



# VR 空間における指揮動作の 学習支援技術の研究

佐野文哉<sup>1)</sup>, 藤原克哉<sup>1)</sup>, 齋藤正親<sup>1)</sup>, 四反田素幸<sup>2)</sup>, 水戸部一孝<sup>1)</sup>

1) 秋田大学大学院 理工学研究科 (〒010-8502 秋田県秋田市手形学園町 1-1, m8017511@s.akita-u.ac.jp)

2) 秋田大学 (〒010-8502 秋田県秋田市手形学園町 1-1)

**概要:** 熟練者の動作を学習するため, VR 技術を利用した自己学習可能な訓練システムの研究が進められている. 本研究では, 音楽の指揮動作に着目し, 指揮初学者の自己学習の効率向上を図ることを目的とする. 予め磁気式 MoCap 装置を用いて計測した熟練者の指揮動作を解析すると共に, 没入型 HMD を装着した指揮初学者に VR 空間で模倣訓練させることが可能な指揮動作の訓練用シミュレータを構築した. さらに, シミュレータを用いた訓練による学習成果を評価するために実験を実施し, 実験参加者の指揮動作を計測した.

**キーワード:** 指揮, 自己学習, 学習支援, モーションキャプチャ

## 1. はじめに

テクニックやノウハウを含む熟練者の技能を学習する方法は, 主に 2 つある. 1 つ目は, 熟練者が教師として生徒の間違いを指摘し, 改善するよう指導するレッスンに参加することである. これは効果的であるが, 教師が常に隣にいて教えることができるわけではない. 2 つ目は, 生徒が教本や動画を用いて教師の動作を観察し, 自己学習することである[1][2]. しかし, 生徒が初学者である場合, 教師の動作を完全に理解して正しく実行することは容易ではない. 音楽の指揮動作においても自己学習は重要であり, 特に初学者の自己学習不足が問題となっている. 指揮動作の自己学習も教本や動画で学び, 音に合わせた自身の指揮動作を姿見鏡, ビデオカメラなどを用いて確認する. 正しい指揮動作の図形を描くことや腕の中心で指揮を振ることなどに注意し練習することが望ましいが, 初学者が自身の指揮動作を客観的に評価することは難しい. そこで, 熟練者のお手本の指揮動作を確認しながら自己学習できる環境が有効であると考えられる.

近年, バーチャルリアリティ(以下, VR)技術を利用して, 熟練者の動作を模倣訓練することができる, 自己学習可能な訓練システムの研究が進められている[3].

そこで, 本研究では, 熟練者の指揮動作に着目し, VR 技術を用いて, 熟練者の指揮動作を模倣訓練することができるシミュレータを構築する. そして, 指揮初学者の自己学習の効率向上を図ることを目的とする.

## 2. VR 指揮訓練シミュレータの構築

### 2.1 システムの概要と必要な機能

本システムは, 指揮初学者を対象に, 指揮動作の基本である拍取りの自己学習の支援を目的とする. 拍取りは, 手や指揮棒の動きで拍を刻んで演奏者に一定のテンポを伝えるのが目的であり, 2 拍子, 3 拍子, 4 拍子といった拍子毎に基本形がある. それぞれの基本形は繰り返しの動作で構成されている. 今回は基本形のなかで初歩の自己学習に向いているものとして, ゆったりとした 60BPM(Beats Per Minute)のテンポで, 日本の音楽に多い 4 拍子[4]を学習対象とした.

自己学習のために, 学習者に, 手本となる教師による指揮動作を視覚提示して, 動きを学べるようにする. また, 教師の動作に合わせて自分でも指揮動作をすることで, 効率的に教師の指揮動作を訓練することができる. そのために, シミュレータには教師の指揮動作の収録機能が必要である. また, シミュレータを利用する際に学習者に有効であると考えられる以下の 3 つの機能を実装する.

- (1) VR 空間に教師の指揮動作を手の 3DCG モデルを用いて提示して, 学習者は様々な角度から確認したり, 自身の手のモデルを教師の手のモデルに重ね合わせて模倣したりすることができる「お手本提示機能」.
- (2) 学習者が自身の指揮動作を対面からの視点で客観的に確認しながら振ることができる「ミラー機能」.
- (3) 学習者の指揮動作を収録し, 教師の指揮動作と重ね合わせてリプレイすることで, 学習者の指揮動作と教師の指揮動作の違いを確認することができる「リプレイ機能」.

Fumiya SANO, Katsuya FUJIWARA, Masachika SAITO,  
Motoyuki SHITANDA and Kazutaka MITOBE

(1)により、学習者は教師の指揮動作を観察したり、模倣訓練したりすることができ、教師の指揮動作に対する理解が深まると考える。また、(2)により、学習者の指揮動作を対面からの視点で客観的に確認することで、腕を身体を中心に振れているかなどを確認することができる。 (3)により、学習者の指揮動作と教師の指揮動作の違いを学習者自身が認識することができる。

## 2.2 VR 指揮訓練シミュレータのシステム構成

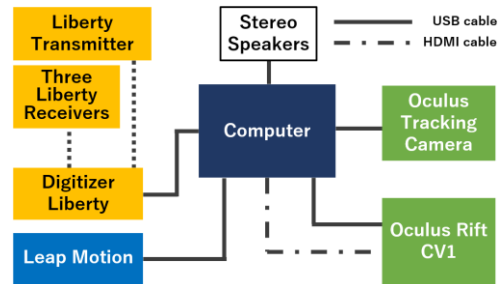
2 種類の MoCap 技術を用いて、教師及び学習者の身体や手の位置・姿勢情報を計測し記録できる、指揮計測システムを構築した。さらに、VR 技術を活用して、予め収録した教師の指揮動作の位置・姿勢情報を用いて、シミュレータ上で元の指揮動作を手の 3DCG モデルによって再現し学習者に提示するシミュレータを構築した。本研究で構築したシミュレータを VR 指揮訓練シミュレータと呼ぶ。

本システムは、制御用 PC(Windows 10 OS, Intel Core i7-6700 CPU, NVIDIA GeForce GTX 1080 8GB GPU, 16GB RAM)と磁気式 MoCap 装置 (Liberty™ 16 system, Polhemus)、光学式のマーカーレス MoCap (Leap Motion)、HMD(Oculus Rift CV1, Oculus)、HMD 用のポジショントラッキングカメラ、スピーカーで構成される。Liberty は、デジタイザ本体とトランスミッタ、3つのレシーバから構成される。Liberty は、トランスミッタに対するレシーバの相対的な位置・姿勢情報の 6 自由度の計測が可能であり、0.0038mm の位置分解能、0.0012deg の角度分解能を有している。Leap Motion は 0.001mm の位置分解能を有している。Liberty は指揮動作の解析に用い、Leap Motion は手指の認識に特化しているため、VR 空間における手指の 3DCG モデルの表示に用いる。図 1 に VR 指揮訓練シミュレータのシステム構成およびシステムの外観図を示す。同図(a)にシステム構成、同図(b)にシステムの外観を示す。トランスミッタの原点から垂直方向、水平方向ともに 35cm の位置に Leap Motion の中心がくるように、木材でできた台の上にトランスミッタと Leap Motion を固定する。Leap Motion の中心から水平距離 22cm、トランスミッタの原点から水平距離 57cm の位置の床に、学習者の足のつま先を合わせる立ち位置の線を引いた。教師および学習者がこの位置でトランスミッタの正面に立って手を振ることで、Liberty と Leap Motion との両方の検出範囲を満たした状態で計測が可能になる。

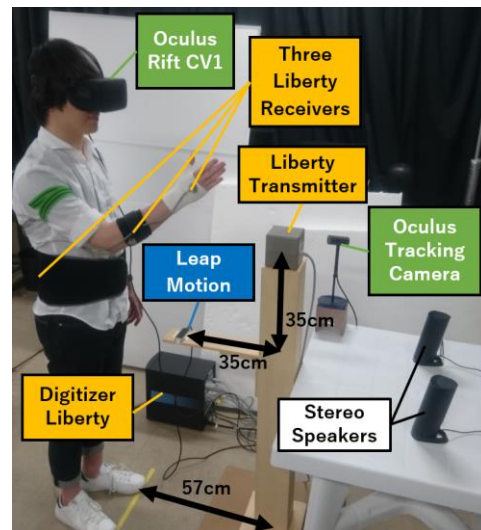
教師及び学習者は、レシーバを手の甲、前腕部、腰部の 3 箇所に取り付ける。学習者は、お手本模倣機能等の視覚提示を得るために HMD を装着する。Leap Motion によって実空間と同じように提示される手を動かすことで、メトロノームの音に合わせて振られる教師の指揮動作を HMD に表示される VR 空間で模倣訓練することができる。シミュレータは、メトロノームの音をスピーカーから鳴らす。音量は、教師や学習者がはっきり聞こえるように設定した。両者は、メトロノームの音を聴きながら指揮を振る。シミュレータ上で教師と学習者の手指の 3DCG モデルは、見分け易いようにそれぞれ青色と肌色に色分けし、互いに重なったときに隠されないようにどちらも半透明に設定した。同様に、レシーバの位置・姿勢情報を同期したオブジェク

ト(以下、レシーバオブジェクト)は指揮動作の軌跡の提示などに用いるため、教師と学習者でそれぞれ半透明の緑色、赤色に設定した。本シミュレータは指揮棒を持たずに素手の右手で指揮を振る学習を対象とする。

本シミュレータは、統合開発環境 Unity 2018.1.0f2 (Unity) を用いて C#言語によって構築した。座標系は、Unity の左手座標系に合わせ、Liberty と Leap Motion の座標系は変換して利用した。また、HMD を装着した学習者が、手を木材の台にぶつけないように、VR 空間にも同スケールの台を用意し、実空間と同様に見えるように工夫した。



(a) システム構成



(b) システムの外観図

図 1: VR 指揮訓練シミュレータのシステム構成およびシステムの外観図

## 2.3 教師の指揮の収録

### 2.3.1 教師の指揮動作の収録内容

前述した計測システムを用いて、右手で素手によって振られる指揮動作を収録した。収録する指揮動作は、指揮動作の基本動作である間接運動の「叩き」、「平均運動」、「しゃくい」とし、60BPM と 120BPM の 2 種類のテンポでそれぞれ 2 拍子、3 拍子、4 拍子を 32 小節分計測し、合計 9 つの基本動作を収録した。本システムのフレームレートは 120Hz である。

### 2.3.2 教師の指揮動作の収録結果

指揮動作の教師の経験のある男性 1 名を対象に、指揮動作を収録した。教師の指揮動作の収録結果から、Liberty と Leap Motion についてそれぞれ各軸方向の位置情報の経時変化を確認したところ、同様のグラフを描くことを目視に

より確認した。また、フレームエラー率は約 0.008%であった。フレームエラーによりデータの抜け落ちた箇所を補間した。まず、データのフレームエラー部分を削除し、データを 1/10 に間引いた。位置・姿勢情報はそれぞれスプライン補間と球面線形補間を用いて補間し、120Hz でリサンプリングした。

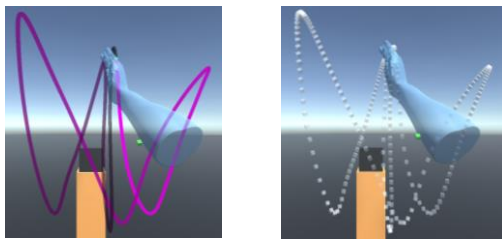
### 2.3.3 教師の指揮動作の訓練用データの抽出

2.1 節で述べたように、今回は 60BPM の 4 拍子を学習対象とした。収録した指揮動作の中で、手本としてシミュレータ上で提示する指揮動作に、間接運動の中で拍点が非常に明瞭である「叩き」を選定した[4]。1 回の訓練時間は、学習者が疲れないように 20 秒とした。20 秒で指揮図形を 5 回繰り返すことができる。

## 2.4 VR 指揮訓練シミュレータの実現

### 2.4.1 お手本提示機能の構築

教師の指揮動作をメトロノームの音とともに提示する機能を追加した。また、手の甲に取り付けたレーザーバの位置・姿勢情報を用いて、指揮動作の軌跡を線で描写するラインプロットと、指揮動作の軌跡をキューブ状のオブジェクトで描写するキューブプロット機能を付け加えた。図 2 にお手本提示機能の実行画面例を示す。同図(a)にラインプロット、同図(b)にキューブプロットを示す。



(a) ラインプロット (b) キューブプロット  
図 2: お手本提示機能の実行画面例

### 2.4.2 ミラー機能の構築

学習者の対面からの視点を設けるミラー機能を追加した。図 3 にミラー機能の実行画面例を示す。学習者は自身の指揮動作を客観的に確認することができる。

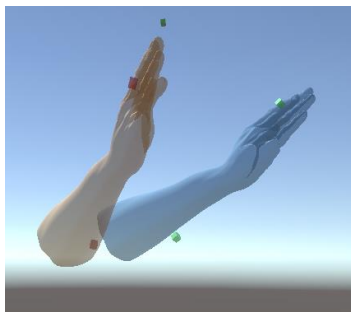


図 3: ミラー機能の実行画面例

### 2.4.3 リプレイ機能の構築

学習者の指揮動作を収録し、教師の指揮動作と重ね合わせてリプレイすることができるリプレイ機能を追加した。リプレイの一時停止、0.5 倍速のスローモーションが可能である。図 4 にリプレイ機能の実行画面例を示す。

リプレイ時の学習者の手の 3DCG モデルの色は半透明の灰色、レーザーバオブジェクトは半透明の橙色に設定した。

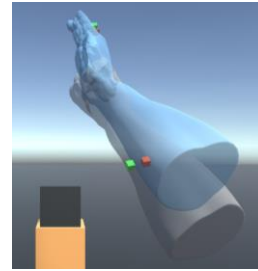


図 4: リプレイ機能の実行画面例

## 3. 教師の指揮動作の解析

### 3.1 指揮動作の軌跡の解析

指揮動作において重要な要素に、「正しくきれいな図を描く」ことがある[5]。図 5 に教師の指揮動作の軌跡を示す。手の甲に取り付けたレーザーバの位置情報の軌跡を示しており、横軸は X 座標、縦軸は Y 座標である。同図から、同様の軌跡を繰り返していることを見てとれる。

### 3.2 メトロノームの音と指揮動作の解析

指揮動作において重要な要素に、「正しく拍を示すこと」がある[5]。図 6 に教師の指揮動作の Y 座標の経時変化と拍の一例を示す。横軸は時間、縦軸左側の第 1 軸は手の甲に取り付けたレーザーバの Y 座標を示している。「叩き」の指揮動作では、Y 座標が極小値を取る点が拍を示す。縦軸右側の第 2 軸はメトロノームの音の鳴ったタイミングを示しており、「1」が鳴った状態を示し、「0」が鳴っていない状態を示す。20 秒程度の教師の指揮動作について、Y 座標の極小値間の時間差の平均は 0.9992 秒(S.D 0.0166 秒)である。また、Y 座標の極小値とメトロノームの音が鳴ったタイミングとの時間差の絶対値の平均は 0.0183 秒(S.D 0.0128 秒)である。このことから、1 秒につき 1 回音の鳴る 60BPM のメトロノームの音に合わせ、テンポを保つことができていることがわかる。

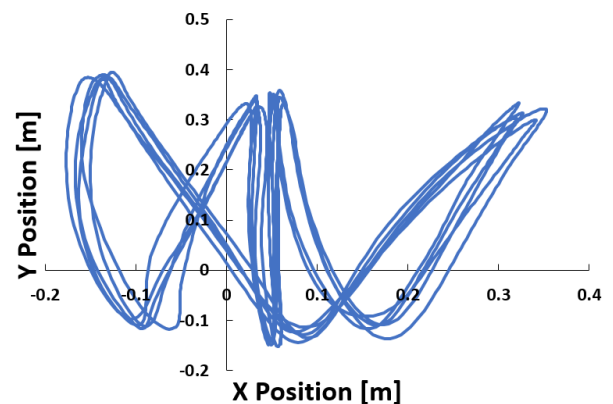


図 5: 教師の指揮動作の軌跡

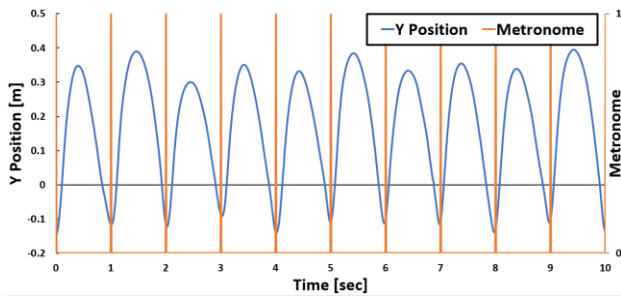


図 6: 教師の指揮動作の Y 座標の経時変化と拍の一例

## 4. VR 指揮訓練シミュレータの評価実験

### 4.1 評価実験の概要

構築した VR 指揮訓練シミュレータを用いて自己学習による学習成果の有無を評価した。

お手本提示機能から軌跡提示機能を除いたシミュレータを用いた。これは、後に実施する追加した機能を備えたシミュレータを用いて自己学習した実験参加者のグループと比較することで、追加した機能の有用性を評価するためである。

### 4.2 実験方法

実験参加者は指揮動作の実演経験のない 21-29 歳の右利きの男性 4 名である。最初に、ディスプレイに表示した VR 指揮訓練シミュレータの実行画面により、学習する教師の指揮動作を視聴させた。次に、実験参加者にレシーバと HMD を装着し、メトロノームの音および指揮動作提示機能のないシミュレータを用いて、VR 空間に慣れるため 2 分程度自由に動いてもらった。そして、訓練前の指揮動作を 5 回計測した(訓練前計測)。その後、5 分間シミュレータを用いて訓練させ計測し(訓練計測)、訓練後も同様に 5 回計測した(訓練後計測)。訓練前計測と訓練後計測に用いるシミュレータはメトロノームの音は鳴るが、お手本提示機能がなく、訓練計測に用いるシミュレータはメトロノームの音が鳴り、軌跡提示機能を除いたお手本提示機能を備える。本実験は、秋田大学倫理委員会の承諾を得て実施した。

### 4.3 計測結果

計測結果として、図 7 に実験参加者の計測結果の一例を示す。青色の線が教師、灰色の線が訓練前の実験参加者、橙色の線が訓練後の実験参加者の軌跡を示す。

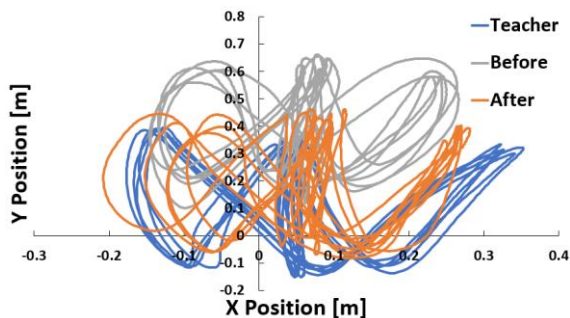


図 7: 実験参加者の計測結果の一例

## 5. 考察

本研究で構築した VR 指揮訓練シミュレータの利用場面について、教師と学習の立場でそれぞれ考察した。教師の立場では、指揮動作の収録機能を用いて熟練者の指揮動作を収録することで、熟練者の動作を保存し、後世に残すことができる点に有用性があると考えられる。学習者の立場では、身近に教師がいない場合でも、いつでも学習効率の良い自己学習ができる点に有用性があると考えられる。そのためには、学習者に教師の助言と同等レベルのフィードバックが必要であり、学習者の指揮動作を定量的に評価する採点システムなどの機能が必要であると考えられる。

## 6. おわりに

本研究では、VR 技術を活用して指揮動作の訓練用シミュレータを構築し、指揮初学者の自己学習の効率向上を図ることを目的とした。教師の指揮動作を収録し、VR 指揮訓練シミュレータにお手本提示機能、ミラー機能、リプレイ機能を追加した。また、VR 指揮訓練シミュレータを評価するため、追加機能を持たないシミュレータを用いて、4 名の実験参加者に訓練させ、訓練前後の指揮動作を計測した。

今後は、指揮図形の正確さと拍の正確さについて、訓練前後の計測結果の解析を進め、シミュレータの学習成果の有無を評価する。指揮図形の正確さは、教師と実験参加者の指揮動作の軌跡の距離を類似度として、動的時間伸縮法を用いて算出する。さらに、追加した 3 つの機能を備えたシミュレータを用いて同様の実験・解析を実施することで、追加した機能の有用性を評価する予定である。また、採点システムなどの新たな機能の追加も検討する。

## 参考文献

- [1] Florian Gosselin, Sylvain Bouchigny, Christine Megard, Farid Taha, Pascal Delcampe, Cedric d'Hauthuille: Haptic systems for training sensorimotor skills: A use case in surgery, *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 61, pp. 380–389, 2013.
- [2] Jacky C.P. Chan, Howard Leung, Jeff K.T. Tang, Taku Komura: A Virtual Reality Dance Training System Using Motion Capture Technology, *IEEE Transactions on Learning Technologies*, Vol. 4, No. 2, pp. 187–195, 2011.
- [3] 柴田傑, 玉本英夫, 松本奈緒, 三浦武, 横山洋之: 学習者中心のインタラクティブ舞踊学習支援システムの開発, *電子情報通信学会論文誌 D*, Vol. J97-D, No.5, pp.1014-1023, 2014.
- [4] 木許隆: 教育現場における指揮法の一考察, *埼玉純真短期大学研究論文集*, 第 2 号, pp.49-52, 2009.
- [5] 斎藤秀雄: 指揮法教程, 音楽之友社, 2010.