

# 手本動作とのずれを触覚フィードバックで提示する

## 左右反転動作の学習支援環境

和歌山大学大学院 システム工学研究科

森 大樹, 曾我 真人

### Presenting the gap between the model action and the action with tactile feedback

### Learning Support Environment for Left-Right Reversal Motion

Wakayama University Graduate School

Taiki Mori, Masato Soga

There are several situations where you need to learn the same movements on your non-dominant hand that you have already mastered on your dominant hand, such as batting and pitching in baseball or dancing. At present, however, the only way to practice these movements individually is to look in a mirror or to take a picture of the movement from behind and check the difference between the left and right sides while watching the video. In this study, we propose and construct a system that can be used in such situations to present left-right reversal movements from a first-person perspective using an HMD.

キーワード：拡張現実感, モーションキャプチャー, 学習支援, ヘッドマウントディスプレイ, 左右差

#### 1. はじめに

##### 1.1 研究の背景

野球の投球やサッカーのシュート, ダンス等利き手側, 片側ですでに習得済みの動作を, 非利き手側, 反対側でも習得することによってメリットがある動作がいくつかある. しかし, 既に片側で習得済みの動作を反対側でも習得するためにコーチの指導を仰ぐのは金銭的にコストがかかる. また, コーチと自身の体格差により, コーチの模倣ではうまくいかない場合もある. 自身の動作を毎回撮影して左右差を比較する場合, 時間的にコストがかかるという問題点が挙げられる.

##### 1.2 研究の目的

本研究ではビデオシースルーHMD, とそのコントローラを用いて, 自身の利き側の手本動作を左右反転した動作を PC 上で生成し, それを 1 人称視点で, 学習者が装着する HMD に AR で提示し, 学習者が, 非

利き側の体で重ねるように追従する手法を提案する. さらに, 試作システムを構築し, そのシステムの有用性を検証する.

##### 1.3 Kinect を用いたシステムの課題

先に記述したものと同様の研究背景, 研究目的によりビデオシースルーHMD とモーションキャプチャシステムとして Kinect v2 を用いたシステムを構築し, システム評価実験を行った. その際の実験結果が以下の通りである.

##### モーションデータの相違度の比較

表 1 各群の学習効果の値の平均値, 中央値

	平均値	中央値
実験群	1.08	0.85
統制群	0.87	0.77

※(学習効果の値)=(事前テストの相違度)/(事後テストの相違度)

学習効果の度合いの値に対して検定をかけた結果、有意差は認められなかった。

表 2 5段階評価アンケート結果

	平均値	中央値
対象動作（投球動作）は適切か？	3.9	4
対象動作への理解は深まるか？	4.3	4
1人称視点は役立つか？	4.3	4

5段階評価に関しては全体的に高めの評価を得たが、「投球動作は適切か？（本システムに適した動作か？）」の項目が比較的低い値となった。これは用いたモーションキャプチャシステムの1方向からの深度情報から骨格を推定するという特性から、モーションキャプチャシステムから見て影になってしまった部分の動作がうまく測れなかった事が原因なのではないかと考えられる。またアンケートの自由記述では「どれくらい正確に軌跡をなぞれているのか」「学習者自身の動作がどれくらいの相違度なのか」を視覚的に、リアルタイムで知りたい」といった意見を多く得た。

#### 1.4 改善案

上記の実験結果と考察の結果本システムにはモーションキャプチャシステムの変更とアンケートの自由記述等で得られた学習者に提示する情報の改良が必要なのではないかと結論付け、変更先のモーションキャプチャシステムを適切に決定するためモーションキャプチャシステムの比較を行った。その結果を以下の表に示す。

表 3 モーションキャプチャシステムの比較

	Kinect V2	Perception Neuron	VIVE トラッカー	OptiTrack
キャプチャ方式	TOF方式	慣性センサ方式	Lighthouse	光学式
トラッカー	20個	(約)30個	2個	可変
コントローラ	無し	無し	有り	無し
フィードバック	視覚	視覚	視覚+触覚	視覚
キャプチャできる範囲の制限	Kinect v2の1方向からのセンサから見える範囲内	無制限（コードが届く範囲内）	ベースステーションで囲われた範囲内	複数台の設置されたカメラの範囲内
キャリブレーションの頻度	小	多	無	少

この表から Kinect v2 は他のキャプチャシステムに比べキャプチャできる範囲が制限される一方でキャリブレーションの必要性が少なく、手軽に多くの点のトラッキングを行えることがメリットであると考えられる。一方で PerceptionNeuron はキャプチャできる範囲の制限が少ない一方で環境側からのキャプチャが行われなためセンサの誤差が蓄積し、他のシステムに比べ頻繁にキャリブレーションが必要である事がデメリットであると考えられる。VIVE コントローラはベースステーションで囲われた範囲内であれば自由に動き回れる一方でコントローラやトラッカーを身に着ける必要があるというデメリットがあると考えられる。OptiTrack はキャプチャできる範囲の制限がなくセンサの誤差が蓄積することがない一方で複数台のカメラが設置されている環境が必要であるというデメリットがあると考えられる。これらのモーションキャプチャシステムの中で Kinect v2 と違いキャプチャできる範囲の制限が少ない3つのモーションキャプチャシステムのうち本研究室で利用可能であった IMU（加速度センサ、ジャイロセンサを搭載している装置）を内蔵した PerceptionNeuron と VIVE コントローラをそれぞれ用いてシステムの再構築を行うこととした。

## 2. PerceptionNeuron を用いたシステム

### 2.1 システム概要

#### 2.1.1 モーションデータ記録機能

本機能は主に学習者による手本動作の記録のために使用する。システム起動後「R キー」を押したタイミングからモーションデータの記録を行い、「X キー」を押したタイミングでファイルを書き出して記録を終了する。

#### 2.1.2 モーションデータ表示機能

モーションデータ記録機能（2.1.1 参照）にて記録した手本動作のモーションデータを左右反転させ、指定した関節の軌跡を表示する。学習者は主に本機能を用いて軌跡を自身の指定した関節でなぞるようにして動作の学習を行う。本機能は以下の3つの機能によって構成されている。

### 2.1.2.1 軌跡表示機能

3.1.1 で記録した関節(全身記録した場合 17 点)の中から学習者に提示する情報過多を防ぐため指定した関節(手先, 足先等)の軌跡を表示する(下図 1 緑色の線). 学習者はこの軌跡をなぞるようにして動作の学習を行う.

### 2.1.2.2 軌跡との距離表示機能

指定した関節(手先, 足先等)の軌跡と現在指定した関節がある箇所との最短距離を線で結び(下図 1 黄色の線), その距離を表示する(下図 1 緑色の数字)機能である.

学習者はこの数値を見ることによって自身の関節が手本と比べてどれくらい離れているかを把握することができる.

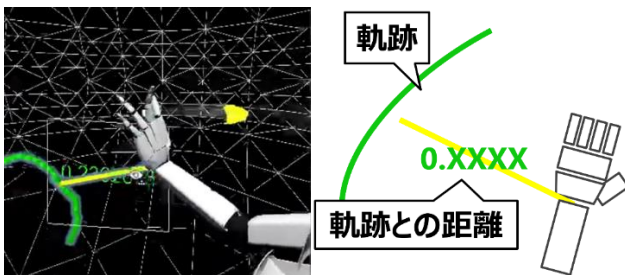


図 1 軌跡表示機能

### 2.1.2.3 軌道と離れている部位を表示する機能

軌跡を表示すると指定した関節のうち, 現在の関節との位置の差が大きい部位があると, 前方の人型オブジェクトの部位の色を変えることによって表示する. これによって学習者は自分が練習している部位の中でどの部位が一番手本動作からずれているかを知ることができる.

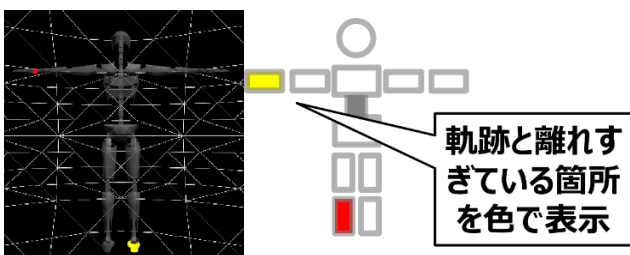


図 2 軌道と離れている部位を表示する機能

### 2.1.3 モーションデータ

本システムではモーションデータは Unity エディタ

上で扱え, 必要に応じてアニメーションファイルに変換できる. asset 形式で保存している.

## 2.2 本システムの問題点

本システムを使用している際, 長時間使用すれば使用するほどキャリブレーションし直さない限りモーションデータがずれてしまうという問題が発生し, 正確なモーションデータの記録や軌跡との距離の計測が困難であることが判明した. 何度もキャリブレーションしながら評価実験を行おうにも比較に使えるような正確なモーションデータの記録が行えないだろうという結論に至り評価実験を行わずにシステムの構築を終了した.

## 3. VIVE コントローラを用いたシステム

本章では VIVE コントローラを用いたシステムに実装されている機能, 各機能の使用手順等について示す.

### 3.1 システム概要

#### 3.1.1 モーションデータ記録機能

本機能は主に学習者による手本動作の記録の為に使用する. システム起動前にあらかじめ記録秒数, 保存ファイル名を入力する必要がある. システム起動後, 学習者にはシステム音声によってなされるカウントダウンの後, 手本動作を 1 度だけ行ってもらい. 動作後には不要なデータの記録を避けるため, あらかじめ設定した秒数経つまで可能な限り静止した状態で待機してもらう必要がある. 本機能は以下の 3 つの機能によって構成されている.

##### 3.1.1.1 モーションデータ記録機能

学習者に動作を記録する箇所にコントローラを付けてもらったのちにカウントダウンを行い, カウントダウン最後の記録開始音が鳴らすと同時にモーションデータの記録を開始する. 指定された秒数分の記録が終了すると使用者に記録の終了を伝えるためにシステムを終了させる. モーションデータの保存形式については「3.2 モーションデータ」に記述したものと同様である.

##### 3.1.1.2 ビデオシースルー機能

HMD の外面に配置されている左右 2 つのカメラの映像を 2 つのディスプレイ上に表示することでビデオ

シースルーを実現している。本機能は本システム起動中常に使用され続けている。

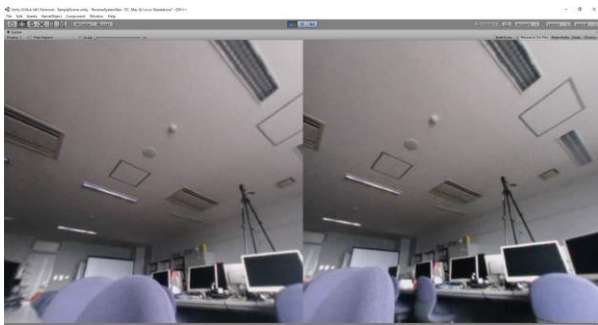


図3 ビデオシースルー機能でHMDの各ディスプレイが表示する映像

### 3.1.2 モーションデータ表示機能

モーションデータ記録機能(3.1.1参照)にて記録した手本動作のモーションデータを左右反転させ、記録した関節の軌跡を表示する。学習者は主に本機能を用いて軌跡を自身のコントローラを装着した部位でなぞるようにして動作の学習を行う。本機能は以下の3つの機能によって構成されている。

#### 3.1.2.1 軌跡表示機能

記録した関節(手先、足先等)の軌跡を表示する(図4緑色の線)。学習者はこの軌跡をなぞるようにして動作の学習を行う。学習者の1人称視点では見えない箇所でも軌跡をなぞれているかを確認できるようにするため、学習者の関節が軌跡に触れることによってコントローラが振動するようになっている。



図4 軌跡表示機能

#### 3.1.2.2 背後から見た自身のモーション表示

上記の軌跡表示機能と同様にして記録したモーションデータの軌跡(図5緑色の線)とコントローラの位置(図5白色の点)を学習者の前方の位置に表示

する。本機能は1人称視点では確認できない背後から見た自身の動作の確認のために使用する

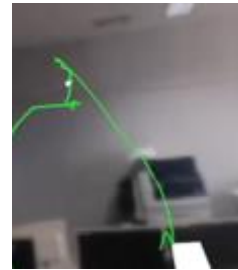


図5 背後から見た自身のモーション表示

## 3.2 システム全体のフロー

本項では説明を簡略化するため、手本動作を撮影した側利き手側、本システムを用いて練習する側を非利き手側と記述する。

本システムを用いた動作の学習方法は大きく分けて2つある。「非利き手側動作の学習」と「フィードバックによる学習」である。本項ではそれぞれの学習を行うための全項で説明した各機能の使用手順について説明する。

### 3.2.1 非利き手側動作の学習

本システムを用いた2つの学習方法のうちメインとなる学習方法である。

システムの体験を終えた後、手本動作を記録、その後記録したモーションデータから生成した指定した部位の軌跡を左右反転させて表示し、学習者に軌跡をなぞることで動作の習得を目指してもらう学習方法である。

### 3.2.2 フィードバックによる学習

本学習方法は上記の非利き手側動作の学習を行った後、または行っている最中に行う学習方法である。非利き手側での動作の学習を行っている最中にモーションデータの記録を行い、その後、記録したモーションデータから生成した指定した部位の軌跡を左右反転させて利き手側に表示する。それによって学習者に利き手側で利き手側と非利き手側との動作の差異を感じてもらい学習効果を得ることを目的とした学習方法である。

## 3.3 モーションデータ

モーションデータはSteamVRのルームスケールを基準とした各関節の座標を羅列したものをcsv形式で保存する。

## 4. 実験と評価

### 4.1 実験目的

本システムを使用し左右反転動作を学習した場合と使用せずに学習を行った場合を比較し本システムの有用性を検証する。

### 4.2 実験概要

本研究では本システムの有用性を検証するために 2 種類の実験を行った。

1 つ目は手本動作とのモーションデータの相違度を測る実験である。被験者を、本システムを用いて動作の学習を行う実験群と、本システムを用いずに鏡をみて動作の学習を行う統制群に分け、それぞれに学習前に行う事前テストと学習後に行う事後テストを行い、事前テストと事後テストで得られたモーションデータと手本動作のモーションデータとの相違度の変化を実験群と統制群で比較した。

2 つ目はアンケート調査である。被験者全員に本システムを用いた学習方法と本システムを用いない学習方法を体験してもらい、本システムについてのアンケート調査を行った。

#### 4.2.1 被験者

対象は右利きの大学生 12 人を実験群 6 人と統制群 6 人に分けて検証する。また、モーションデータの相違度を測る実験を行った後に体験してもらっていない方の学習方法も試してもらい、被験者全員に対してアンケート調査も同時に行った。

#### 4.2.2 実験に用いる動作

本実験では右手での投球動作を手本動作とし、左手で手本動作を左右反転した動作を再現することを目標とし被験者の学習内容とした。

#### 4.2.3 実験手順

実験は以下に示す図 6 の手順で行った



図 6 実験群，統制群の実験手順

### 4.2.4 評価方法

#### 4.2.4.1 モーションデータの相違度の比較

手本動作のモーションデータとテストで記録したモーションデータの手先の座標同士の距離をフレーム毎に計算し、対象となるすべてのフレーム毎の距離の平均値をモーションデータ同士の相違度とする。ただし、モーションデータ同士の投球開始のタイミング、投球動作の速度のずれによる大幅な距離の累積を防ぐため以下の 2 つの対策を行った。

1 つ目はテストで記録したモーションデータの全フレームのうち手先が最も高い位置にあるフレームから 0.5 秒間を相違度の計算対象とした。これにより投球動作開始前、開始後のモーションデータを計算対象外としている。

2 つ目はテストで記録したモーションデータのフレーム毎の各座標に最も近い座標を手本動作のモーションデータの中から検索し、最短距離を座標同士の距離とした。これにより、本実験では対象としていない投球動作のタイミングと速度を、相違度の計算対象外とした。

本研究では事前テスト、事後テストの記録をそれぞれ 3 回ずつ行い被験者毎に手本動作と事前テスト、手本動作と事後テストの相違度を算出し、3 回のうち最も相違度の高い値をそれぞれのテストの結果とした。

#### 4.2.4.2 アンケート評価

以下の 5 段階評価、記述の内容をもってアンケートの評価とした

表 4 5 段階評価

対象動作は適切であると思いますか？
システムによって対象動作への理解を深めることができますと思いますか？
本人視点から見た手本動作提示はスキル学習に役立つと思いますか？

表 5 自由記述

今回の対象動作以外に本システムを利用してみたい対象動作は何ですか？
実装した機能のうちスキル学習の助けになると思う機能はありますか？
実装した機能以外に欲しい機能はありますか？

## 4.3 実験結果と考察

### 4.3.1 モーションデータの相違度の比較

表 6 各群の学習効果の値の平均値, 中央値

	平均値	中央値
実験群	0.75	0.81
統制群	1.10	1.15

※(学習効果の値)=(事前テストの相違度)/(事後テストの相違度)

事前テストと手本動作の相違度, 事後テストと手本動作の相違度を比較して算出した実験群 6 名と統制群 6 名の学習効果の度合いの値に対してウィルコクソンの順位和検定をかけた結果「有意水準 5%で平均値に差がある」という結果となった。又, 先行研究(卒業論文)の際に構築した Kinect v2 を用いた左右反転動作のスキル学習支援システムは「システムを用いることによって相違度が向上することはないが相違度の低下を抑えることができる」といった結果となっていたのに対して本システムでは実験群の被験者 6 人のうち 4 人が学習効果の度合いが 1 以上という結果となった。それにより HMD 付属の VIVE コントローラを用いた本システムは, 指定した関節の動作を左右反転させて習得する際に右の動作と左の動作の相違度を向上させるのに有用であると言えるのではないかと考えられる。

### 4.3.2 アンケート結果

表 7 5 段階評価アンケート結果

	平均値	中央値
対象動作(投球動作)は適切か?	4.2	4
対象動作への理解は深まるか?	4.3	4
1 人称視点は役立つか?	4.7	5

5 段階評価に関しては全体的に高めの評価を得た。Kinect v2 を用いたシステムで評価を得た際には平均値が上から順に 3.9,4.3,4.3 であったのに対し VIVE コントローラを用いた本システムでは平均値が上から順に 4.2,4.3,4.7 という結果となり, 特に前回のシステムでは比較的低い値であった 1 つ目の「対象動作(投球動作)は適切か?」という項目の値が向上するという結果となった。その為, 1.3.3 でも述べた Kinect v2 で構築したシステムの改善案として VIVE コントローラを用いたのは適切であったのではないかと考えられる。

記述式のアンケートのうちスキル学習の助けになった機能の項目では「軌跡に触れると振動する機能」が役に立ったとの意見を多く得た。その理由として「練習をする際に軌跡を見続ける必要がなくなる為」, 「触覚的なフィードバックがある事によって体で覚えているという感覚になる為」といったような意見を得た。そのためスキル動作学習を支援するシステムにおいては軌跡などの視覚的なフィードバックよりも振動などの触覚的なフィードバックの方が適しているのではないかと考えられる。

一方, 本システムでほしい機能としてやはり手先だけではなく他の関節の位置やタイミング, モーション全体の相違度等, ユーザに提示する機能をもっと増やしてほしいという意見も多く得た。

また, 「AR 上に表示されている軌跡の奥行きが分かりづらい」という意見を得た。その原因として, 軌跡等の仮想の 3D 空間上の仮想オブジェクトを AR 表示する際, 必ず仮想オブジェクトが現実の映像よりも前に表示されてしまうために, 現在自分の手が軌跡よりも奥にあるのか手前にあるのかが分かりづらいといったような事があるのではないかと考えられる。

また, 「VIVE コントローラのみで動作の記録や, 表示の操作を行いたい」といった意見も得た。これは本システムを利用する際の動作の記録, 表示等の操作をキーボードや, マウス, 卓上ディスプレイを用いて行うようにしていたために, HMD を被っている学習者一人で学習を行おうとすると操作が困難となってしまうことが原因であると考えられる。

## 5. まとめ

本研究ではモーションキャプチャシステムとビデオスルー HMD を用いて, 自身の左右反転動作を手本動作としたスキル学習支援システムの構築とシステムの有用性を検証する実験を行った。

先行研究(参考文献(6))の結果から使用するモーションキャプチャシステムは 1 方向のみの光学式のセンサを用いたものではなく, キャプチャできる範囲の制限が少ないモーションキャプチャシステムを用いる必要があるとわかったため, IMU を内蔵したモーションキャプチャシステムである PerceptionNeuron と

HMD に付属しているコントローラを用いたシステムを構築した。

しかし、PerceptionNeuron を用いたシステムは誤差の蓄積により正確なモーションデータの記録ができないであろうという理由で評価実験は行わず、HMD に付属しているコントローラを用いたシステムのみ評価実験を行った

実験の結果、本システムを用いなかった場合ほぼ指定した関節の左右の動作の相違度の向上が見られなかったのに対し、本システムを用いることによって相違度が向上することが示された。

また、被験者からのアンケート結果では先行研究のシステムで評価が低かった「投球動作は本システムに適切か」の項目の値が向上し、選びなおしたモーションキャプチャシステムは適切であったことが示された。また触覚的なフィードバックがスキル学習において有用であることが示された。一方、「表示できる関節が少ない」「UIをコントローラのみで完結してほしい」「もっと表示する情報を増やしてほしい」「AR空間上の距離感覚が掴みづらい」といった問題点も指摘された。

今後は、触覚的なフィードバックを行えるトラッカーを追加し、段階的に表示する情報を調整できる機能、HMD を被っている学習者のみですべての操作が行える機能、より AR 空間上の距離感覚を掴みやすくするための機能等を追加することによってより効率的な左右反転のスキル学習を行えるシステムを構築できるのではないかと考えている。

## 参考文献

- (1) 廣田一樹, 石井和喜, 西野友泰, 曾我 真人, 瀧寛和「左右反転動作を用いた非利き側動作学習支援環境と左右差の分析」人工知能学会全国大会(2013)
- (2) 西野友泰, 曾我 真人, 瀧寛和「熟練者と学習者の視点を統合するスキル動作提示手法の提案」情報処理学会インタラクシオン 2011(2011)
- (3) 吉川健彦, 松浦健二, 菅原宏太, カルンガルステファン, 後藤田中「二重跳びにおける身体部位間の運動タイミング差の安定化支援」日本教育工学会論文誌(2017)
- (4) 曾我麻佐子, 明神由佳「モーションデータを用いた新体操ルール学習戦システムの試作と評価」映像情報メディア(2008)
- (5) 宮西智久「身体動作 3 次元 CG アニメーションを用いたスポーツ技術学習支援モデルの提案」仙台大学紀要(2005)
- (6) 森 大樹, 曾我 真人「HMD と AR を用いた左右反転動作の学習支援システムの構築」和歌山大学(2020)