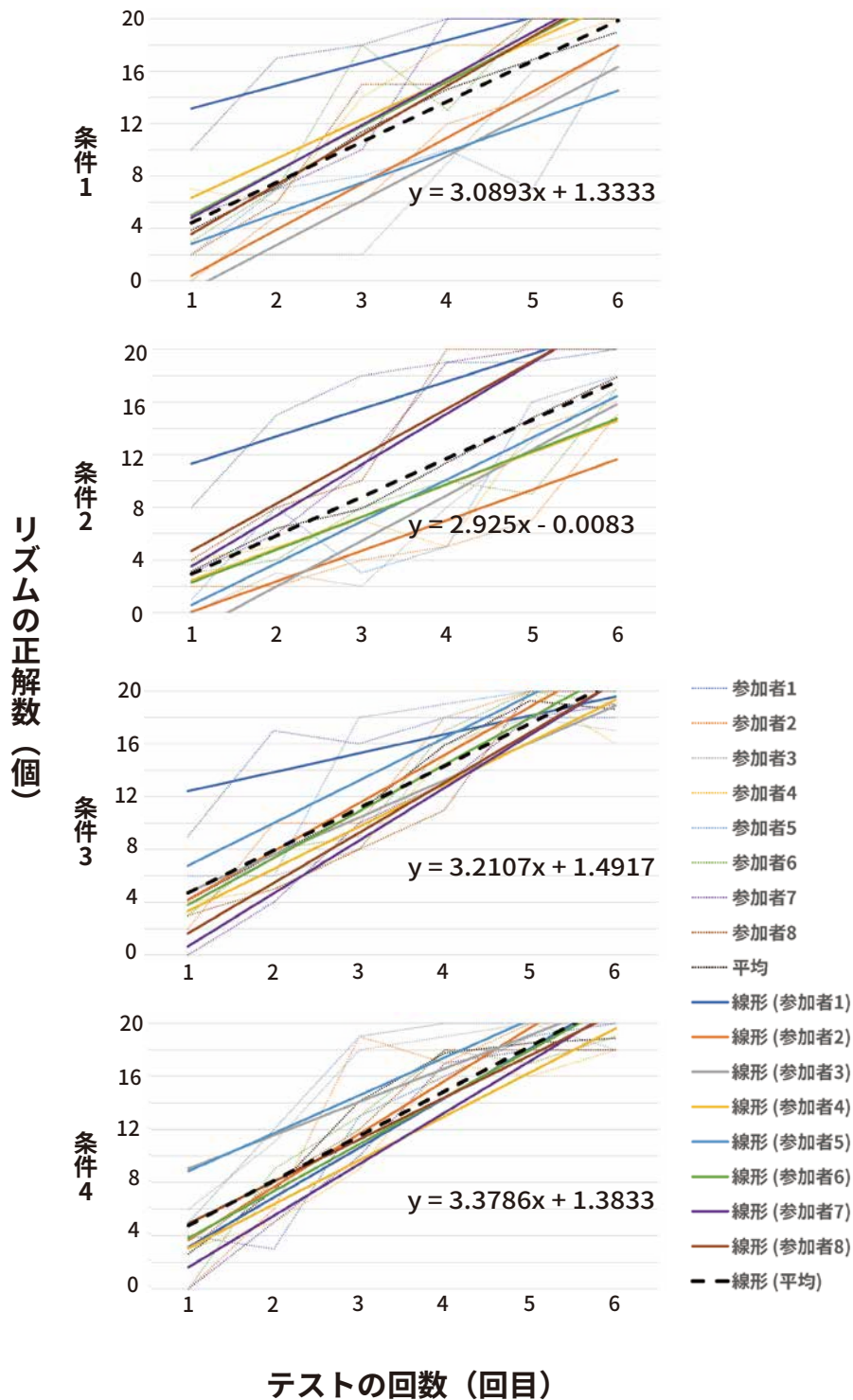


図 6.6: 実験 2 における条件ごとの各参加者のリズムの正解数の推移に対し求めた近似直線. グラフ中の式は, 平均の近似直線の式を表す.

表 6.5: 実験 2 の各テストにおける条件ごとのリズムの正解数の平均.

	1 回目	2 回目	3 回目	4 回目	5 回目	6 回目
条件 1	3.88	7.13	11.38	14.63	16.88	19.00
条件 2	3.13	6.38	7.88	11.38	14.75	17.88
条件 3	4.13	7.63	10.88	15.88	19.25	18.63
条件 4	2.63	7.38	14.13	17.75	18.5	18.88

表 6.6: 実験 2 における条件ごとのリズムの正解数の平均の変化量.

	1-2 回目	2-3 回目	3-4 回目	4-5 回目	5-6 回目
条件 1	3.25	4.25	3.25	2.25	2.13
条件 2	3.25	1.50	3.50	3.38	3.13
条件 3	3.50	3.25	5.00	3.38	-0.63
条件 4	4.75	6.75	3.63	0.75	0.38

はユーザビリティの向上に効果がない可能性が示唆された。この結果に対して、Shapiro-Wilk 検定を行った結果、正規性が示された。一元分散分析を行った結果、有意差は見られなかった。

#### 6.4.4 NASA-TLX

各条件における NASA-TLX スコアの平均は、条件 1 が 68.75 (SD=10.48)、条件 2 が 69.63 (SD=8.41)、条件 3 が 63.21 (SD=8.37)、条件 4 が 61.29 (SD=10.08) であった (図 6.8)。これより、光のみまたは振動および光両方の提示により練習の際の作業負荷を軽減する一方、振動のみでは作業負荷を増加させる可能性が示唆された。この結果に対して、Shapiro-Wilk 検定を行った結果、正規性が示された。一元分散分析を行った結果、有意差は見られなかった。

#### 6.4.5 その他のアンケート

本項では、SUS および NASA-TLX 以外のアンケートの結果を示す。

##### 練習しやすかった条件

実験の最後のアンケートにおいて、各条件を練習しやすかった順に回答してもらった。結果を表 6.7 に示す。表 6.7 より、練習しやすい (1 番目および 2 番目) と回答した人数が最も多かったのは条件 4 (4 名 + 3 名 = 7 名) であり、練習しにくい (3 番目および 4 番目) と回答した人数が最も多かったのは条件 1 (4 名 + 3 名 = 7 名) であった。



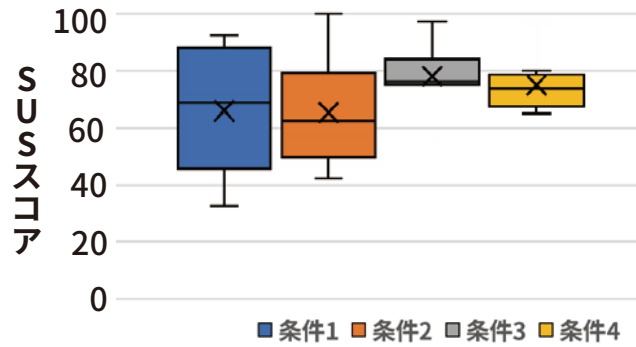


図 6.7: 実験 2 における条件ごとの SUS スコアの平均.

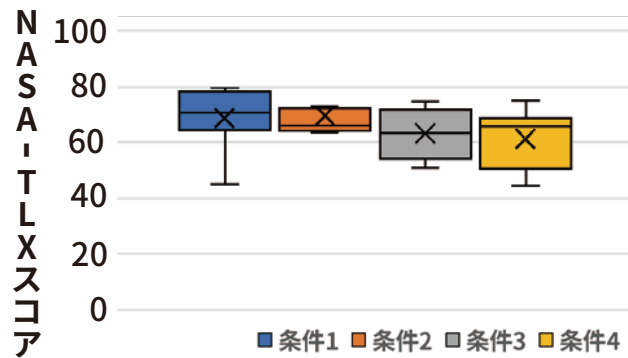


図 6.8: 実験 2 における条件ごとの NASA-TLX のスコアの平均.

表 6.7: 実験 2 において各条件を練習しやすかった順に回答してもらった際の順位および人数.

	1 番目	2 番目	3 番目	4 番目
条件 1	0 人	1 人	4 人	3 人
条件 2	1 人	1 人	2 人	4 人
条件 3	3 人	3 人	1 人	1 人
条件 4	4 人	3 人	1 人	0 人

表 6.8: 実験 2 において各条件を今後練習に用いたい順に回答してもらった際の順位および人数.

	1 番目	2 番目	3 番目	4 番目
条件 1	0 人	0 人	4 人	4 人
条件 2	2 人	1 人	2 人	3 人
条件 3	3 人	2 人	2 人	1 人
条件 4	3 人	5 人	0 人	0 人

### 今後練習に用いたい条件

実験の最後のアンケートにおいて、今後ピアノの練習を行う際に最も用いたい条件および最も用いたくない条件を回答してもらった。結果を表 6.8 に示す。表 6.8 より、今後練習に用いたい（1 番目および 2 番目）と回答した人数が最も多かったのは条件 4（3 名 + 5 名 = 8 名）であり、練習に用いたくない（3 番目および 4 番目）と回答した人数が最も多かったのは条件 1（4 名 + 4 名 = 8 名）であった。

## 6.5 考察

本節では、実験結果より得られる考察を述べる。

### 6.5.1 成績

6.4.1 節より、振動および光両方、ならびに光のみの提示は、多くの人に対して運指の練習効果を高める一方、振動のみでは妨げになる可能性が示唆された。さらに、振動および光両方、ならびに光のみの提示により運指の習得を早める一方、振動のみの提示により運指の習得を遅める効果がある可能性が示唆された。アンケートにおいて、「振動のみではどの指が振動したか分からないことがあったが、光もあることにより動かすべき指が分かった」とのコメントがあったように、光により楽譜が瞬時に読めない練習者でもフレーズを正確に理解できるため、光は運指の理解に役立ったと考えられる。一方、振動のみでは運指を正確に理解できなかったため、振動は運指の習得を妨げたと考えられる。

6.4.2 節より、振動および光両方、ならびに光のみの提示は、多くの人に対してリズムの練習効果を高める一方、振動のみでは妨げになる可能性が示唆された。さらに、振動および光両方の提示によりリズムの習得を早める一方、振動のみの提示によりリズムの習得を遅める効果がある可能性が示唆された。アンケートにおいて、「振動により音の長さがより実感できた」とのコメントがあったように、視覚を通してリズムを正確に提示できる光に加え、振動があることによりリズムを少ない意識で感じられ、身体に残ったため、振動および光はリズムの練習に役立ったと考えられる。また、「振動のみではどの指か分からないことがあり、逆

に邪魔に感じた」とのコメントがあったように、振動のみでは指の識別に意識が持っていかれてしまい曲に集中できなかつたため、振動はリズムの習得を妨げたと考えられる。

## 6.5.2 主観評価

6.4.4 節より、光のみ、または振動および光両方の提示により練習の際の作業負荷を軽減する一方、振動のみでは作業負荷を増加させる可能性が示唆された。アンケートから、「振動があると目で見なくても動かす指が分かり、光もあったので目で見ても分かりやすかつた」、「光があると譜面を読む努力量が少なかつた」、および「自分の譜読みが正しいかすぐに確認でき、あまり音符を読まなくても正解の音が分かる」などの意見があったため、光および振動は、譜読みに不慣れな練習者の譜読みのサポートに繋がり、譜読みの負担を軽減できたと考えられる。また、「どの指に振動が起きているのか分からない時があつた」とのコメントがあつたことから、振動した指を把握できない場合には振動が逆にストレスになってしまい作業負荷を増加させたと考えられる。

6.4.5 節および 6.4.5 節より、練習しやすいおよび今後練習に用いたいと回答した人数が最も多かつたのは条件 1 であつた。これより、振動および光両方は他の条件に比べ、練習者に比較的好まれる方法であることが示唆された。アンケートでは、譜読みのサポートになつたという意見以外に「正しい運指のフィードバックを得られた」という意見があつたことから、振動および光両方は譜読みのサポートのみでなくフィードバックとして暗譜のサポートにもつながることが分かつた。また、練習しにくいおよび今後練習に用いたくないと回答した人数が最も多かつたのは条件 1 であつた。これより、振動および光両方なしは他の条件に比べ、練習者に比較的好まれない方法であることが示唆された。アンケートにおいて、「フィードバックがないため指を正しく動かしているか確認できず難しい」、および「楽譜が読めないため音およびリズムを楽譜から理解するのが難しい」などの意見があつたことから、振動および光両方なしでは運指およびリズムを理解するための補助ならびに確認するためのフィードバックがないために好まれないと考えられる。つまり、振動および光は運指およびリズムの補助ならびにフィードバックとして役立つたと考えられる。

## 第7章 議論および今後の課題

本章では、実験および練習システムの課題ならびに今後の展望を述べる。

### 7.1 追加で実施すべき調査

本節では、追加で実施すべき調査を述べる。

#### 7.1.1 複雑な曲の練習における効果の調査

今回の実験では、ピアノ初心者を対象とし、手の横移動および和音のない片手のみを用いて演奏可能な短いフレーズを用いた。しかし、実際のピアノの曲は、手の横移動および和音を含む両手の曲が多く、曲のレベルによって振動および光が与える効果は変わる可能性がある。このため、このような曲の練習に対して振動および光が与える効果を今後調査する必要がある。これにより生じる課題として、複数の指が振動することによりどの指が振動したか知覚しにくくなること、複数の指の光を同時に追うことができなくなること、ならびに運指および音が分かっていても鍵盤の位置が分からないために弾けないことが考えられる。まずはこのような現象が実際に生じるのかを確認し、対応を検討する必要がある。

#### 7.1.2 場所を問わない練習における効果の調査

本研究は、ピアノ初心者の場所を問わない練習において効果的な練習方法を示すことを目的としている。しかし、今回の実験では練習を行う場所が固定されており、開発した練習システムが場所を問わない練習に適しているかについては調査できていない。今後、練習システムを数日間持ち運び、練習者の好きなタイミングで練習システムを使用して練習してもらうことにより、場所を問わない練習における効果を調査する。なお、タスクおよび評価項目などの調査内容、ならびに使用する練習システムは第6章の実験2と同様のものと考えている。

#### 7.1.3 練習者の習熟度による効果の違いの調査

本研究は、ピアノ初心者を主な対象とし、ピアノ初心者の練習において効果的な練習方法を示すことを目的としている。このため、今回の実験では譜読みが苦手な初心者レベルの人を

参加者とした。しかし、振動および光は習熟度の高い人に対しても効果がある可能性が考えられる。これを示すことができれば、振動および光の有用性はさらに高まる。このため、今後、練習者の習熟度により振動および光が与える効果の違いについても調査する必要がある。

## 7.2 練習システムの改良

本節では、今後練習システムをより良くするために考えられる改良点を述べる。

### 7.2.1 振動を提示する強度および場所の検討

今回行った実験により、振動のみを提示した場合には、フレーズの練習を妨げ、習得を遅める可能性が示唆された。6.5.1 節において述べたように、これは、どの指が振動したかが分かりにくかったことが原因であると考えられる。しかし、本研究では、振動を認識しやすい強度および提示場所など、最適な振動の提示方法について調査を行っていない。このため、実験において振動が与えた負の効果については、実装面での工夫により改善できる可能性がある。以上より、今後、振動を提示する強度および場所を検討し、その後に振動が与える効果を再度調査する必要がある。

### 7.2.2 振動および光を提示するタイミングの検討

現在の練習システムでは、振動および光の提示をピアノ音と同時に行っている。しかし、振動または光を提示されてから指を動かした場合、ピアノ音と打鍵のタイミングがずれてしまう。このため、練習の初期段階に次に動かすべき指が分かっていない場合、ピアノ音と同時に打鍵できるようにするためには、振動および光を提示するタイミングを早める必要がある。一方で、実験のアンケートより、振動および光は正しく指を動かしているか確認するためのフィードバックとしても使われていたことが分かった。振動および光をフィードバックとして使用する場合には、まずは自分で指を動かし、打鍵した後に振動および光が提示されるべきであるため、現在のタイミングが妥当である。以上より、振動および光を提示するタイミングについて今後検討する、または用途に合わせて選択できるようにする必要がある。

### 7.2.3 グローブ型デバイスへの機能の追加

今回作製したグローブ型デバイスは、練習者に対し音、運指およびリズムを提示できるが、指および鍵盤位置の対応に関する情報を提示できていない。このため、指および鍵盤が一対一対応でない、手の横移動を伴う曲の練習を行う際に、音、運指およびリズムが分かっても指および鍵盤位置の対応が分からないためになかなか曲を弾けるようにならないという状況が起ころうと考えられる。この課題を解決するために、グローブ型デバイスに対し、別の色のLEDを追加する(図7.1a)、別の場所へ振動アクチュエータを追加する(図7.1b)、また

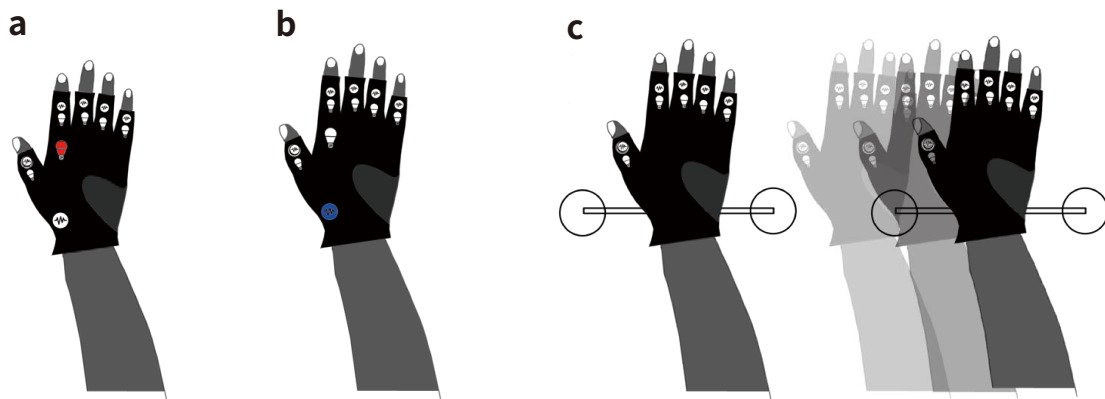


図 7.1: グローブ型デバイスの改良案. a) 別の色の LED を追加した様子. b) 別の場所へ振動アクチュエータを追加した様子. c) 手のひら側にローラを追加した様子.

は手のひら側にローラを追加する（図 7.1c）ことなどにより，指および鍵盤位置の対応に関する情報を提示できると考えている．

#### 7.2.4 練習システムの小型化

現在は練習のために PC，グローブ型デバイス，および紙媒体の楽譜を使用している．しかし，利便性を高めるためには機材をより小型化することが望まれる．現在検討している案としては，楽譜を紙ではなくスマートフォンにより提示すること，グローブおよび PC 間の有線による USB 接続をグローブおよびスマートフォン間の Bluetooth による無線接続に変更すること，ならびにピアノ音，振動，および光の制御を PC ではなくスマートフォンにより行うことなどがあげられる．これにより，図 7.2 に示すような環境で練習を行うことができ，システムを小型化できる．



図 7.2: 楽譜を紙ではなくスマートフォンにより提示すること, グローブおよび PC 間の有線による USB 接続をグローブおよびスマートフォン間の Bluetooth による無線接続に変更すること, ならびにピアノ音, 振動, および光の制御を PC ではなくスマートフォンにより行うことにより小型化されたシステムを用いて練習する様子.

## 第8章 おわりに

本研究では、ピアノ初心者の場所を問わない練習において効果的な練習方法を示すことを目的とした。そのために、場所を問わないピアノの練習に振動および光が与える効果を調査した。また、調査のために、場所を問わず振動および光を提示できるグローブ型デバイスを作製した。さらに、練習用アプリケーション、グローブ型デバイス、および紙媒体により構成される練習システムを開発した。練習システムは、練習用アプリケーションから再生されるピアノ音、グローブ型デバイスに装着された振動アクチュエータおよび光、ならびに紙媒体に印刷された楽譜を用いて、練習する曲の音、リズム、および運指の3つの情報を練習者に提示する。開発した練習システムを用いて、ピアノがない環境においてピアノ初心者が片手のみを用いて演奏可能な短いフレーズの練習を行う際に振動および光が与える効果を調査するための実験を行った。実験では、練習の際に提示する情報による練習効果の違いを計測した。比較条件は、ピアノ音および楽譜、ピアノ音、振動および楽譜、ピアノ音および光、ならびにピアノ音、振動および光の4条件であった。しかし、最初に行った実験では、各条件において成績がほとんど変わらない、および人ごとにばらつきが大きいため、練習効果の高い条件を明らかにすることはできなかった。この原因として、実験設計に課題が見られたため、実験設計を見直し、再度実験を行った。比較条件は、ピアノ音および楽譜、ピアノ音、振動および楽譜、ピアノ音、光および楽譜、ならびにピアノ音、振動、光および楽譜の4条件であった。実験の結果、振動および光両方の提示により多くの人に対して運指およびリズムの習得を早める効果があること、ならびに振動および光両方の提示は練習者に比較的好まれる練習方法であることが示された。



## 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、Simona Vasilache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、主指導教員である志築文太郎先生には、研究の進め方、論文執筆、発表の方法などの研究に関することのみならず、日常生活における研究者の心構えなど多岐に渡るご指導を頂きました。先生の熱心なご指導のおかげで、これまでの研究成果の発表および本論文の執筆ができました。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先輩方、同輩、後輩には研究生活においてお世話になりました。特に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などの研究に関する多くのご支援に加えて、研究室においても研究の進め方や研究生活について多くのご助言を頂きました。中でも高倉礼さん、國分晴利さん、日高拓真さん、西川宜利さんには、ハードウェア面において多くのことを教えていただきました。研究室配属当初はハードウェアに触れた経験が少なかった私が自分の興味のあるテーマで研究を進めることができたのは、皆様のおかげです。ありがとうございました。また、研究室の皆様には、日常生活においても深く関わっていただき、皆様のおかげで、3年間楽しく充実した学生生活を送ることができました。重ねて感謝いたします。

また、本研究と並行して行っていた、漆に関する共同研究を進めるにあたり、感触工学研究室の橋本悠希先生には多大なご意見とご指導を頂きました。深く感謝いたします。加えて、漆班のメンバーである池田凌さん、西川宜利さん、新由衣さん、井口凌輔さんには大変お世話になりました。チーム研究ならではの困難もありましたが、共に乗り越えた先にある、皆で1つのことを成し遂げた時の喜びを、皆様との研究活動を通して知ることができました。

最後に、これまで私を育て、どんな時も支えてくださった家族、学生生活に彩りを与えてくださった友人、学生生活において関わってくださった全ての方々に心より感謝を申し上げます。ありがとうございました。

## 参考文献

- [Bro96] John. Brooke. SUS:A Quick and Dirty Usability Scale. *Usability Evaluation in Industry*, pp. 189–194, 1996.
- [CAS] CASIO. 光ナビゲーションキーボード. <https://www.casio.com/jp/electronic-musical-instruments/product.LK-320> (最終閲覧日: 2023年2月13日).
- [DPB21] Rumen Donchev, Erik Pescara, and Michael Beigl. Investigating Retention in Passive Haptic Learning of Piano Songs. *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*, Vol. 5, No. 2, pp. 60:1–60:14, 2021.
- [DSJ<sup>+</sup>90] Roger B. Dannenberg, Marta Sanchez, Annabelle Joseph, Peter Capell, Robert Joseph, and Ronald Saul. A Computer-Based Multi-Media Tutor for Beginning Piano Students. *Journal of New Music Research*, Vol. 19, No. 2-3, pp. 155–173, 1990.
- [Gri08] Graham Grindlay. Haptic Guidance Benefits Musical Motor Learning. In *2008 Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, pp. 397–404. IEEE, 2008.
- [GTD<sup>+</sup>22] Tan Gemicioglu, Noah Teuscher, Brahmi Dwivedi, Soobin Park, Emerson Miller, Celeste Mason, Caitlyn Seim, and Thad Starner. Passive Haptic Rehearsal for Accelerated Piano Skill Acquisition. *arXiv e-prints*, 2022. 4 pages.
- [HBDH10] Simon Holland, Anders J. Bouwer, Mathew Dalgelish, and Topi M. Hurtig. Feeling the Beat Where It Counts: Fostering Multi-Limb Rhythm Skills with the Haptic Drum Kit. In *Proceedings of the Fourth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*, TEI '10, pp. 21–28, New York, NY, USA, 2010. Association for Computing Machinery.
- [HDS08] Kevin Huang, Ellen Yi-Luen Do, and Thad Starner. PianoTouch: a Wearable Haptic Piano Instruction System for Passive Learning of Piano Skills. In *Proceedings of International Symposium on Wearable Computers*, ISWC '08, pp. 41–44. IEEE, 2008.
- [HS88] Sandra G. Hart and Lowell E. Staveland. Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research. In Peter A. Hancock and Na-

jmedin Meshkati, editors, *Human Mental Workload*, Vol. 52 of *Advances in Psychology*, pp. 139–183. North-Holland, 1988.

- [HSD<sup>+</sup>10] Kevin Huang, Thad Starner, Ellen Do, Gil Weinberg, Daniel Kohlsdorf, Claas Ahlrichs, and Ruediger Leibrandt. Mobile Music Touch: Mobile Tactile Stimulation for Passive Learning. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '10, pp. 791–800, New York, NY, USA, 2010. Association for Computing Machinery.
- [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. IEEE, 2017.
- [KM06] Tamaki Kitamura and Masanobu Miura. Constructing a support system for self-learning playing the piano at the beginning stage. In *Proceedings of International Conference on Music Perception and Cognition*, pp. 258–262. Bononia University Press, 2006.
- [KS10] Daniel Kohlsdorf and Thad Starner. Mobile Music Touch: The Effect of Primary Tasks on Passively Learning Piano Sequences. In *Proceedings of International Symposium on Wearable Computers*, ISWC '10, pp. 1–8. IEEE, 2010.
- [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, pp. 33:1–33:2, New York, NY, USA, 2017. Association for Computing Machinery.
- [NMTS21] Hinako Nozaki, Kaori Minawa, Rei Takakura, and Buntarou Shizuki. Investigating Reaction Accuracy of Extended Touchscreen with Conductive Ink for Mobile Virtual Piano. In *Asian CHI Symposium 2021*, Asian CHI Symposium 2021, pp. 111–113, New York, NY, USA, 2021. Association for Computing Machinery.
- [PT19] Ferhat Pala and Pınar Türker. Developing a Haptic Glove for Basic Piano Education. *World Journal on Educational Technology: Current Issues*, Vol. 11, pp. 38–47, 2019.
- [RRW<sup>+</sup>14] Katja Rogers, Amrei Röhlig, Matthias Weing, Jan Gugenheimer, Bastian Könings, Melina Klepsch, Florian Schaub, Enrico Rukzio, Tina Seufert, and Michael Weber. P.I.A.N.O.: Faster Piano Learning with Interactive Projection. In *Proceedings of the*

*Ninth ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces, ITS '14*, pp. 149–158, New York, NY, USA, 2014. Association for Computing Machinery.

- [SES15] Caitlyn Seim, Tanya Estes, and Thad Starner. Towards Passive Haptic Learning of Piano Songs. In *Proceedings of 2015 IEEE World Haptics Conference, WHC '15*, pp. 445–450. IEEE, 2015.
- [SON] SONY. Xperia Touch G1109. <https://www.sonymobile.co.jp/product/smartproducts/g1109/> (最終閲覧日：2023年2月13日) .
- [TSK<sup>+</sup>18] Enkhtogtokh Togootokh, 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, 2018.
- [YAMa] YAMAHA. ピアノの大きさは？ 正しい設置方法は？ 購入や引っ越しの際に知っておきたいこと. <https://jp.yamaha.com/sp/myujin/17877.html#:~:text=%E3%83%94%E3%82%A2%E3%83%8E%E3%81%AE%E5%A4%A7%E3%81%8D%E3%81%95%E3%81%A3%E3%81%A6,%E3%82%B9%E3%83%9A%E3%83%BC%E3%82%B9%E3%82%92%E8%80%83%E3%81%88%E3%81%BE%E3%81%97%E3%82%87%E3%81%86%E3%80%82> (最終閲覧日：2023年2月13日) .
- [YAMb] YAMAHA. ヤマハ 電子ピアノ. <https://www.yamahamusic.jp/shop/ginza/item/digitalpianos.html#clv> (最終閲覧日：2023年2月13日) .
- [YAMc] YAMAHA. ヤマハ電子キーボード「ez-300」. [https://www.yamaha.com/ja/news\\_release/2020/20111601/](https://www.yamaha.com/ja/news_release/2020/20111601/) (最終閲覧日：2023年2月13日) .
- [河合] 河合楽器製作所. 簡単！ ピアノマスター. <https://cm.kawai.jp/products/pm/> (最終閲覧日：2023年2月13日) .
- [株式 a] 株式会社エルパ. エルパ 厳選された音大出身の講師が担当する安心のピアノオンラインレッスン. <https://www.music-lpa.com/lp/online.html> (最終閲覧日：2023年2月13日) .
- [株式 b] 株式会社スモールブリッジ. オンライン習い事サイト カフェトーク. <https://cafetalk.com/?lang=ja> (最終閲覧日：2023年2月13日) .
- [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. 日本ソフトウェア科学会, 2018. 2 pages.
- [山田 11] 山田和広, 中平勝子. ピアノ初学者に向けたピアノ演奏学習支援システムの提案. 情報科学技術フォーラム講演論文集, 第 10 巻, pp. 709–712, 2011.

- [山田 15] 山田和毅, 山本邦雄, 乃万司. 音階と鍵盤の視覚的対応付けによるピアノ学習支援システム. エンタテインメントコンピューティングシンポジウム 2015 論文集, Vol. 2015, pp. 378–385, 2015.
- [松原 06] 松原正樹, 遠山紀子, 斎藤博昭. ピアノ初級者のための独習支援システムの提案. 情報処理学会研究報告音楽情報科学 (MUS), Vol. 2006, No. 19 (2006-MUS-064), pp. 79–84, 2006.
- [菅家 16] 菅家浩之, 寺田努, 塚本昌彦. 触覚提示を用いたフレーズ内在化に基づく打楽器学習支援システム. インタラクション 2016, pp. 89–96. 情報処理学会, 2016.
- [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, Vol. 2017, No. 1, pp. 983–984, 2017.
- [大島 07] 大島千佳, 井ノ上直己. 不得手要素を克服させるピアノ学習支援システムにむけて. 情報処理学会研究報告音楽情報科学 (MUS), Vol. 2007, No. 81 (2007-MUS-071), pp. 185–190, 2007.
- [大和 03] 大和田茂. ピアノ演奏・学習支援ソフト. IPA 未踏ソフトウェア報告会, 2003.
- [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, 2011.
- [竹川 12] 竹川佳成. リズム学習を考慮したピアノ演奏学習支援システムの構築. 情報処理学会インタラクション 2012, pp. 73–80, 2012.
- [竹川 16] 竹川佳成, 福家悠人, 柳英克. モチベーションを考慮したピアノ学習支援システム. 情報処理学会論文誌, Vol. 57, No. 4, pp. 1193–1206, 2016.
- [丁慶 11] 丁慶松, 笠原信一, 安藤大地. AR による「紙のピアノ」の提案. 情報処理学会シンポジウム論文集, Vol. 2011, No. 3, pp. 633–636, 2011.
- [田中] 田中純之介, 勝間亮. カメラを用いたバーチャル楽器におけるフレームレートによる演奏制限の解決法. 2018 年度 情報処理学会関西支部 支部大会 講演論文集, Vol. 2018, 2018. 6 pages.
- [藤田 08] 藤田顕次, 大野博之, 稲積宏誠. 習熟度を考慮した複数楽譜からのピアノ譜生成手法の提案. 情報処理学会研究報告音楽情報科学 (MUS), Vol. 2008, No. 89 (2008-MUS-077), pp. 47–52, 2008.
- [樋川 06] 樋川直人, 大島千佳, 西本一志, 苗村昌秀. The Phantom of the Piano : 自学自習を妨げないピアノ学習支援システムの提案. 情報処理学会シンポジウムシリーズ, Vol. 2006, No. 4, pp. 69–70, 2006.

- [福家 15] 福家悠人, 竹川佳成, 柳英克. モチベーションを考慮したピアノ学習支援システムの設計と実装. インタラクション 2015, pp. 118–127. 情報処理学会, 2015.
- [福田 17] 福田翼, 中村栄太, 糸山克寿, 吉井和佳ほか. 楽譜簡略化と自動補完伴奏によるピアノ演奏練習支援システム. 研究報告音楽情報科学 (MUS), Vol. 2017, No. 21, pp. 1–4, 2017.
- [文部] 文部科学省. 子どもの学校外での学習活動に関する実態調査報告. [https://www.mext.go.jp/b\\_menu/houdou/20/08/08080710/001.pdf](https://www.mext.go.jp/b_menu/houdou/20/08/08080710/001.pdf) (最終閲覧日: 2023年2月13日) .

# 著者論文リスト

## 本論文に関する論文および発表

- 査読あり国内会議論文
  1. 野崎 陽奈子, 志築 文太郎. いつでもどこでもピアノ練習が可能なグローブ型デバイスを用いた練習方法の提案. 第30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 (WISS2022), 日本ソフトウェア科学会, 2022年12月, 4 pages.
- 査読なし国内会議論文
  1. 野崎 陽奈子, 志築 文太郎. ピアノ運指を学ぶための振動提示鍵盤の試作. 第29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 (WISS2021), 日本ソフトウェア科学会, 2021年12月, 3 pages.
  2. 野崎 陽奈子, 志築 文太郎. 場所を問わずピアノ練習が可能なグローブ型デバイスを用いた手の横移動を伴わない片手フレーズの練習効果の調査. 情報処理学会研究報告 (HCI-201), 情報処理学会, 2023年1月, 8 pages.

## その他論文および発表

- 査読あり国際会議論文
  1. Hinako Nozaki, Kaori Minawa, Rei Takakura, Buntarou Shizuki. Investigating Reaction Accuracy of Extended Touchscreen with Conductive Ink for Mobile Virtual Piano. CHI 2021 symposia on Asian CHI Symposium: HCI Research from Asia and on Asian Contexts and Cultures, Association for Computing Machinery, May 2021, pp. 111-113.
  2. Naoto Nishida, Hinako Nozaki, Buntarou Shizuki. Laugh at Your Own Pace: Basic Performance Evaluation of Language Learning Assistance by Adjustment of Video Playback Speeds Based on Laughter Detection. Learning at Scale 2022, Association for Computing Machinery, Jun 2022, pp. 368-373.
  3. Hinako Nozaki, Ryo Ikeda, Yoshiki Nishikawa, Yui Atarashi, Yuki Hashimoto, Buntarou Shizuki. Prototyping an Urushi Display that Changes Color Interactively by Temperature Control. 2022 Nicograph International, IEEE, Jun 2022, pp. 69-74.

- 査読なし国内会議論文

1. 西田 直人, 野崎 陽奈子, 志築 文太郎. 表情に基づく再生速度自動調節機能を備えた外国語学習支援の提案. 第 29 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 (WISS2021), 日本ソフトウェア科学会, 2021 年 12 月, 3 pages.

- 論文なし国内会議発表

1. 西川 宜利, 野崎 陽奈子, 井口 凌輔, 新 由衣, 橋本 悠希, 志築 文太郎. サーモクロミック色漆を用いたインタラクティブに模様が変わるおぼん型アプリケーションの試作. 第 30 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 (WISS2022), 日本ソフトウェア科学会, 2022 年 12 月.



## 付録A 実験の際に用いた各種書類

本研究における実験にて用いた, 実験手順書および実験2における譜読みの説明書を以下に示す. さらに, 各実験に用いた実験後アンケートの用紙も合わせて示す.

## A.1 実験1の手順書

### 実験に関する説明

- 複数の学習条件にてフレーズの学習を行っていただきます。本研究ではピアノがない環境での学習を想定しているため、学習にはピアノを用いません。各学習条件で一定時間学習した際にどの程度弾けるようになるかを調査します。
- まず、デバイスについて説明します。
  - 本デバイスは、ピアノの学習の補助を行うものです。
  - グローブの各指に振動子と LED が装着されており、振動および光によってリズムおよび運指を提示します。
  - グローブは右手に装着してください。
- 以下に実験手順を示します。
  - 次に行う学習方法の説明をします。
  - (グローブを右手に装着し、)その手を指定された位置(ドレミファソ)に置きます。
  - (グローブから)情報を提示されながらフレーズを聞きます。鍵盤の位置と音の対応を確認してください。
  - ピアノから手を外し、学習を開始します。

学習中には、条件ごとにピアノ音、振動、光、および楽譜のいずれかもしくはそれらの組み合わせが提示されるため、これらの情報をもとに意識的に音およびリズムの学習を行ってください。楽譜には指番号(1~5)が記載されているので、楽譜が読めない方は参考にしてください。学習するフレーズは指と音が1対1対応になっています(親指ではドを、人差し指ではレを弾く)。

フレーズは4回繰り返されます。この際身体は自由に動かして構いません。
  - ピアノを用いて3回楽譜を見ずに先ほど学習したフレーズを演奏してもらいます。この際の演奏データを記録させていただきます。
  - SUS および NASA-TLX のアンケートに回答してもらいます。

- 3分以上の休憩を挟んだ後、次の学習条件に移ります。
- 4つの条件全てで学習を終えたら、アンケートを行います。
- その後実験終了です。

- 以下に学習条件を示します。

## 条件

- |                |      |         |
|----------------|------|---------|
| 1. ピアノ音        | + 楽譜 | } 能動的学習 |
| 2. ピアノ音 + 振動   | + 楽譜 |         |
| 3. ピアノ音 +      | LED  |         |
| 4. ピアノ音 + 振動 + | LED  |         |

## 実験中の注意

- ピアノの上に手を置いて鍵盤の位置と音の対応を確認する際に、ピアノ音の音量、ならびに振動子および LED が問題なく動作しているか（振動しない振動子および光らない LED がないか）確認してください。挙動が怪しい場合には確認を行うのですぐに教えてください。
- 学習中もピアノ音の音量、ならびに振動子および LED の動作で気になる点があればすぐに教えてください。
- なるべくフレーズが4回流れる間に習得できるよう集中して学習してください。
- ピアノの準備に時間がかかる可能性があります、その時間で忘れないように頭の中でイメージトレーニングをしてもらって構いません。
- 演奏中に思ったこと、考えたことは、休憩時間または実験後に口に出して言ってください。
- 提示されている条件に誤りがあると感じた場合はすぐに教えてください。
- 休憩中はピアノの練習はしないでください。それ以外は何をしていただいても構いません。

## A.2 実験2の手順書

### 実験に関する説明

- 複数の練習条件にてフレーズの練習を行っていただきます。本研究ではピアノがない環境での練習を想定しているため、練習にはピアノを用いません。各練習条件で練習を行った際の成績の推移を計測します。
  
- まず、デバイスについて説明します。
  - 本デバイスは、ピアノの練習の補助を行うものです。
  - グローブの各指に振動子と LED が装着されており、振動および光によってリズムおよび運指を提示します。
  - グローブは右手に装着してください。
  
- 以下に実験手順を示します。
  - ① 今回練習するフレーズに登場する音およびリズムを説明します。ここで譜読みの方法を覚えてください。
  - ② 次に練習するフレーズのデモ演奏動画をお見せします。デモ演奏動画の中では同時にメトロノームも提示されています。フレーズのイメージ付けおよび鍵盤の位置の確認などを行ってください。この際、楽譜を見ながら身体は自由に動かして構いません。
  - ③ 最初のレベルを計測するため、電子キーボードを用いて楽譜を見ずに、先ほどデモ演奏動画を見たフレーズを1回演奏してください。この際の演奏データを記録させていただきます。
  - ④ 電子キーボードから手を外し、各条件で練習を開始します。条件2~4ではグローブを装着します。練習では、フレーズが3回提示されます。その間、身体は自由に動かしてもらって構いません。意識的に練習を行い、可能な限り音およびリズムを覚えてください。
  - ⑤ 2分間、与えられたお題に対して1人でしりとりを行ってください。条件2~4ではこの間にグローブを丁寧に外してください。
  - ⑥ 30秒間時間を設けるので、先ほど練習したフレーズを弾けるようにイメージトレーニングをしてください。この間、電子キーボードに触れなければ身体は自由に動かして構いません。

- ⑦ 電子キーボードを用いて楽譜を見ずに、各条件で練習したフレーズを 1 回演奏してください。この際の演奏データを記録させていただきます。
- ⑧ ④～⑦を 5 回繰り返します。
- ⑨ 各条件での練習に関するアンケートに回答してもらいます。
- ⑩ 3 分以上の休憩を挟んだ後、次の練習条件に移ります。
- ⑪ 4 つの条件全てで練習を終えたら、全体に関するアンケートを行います。

- 以下に練習条件を示します。

	ピアノ音	振動	光	楽譜
条件 1	○			○
条件 2	○	○		○
条件 3	○		○	○
条件 4	○	○	○	○

#### 実験中の注意

- 練習中にピアノ音の音量、ならびに振動子および LED の動作で気になる点があればすぐに教えてください。
- 練習中は手指など身体は自由に動かして構いません。集中して、フレーズの音およびリズムを可能な限り正確に覚えてください。ただし、頭の中でフレーズをイメージするのは良いですが、声は出さないでください。
- 演奏時には、音およびリズムを可能な限り正確に弾いてください。リズムをわかりやすくするためにメトロノームを提示するので、メトロノームに合わせて弾いてください。
- グローブは壊れやすいため丁寧に扱ってください。
- 練習および演奏中に思ったこと、考えたことは、休憩時間または実験後に口に出して言ってください。
- 提示されている条件に誤りがあると感じた場合はすぐに教えてください。

A.3 実験2における譜読みの説明書

音

A musical staff with a treble clef and a 5/4 time signature. It contains five notes on a five-line staff. Below each note is a symbol: a sharp sign (♯), a flat sign (♭), a double slash (//), a sharp sign (♯), and a flat sign (♭). The notes are positioned on the first, second, third, fourth, and fifth lines of the staff.

リズム

Rhythm notation consisting of three rows of notes. The first row has a quarter note with a dot (♩.), followed by an equals sign (=), a quarter note (♩), and a plus sign (+). The second row has a quarter note (♩), followed by an equals sign (=), a quarter note (♩), a quarter note (♩), a quarter note (♩), a plus sign (+), a quarter note (♩), a quarter note (♩), a quarter note (♩), an equals sign (=), a quarter note (♩), a quarter note (♩), a quarter note (♩), a plus sign (+), a quarter note (♩), a quarter note (♩), a quarter note (♩), an equals sign (=), and a wavy line (〰). The third row has a quarter note (♩), followed by an equals sign (=), a quarter note (♩), a quarter note (♩), a plus sign (+), a quarter note (♩), a quarter note (♩), and a plus sign (+).

## A.4 SUS および自由記述から成るアンケート

実験2SUS

2022/12/21 18:41

### 実験2SUS

 nozaki@iplab.cs.tsukuba.ac.jp (共有なし)  
[アカウントを切り替える](#)



\*必須

参加者番号 \*

回答を入力

練習条件 \*

- ピアノ音+楽譜
- ピアノ音+振動+楽譜
- ピアノ音+LED+楽譜
- ピアノ音+振動+LED+楽譜

この練習方法をしばしば使いたいと思う \*

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

この練習方法は不必要なほど複雑であると感じた \*

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

この練習方法は容易に使えると思った \*

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

この練習方法を使うのに技術専門家のサポートを必要とするかもしれない \*

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

この練習方法にある様々な機能はよくまとまっていると感じた \*

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



この練習方法では一貫性のないところが多くあったと思った \*

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

大抵のユーザはこの練習方法について素早く学べるだろう \*

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

この練習方法はとても使いにくいと思った \*

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

この練習方法を利用できる自信がある \*

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

この練習方法を利用し始める前に知っておくべきことが多くあると思う \*

1 2 3 4 5  
全く思わない ○ ○ ○ ○ ○ そう思う

練習の際に楽譜はどのくらい見ましたか? \*

1 2 3 4 5  
全く見ていない ○ ○ ○ ○ ○ ずっと見ていた

何セッション目の練習で十分暗記できたと感じましたか? \*

練習回数が足りなかった場合は、その他の欄にあと何回欲しかったかを記入してください

- 1セッション目
- 2セッション目
- 3セッション目
- 4セッション目
- 5セッション目
- その他:

**自由記述**

システムを使用していて使いやすいと思った点、および使いにくいと思った点などを記述いただくと助かります。または、システムを使用した感想を記述してください。

回答を入力

送信

[フォームをクリア](#)

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



## A.5 参加者および実験全体に関するアンケート

ピアノ練習の効果の調査に関するアンケート

2022/12/21 18:49

### ピアノ練習の効果の調査に関するアンケート

参加者に関する基本的な情報を教えてください

 nozaki@iplab.cs.tsukuba.ac.jp (共有なし)  
[アカウントを切り替える](#)



\*必須

参加者番号 \*

回答を入力

年齢を教えてください \*

回答を入力

性別を教えてください \*

- 男性
- 女性
- その他:

[https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSc-2lKdJz\\_JMnDAS2\\_5MvOWIqogDUYZmyAh0onY0iW1MKh49g/viewform](https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSc-2lKdJz_JMnDAS2_5MvOWIqogDUYZmyAh0onY0iW1MKh49g/viewform)

1 / 3 ページ

利き手を教えてください \*

- 右手
- 左手
- 両手
- その他:

楽器経験を教えてください \*

楽器名、時期、期間を教えてください。習い事、授業、趣味などといった形でも結構です。ただし、遊びで弾いた事がある程度の方は除いてください。複数経験がある場合は複数回答してください。経験がない場合は「特になし」と回答してください。  
(例) ピアノを中学1~3年生までの3年間

回答を入力

譜読みのレベルを教えてください \*

(例) すらすら読める。時間をかけてドから順番に数えれば読める。など

回答を入力

日頃どのような音楽をどの程度聴きますか \*

(例) クラシックを毎日、J-POPを週3回など

回答を入力

暗記力には自信がありますか？ \*

	1	2	3	4	5	
全くない	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	とてもある

[次へ](#)

[フォームをクリア](#)

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



# ピアノ練習の効果の調査に関するアンケート

 nozaki@iplab.cs.tsukuba.ac.jp (共有なし)  
[アカウントを切り替える](#)



\*必須

ピアノ練習の効果の調査に関するアンケート

学習効果について教えてください

一番練習しやすかった条件を教えてください \*

- ピアノ音+楽譜
- ピアノ音+振動+楽譜
- ピアノ音+LED+楽譜
- ピアノ音+振動+LED+楽譜

その理由を教えてください

回答を入力

2番目に練習しやすかった条件を教えてください \*

- ピアノ音+楽譜
- ピアノ音+振動+楽譜
- ピアノ音+LED+楽譜
- ピアノ音+振動+LED+楽譜

その理由を教えてください

回答を入力

3番目に練習しやすかった条件を教えてください \*

- ピアノ音+楽譜
- ピアノ音+振動+楽譜
- ピアノ音+LED+楽譜
- ピアノ音+振動+LED+楽譜

その理由を教えてください

回答を入力



1番練習しづらかった条件を教えてください \*

- ピアノ音+楽譜
- ピアノ音+振動+楽譜
- ピアノ音+LED+楽譜
- ピアノ音+振動+LED+楽譜

その理由を教えてください

回答を入力

今後鍵盤楽器を用いずにピアノを練習する際に一番使用したいと思う方法を教え \*

てください

- ピアノ音+楽譜
- ピアノ音+振動+楽譜
- ピアノ音+LED+楽譜
- ピアノ音+振動+LED+楽譜

その理由を教えてください

回答を入力

今後鍵盤楽器を用いずにピアノを練習する際に2番目使用したいと思う方法を教えてください \*

- ピアノ音+楽譜
- ピアノ音+振動+楽譜
- ピアノ音+LED+楽譜
- ピアノ音+振動+LED+楽譜

その理由を教えてください

回答を入力

今後鍵盤楽器を用いずにピアノを練習する際に3番目使用したいと思う方法を教えてください \*

- ピアノ音+楽譜
- ピアノ音+振動+楽譜
- ピアノ音+LED+楽譜
- ピアノ音+振動+LED+楽譜

その理由を教えてください

回答を入力

今後鍵盤楽器を用いずにピアノを練習する際に一番使用したくないと思う方法を \*  
教えてください

- ピアノ音+楽譜
- ピアノ音+振動+楽譜
- ピアノ音+LED+楽譜
- ピアノ音+振動+LED+楽譜

その理由を教えてください

回答を入力

ご自身なりの覚え方があれば教えてください \*

回答を入力

練習時にピアノ音、振動、光、楽譜をそれぞれどのような役割として使ったか教 \*  
えてください

楽譜で全体の流れを見て、振動で運指をなんとなく感じて、光で運指を確認した

回答を入力

曲の難易度について感じたことがあれば教えてください \*  
フレーズ〇〇は同じ音が多くて簡単だった、フレーズ〇〇は速くて難しかった、など

回答を入力

デバイスについて改善して欲しい点があれば教えてください

回答を入力

その他コメントがありましたら教えてください

回答を入力

戻る

送信

フォームをクリア

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

