

筑波大学 情報学群 情報メディア創成学類

卒業研究論文

AR ハンドの提示と EMS による手指の同期を  
用いた遠隔ピアノ演奏指導

守 新太郎

指導教員 川口 一画, 志築 文太郎

2024 年 1 月

## 概要

遠隔同期型の楽器演奏指導において細かな演奏動作を確認するためには、学習者は複数の視点から指導者の動作を見る必要がある。そのため、複数カメラの設置と映像のスイッチングが必要となり、操作が負担となる。また、各カメラの視点は固定されているため、学習者はより細かな動作の確認ができない。そこで、本研究では、拡張現実感 (AR) と電氣的筋肉刺激 (EMS) を組み合わせて遠隔からの楽器演奏支援システムを提案する。指導者の手の動きを変換し学習者のヘッドマウントディスプレイ (HMD) 越しに表示することによって、演奏時の手の形の効率的な伝達を目指す。また、指導者が楽器の弦や鍵盤などを押さえたときに、学習者の手に対して EMS を与えることによって、指の動きを提示する。本研究では、ピアノの演奏指導における提案システムを実装し、遠隔でのピアノ指導を 4 つの条件で比較した。実験結果から、システムのユーザビリティや学習効果に関する複数の課題が明らかになった。その課題の原因として、AR ハンドの視認性の低さと EMS の適用精度の不足が示唆された。その改善の指針として、AR ハンドの 3D ハンドモデル化および EMS の精度を向上手法を示した。

# 目次

|            |                  |           |
|------------|------------------|-----------|
| <b>第1章</b> | <b>序論</b>        | <b>1</b>  |
| 1.1        | 背景               | 1         |
| 1.2        | 目的とアプローチ         | 2         |
| 1.3        | 本論文の構成           | 2         |
| <b>第2章</b> | <b>関連研究</b>      | <b>4</b>  |
| 2.1        | ピアノにおける楽器演奏支援    | 4         |
| 2.2        | 電氣的筋肉刺激 (EMS)    | 5         |
| <b>第3章</b> | <b>提案システム</b>    | <b>6</b>  |
| 3.1        | システム構成           | 6         |
| 3.2        | 指導者の演奏動作の取得      | 8         |
| 3.2.1      | 関節点の取得           | 8         |
| 3.2.2      | MIDI 情報          | 8         |
| 3.3        | AR ハンド表示         | 10        |
| 3.4        | EMS 制御           | 10        |
| <b>第4章</b> | <b>評価実験</b>      | <b>13</b> |
| 4.1        | 実験環境             | 13        |
| 4.2        | 指導条件             | 14        |
| 4.3        | 演奏タスク            | 15        |
| 4.4        | 実験手順             | 16        |
| 4.5        | 実験参加者            | 16        |
| 4.6        | 評価項目             | 16        |
| 4.6.1      | SUS              | 16        |
| 4.6.2      | NASA-TLX         | 18        |
| 4.6.3      | 学習効果             | 19        |
| <b>第5章</b> | <b>実験結果および考察</b> | <b>20</b> |
| 5.1        | システムユーザビリティ      | 20        |
| 5.2        | NASA-TLX         | 21        |
| 5.3        | 主観的評価による学習効果     | 24        |
| 5.4        | 事後自由記述アンケート      | 24        |

|              |                         |           |
|--------------|-------------------------|-----------|
| 5.5          | 考察 . . . . .            | 25        |
| 5.5.1        | AR ハンド . . . . .        | 25        |
| 5.5.2        | EMS . . . . .           | 25        |
| 5.6          | 追加アンケート . . . . .       | 26        |
| 5.6.1        | AR ハンド . . . . .        | 26        |
| 5.6.2        | EMS . . . . .           | 27        |
| 5.6.3        | 実験について . . . . .        | 27        |
| <b>第 6 章</b> | <b>今後の課題</b>            | <b>28</b> |
| 6.1          | AR 表示の改善 . . . . .      | 28        |
| 6.2          | EMS 制御システムの改善 . . . . . | 28        |
| <b>第 7 章</b> | <b>結論</b>               | <b>29</b> |
|              | 謝辞                      | 30        |
|              | 参考文献                    | 31        |



# 目 次

|     |                                                                                                                                                                                                        |    |
|-----|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.1 | 提案システムを示す. (a) 指導者の演奏を単眼カメラから撮影し, ハンドトラッキング情報を学習者側へ送信する. (b) 学習者はEMSを指に装着し, 指導者の手を模したARハンドに手の動きを追従しながら, EMSによる指の動きの支援を受ける. (c) 指導者の手の俯瞰映像から関節点を取得する. (d) 指導者の手を模したARハンド. 関節点とそれらを結ぶボーンから構成される. . . . . | 3  |
| 3.1 | システム構成図. . . . .                                                                                                                                                                                       | 7  |
| 3.2 | 鍵盤のColliderコンポーネント. . . . .                                                                                                                                                                            | 9  |
| 3.3 | 関節点と鍵盤の衝突検出. 衝突検出を視覚的に分かりやすくするため, 鍵盤に対して衝突した指ごとに色付けを行っている (e.g. 左手親指: 赤色). 3オクターブ目のレが押された場合, レの鍵盤と重なっている左手親指に対してEMSを与える. . . . .                                                                       | 9  |
| 3.4 | EMS制御モジュール. . . . .                                                                                                                                                                                    | 11 |
| 3.5 | 電極パッド装着位置. (a) 電極パッドを親指を除く左手の虫様筋に装着した. 手首の電極パッドはGNDとして用いる. (b) 親指は電極パッドを短母指外転筋に装着した. (c) タスク中電極パッドが外れないように実験参加者は指の部分を取り除いた手袋を装着した. . . . .                                                             | 12 |
| 4.1 | 実験環境. (a) 指導者の実験環境. (b) 実験参加者の実験環境. . . . .                                                                                                                                                            | 13 |
| 4.2 | 指導者の様子. . . . .                                                                                                                                                                                        | 14 |
| 4.3 | 各条件における実験参加者の様子. (a) ビデオ条件. (b)AR 条件. (c)EMS × ビデオ条件. (d)AR × EMS 条件. . . . .                                                                                                                          | 15 |
| 5.1 | SUSスコア. . . . .                                                                                                                                                                                        | 21 |
| 5.2 | NASA-TLX 総合スコア. . . . .                                                                                                                                                                                | 22 |
| 5.3 | NASA-TLX 下位尺度のスコア. (a) 知的・知覚的要求. (b) 身体的要求. (c) タイムプレッシャー. (d) 作業成績. (e) 努力. (f) フラストレーション. . . . .                                                                                                    | 23 |
| 5.4 | 主観的評価による学習効果順序. . . . .                                                                                                                                                                                | 24 |

# 第1章 序論

本研究では、拡張現実感 (AR) を用いた AR ハンドと 電氣的筋肉刺激 (EMS) による手指の同期を用いた遠隔でのピアノ演奏指導のための基礎的調査を行った。本章では、まず研究の背景として遠隔同期型での楽器演奏指導における演奏動作の確認や機器の操作に関する課題を説明する。次に本研究の目的とアプローチ、本研究の貢献、および本論文の構成を示す。

## 1.1 背景

近年、楽器を始める人が増えている。2019 年 7 月から 2020 年 7 月までの直近 1 年間で楽器を新たに始めた人、または再開した人を対象にしたアンケート調査によると、回答者 ( $N = 1030$ ) の約 25 % が 2020 年 3 月 ~ 4 月にかけて、新たに楽器を始めたという結果が出ている [1]。また、山野楽器が 2021 年 12 月から 1 ヶ月間行ったアンケート調査において、回答者 ( $N = 1186$ ) の 22.6 % が新たに楽器を始めた人や再開した人である [2]。経済産業省による生産動態統計では、ピアノ、電子ピアノ・電子オルガン、およびギター・エレキギターの販売台数が、2019 年と比べて、2021 年、および 2022 年ともに増加している [3]。しかし、初学者にとって、楽器を継続的に学習し、技術を習得することは容易ではない。ヤマハ音楽振興会のアンケート調査によると、楽器演奏の経験がある人 ( $N = 232$ ) のうち、42.8 % の人が挫折経験がある [4]。したがって、初期段階の楽器学習において、適切な指導を受けることは重要である。

また、楽器を始める人の増加に加えて、オンライン指導も増加している。オンライン指導には、動画を視聴して学習するオンデマンド型や、リアルタイムで指導者が遠隔から学習者に指導する遠隔同期型がある。ただ、遠隔同期型の楽器演奏指導において細かな演奏動作を確認するためには、指導者および学習者がともに複数の視点から相手の動作を見る必要がある。そのためには複数カメラの設置と映像のスイッチングが必要となり、操作が負担となる [5]。また、各カメラの視点は固定されているため、演奏時の細かい指の動きや角度を確認したい場合（弦の押さえ方の確認など）に問題が生じる。

このような視点の課題に対する先行研究として、AR もしくは EMS を用いた手法が検討されている。AR を用いた方法 [6] では、ピアノ演奏時の指導者の手を AR アバタに変換し、学習者がヘッドマウントディスプレイ (HMD) を通して手の形を確認できるようにすることによって、指導者は学習者に対して鍵盤に置く手の位置や動作を効率的に伝えられる。ただし、AR アバタでは、楽器の弦や鍵盤などを押す強さは提示できない。また、手のみの AR アバタでは、遠隔同期型での指導の場合、指導者の存在感を感じづらい。これに対して、EMS を用いた方法 [7] では、電気刺激により楽器を演奏する学習者の指を直接制御することによって、

楽器の弦や鍵盤などを押す強さを提示することができる。また、初心者は、打鍵時の指の動作やタイミングの再現性が低い [8] ことから、指を直接制御することによって指の角度や動きの再現性を高められる。ただし、EMS を用いた手法は、指導者が学習者に対して遠隔からリアルタイムに指示を行うケースでは検討されていない。

## 1.2 目的とアプローチ

本研究では、楽器演奏支援に対するアプローチとして、AR ハンドと EMS を組み合わせて、遠隔からの楽器演奏を支援するシステムを提案する (図 1.1)。本システムでは、指導者の手を AR ハンドに変換し、学習者の HMD 越しに表示することにより、演奏時の手の形および位置を効率的に伝える。また、指導者が楽器の弦や鍵盤などを押さえたときに、学習者の手に対して EMS を与えることによって、指の動きを提示する。これにより、学習者は能動的に自分の手を動かしながら、受動的に指導者からの正しい指の動きの指示を受けられる。

本論文では、ピアノ演奏時に AR ハンドと EMS で遠隔指導を行うシステムを実装し、実験を通じて本システムの有効性を検証した。

## 1.3 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した。第 2 章においては、本研究に関連する研究を示し、本研究の位置付けを示す。第 3 章においては、本研究の提案システムの設計および本研究のシステム構成を示す。第 4 章においては、本研究を評価するために行った実験内容、第 5 章において結果および考察を示す。第 6 章においては、今後の課題および展望を示す。第 7 章においては、本研究の結論を示す。



図 1.1: 提案システムを示す. (a) 指導者の演奏を単眼カメラから撮影し, ハンドトラッキング情報を学習者側へ送信する. (b) 学習者は EMS を指に装着し, 指導者の手を模した AR ハンドに手の動きを追従しながら, EMS による指の動きの支援を受ける. (c) 指導者の手の俯瞰映像から関節点を取得する. (d) 指導者の手を模した AR ハンド. 関節点とそれらを結ぶボーンから構成される.

## 第2章 関連研究

本システムは、AR ハンドおよびEMS を用いて、遠隔からの楽器演奏を支援する。そのため本章では、AR を用いたアプローチを含む楽器演奏支援に対する既存手法、およびEMS に関する関連研究について述べる。

### 2.1 ピアノにおける楽器演奏支援

楽器演奏支援として、いくつかのアプローチがある。ピアノの指導に対する学習者ベースのアプローチでは、(1) さまざまな身体部位の動きと姿勢を同期させる、(2) 譜読力を向上させる (3) 学習者のモチベーションを高める (4) アドリブ演奏を奨励することの4つが重要である [9]。身体の同期を用いたアプローチとして、ユーザに対して次にどの鍵盤を押せばいいかを色分けする、もしくはタイミングのエラーを表示させるといったフィードバックを与えるものがある [10, 11, 12]。また、ハンドトラッキングを用いて指導者の手の形を AR アバタに変換し、それを学習者に対して、HMD 越しに表示させることによって、手の形や動きを効率的に伝える手法も提案されている [6]。この手法では、現実空間の鍵盤の上に表示された指導者の手の動きを理解することによって、学習者は演奏時の手を正しく位置づけ、手の形を再現する能力が高まることが示唆されている。加えて Liu らは、指導者と学習者の手の動きをモーションキャプチャによって記録し、ボーン表示を用いて手の動きの違いを視覚的に表示する手法を提案している [13, 14]。譜読力への支援として、ピアノロールを鍵盤の延長線上に表示させ、次に押す鍵盤の位置に加えて、タイミングをユーザに教える手法がある [15, 16]。学習者のモチベーションを高めるアプローチでは、AR とゲーミフィケーションに基づいたアプローチがある。ピアノの演奏にゲームプレイの要素を追加したもの [17] や、定期的にピアノを演奏してポイントを獲得するといったインセンティブ [18] によって動機づける手法がある。アドリブ演奏への支援として、手のジェスチャーをカメラ [19] や筋電図 (EMG) [20] を用いて検出し、手の形や動きに応じて、音を変化させ、音の表現を拡張している。本研究では、(1) と (3) に着目し、遠隔での学習において、初学者の手の動きの再現性を高めるため、AR ハンドと EMS を組み合わせることで、指導者との手指の動きの同期をリアルタイムで行い、学習効率の向上を図る。

## 2.2 電氣的筋肉刺激 (EMS)

EMS を用いた楽器演奏システムはこれまでにいくつか検討されている。Stimulated Percussions [21] は、前腕もしくは、ふくらはぎに電気刺激を与えて打楽器でのリズムをユーザに直接提示する。Niijima らは、トレモロ演奏するピアノ熟練者と初心者の筋活動を比較し、ピアノ熟練者が演奏時によく活動する上腕筋や前胸筋へ EMS を与えることによって、初心者がトレモロ演奏するときに不必要な筋活動を抑制している [22]。ただ、この研究ではピアノの演奏手法としてトレモロ演奏のみに限定している。PossessedHand [23] は、前腕周囲の筋肉に電気刺激を与えることによってユーザの指を制御する。各筋肉は 28 個の電極パッドを介して刺激され、手の 16 の関節の動きを制御できる。このシステムを用いて、琴の楽器演奏支援を行い、タイミングのエラー、および弦の間違いを軽減している。ただ、このシステムは、親指を除く PIP 関節（近位指節骨間関節）を独立的に制御できるが、それ以外の関節は制御できない。これは、前腕部にある指を屈曲するための指屈筋が密接しているため、前腕部に電気刺激を与えると関節を独立的に制御することが難しくなるからである。そこで、Takahashi らは、指の MCP 関節（中手指節間関節）を動かす虫様筋に電気刺激を与える手法をとっている [7]。これは、従来の前腕部に電気刺激を与える手法と比べて、MCP 関節を独立的に制御することができる。また、複雑な指の形を制御する方法として、EMS と外骨格を組み合わせたものが検討されている [24]。これは EMS によって指を作動させ、外骨格を用いて指を正確な位置で停止させるアプローチを取っている。これによって、MCP、および PIP 関節を独立して制御できる。先行研究では、楽器以外に EMS と EMG を用いて他者との動きを同期するシステムがある [25] が、指導者が学習者に対して遠隔からリアルタイムに楽器演奏指導を行うケースでは検討されていない。そこで、本研究では、Takahashi ら [7] の先行研究をもとに、EMS を用いて遠隔にいる指導者の指の動きをリアルタイムに学習者の指へ提示し、楽器演奏指導を行う。

## 第3章 提案システム

初心者は指の動きやタイミングの再現性が低いことから、提案システムは、HMDを通して指導者の手を模したARハンドによって、演奏時の手を正しく移動させ、手の形の再現性を高める。また、細かな指の動きやタイミングの再現性を高めるため、EMSを用いて提示する。本章では、提案システムにおけるこれらのシステム実装構成について述べる。

### 3.1 システム構成

提案システムの実装構成を図 3.1 に示す。本システムでは、単眼カメラ (カメラ: logicoool C922n PRO HD ストリーム ウェブカメラ) を用いて指導者の手の映像を取得し、MediaPipe [26] を用いてハンドトラッキングを行う。また、ハンドトラッキング情報、およびピアノ演奏における MIDI (Musical Instrument Digital Interface) 情報を、UDP 通信を用いて指導者側の PC (CPU: Intel Core i7-12700H, GPU: Intel Arc A370M, メモリ: 32GB) から、学習者側の PC (CPU: Intel Core i7-11800H, GPU: GeForce RTX 3070 Laptop, メモリ: 64GB) に送信し、HMD 上にアバタとして表示する。そして、Arduino から EMS を制御し、学習者の指に EMS を与える。指導者と学習者は、ビデオ会議ツールを用いて、音声を共有する。また、指導者は、学習者の学習状況を確認するため、学習者側の手を映したカメラ映像を、ディスプレイにて確認する。単眼カメラの位置は鍵盤の真上に設定した。HMD は Hololens2 [27] を、HMD への表示ソフトウェアとして Unity (バージョン 2021.3.21f1) を用いた。また、ピアノは指導者・学習者ともに Casio LK-520 [28] を用いた。

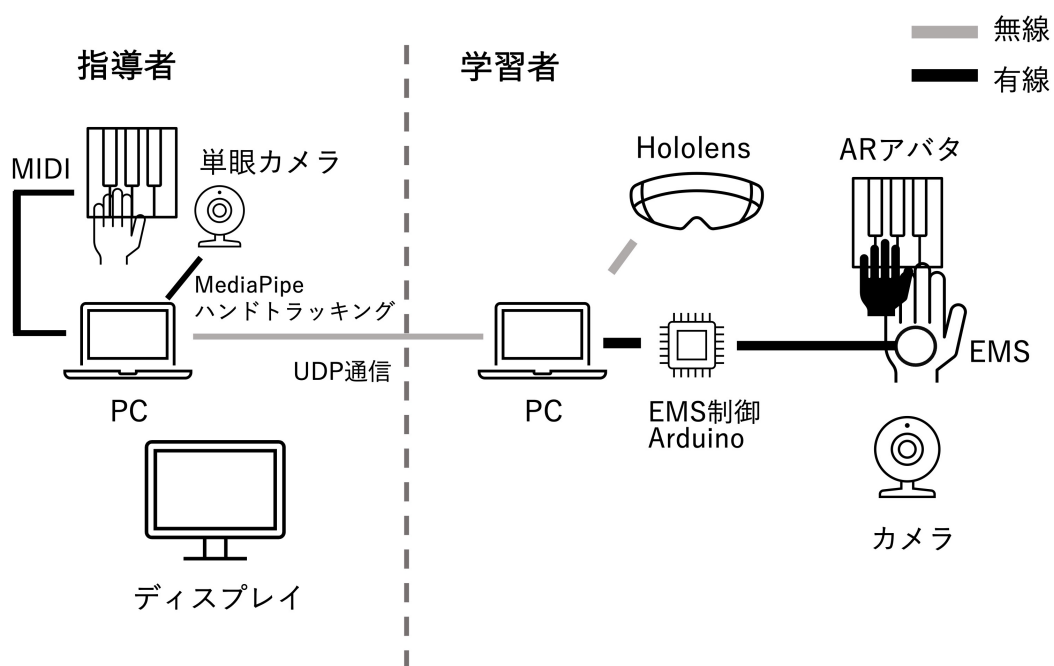


図 3.1: システム構成図.



## 3.2 指導者の演奏動作の取得

指導者が演奏する際の正確な手の動きを取得するため、カメラを使用したハンドトラッキングによって、関節点の取得を行う。ただ、これだけでは打鍵情報の取得が難しいため、キーボードの MIDI データを利用して、打鍵情報を取得する。

### 3.2.1 関節点の取得

OpenCV と Mediapipe のライブラリがパッケージ化されている CVzone [29] を用いて、指導者に対しハンドトラッキングを行い、UDP 通信にて学習側の PC へ送信する。ハンドトラッキングは、Mediapipe を用いて、手首と各指 4 点の計 21 点の関節点を取得した。リアルタイムでのハンドトラッキングにおけるフレームレートは 20FPS 程度であった。

### 3.2.2 MIDI 情報

Mediapipe を用いたハンドトラッキング情報では、真上からの映像であるため、指がどの程度曲がっているかを取得することが難しく、EMS を制御するための入力として用いることができない。そこで、指導者が演奏するピアノの MIDI 情報から、打鍵または離鍵した鍵盤の位置、および打鍵の強さ(音の大きさ)を取得し、打鍵の強さに応じて与える EMS の強さを調節する。このとき、打鍵の強さは 128 段階で取得できる。そして、打鍵または離鍵した鍵盤の位置、および AR 上に表示されたピアノと AR ハンドの衝突情報を用いて、弾いている鍵盤の指を推定し、EMS を与える指を選択する。具体的には、各指の先端の関節点と、仮想ピアノの各鍵盤にゲームオブジェクト同士の物理的な衝突を検出する機能を持つ Collider コンポーネントを持たせている。鍵盤の Collider コンポーネントを図 3.2 のように y 軸上に検出範囲を伸ばすことによって、x 軸と z 軸の 2 次元平面上において、関節点と鍵盤が重なったときに衝突を検出する(図 3.3)。そして、打鍵、または離鍵した鍵盤の位置と、その鍵盤と重なっている関節点から、弾いている鍵盤の指を推定する。

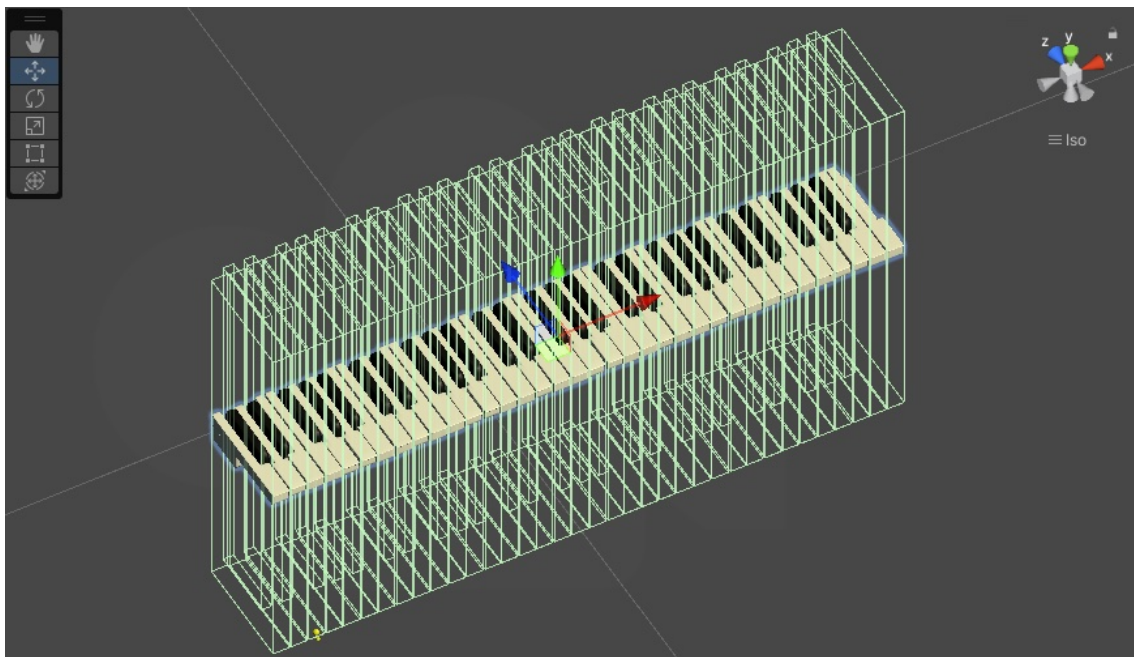


図 3.2: 鍵盤の Collider コンポーネント.

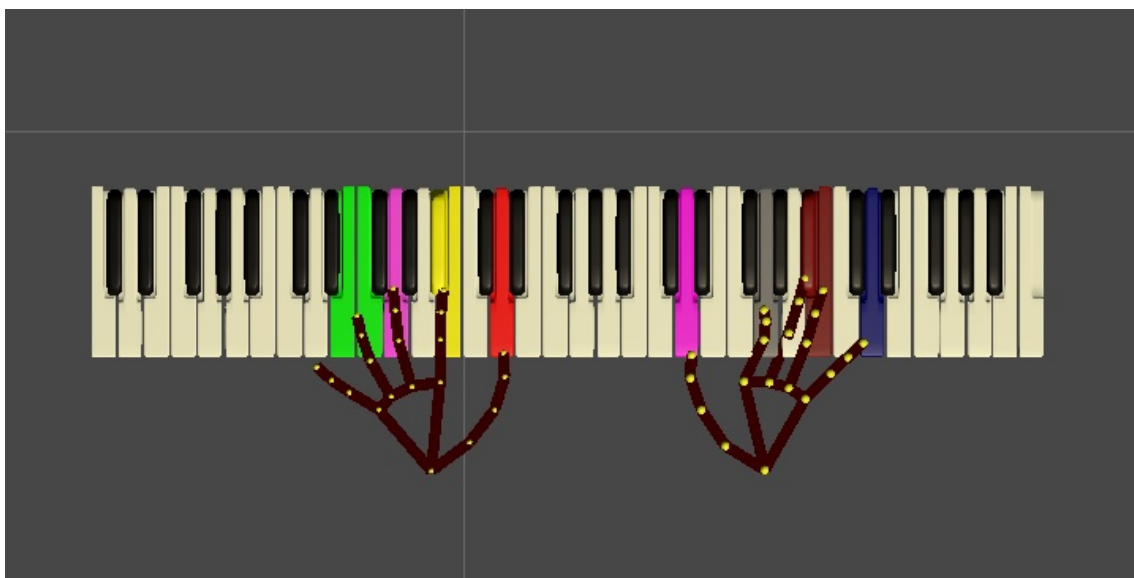


図 3.3: 関節点と鍵盤の衝突検出. 衝突検出を視覚的に分かりやすくするため, 鍵盤に対して衝突した指ごとに色付けを行っている (e.g. 左手親指: 赤色). 3 オクターブ目のレが押された場合, レの鍵盤と重なっている左手親指に対して EMS を与える.

MIDI 情報は、ピアノからシリアル通信 (USB 接続) で指導者側の PC に送られ、Python ライブラリの Pygame [30] を用いて情報を取得する。その後、UDP 通信によって学習者側の PC へ MIDI 情報が送信される。このとき、MIDI 情報を即時に送信すると、複数の鍵盤を同時に打鍵、または離鍵した情報を損失する場合があるため、即時送信ではなく、0.05 秒おきに送信する。

### 3.3 AR ハンド表示

指導者の手を模した AR ハンドは、関節点の球体と関節点をラインで結んだ構成をしている (図 1.1(d))。AR 空間上には現実のピアノとの位置を調節するために、現実のピアノと同等サイズの仮想ピアノを配置している。この仮想ピアノを現実のピアノに重畳表示して、位置合わせを行う。Mediapipe で取得した手のランドマーク座標は、Unity 上にて関節点を表示する球体に各関節の座標に対して入力する。AR ハンドのサイズは、仮想ピアノと比較しながら図 1.1(c) のような指導者の手と大きさが同じになるように、x,y,z 軸のすべてのスケールを手動で調整する。

### 3.4 EMS 制御

電気刺激によって学習者の指を直接制御する EMS 制御装置では、Arduino と PhotoMOS リレーを用いている (図 3.4)。また、EMS 生成器として Sanitas SEM 43 [31] を使用した。制御方法として、Arduino の出力に応じて、PhotoMOS リレーのスイッチングを行い、EMS 出力の ON/OFF 切り替えを行っている。

ピアノの演奏では、音階を打鍵する場合、MCP 関節が屈曲し PIP 関節が伸展する。また、和音を打鍵する場合、手首、MCP 関節および、DIP 関節 (遠位指節骨間関節) が屈曲する [32]。したがって、音階・和音の演奏動作から指の MCP 関節を屈曲・伸展させるため、電極パッドの装着位置として指の MCP 関節を独立して制御できる手の虫様筋に設定した (図 3.5)。ただし、親指は虫様筋がないため、短母指外転筋に設定した。電極パッドのサイズは、 $1 \times 3$  cm (虫様筋) と  $3 \times 3$  cm (手首) とした。EMS の強さは実験参加者の手が 1~2cm ほど動く強さに設定した。鍵盤の打鍵から指に EMS が与えられるまでの時間は約 0.2 秒であった。研究室内の同一ネットワークを使用している環境では、キーボードの打鍵から光るタイミングまでの時間差から、ハンドトラッキングと MIDI イベントの受信との間には約 0.2 秒の遅延が生じていた。

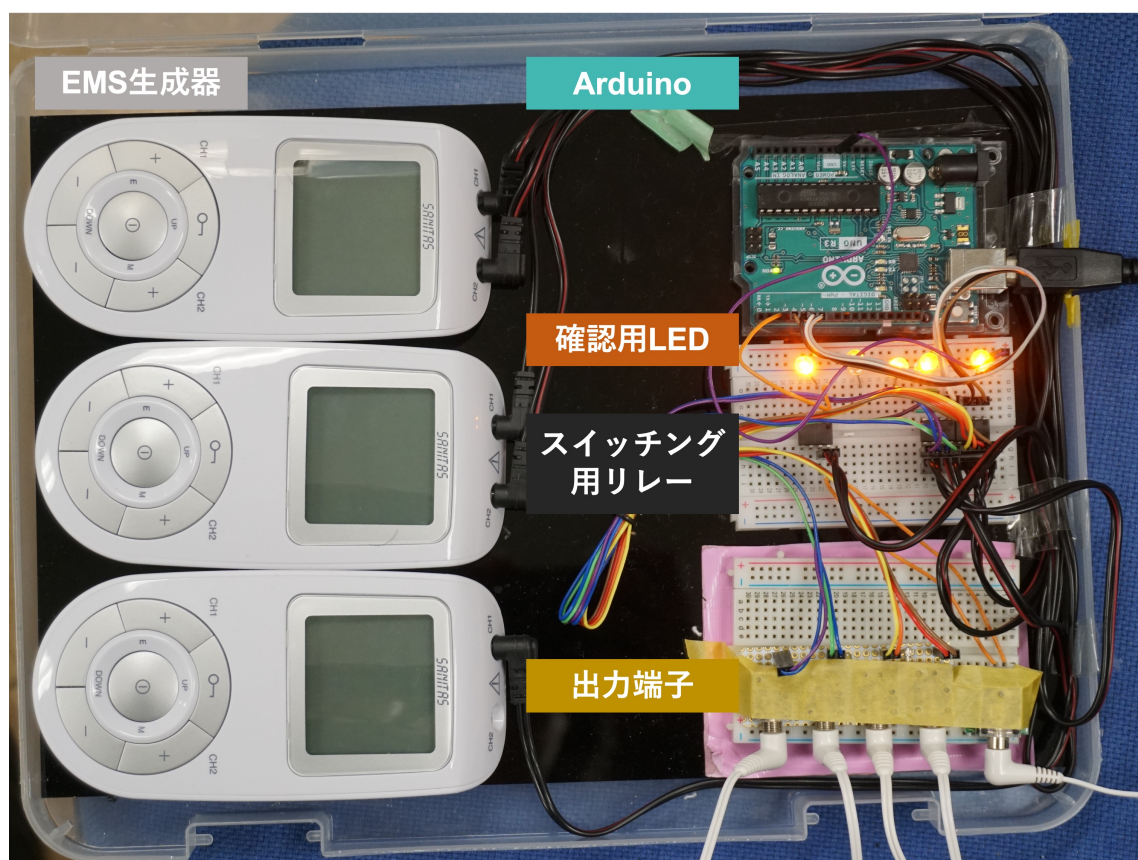


図 3.4: EMS 制御モジュール.

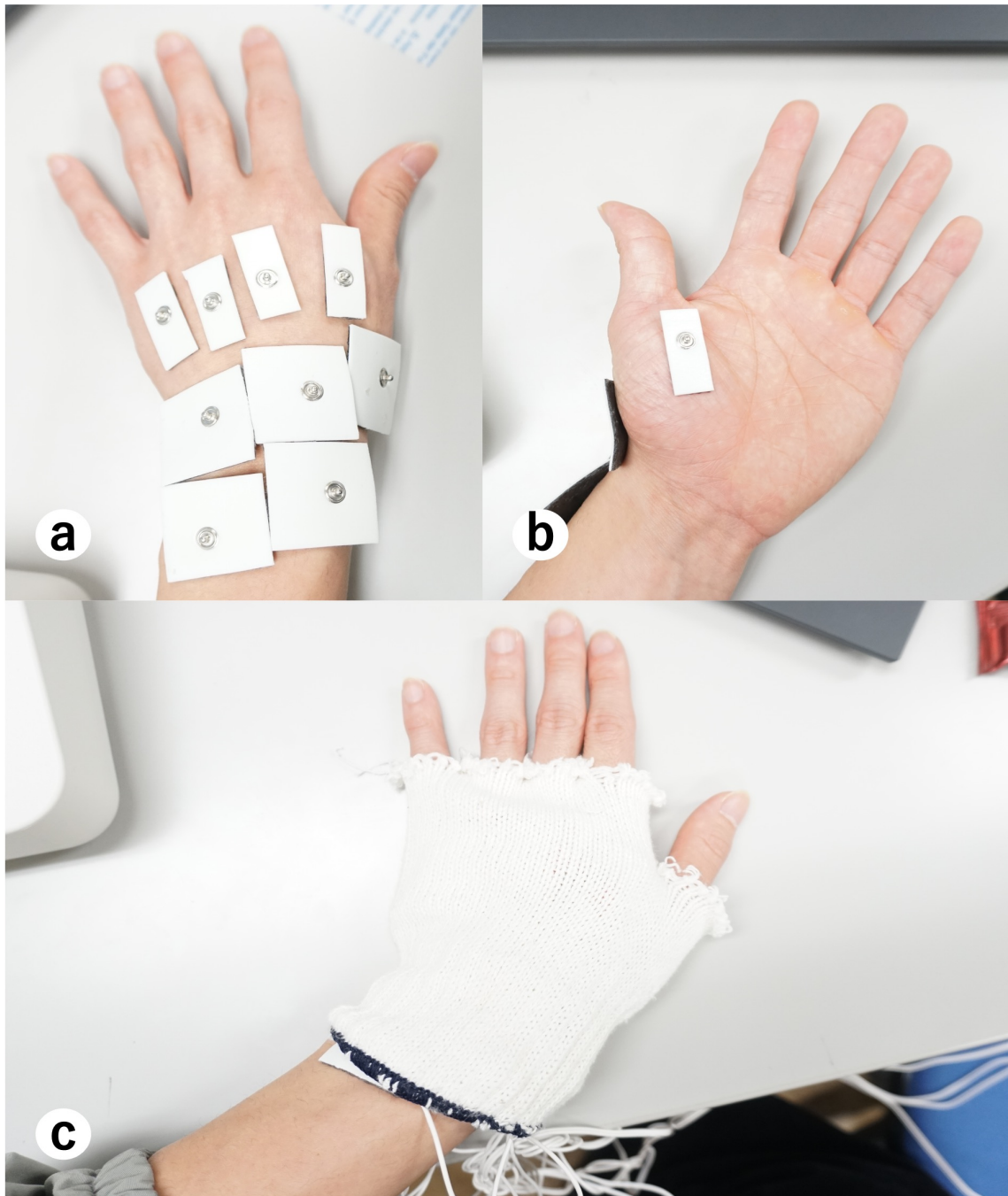


図 3.5: 電極パッド装着位置. (a) 電極パッドを親指を除く左手の虫様筋に装着した. 手首の電極パッドは GND として用いる. (b) 親指は電極パッドを短母指外転筋に装着した. (c) タスク中電極パッドが外れないように実験参加者は指の部分を取り除いた手袋を装着した.



## 第4章 評価実験

遠隔でのピアノの演奏指導における提案システムのユーザ体験および制約と，システム設計の今後の指針を得るため，ピアノ指導を視覚要因と EMS 要因を組み合わせた4つの条件で比較した．実験は実験室実験で行った．

### 4.1 実験環境

実験環境として，1つの部屋を指導者と実験参加者用に2つに区切り，図4.1に示すように各機器を設定した．指導者の実験環境には，Webカメラを用いて指導者の手のハンドトラッキングを行い，制御PCを用いて学習者側へ情報をUDP送信する．また，指導中に，iPadを用いてリズムを確認し，学習者の演奏の様子をディスプレイで確認する．また，学習者の実験環境において，Webカメラを用いて学習者の手を撮影し，制御PCを用いて学習者側へ映像を共有する．また，条件に応じてHololensを用いてARハンドの表示や，指の動きを共有するため，図3.4, 3.5のEMS装置を用いる．

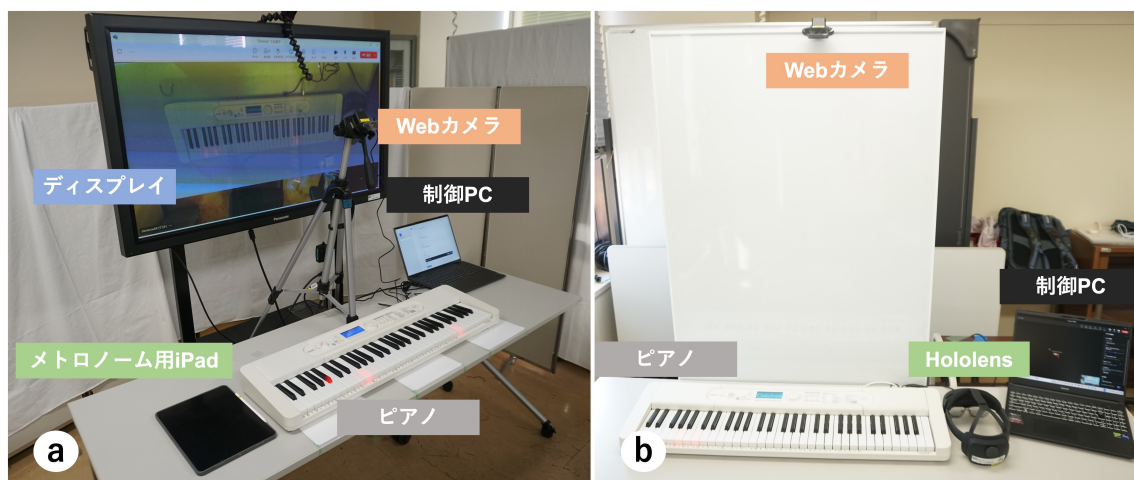


図 4.1: 実験環境. (a) 指導者の実験環境. (b) 実験参加者の実験環境.

## 4.2 指導条件

AR による視覚情報の提示有無および EMS 提示の有無を組み合わせることによって、AR 提示と EMS 提示それぞれの有効性を確認するため、指導条件は、以下の 4 条件を実施した。

- ビデオ: ビデオ会議ツール Teams を用いて指導者の手を俯瞰で映した映像を見ながら学習する
- AR: 指導者の手を模した AR ハンドに追従しながら学習する
- EMS × ビデオ: 学習者の手に EMS を与え、Teams での映像を見ながら学習する
- EMS × AR: 学習者の手に EMS を与え、指導者の手を模した AR ハンドに追従しながら学習する

指導者は図 4.2 に示すように、ディスプレイを見ながら実験参加者の学習状況を確認した。図 4.3 は各条件における実験参加者の様子である。



図 4.2: 指導者の様子.



図 4.3: 各条件における実験参加者の様子. (a) ビデオ条件. (b)AR 条件. (c)EMS × ビデオ条件. (d)AR × EMS 条件.

### 4.3 演奏タスク

Liu ら [14] の実験では、演奏タスクとして音階とアルペジオを用いて検証していたため、同様にそれらを演奏タスクとして用意した。また、両手の動作が異なる場合を検証するため、コードを用意した。素早い両手の動作の場合を検証するため、ピアノ被指導経験者用に速いテンポの音階を用意した。ピアノ被指導未経験者は音階・アルペジオ・コードの3種類、ピアノ被指導経験者は4種類の演奏タスクを実施した。

**音階.** 開始音階をC(ド)とし、1オクターブ高い音階と交互に引きながら、音階を2オクターブ分上昇させていく。つまり、演奏する音階はC, C, D, D, E, E, F, F, G, G, A, A, B, B, C, C, D, D, E, E, F, F, G, G, A, A, B, Bである。この演奏タスクでは、片手の親指と小指のみを使用して、100BPMの速さで音階を演奏する。

**アルペジオ.** Cメジャーのアルペジオで、開始音階をCとし2オクターブ上昇させていく。つまり、演奏する音階はC, E, G, C, E, G, C, E, Gである。この演奏タスクでは、片手の親指、中指および、小指を使用して、80BPMの速さでアルペジオを演奏する。

**コード.** カノン進行のコードであるC → G → Am → Em → F → C → F → Gを演奏する。この演奏タスクでは、片手でルート音を、もう一方の手で3和音を弾き、30BPMの速さで演奏する。



**速いテンポの音階.** ピアノ教本「ハノン」[33]1 番にあるフレーズを使用する. 演奏する音階は C, E, F, G, A, G, F, E, D, F, G, A, B, A, G, F である. この演奏タスクでは, 両手を用いて 80BPM の速さで演奏する.

## 4.4 実験手順

実験開始前に, 実験参加者は事前アンケートを行い, 実験内容について説明された後, 指導者から演奏タスクについて説明を受けた. また, 演奏フレーズの説明時に, 実験参加者は 1~2 回演奏フレーズを通して練習した. その後, 学習間でどの程度学習効果があるかを測定するため, 学習前にプレテストとして各フレーズの演奏テストを実施した. プレテスト後, 各指導条件において 1 フレーズの最大学習時間を 5 分として学習した. 学習時間は実験参加者が自身の学習について適切な段階に達したと判断した際に, その時点で切り上げることができる. 学習後, ポストテストとして各フレーズの演奏テストを実施し, System Usability Scale (SUS)[34] および NASA Task Load Index (NASA-TLX)[35] を実施した. また, 全体のタスク終了後に, 事後アンケートを実施した.

## 4.5 実験参加者

研究室内から大学生および大学院生の計 6 名 (男性 4 名, 女性 2 名) が実験に参加した. 平均年齢は 22.8 歳 ( $SD = 0.41$ ) であり, 6 名すべて利き手は右利きであった. 実験は被験者内実験とし, 条件の順序はカウンターバランスをとった. 実験参加者のうち 3 名を右手で, 残りの 3 名を左手で演奏タスクを実施した. 事前アンケートとして AR/VR, EMS およびピアノ演奏にどれほど慣れているかを 7 段階のリッカート尺度 (1: 初心者, 7: 専門家) を用い回答してもらった結果, 平均点は AR/VR: 4.17 ( $SD = 0.98$ ), EMS: 2.33 ( $SD = 1.37$ ), ピアノ演奏: 2.33 ( $SD = 1.86$ ) であった. また, 実験参加者のうち 1 名が指導者からピアノを指導された経験があった (被指導年数: 14 年).

## 4.6 評価項目

各指導条件において, 学習体験を調査するため, SUS および NASA-TLX を設定した. また, 主観的評価による学習効果順序を測定した.

### 4.6.1 SUS

システムのユーザビリティを評価するため, SUS を用いた. SUS は, 以下の表 4.1 に示す 10 個の質問からなる. 質問に対する回答は, 5 段階のリッカートスケール (「全く同意できない」から「非常に同意できる」) で評価される. 質問は回答のバイアスを軽減するため, 肯定的な内容と否定的な内容が交互になるように設計されている. 総合スコアは 0~100 の範囲を

とり．計算方法は，各質問項目のスコアを合計した後，その合計値に 2.5 を掛けて，算出する．各質問項目のスコアの計算方法は，質問項目 1, 3, 5, 7, 9 の場合，スコアはスケール位置から 1 を引いた値であり，質問項目 2, 4, 6, 8, 10 の場合，スコアは 5 からスケール位置を引いた値である．

表 4.1: SUS.

| No. | 質問内容                                 |
|-----|--------------------------------------|
| 1   | このシステムをしばしば利用したいと思う                  |
| 2   | このシステムを利用するには説明が必要となるほど複雑であると感じた     |
| 3   | このシステムは容易に使いこなす事ができると思った             |
| 4   | このシステムを利用するのに専門家のサポートが必要だと感じる        |
| 5   | このシステムにあるコンテンツやナビゲーションは十分に統一感があると感じた |
| 6   | このシステムでは一貫性のないところが多々あったと感じた          |
| 7   | たいていの人は、このシステムの利用方法をすぐに理解すると思う       |
| 8   | このシステムはとても操作しづらいと感じた                 |
| 9   | このシステムを利用できる自信がある                    |
| 10  | このシステム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     |

#### 4.6.2 NASA-TLX

システムのメンタルワークロードを評価するため、NASA-TLX を用いた。NASA-TLX は、以下の表 4.2 に示す 6 つの尺度によってワークロードを評価する。総合スコアは 5~100 の範囲をとり、スコアの計算方法は、各尺度について 20 段階の評価をし（5 から 100 まで 5 点刻み）、それぞれの尺度の重要性をペア比較することによって加重平均を計算し、総合的な作業負荷スコアを導出する。

表 4.2: NASA-TLX.

| 尺度        | 質問内容                                                                                                                |
|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 知的・知覚的要求  | どの程度の知的・知覚的活動(考える, 決める, 計算する, 記憶する, 見るなど)を必要としましたか. 課題はやさしかったですか難しかったですか, 単純でしたか複雑でしたか, 正確さが求められましたか大ざっぱでよかったですか    |
| 身体的要求     | どの程度の身体的活動(押す, 引く, 回す, 制御する, 動き回るなど)を必要としましたか. 作業はラクでしたかキツかったですか, ゆっくりできましたかキビキビやらなければなりませんでしたか, 休み休みできましたか働きづめでしたか |
| タイムプレッシャー | 仕事のペースや課題が発生する頻度のために感じる時間的切迫感はどの程度でしたか. ペースはゆっくりとして余裕があるものでしたか, それとも速くて余裕のないものでしたか                                  |
| 作業成績      | 作業指示者(またはあなた自身)によって設定された課題の目標をどの程度達成できたと思いますか. 目標の達成に関して自分の作業成績にどの程度満足していますか                                        |
| 努力        | 作業成績のレベルを達成・維持するために, 精神的・身体的にどの程度いっしょうけんめいに作業しなければなりませんでしたか                                                         |
| フラストレーション | 作業中に, 不安感, 落胆, いらいら, ストレス, 悩みをどの程度感じましたか. あるいは逆に, 安心感, 満足感, 充足感, 楽しさ, リラックスをどの程度感じましたか                              |

### 4.6.3 学習効果

主観的評価による学習効果を測定するため, 各条件間で学習効果を感じた順に条件を選択させた. また, AR × EMS において一番効果的だと感じた演奏タスクを選択させた.

## 第5章 実験結果および考察

本章では、4章にて述べた実験の結果を示し、考察を行う。本研究では、正規性および等分散を調査するため、Shapiro-Wilk 検定および Levene の検定を行った。また、各検定に用いた有意水準は 0.05 とした。

### 5.1 システムユーザビリティ

各条件の SUS スコア平均値のグラフを図 5.1 を示す。正規性および等分散がみられたため、二元配置分散分析を実施した結果、EMS 要因において有意な主効果がみられた (視覚要因： $p = 0.210$ , EMS 要因： $p = 0.006 < 0.05$ , 視覚要因\*EMS 要因： $p = 0.591$ )。そこで EMS 要因において対応あり t 検定を実施した結果、有意差がみられた ( $p = 0.016 < 0.05$ )。ここで EMS 要因の対応の設定として、AR 条件と AR × EMS 条件、ビデオ条件と EMS × ビデオ条件がペアとなるように設定した。

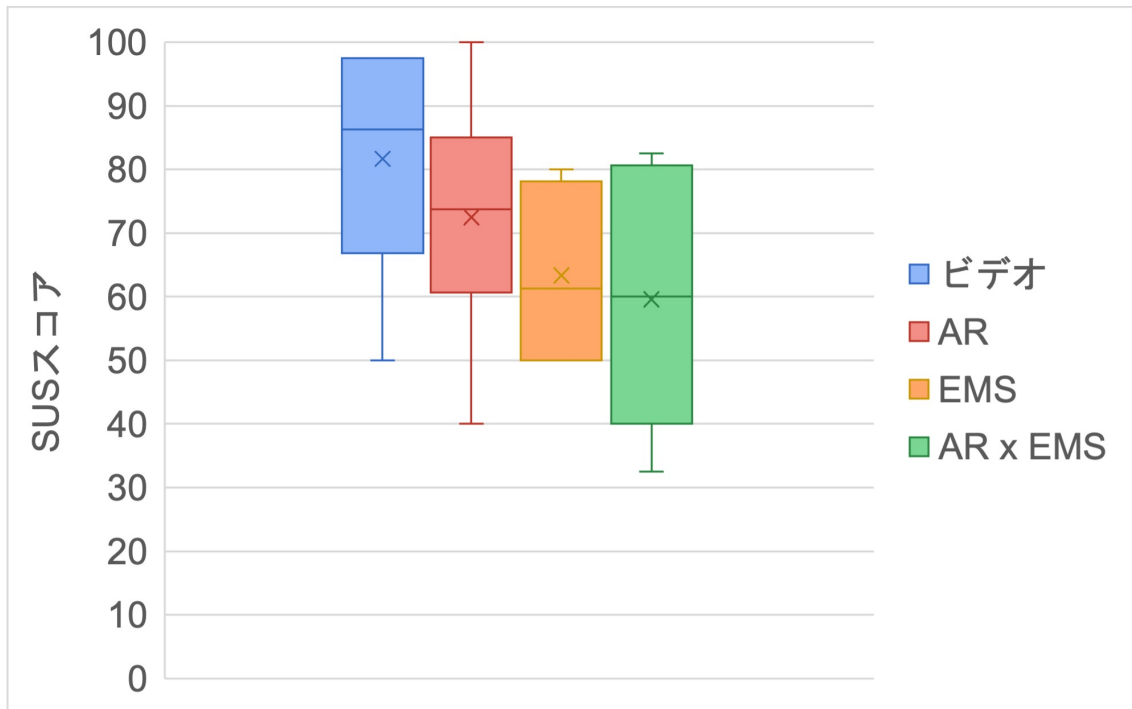


図 5.1: SUS スコア.

## 5.2 NASA-TLX

各条件の NASA-TLX の総合スコアにおける平均値のグラフを図 5.2 に示す。加えて、下位尺度のスコアに関するグラフを図 5.3 に示す。総合スコアおよびフラストレーションにおいて、正規性および等分散がみられたため、二元配置分散分析を実施した結果、有意な主効果および交互作用はみられなかった (総合スコア: 視覚要因:  $p = 0.886$ , EMS 要因:  $p = 0.719$ , 視覚要因\*EMS 要因:  $p = 0.861$ ; フラストレーション: 視覚要因:  $p = 0.700$ , EMS 要因:  $p = 0.385$ , 視覚要因\*EMS 要因:  $p = 0.607$ )。正規性がみられなかった知的・知覚的要求, 身体的要求, タイムプレッシャー, 作業成績および努力の尺度に対して整列ランク変換 (ART) を施した。ART を施したデータに対して二元配置分散分析を実施した結果, タイムプレッシャー尺度の EMS 要因にて有意な主効果がみられた (知的・知覚的要求: 視覚要因:  $p = 0.721$ , EMS 要因:  $p = 0.142$ , 視覚要因\*EMS 要因:  $p = 0.767$ ; 身体的要求: 視覚要因:  $p = 0.794$ , EMS 要因:  $p = 0.477$ , 視覚要因\*EMS 要因:  $p = 0.181$ ; タイムプレッシャー: 視覚要因:  $p = 0.408$ , EMS 要因:  $p = 0.042 < p = 0.05$ , 視覚要因\*EMS 要因:  $p = 0.788$ ; 作業成績: 視覚要因:  $p = 0.721$ , EMS 要因:  $p = 0.142$ , 視覚要因\*EMS 要因:  $p = 0.767$ ; 努力: 視覚要因:  $p = 0.751$ , EMS 要因:  $p = 0.151$ , 視覚要因\*EMS 要因:  $p = 0.838$ )。そこで, Wilcoxon 符号付順位和検定を行った結果, タイムプレッシャーの EMS 要因において有意差がみられた ( $p = 0.028 < 0.05$ )。こ

ここで視覚要因の対応の設定として、AR 条件とビデオ条件、AR × EMS 条件と EMS × ビデオ条件がペアとなるように設定した。

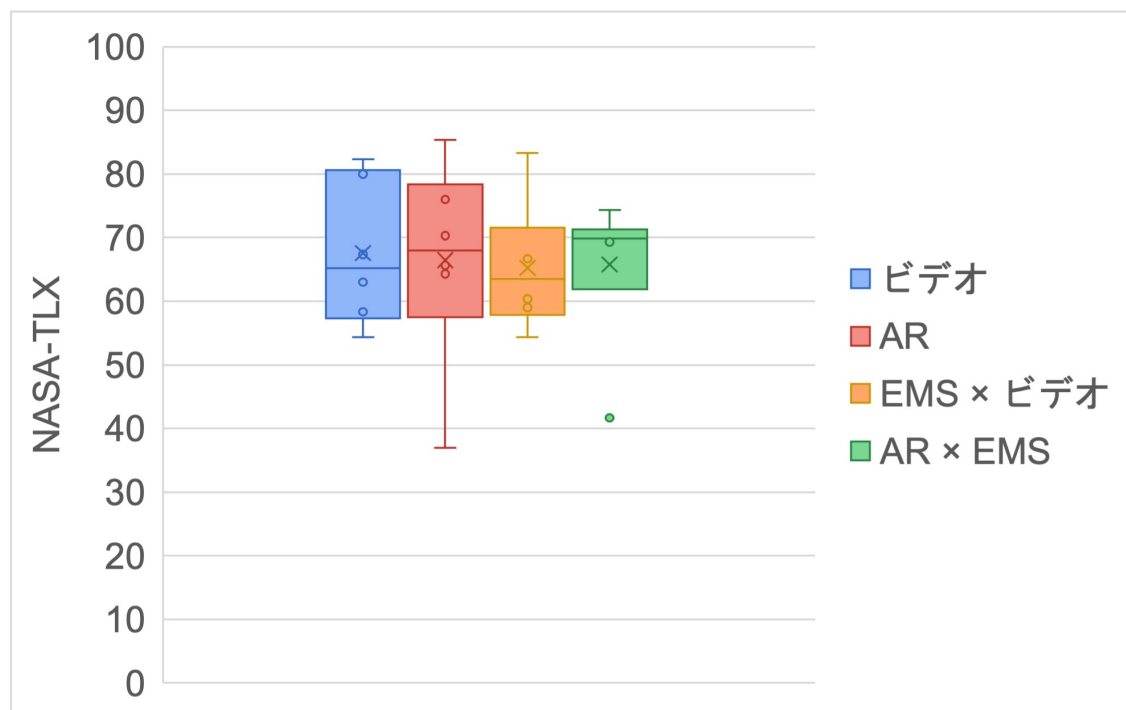


図 5.2: NASA-TLX 総合スコア.

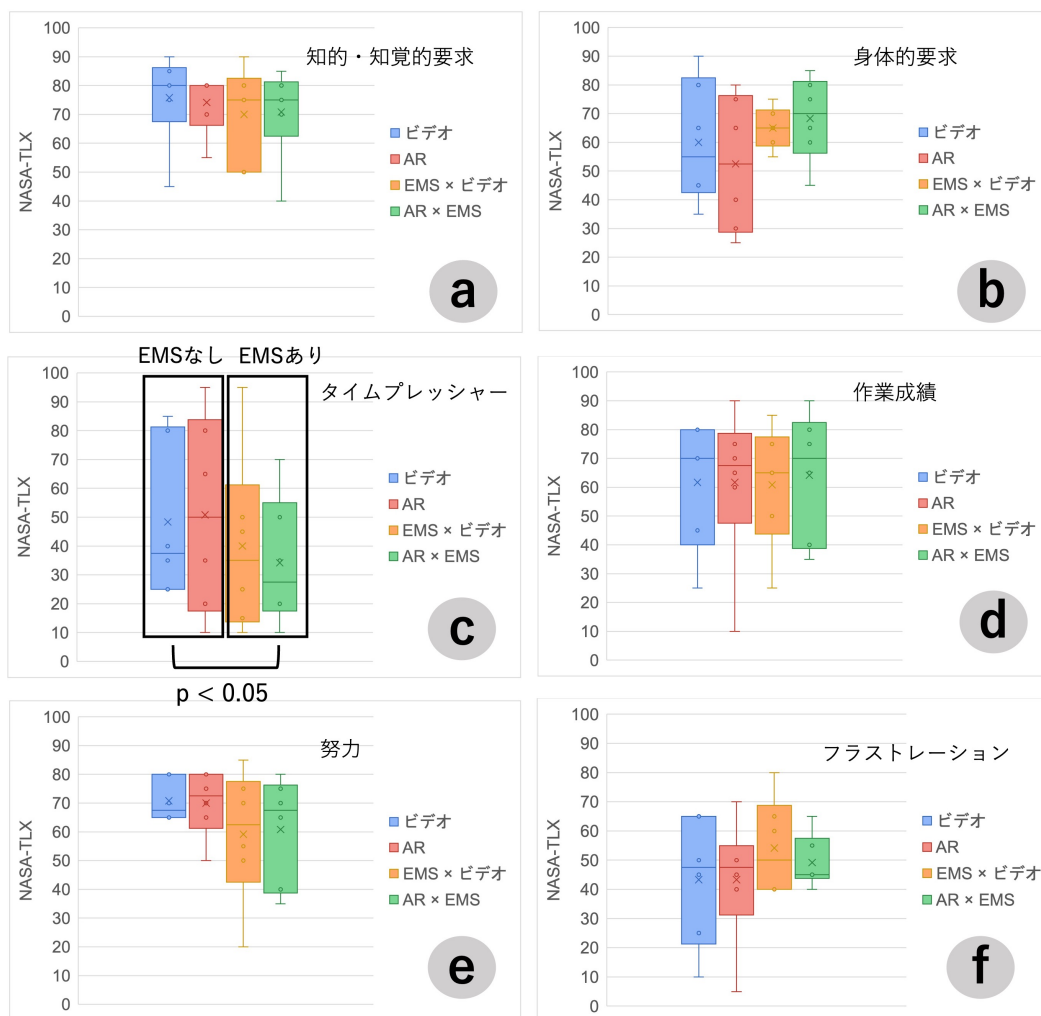


図 5.3: NASA-TLX 下位尺度のスコア. (a) 知的・知覚的要求. (b) 身体的要求. (c) タイムプレッシャー. (d) 作業成績. (e) 努力. (f) フラストレーション.



### 5.3 主観的評価による学習効果

各条件間で学習効果を感じた順序の結果を図 5.4 に示す。システムユーザビリティの結果に反して、EMS × ビデオが最も平均値が高く 1 位評価数も多かったが、AR および AR × EMS 条件では平均値が他より低かった。また、AR × EMS 条件において、一番効果的だと感じた演奏タスクを選択させた結果、単音、アルペジオおよびコードをそれぞれ 2 名が選択した。

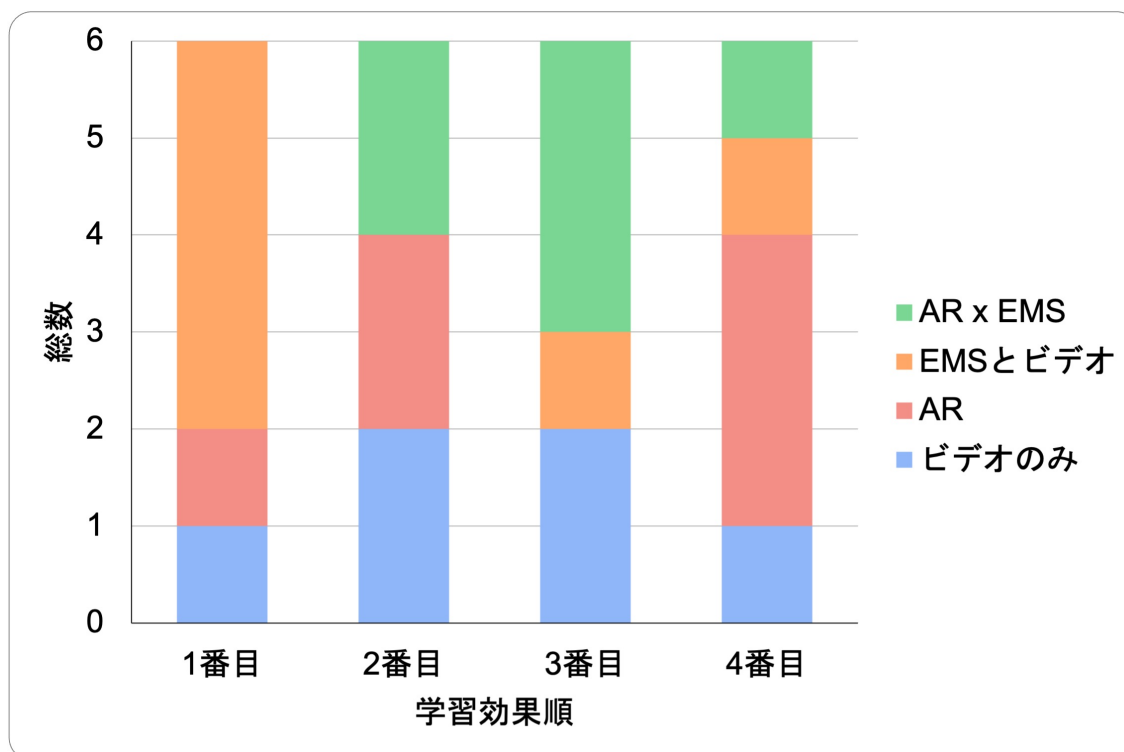


図 5.4: 主観的評価による学習効果順序.

### 5.4 事後自由記述アンケート

AR に関して、「黄色い球ははっきり見えたが、ボーンはあまり見えず、手の形が把握しづらかった。指導中手首の角度についての話が多かったが、ハンドからはよく分からなかった。」(P1), 「AR 条件の手を見るのが難しかった。」(P2) といった回答があった。

EMS に関して、「指導者側の入力が多いと刺激が全部正確に届かないことがあった (特にアルペジオ、最初の親指と最後の小指のみしか流れない)。刺激本数が多いとどの指に流れてるのかわからなくなった (特にコードは、指全部に刺激来てるように感じた).」(P1), 「EMS で電気を流すのは同時に同じ音を弾いているときはあまり気にならないが、指導者の映像を見な

がら聞いているときに電気が流れるのは少し気になった。」(P4),「指導中は指導者の意見を聞きたいため、EMS の刺激は必要ないと感じた。」(P5) といった回答があった。

その他実験に関して、「指導者に正しいリズムを教えてもらう際に、ビデオの映像の音ズレがやや気になった。ビデオがない条件において、AR や EMS では弾いている鍵盤が曖昧でわかりにくい時があったため、鍵盤が光るとより学びやすいと感じた。」(P3),「自分のペースで練習したかった。自分で何回も反復することで、自分は覚える気がするが、特に和音の場合、自分のペースでたくさん反復したかった。」(P6) といった回答があった。

## 5.5 考察

5.1 節～5.4 節に示した実験結果より、本研究で想定した AR 提示や EMS の有効性は示されず、特に EMS については付与によってユーザビリティが有意に低下することが示された。本節では、自由記述アンケートをもとに、AR ハンドおよび EMS の影響について考察を行う。

### 5.5.1 AR ハンド

複数の実験参加者が AR ハンドの視認性が悪いと感じたと回答した。Hololens は、光学的シースルーを用いた AR デバイスであるため、部屋の環境光による影響を受けやすい。したがって、視認性をあげるため、部屋の環境光をある程度暗く設定する必要があると考えられる。ただ、関節点は見えたがボーンが見えづらいという意見もあったため、色の問題も影響していると考えられる。さらに、Hololens では視野角が限られている。したがって、AR ハンドを表示するために、AR ハンドに Hololens を追従させる必要があるため、表示に影響があったと考えられる。

指導中手首の角度についての話が多かったにも関わらず、AR ハンドが手首まで表示がなく、確認できないという回答があった。AR ハンドを手首まで含める必要があると考えられるが、ボーン表示では手首の角度の確認や形状把握が分かりづらい。したがって、視認性の向上も考慮すると、AR ハンドを関節点とボーンを表示ではなく、リアルなハンドモデル表示が AR ハンドとして適切であると考えられる。

### 5.5.2 EMS

指導者側の入力が多いと刺激が全部正確に届かないことが実験中にみられた。これは、EMS の時間的な分解能が足らなかったため、入力が多いと EMS が与えられなかったと考えられる。刺激本数が多いとどの指に流れてるのかわからないと感じる参加者がみられた。これは、EMS の制御において、指の選択が適切に行われていなかったことが考えられる。今回のシステムでは、AR 上のピアノと指のコリジョン情報と MIDI 情報の打鍵から指の選択を行っている。指が異なる指に重なるように弾いた場合、複数の指がコリジョン情報として取得される。その結果、誤った指にも EMS が与えられてしまう。したがって、適切な指の選択のためにコ

リジョン情報の取得を改善する必要がある。また、EMS の強さを指が少し曲がる程度にしていたため、EMS を複数の指に与えられている場合に、EMS が分散して、どの指に流れているか知覚しづらかった可能性が考えられる。「EMS で電気を流すのは同時に同じ音を弾いているときはあまり気にならないが、指導者の映像を見ながら聞いているときに電気が流れるのは少し気になった。」(P4)、「指導中は指導者の意見を聞きたいため、EMS の刺激は必要ないと感じた。指導者からの指導を聞いている際、EMS が与えられることに対して気になる実験参加者が複数いた。したがって、指導者による学習では、指導者側で EMS の ON/OFF 切り替えを行い、口頭による聴覚フィードバックと EMS による触覚フィードバックを分ける必要があると考えられる。

## 5.6 追加アンケート

実験結果および事後アンケートの回答をもとに、今後のシステム改善のためのフィードバックを得るため、実験参加者のうち 5 名に追加アンケートを実施した。追加アンケートでは、AR ハンド、EMS および実験について質問した。

### 5.6.1 AR ハンド

AR ハンドの視認性は悪いと思うか「はい(1)」から「いいえ(5)」の 5 段階のリッカートスケールにより回答させた結果、平均 2.4、標準偏差 0.89 であった。したがって、ビデオ条件よりもシステムユーザビリティが下がった原因として視認性の影響があったと考えられる。視認性について、環境光、AR ハンドの色(関節点：黄色、ボーン：赤色)、および Hololens の視野角について、それぞれ影響があったかを「はい」か「いいえ」の 2 択で回答させた。影響があったと回答した人数は、環境光で 1 名、AR ハンドの色で 0 名、視野角で 1 名であった。一方、本設問に関する自由記述より、AR ハンドの色ではなく透明度が影響していたという回答が 2 名から得られた。したがって、環境光、AR ハンドの色および Hololens の視野角は視認性の影響として低く、AR ハンドの透明度が視認性に対して影響したと考えられる。

AR ハンドの表示に関して、ボーン表示ではなくリアルなハンドモデルにしたほうが良いと思うか、「はい」か「いいえ」の 2 択で回答させた結果、4 人がはいと回答した。また、「ボーン同士が重なって手の形がイメージしづらい。」(P1)、「リアルな表示の方が、指の種類をすぐに判別できて分かりやすい。」(P3)、「指導者から指や手首についての説明もあったため、リアルな方が分かりやすいと感じた。」(P5)という意見も挙げられた。さらに、AR ハンドの表示は手首まであったほうが良いと思うか、「なくてもいい」から「あったほうがいい」の 5 段階のリッカートスケールにより回答させた結果、平均 3.2、標準偏差 1.64 であった。したがって、AR ハンドは関節点とボーン表示ではなく、手首まで含めたリアルな 3D ハンドモデルが適切であると考えられる。

AR ハンドはどのタイミングで指を離すか、次の鍵盤に移すかがわかりやすかったか、「はい」か「いいえ」の 2 択で回答させた結果、1 人がはいと 1 人が部分的にはいと回答した。ま

た、「音の流れと AR ハンドの動きにラグを感じたので細かい指の動きやタイミングは分からなかったが、手全体の動きは参考にできた。」(P1),「押す鍵盤だけでなく、指の移動動作や手の形を見ることが出来る点が分かりやすかった。ただ、左右の位置はわかったが、鍵盤と AR ハンドの距離感が分かりにくかったため、AR ハンドの視認性が上がればさらにわかりやすいと感じた。」(P3),「AR ハンドの指が鍵盤を移動する際(1 オクターブ以上)、いきなり鍵盤に指があったのでタイミングが取りづらかった。」(P5)という意見が挙げられた。したがって、AR ハンドの視認性が減少すると、学習効果も減少することが考えられる。

AR ハンドのなめらかさ(フレームレート)は十分だったか、「十分」か「不十分」の2択で回答させた結果、3名が十分と答えた。また、「AR ハンドの指がいきなり移動することがあったが、1 オクターブよりも離れていなければ滑らかに動作してた。」(P5)という意見が挙げられた。

### 5.6.2 EMS

テンポが速いとき、EMS は適切に流れていたか、「はい」か「いいえ」の2択で回答させた結果、1名がはいと回答した。また、指の本数が多いとき、どの指にEMS が与えられていたか認識できていたか、「はい」か「いいえ」の2択で回答させた結果、3名がはい、1名がある程度認識できたと回答した。加えて、EMS の強さは弱いと思うか、「はい」か「いいえ」の2択で回答させた、はいと回答した参加者はいなかった。したがって、今回の実験設計に対して、現状のシステムではEMS の時間的な分解能が足りず、指選択やタイミング制御が不適切であったと考えられる。

指導者の解説に集中するため、解説中にEMS が与えられるのは不必要だと思うか、「必要」か「不必要」の2択で回答させた結果、2名が必要、2名が部分的に必要という回答だった。また、「解説中にEMS があるのは、理解の一助になった。」(P2),「場合による。鍵盤を押す指やタイミングを教えてもらう際はEMS が役立つと感じる。」(P3),「EMS が与えられると指導者の解説に集中できず、覚えにくかった。」(P5),「EMS か映像か AR ハンドのいずれかは欲しい。」(P6)という意見が挙げられた。さらに、学習中、EMS が与えられる時間と与えない時間をはっきり分けた方がいいと思うか、「はい」か「いいえ」の2択で回答させた結果、3名がはいと回答した。したがって、解説にEMS を与えることによって動かす指の選択やタイミング提示に有効であると考えられる。ただ、指導者が解説中にEMS を与える場合、与えるタイミングの提示を明示的に示す必要があると考えられる。

### 5.6.3 実験について

学習時間中、自分のペースで練習ができる時間がほしいと思ったか、「はい」か「いいえ」の2択で回答させた結果、4名がはいと回答した。したがって、指導者による指導の他に、動作の定着のため反復練習の時間を設ける必要があると考えられる。また、「練習中に単音、アルペジオと比べてコードはやってる作業が違うように感じた。」(P1)という意見が挙げられたことから、特に習得が難しい動作に対して有効であると考えられる。

## 第6章 今後の課題

実験結果から、現段階において提案システムはEMS制御およびAR表示の課題が明らかになった。したがって、学習者の学習体験および学習効果を向上させるために、システムの修正が必要である。

### 6.1 AR表示の改善

本研究のARハンド表示は、視認性の悪さが課題として明らかになった。本システムでは、手の関節点とボーンの簡素な表示のみであったが、色の透明性を原因として、視認性が悪くなった。そこで、視認性の向上のために、ARハンドを手首を含めた3Dハンドモデルに拡張し、手の形状のほかに、手首の角度をより明確に認識できるようにする。ただ、現状のシステムでは、手のみをハンドトラッキングしているため、手首の角度情報も取得する必要がある。また、俯瞰からの映像では、手首の角度が正確に取得できない可能性があるため、真横の映像からの角度取得や、映像からのトラッキング以外の方法を用いて角度情報を取得する必要がある。

### 6.2 EMS制御システムの改善

EMS制御システムにおいて、タイミングのコントロールおよび刺激の正確性の向上が課題として明らかになった。そこで指導者がEMSのタイミングをコントロールし、口頭指導時にはEMSをオフにすることで、学習者の集中を向上させる。また、コリジョン情報による指の選択を改善し、特定の指に対する刺激の正確さを向上させることによって、刺激がどの指に流れているかを明確にし、学習者の混乱を減らす。さらに、EMSの分解能を向上させ、速いテンポに適応させる。

指導者の指の動きを、MIDI情報から間接的に取得しており、指の動きの提示としてMCP関節の屈曲に限定している。音階の打鍵ではMCP関節が主として屈曲するが、和音の打鍵ではMCP関節に加えて手首やDIP関節が屈曲する。したがって、より正確な指の動きの提示を行うため、筋電位を用いて指導者の指の動きの情報を取得し、MCP関節に加えて手首やDIP関節の動きの提示を行う。

## 第7章 結論

本研究では、指導者の手を模倣した AR ハンドと EMS を組み合わせたピアノ演奏指導支援を提案し、そのシステムを実装した。本システムでは、21 の関節点と関節点を結んだボーンから構成される AR ハンドを用いて、遠隔指導者の手を表現した。また、EMS を用いて、学習者の片手の 5 本の指を制御した。その後、提案システムを含めたビデオ、AR、EMS × ビデオ、AR × EMS の 4 つの指導条件で評価実験を行った。実験結果から、システムのユーザビリティや学習効果に関する複数の課題が明らかになった。今後の課題として、AR 表示の改善および EMS 制御システムの改善の必要性が挙げられる。AR ハンド表示に関しては、詳細な 3D ハンドモデルの使用によって視認性を向上させる必要がある。また、EMS 制御システムにおいては、指導者がタイミングをコントロールし、刺激の正確さを向上させることによって学習者の集中を高め、混乱を減らす必要がある。

## 謝辞

本研究を進めるにあたり，川口一画先生，志築文太郎先生，高橋伸先生には多大なご意見とご指導をいただきました。こころから感謝申し上げます。特に，川口一画先生には，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，研究や論文執筆において多大なるご心配をおかけしました。また，研究の相談や研究生活に関して多くのお力添えをいただきました。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，先輩方には研究生活においてお世話になりました。また，COMMUNICATION チームの皆様にはチームゼミや研究生活におけるご意見やご助言といった研究に関する多くの支援をいただきました。深く感謝します。特に井原圭一氏には，研究方針や実験実施，論文投稿など，本研究における重要な場面において多くのご指導をいただきました。重ねて感謝申し上げます。

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いただいた家族，友人に深く感謝申し上げます。

## 参考文献

- [1] カシオ計算機. 約 5 割の人がネット・テレビの見過ぎを楽器演奏で解消できたと回答. [https://www.casio.co.jp/release/2020/0820\\_1k-315\\_1k-515/](https://www.casio.co.jp/release/2020/0820_1k-315_1k-515/). (Accessed on 09/06/2023).
- [2] 山野楽器. 【山野楽器】「2022 年に始めたい楽器」アンケート、結果発表 — 山野楽器のプレスリリース — 共同通信 pr ワイヤー. [https://kyodonewsprwire.jp/release/20220125\\_6509](https://kyodonewsprwire.jp/release/20220125_6509). (Accessed on 09/06/2023).
- [3] 経済産業省. 統計表一覧 (経済産業省生産動態統計) | 経済産業省生産動態統計 | 経済産業省. [https://www.meti.go.jp/statistics/tyo/seidou/result/ichiran/08\\_seidou.html](https://www.meti.go.jp/statistics/tyo/seidou/result/ichiran/08_seidou.html). (Accessed on 09/06/2023).
- [4] 一般財団法人ヤマハ音楽振興会. 楽器演奏に関する調査。働く男女、3 人に 1 人以上は今後楽器を始めたい！一方、4 割は挫折経験あり。始めたい楽器 1 位「ピアノ」一緒に楽器を演奏したい俳優ランキング - 一般財団法人ヤマハ音楽振興会のプレスリリース. <https://www.value-press.com/pressrelease/293112>. (Accessed on 09/06/2023).
- [5] C. Ailie Fraser, Joy O. Kim, Alison Thornsberry, Scott Klemmer, and Mira Dontcheva. Sharing the studio: How creative livestreaming can inspire, educate, and engage. In *Proceedings of the 2019 Conference on Creativity and Cognition*, CC '19, p. 144–155, New York, NY, USA, 2019. Association for Computing Machinery.
- [6] Katerina Labrou, Cagri Hakan Zaman, Arda Turkyasar, and Randall Davis. Following the master's hands: Capturing piano performances for mixed reality piano learning applications. 2023.
- [7] Akifumi Takahashi, Jas Brooks, Hiroyuki Kajimoto, and Pedro Lopes. Increasing electrical muscle stimulation's dexterity by means of back of the hand actuation. In *Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '21, New York, NY, USA, 2021. Association for Computing Machinery.
- [8] 三浦雅展. ピアノ演奏の初期教育における指の構えに関する考察. 音楽音響研究会資料, Vol. 39, No. 8, pp. 37–42, 02 2021.
- [9] Jordan Aiko Deja, Sven Mayer, Klen Čopić Pucihar, and Matjaž Kljun. A survey of augmented piano prototypes: Has augmentation improved learning experiences? *Proc. ACM Hum.-Comput. Interact.*, Vol. 6, No. ISS, nov 2022.



- [10] Feng Huang, Yu Zhou, Yao Yu, Ziqiang Wang, and Sidan Du. Piano ar: A markerless augmented reality based piano teaching system. In *2011 Third International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics*, Vol. 2, pp. 47–52, 2011.
- [11] Barakonyi István and Schmalstieg Dieter. Augmented reality agents in the development pipeline of computer entertainment. *Entertainment Computing - ICEC 2005*, pp. 345–356, 2005.
- [12] Chung-Hsuan Sun and Pei-Ying Chiang. Mr. piano: A portable piano tutoring system. In *2018 IEEE XXV International Conference on Electronics, Electrical Engineering and Computing (INTERCON)*, pp. 1–4, 2018.
- [13] Ruofan Liu, Erwin Wu, Chen-Chieh Liao, Hayato Nishioka, Shinichi Furuya, and Hideki Koike. Synchronized hand difference visualization for piano learning. In *ACM SIGGRAPH 2022 Posters*, SIGGRAPH '22, New York, NY, USA, 2022. Association for Computing Machinery.
- [14] Ruofan Liu, Erwin Wu, Chen-Chieh Liao, Hayato Nishioka, Shinichi Furuya, and Hideki Koike. Pianohandsync: An alignment-based hand pose discrepancy visualization system for piano learning. In *Extended Abstracts of the 2023 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '23, New York, NY, USA, 2023. Association for Computing Machinery.
- [15] Jonathan Chow, Haoyang Feng, Robert Amor, and Burkhard C. Wünsche. Music education using augmented reality with a head mounted display. In *Proceedings of the Fourteenth Australasian User Interface Conference - Volume 139*, AUIC '13, p. 73–79, AUS, 2013. Australian Computer Society, Inc.
- [16] Seth Glickman, Byunghwan Lee, Fu Yen Hsiao, and Shantanu Das. Music everywhere - augmented reality piano improvisation learning system. In *New Interfaces for Musical Expression*, 2017.
- [17] D. Molero, Santiago Schez-Sobrino, David Vallejo-Fernandez, Carlos González-Morcillo, and Javier Albusac. A novel approach to learning music and piano based on mixed reality and gamification. *Multimedia Tools and Applications*, Vol. 80, pp. 165–186, 2020.
- [18] Will Molloy, Edward Huang, and Burkhard C. Wünsche. Mixed reality piano tutor: A gamified piano practice environment. In *2019 International Conference on Electronics, Information, and Communication (ICEIC)*, pp. 1–7, 2019.
- [19] Niccolò Granieri and James Dooley. Reach, a keyboard-based gesture recognition system for live piano sound modulation. 06 2019.

- [20] Jakob Karolus, Annika Kilian, Thomas Kosch, Albrecht Schmidt, and Paweł W. Wozniak. Hit the thumb jack! using electromyography to augment the piano keyboard. In *Proceedings of the 2020 ACM Designing Interactive Systems Conference*, DIS '20, p. 429–440, New York, NY, USA, 2020. Association for Computing Machinery.
- [21] Ayaka Ebisu, Satoshi Hashizume, Kenta Suzuki, Akira Ishii, Mose Sakashita, and Yoichi Ochiai. Stimulated percussions: Method to control human for learning music by using electrical muscle stimulation. In *Proceedings of the 8th Augmented Human International Conference*, AH '17, New York, NY, USA, 2017. Association for Computing Machinery.
- [22] Arinobu Nijima, Toki Takeda, Kentaro Tanaka, Ryosuke Aoki, and Yukio Koike. Reducing muscle activity when playing tremolo by using electrical muscle stimulation to learn efficient motor skills. *Proc. ACM Interact. Mob. Wearable Ubiquitous Technol.*, Vol. 5, No. 3, sep 2021.
- [23] Emi Tamaki, Takashi Miyaki, and Jun Rekimoto. Possessedhand: Techniques for controlling human hands using electrical muscles stimuli. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '11, p. 543–552, New York, NY, USA, 2011. Association for Computing Machinery.
- [24] Romain Nith, Shan-Yuan Teng, Pengyu Li, Yujie Tao, and Pedro Lopes. Dextrems: Increasing dexterity in electrical muscle stimulation by combining it with brakes. In *The 34th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '21, p. 414–430, New York, NY, USA, 2021. Association for Computing Machinery.
- [25] Jun Nishida and Kenji Suzuki. biosync: A paired wearable device for blending kinesthetic experience. In *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '17, p. 3316–3327, New York, NY, USA, 2017. Association for Computing Machinery.
- [26] Mediapipe. Mediapipe — google for developers. <https://developers.google.com/mediapipe>. (Accessed on 1/31/2024).
- [27] Microsoft. Microsoft hololens — mixed reality technology for business. <https://www.microsoft.com/en-us/hololens>. (Accessed on 09/06/2023).
- [28] Casio. Lk-520 — casio. <https://www.casio.com/jp/electronic-musical-instruments/product.LK-520>. (Accessed on 09/06/2023).
- [29] CVzone. Cv zone - computer vision zone. <https://www.computervision.zone>. (Accessed on 09/06/2023).
- [30] Pygame. pygame.org news. <https://www.pygame.org/news>. (Accessed on 09/06/2023).

- [31] Sanitas. For regeneration and pain relief sem 43 - digital ems/tens — sanitas onlineshop. <https://sanitas-online.de/en/p/sem-43-digital-ems-tens-1>. (Accessed on 09/06/2023).
- [32] Naotaka Sakai, Michael C. Liu, Fong-Chin Su, Allen T. Bishop, and Kai-Nan An. Motion analysis of the fingers and wrist of the pianist. *Medical Problems of Performing Artists*, Vol. 11, No. 1, pp. 24–29, 1996.
- [33] 全訳ハノンピアノ教本 全音ピアノライブラリー. 全音楽譜出版社, ペーパーバック, 1 1955.
- [34] John Brooke. *SUS – a quick and dirty usability scale*, pp. 189–194. 01 1996.
- [35] S. G. Hart and Lowell E. Staveland. Development of nasa-tlx (task load index): Results of empirical and theoretical research. *Advances in psychology*, Vol. 52, pp. 139–183, 1988.

# 著者論文リスト

## 参考論文

本論文の主な内容は、下記にて公表済みである。

- 査読あり国内会議論文

1. 守新太郎, 井原 圭一, 川口 一画, AR ハンドと EMS による手指の同期を用いた遠隔でのピアノ演奏指導, 第 31 回インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ (WISS 2023) , 11 月 29-12 月 1 日, 2023, 山梨, 日本ソフトウェア科学会, pp. 41-47.

## 付録A SUS アンケート

## System Usability Scale Template

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



共有なし

\* 必須の質問です

参加者番号 \*

回答を入力

条件 \*

- ☐ AR
- ☐ EMS
- ☐ AR x EMS
- ☐ ビデオ

このシステムをしばしば利用したいと思う \*

|          | 1                     | 2                     | 3                     | 4                     | 5                     |          |
|----------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------|
| 全く同意できない | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | 非常に同意できる |

このシステムを利用するには説明が必要となるほど複雑であると感じた \*

|          | 1                     | 2                     | 3                     | 4                     | 5                     |          |
|----------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------|
| 全く同意できない | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | 非常に同意できる |

このシステムは容易に使いこなす事ができると思った \*

|          | 1                     | 2                     | 3                     | 4                     | 5                     |          |
|----------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------|
| 全く同意できない | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | <input type="radio"/> | 非常に同意できる |

このシステムを利用するのに専門家のサポートが必要だと感じる \*

1 2 3 4 5  
全く同意できない ○ ○ ○ ○ ○ 非常に同意できる

このシステムにあるコンテンツやナビゲーションは十分に統一感があると感じた \*

1 2 3 4 5  
全く同意できない ○ ○ ○ ○ ○ 非常に同意できる

このシステムでは一貫性のないところが多々あったと感じた \*

1 2 3 4 5  
全く同意できない ○ ○ ○ ○ ○ 非常に同意できる

たいていの人は、このシステムの利用方法をすぐに理解すると思う \*

1 2 3 4 5  
全く同意できない ○ ○ ○ ○ ○ 非常に同意できる

このシステムはとても操作しづらいと感じた \*

1 2 3 4 5  
全く同意できない ○ ○ ○ ○ ○ 非常に同意できる

このシステムを利用できる自信がある \*

1 2 3 4 5  
全く同意できない ○ ○ ○ ○ ○ 非常に同意できる

このシステム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  
全く同意できない ○ ○ ○ ○ ○ 非常に同意できる