JAIST Repository
https://dspace.jaist.ac.jp/

Title	動作推定を用いた野球投球動作の習得方法の提案
Author(s)	大加戸, 翔真
Citation	
Issue Date	2024-03
Type	Thesis or Dissertation
Text version	author
URL	http://hdl.handle.net/10119/18930
Rights	
Description	Supervisor: 藤波 努, 先端科学技術研究科, 修士(知識科学)

JAIST
JAPAN
ADVANCED INSTITUTE OF
SCIENCE AND TECHNOLOGY

Japan Advanced Institute of Science and Technology

修士論文

動作推定を用いた野球投球動作の習得方法の提案

Proposal of a Method for Learning Baseball Pitching Motion Using Pose Estimation

大加戸　翔真

主指導教員　　藤波　努

北陸先端科学技術大学院大学
先端科学技術研究科
（知識科学）

令和 6 年 2 月

Abstract

動作推定を用いた野球投球動作の習得方法の提案

Proposal of a Method for Learning Baseball Pitching Motion Using Pose Estimation

2210031 OKADO, SHOMA

The most common ways to learn sports techniques are by watching other athletes for reference, by watching videos of yourself, or by having an instructor teach you. However, with these methods, it is difficult to clearly see the difference from the target movement, so there is a problem that there is a possibility of learning the wrong movement.

In this research, we propose a system that uses VR and MediaPipe Pose to allow users to check the actions of a model and themselves in real time. Focusing on the right knee joint angle in the pitching motion of baseball, we compared practice using this VR system, practice by watching and imitating general videos, practice by watching videos while paying attention to the angle of the knee, and practice displayed the angle of the knee. We will evaluate whether there is a difference in reproducibility among the four VR practice methods shown.

As a result of the experiment, in all four exercises, I was able to get closer to the model knee joint angle than before the exercise. In particular, with the proposed VR system, the joint angle of the model knee could be reduced to 3.81 degrees for all experimenters, including those who had no experience playing catch, and 0.08 degrees for those with experience playing catch. On the other hand, in the VR system that displayed a comparative view of the knee angle, it was found that the knee was flexed 7.82 degrees to 12.89 degrees more than the model.

When learning a specific movement or technique in sports, etc., one practice method is to imitate an expert to get the hang of it or to find opportunities to improve your level. We hope that the system proposed in this study, which allows users to check the model and the user's actions in real time, will be able to support technical acquisition.

Keywords: VR, MediaPipe, Pose Detection, Baseball Pitching

目次

第 1 章 序論 1

1.1 研究背景と目的 1

1.2 本論文の構成 3

第 2 章 関連研究と関連領域 4

2.1 MediaPipe について 4

2.2 VR を用いた技術習得支援について 8

2.3 野球の投球動作について 9

第 3 章 提案手法 12

3.1 提案手法 12

3.2 実装について 13

第 4 章 実験方法・実験結果と考察 16

4.1 使用機材 16

4.2 実験協力者について 16

4.3 実験方法 17

4.4 実験の様子 18

4.5 実験の結果 19

4.5.1 膝関節角度の選定タイミング 19

4.5.2 実験の結果 1 20

4.4.3 実験の結果 2 24

4.5 考察 25

第 5 章 結論 27

付録 A 姿勢推定のためのコード 34

付録 B　3 次元データの受信側のコード 42

付録 C 実験協力者の膝関節角度データ 43

図目次

2.1：MediaPipe Pose 33 点の landmark 6
2.2：レオナルド・ダ・ヴィンチのウィトルウィウス的人体図 7
2.3：けん玉技術習得システム 9
2.4：5 段階に分類した投球動作 10
2.5：膝関節角度..... 10
2.6：複数の研究による股関節・膝関節角度の比較 10
2.7：各関節角度における共通性..... 11

3.1：システム概要 14
3.2：右脚膝の角度の検出結果 14
3.3：MediaPipe Pose による 33 点の landmark 15
3.4：目標動作の映像..... 15

4.1：VR を用いた練習の提示映像 18
4.2：VR を用いた練習を行う様子 19
4.3：野球投球動作 20
4.4：練習(1)による右膝関節角度の変化 22
4.5：練習(2)による右膝関節角度の変化 23
4.6：練習(3)による右膝関節角度の変化 23
4.7：練習(4)による右膝関節角度の変化 24

C.1：実験協力者 1 の右膝関節角度 43
C.2：実験協力者 2 の右膝関節角度 44
C.3：実験協力者 3 の右膝関節角度 45
C.4：実験協力者 4 の右膝関節角度 46
C.5：実験協力者 5 の右膝関節角度 47
C.6：実験協力者 6 の右膝関節角度 48
C.7：実験協力者 7 の右膝関節角度 49
C.8：実験協力者 8 の右膝関節角度子..... 59

C.9：実験協力者 9 の右膝関節角度 51
C.10：実験協力者 10 の右膝関節角度 52

表目次

4.1：実験協力者に関する野球経験の調査 16
4.2：キャッチボール経験者の練習結果 25
4.3：左脚地面着地時の膝関節角度 26

第1章 序論

1.1 研究背景と目的

現在，スポーツ界では，様々な情報技術が活用されている．より楽しく観戦するために，VR(Virtual Reality:仮想現実)や AR(Augmented Reality:拡張現実)などの技術を用いて，自宅に居ながら試合会場にいるかのような臨場感を味わうことや，自分好みの視点を選んで観戦したり，試合や選手のデータを身ながら観戦することも可能になった．また，正確な判定をするため，ホークアイのような審判を補助できるシステムも活用されている．他にも，より良いパフォーマンスを発揮するという点でも情報技術は活用される．選手のその日の活動量や食事などを管理することによる体調管理や，様々な最新技術を用いた技術習得支援がなされている．スポーツ競技者にとって，正しい技術の習得は重要であるが，練習設備が整っている環境は限られているため，スポーツ技術の習得は，他の選手を見て参考にする方法や自分を撮影した映像を見る方法，指導者に教えてもらう方法が一般的である．しかし，これらの方法では，目標動作との違いが明確に分かりにくいため，誤った動作を習得する可能性があるという問題や指導者不脚によって指導してもらえないという問題がある．この問題に対して，VR 技術やモーションキャプチャ[1][2][3]，筋電位などの身体内部

を計測する内部センサ[4]，ウェアラブルセンサなどの身体の外部を計測する外部センサ[5][6]，MediaPipe のような画像処理や機械学習を用いた姿勢推定を利用した方法が用いられる．VR は，スポーツトレーニングだけでなく，医療やフライト，教育，ドライビングのシミュレータなどやエンタテインメントとして活用されている技術である[7][8][9]．VR とモーションキャプチャや機械学習などを用いた姿勢推定による動作の 3 次元データを VR 空間に提示するなどして技術を組み合わせた研究もおこなわれている．スポーツトレーニングにおいては，モーションキャプチャや Kinect，外部センサを用いた動作計測に基づいて目標動作やアドバイスを HMD(Head-Mounted-Display)に提示しながら練習するシステムがある[1]．しかし，これらのシステムは，臨場感のある目標動作を用いた練習や，正確な技術の習得を可能にできるが，目標動作と体験者の両方の動作を体験者が同時に見て比較しながら練習することが出来ない．また，フィードバックをリアルタイム(動作中に同時に)に行うことが出来ない．

そこで，本研究では，目標動作と実験協力者の動作を実験協力者がリアルタイムで確認しながら練習できる，さらに目標動作との差異もリアルタイムで確認しながら練習できるシステムを提案する．事前に用意した目標動作とリアルタイムで動作している体験者の姿勢推定を行い，目標動作と学習対象者の動作を VR 空間に提示することによって，動作を習得できるシステムを構築する．

そして，構築したシステムを用いて練習を行い，練習前後で野球の投球動作における右膝関節の角度に変化が見られたかどうかについて評価実験を行う．

1.2 本論文の構成

以下に本論文の章構成を示す．第 1 章で序論を述べる．第 2 章では，本研究に関連する研究と関連する領域，第 3 章で提案手法とシステム実装について述べる．第 4 章では，実験方法と結果，考察について述べ，最後に第 5 章でまとめを述べる．

第2章 関連研究と関連領域

本研究では，事前に用意した目標動作とリアルタイムでの体験者の姿勢推定を行い，目標動作と学習対象者の動作を VR 空間に提示することによって，動作を習得できるシステムを構築する．そして，システムによる練習の前後で野球の投球動作における膝の角度に変化が見られたかどうかについて評価する．本章では，MediaPipe に関する領域について，そして VR を用いた習得支援システムについて紹介する．

2.1 MediaPipe について

本研究の姿勢推定に用いた MediaPipe は 2018 年から，Google 社が提供する機械学習によるリアルタイムおよびストリーミングメディアである[10]．このメディアでは，姿勢推定(Pose Landmark Detection)や顔検出(Face Detection)，手検出(Hand Landmark Detection)などを行うことが可能になる．推定・検出したデータは AR や VR と重ね合わせることも可能になる．顔検出は，人間の感情を識別するための研究やフェイスマスクを装着しているかどうかを自動的に検出するための研究などに用いられている[11][12][13]．手検出に関しては，ハンドジェスチャーの認識，及び手話認識等の研究がされている[14][15]．

特に，姿勢推定においては，BlazePose 研究を活用した Machine Learning ソリューションであり，撮影した動画や撮影しているカメラの映像における，図 2.1 に示す 33 点の特徴点を推測可能になっている[16]．BlazePose とは，姿勢推定のモデルのことである．レオナルド・ダ・ヴィンチのウィトルウィウス的人体図(Vitruvian man)からヒントを得ており，人体の腰を中心に円を描き，人体全体を囲む円の半径, 肩と腰の中点を結ぶ線の傾斜角を予測している(図 2.1)[17]．このモデルを応用した姿勢推定により 33 個の特徴点の 3 次元の座標データを取得することが出来る．MediaPipe の姿勢推定を用いて多くの研究が行われている．スポーツにおいては，クリケットのバッティングスキルにおける人体のキーポイント MediaPipe で抽出し，ショットを分類することによって，指導者無しでも，選手個人のバッティングパフォーマンスを分析や改善することを可能にした研究がある[19]．また，MediaPipe と python ライブラリを用いてデッドリフトやスクワットなどのスポーツトレーニング動作の正確性を予測した研究やトレーニング支援の研究もされている[20][21]．医療分野においては，高齢者の転倒を検知するために姿勢推定・検出が活用されている[22]．他にも，ヨガの姿勢を検知して正しい動作をできているか判断，アドバイスする研究や[23]，慢性疾患の早期発見に必要不可欠なボディバランス能力の評価についての研究[24]，

座っている際の姿勢の良し悪しの判定など，幅広い分野で研究[25]が行われている．

これらの研究のように MediaPipe を使用した研究はあるが，目標動作と実験協力者(プレイヤ)を同時にリアルタイムで比較して技術の習得を目指す研究や，それらを VR 環境に提示することによって行う習得支援についての研究ではない．

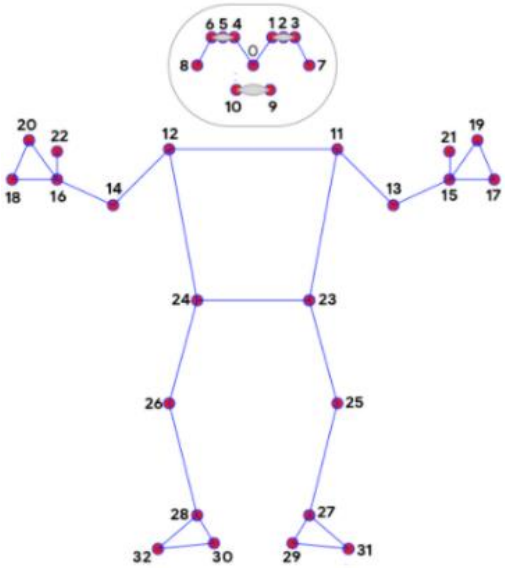

図 2.1：MediaPipe Pose 33 点の landmark

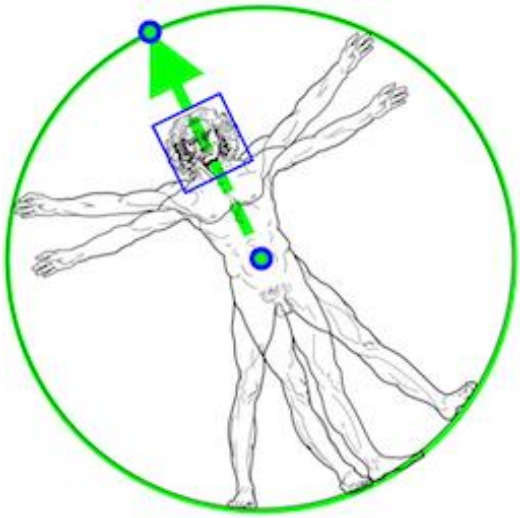

図 2.2：レオナルド・ダ・ヴィンチのウィトルウィウス的人体図

2.2 VR を用いた技術習得支援について

VR を用いた動作習得支援においては，一般的に，モーションキャプチャや Kinect を用いて目標動作を計測し, HMD に目標動作やアドバイスを提示する，目標動作を真似する，あるいは目標動作との違いをフィードバックすることで，短時間で技術を習得できることに加えて，誤った動作を習得することを防ぐことができる．

川崎らは，VR トレーニングによって，けん玉の技の習得を支援するシステムを提案している[1]．目標動作はけん玉熟練者であり，モーションキャプチャを用いて動作を計測し, HMD にバーチャルな目標動作として提示している(図 2.1)．習得段階においては，玉の速度を遅くし難易度を下げて開始し，徐々に速度を上げている．被験者は，HMD とコントローラを装着し目標動作を真似することで技を習得できる．多くの被験者がこれまでに成功したことがない技を習得することに成功し，習得時間も短縮されることが報告されている．

しかし，目標動作動作と実験協力者の動作をリアルタイムで確認しながら練習することができない．

図 2.3：けん玉技術習得システム[1]

2.3 野球の投球動作について

プロ野球選手や大学生の投球時の下肢に着目して分析を行った研究がある[26]．図 2.4 に示すように，投球動作を 5 つに分類し，それぞれの時点での，股関節と膝関節の屈伸角度の特徴についてまとめている．膝関節の屈伸角度(図 2.5)について，左脚が地面に着地した際(SFC)の 25 人のプロ野球選手の数値は 136.6±8.0 であった．また，ピボット脚(右投手の右脚)の膝関節角度について，他の研究[26][27][28]と比較すると，プロ，大学，高校の競技レベルに関係なく，5 つのすべての時点で高い共通性が見られたとしている(図 2.6，図 2.7)．

そこで，本研究では，右膝関節角度に着目し，システムの実装，実験，分析を行う．

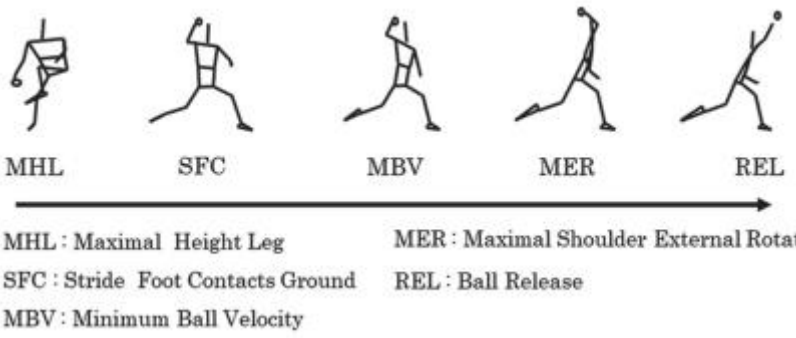

図 2.4：5 段階に分類した投球動作

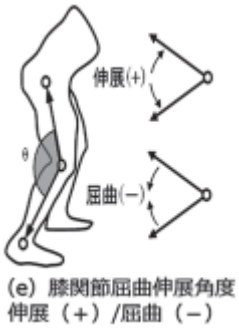

図 2.5：膝関節角度

表 4　本研究の結果と先行研究との比較

	本研究	高橋ほか（2005）		Fleisig et al.（1999）			Kageyama et al.（2014）
	プロ野球選手	大学生（High 群）	大学生（Low 群）	高校生	大学生	プロ野球選手	大学生（High 群）
	$n = 25$	$n = 10$	$n = 12$	$n = 33$	$n = 115$	$n = 60$	$n = 10$
MBV時ストライド脚股関節屈伸角度（deg）	90.6 ± 13.8						
MER時ストライド脚股関節屈伸角度（deg）	103.5 ± 15.5						110.7 ± 10.8
REL時ストライド脚股関節屈伸角度（deg）	104.4 ± 17.2						105.3 ± 12.7
SFC時ストライド脚膝関節屈伸角度（deg）	133.2 ± 7.3	114.3 ± 6	124.3 ± 6.7	13.0 ± 9.0	132.0 ± 12.0	134.0 ± 8.0	134.0 ± 6.7
MBV時ストライド脚膝関節屈伸角度（deg）	129.3 ± 7.8						
MER時ストライド脚膝関節屈伸角度（deg）	129.3 ± 11.7						140.5 ± 13.1
REL時ストライド脚膝関節屈伸角度（deg）	131.2 ± 15.2			137.0 ± 13.0	141.0 ± 13.0	142.0 ± 13.0	152.5 ± 13.4
MHL時ピボット脚膝関節屈伸角度（deg）	144.1 ± 16.8	160.0					160.9 ± 8.2
SFC時ピボット脚膝関節屈伸角度（deg）	136.6 ± 8.0	130.0					154.5 ± 6.4
MER時ピボット脚膝関節屈伸角度（deg）	131.8 ± 8.7						
REL時ピボット脚膝関節屈伸角度（deg）	123.0 ± 10.6	120.0					

図 2.6：複数の研究による股関節・膝関節角度の比較

表 2　一流競技者の投球動作における各関節角度と変動係数の値

		MHL	SFC	MBV	MER	REL
ストライド脚股関節						
内外転	(deg)	-9.3 ± 11.9	37.8 ± 10.9	28.6 ± 18.6	13.0 ± 18.5	8.6 ± 16.4
	CV	0.56	0.29	0.65	1.43	1.92
内外旋	(deg)	-22.6 ± 16.2	-0.3 ± 14.7	-4.4 ± 21.6	-1.4 ± 16.9	3.4 ± 35.0
	CV	0.26	0.51	0.24	0.42	0.76
屈曲伸展	(deg)	96.7 ± 26.5	70.7 ± 13.4	90.6 ± 13.8	103.5 ± 15.5	102.1 ± 15.7
	CV	0.26	0.19	0.15	0.15	0.16
ストライド脚膝関節						
屈曲伸展	(deg.)	95.6 ± 37.0	131.2 ± 7.3	129.3 ± 7.8	129.3 ± 11.7	133.1 ± 15.2
	CV	0.31	0.06	0.06	0.09	0.11
ピボット脚股関節						
内外転	(deg)	11.0 ± 11.3	36.0 ± 7.7	19.4 ± 11.7	-3.4 ± 12.1	-7.3 ± 11.4
	CV	0.46	0.21	0.49	0.62	0.55
内外旋	(deg)	15.6 ± 38.4	26.9 ± 18.6	15.4 ± 22.5	9.5 ± 20.2	11.0 ± 16.7
	CV	0.33	0.34	0.53	0.47	0.55
屈曲伸展	(deg)	31.0 ± 21.2	-6.6 ± 13.9	-14.3 ± 11.1	-4.2 ± 9.4	8.5 ± 10.2
	CV	0.40	0.73	0.71	0.57	0.75
ピボット脚膝関節						
屈曲伸展	(deg)	144.1 ± 16.8	136.6 ± 8.0	141.3 ± 7.0	131.8 ± 8.7	123.0 ± 10.6
	CV	0.12	0.05	0.05	0.07	0.09

高い　　中程度　　低い

†変動係数の値が最低値～0.32 の値を共通性が高い動作, 0.33～0.63 の値を中程度の共通性がある動作, 0.64～最高値の値を共通性が低い動作と定義した.

図 2.7：各関節角度における共通性

第3章 提案手法

本研究の実験では，目標動作の動作を真似することによって，実験協力者が目標動作の動作に近づくことが出来るかどうかを評価する．そのために，HMD を用いて，目標動作と実験協力者が同じ画面上でリアルタイムに動作を見ることができるという練習の提案について．そして，実装内容について説明する．

3.1 提案手法

映像のみによる練習と VR 環境を利用した練習で目標動作動作を真似することによって，実験協力者(右投投手)の投球動作における右膝関節の角度が目標動作に近づくかを評価するためのシステムを提案する．

1. 動画のみによる練習
2. VR 空間を利用した練習
3. 1 において，右膝関節角度を意識するよう指示
4. 2 において右膝関節角度を意識するよう指示

これら 1~4 の練習を行い，どの練習で最も目標動作に近づくことが出来たかを評価する．2，4 においては，VR 空間に目標動作と実験協力者(ユーザ)の両方を HMD に表示し，リアルタイムで見比べながら練習を行う．加えて 4 においては，両者の右膝関節角度を表示する．目標動作の動画は全ての練習において 0.5 倍速で再生する．

3.2 実装について

システムの概要を図 3.1 に示す．本研究では，投球動作における右膝関節の角度を算出する必要があるため，MediaPipe を使用した．MediaPipe Pose によって人体の 33 点が推定されていることが分かる図を示す．この 33 点の内，右腰と右膝，右脚踵の 3 点を利用して，右膝の角度を計算する．計算は，A を求める右膝の角度，右腰の x，y 座標を x1，y1，右膝の x，y 座標を x2，y2，右脚踵の x，y 座標を x2，y2 とすると，

$$A = \left\{ atan\left(\frac{y3 - y2}{x3 - x2}\right) - atan\left(\frac{y1 - y2}{x1 - x2}\right) \right\} * \frac{180}{\Pi}$$

の式によって，計算することが出来る．計算によって得た右膝の角度と，33 点の 3 次元座標をリアルタイムで VR 空間に反映するために，UDP(User Datagram Protocol)を使用した．UDP 通信は，音声通話や動画配信などリアルタイム性が重視される際に利用される通信プロトコルである．UDP 通信により Python 側から Unity(C#)側にリアルタイムにデータを送信している．

目標動作の動作については，第 2 章 2.3 節における結果を参考に，左脚が地面に着地する際に膝関節角度が 136.6±8.0(±標準偏差)の範囲内であるプロ野球選手を選び，MediaPipe で姿勢推定を行い 3 次元座標データを取得し，実装した．本研究で選んだ投手の膝関節角度は，134.00°であった．

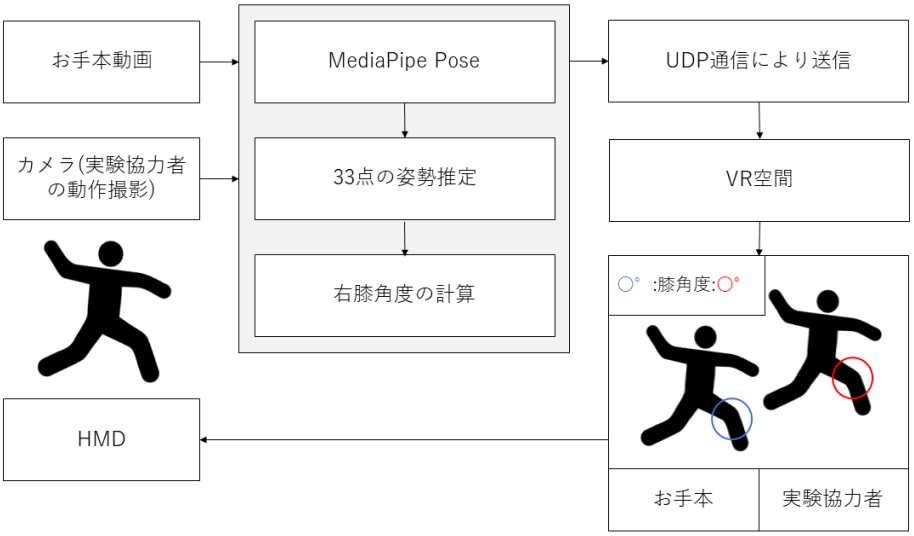

図 3.1：システム概要

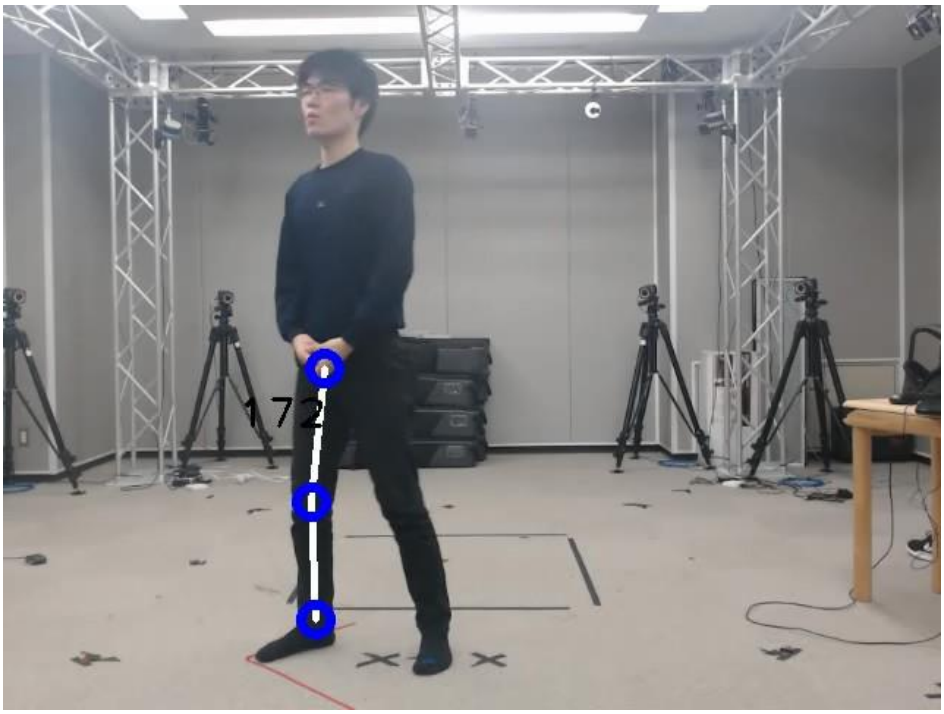

図 3.2:右脚膝の角度の検出結果

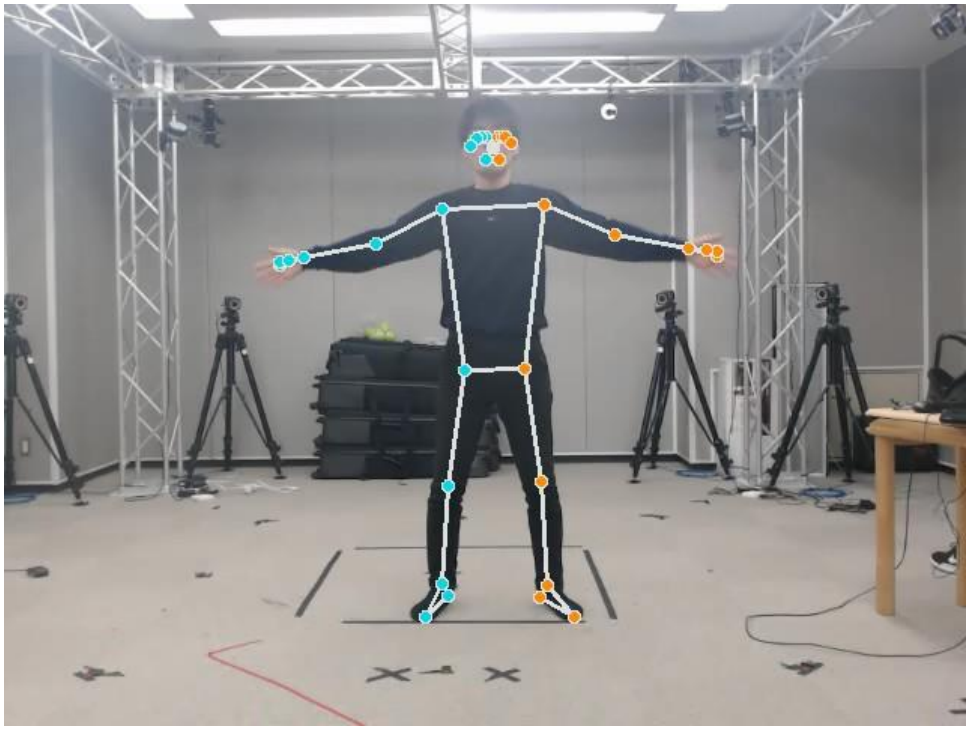

図 3.3：MediaPipe Pose による 33 点の landmark

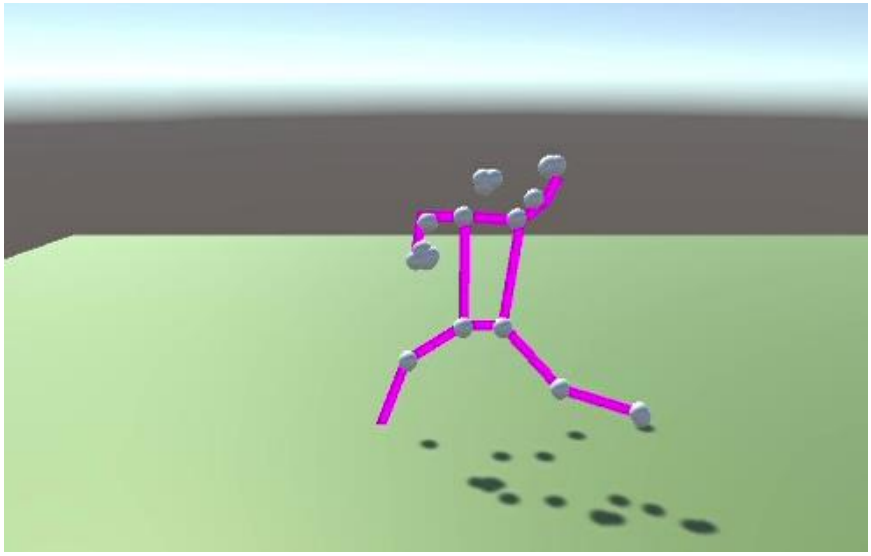

図 3.4：お手本の映像(画面左に投球)

第4章 実験方法・実験結果と考察

本章では，野球投球動作の練習についての実験と実験の結果，及び実験の考察について述べる．

4.1 使用機材

本研究では，カメラとして Logicool フル HD(1080P)を使用し，HMD として Oculus Quest を使用した．VR 環境の構築は Unity を使用した．

4.2 実験協力者について

本実験の実験協力者は，合計 11 名である．男性 10 名，女性 1 名であり，野球経験者は 4 名，年齢は 23～24 の大学院生である．実験前に行った調査の結果を表 4.1 に示す．

番号	野球経験(年数)	投球動作の経験があるか	キャッチボールの経験があるか	投球動作を見たことがあるか
1	0	×	○	○
2	2	○	○	○
3	0	×	○	○
4	0	×	×	○
5	0	×	○	○
6	2	○	○	○
7	0	×	○	○
8	0	×	○	○
9	5	○	○	○
10	0	×	○	○

表 4.1: 実験協力者に関する野球経験の調査

4.3 実験方法

1. 練習をしていない状態で投球動作を行う・・・・・・・・・・(0)
2. 目標動作の動作の映像だけを見て練習を行う・・・・・・・・(1)
3. 投球動作を行う
4. HMD に表示される目標動作動作と実験協力者の全体像を比較しながら練習を行う・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・(2)
5. 投球動作を行う
6. 2 と同様の映像を見て, 右膝の角度を意識するように指示を出して，練習を行う・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・(3)
7. 投球動作を行う
8. HMD に表示される目標動作動作と実験協力者の全体像の比較に加えて，右ひざの角度を表示した映像で練習を行う・・・・(4)
9. 投球動作を行う

1~9 の手順で実験を行った，2，4，6，8 は練習パートである．練習パートにおいて, 右投げ投手の左脚が上がった瞬間から, 左脚が地面につく瞬間までを反復して練習するように指示した(図)．反復練習については，口頭で目標動作の動作を真似するようにして練習するように指示を出した．すべてのパートで 3 分間, 反復して練習してもらった．各パートの練習が終了してから 1 分後に，投球

動作を行ってもらいデータ記録した(1，3，5，7，9)．以下では，練習パートを(0)~(4)の番号で表す．

4.4 実験の様子

実験の様子を図 4.1，図 4.2 に示す．図 4.1 は VR を用いた練習中に HMD に反映されている映像であり，図 4.2 は VR を用いた練習を行っている人の様子である．

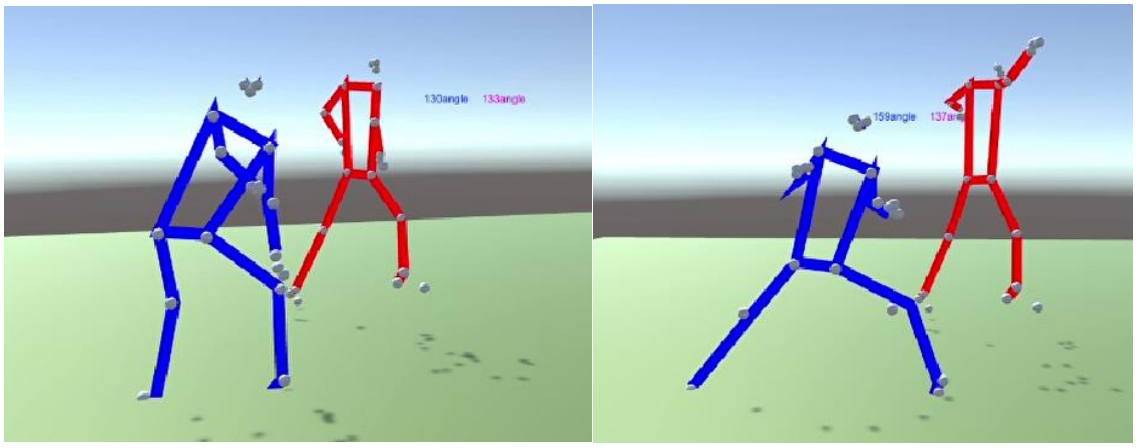

図 4.1：VR を用いた練習の提示映像

図 4.2：VR を用いた練習を行う様子

4.5 実験の結果

4.5.1 膝関節角度の選定タイミング

投球動作中のどのタイミングでの右膝の角度を選定したかについて説明する．投球動作は大きく並進運動と回転運動に分けることが出来る．今回の実験では並進運動までの動作を練習するように指示した(図 4.3 の番号 1~3)．図番号 3~4 の動作中で左脚が地面に着く瞬間あるいは，その直前で右膝の回旋運動が開始されるため，左脚着地時に回旋が始まっていなければ左脚着地の右膝角度，左脚着地直前に回旋運動が開始されていれば，回旋が開始された瞬間の右膝の角度

を選定した.

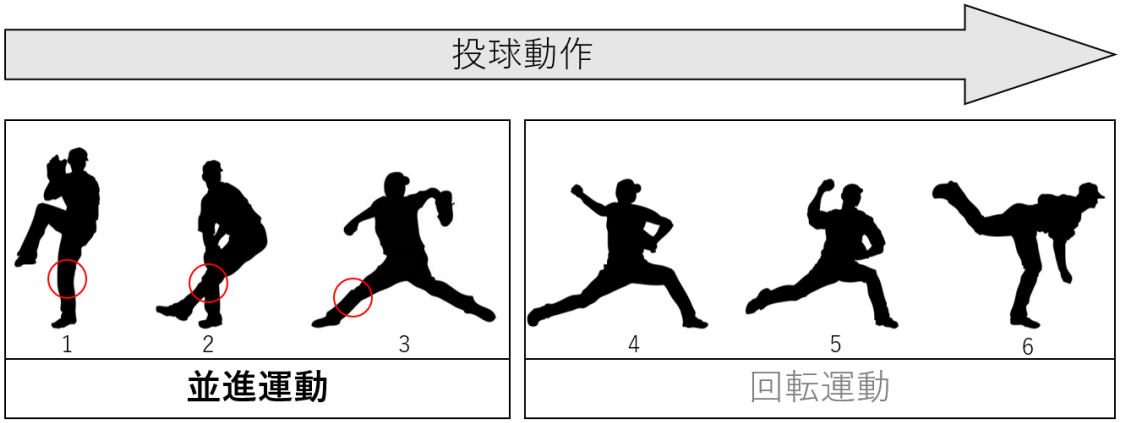

図 4.3：野球投球動作

4.5.2 実験の結果 1

投球動作における右膝の角度が実験による練習でどのように変化したかについての結果を説明する.

それぞれの練習の効果について，練習前の右膝関節の角度と練習後の膝関節の角度に有意差があるかどうか，t 検定を用いて調べた.

動画による練習の結果を図 4.4 に示す．練習前(平均 = 154.25，標準偏差 = 14.57)に対して，練習後(平均 = 142.79，標準偏差 = 19.90)であり，練習による有意差が見られた(t = 3.5，p = 0.0065)．つまり，目標動作の右膝関節の角度 134.00° から平均で 20.25° の差があるものの, 目標動作の動作に近づくことはできている.

次に，VR による練習の結果を図 4.5 に示す．練習前(平均 = 154.25，標準偏差 = 14.57)に対して，練習後(平均 = 137.81，標準偏差 = 19.60)であり，練習による有意差が見られた(t = 1.83，p = 0.0002)．つまり，目標動作の右膝関節の角度 134.00°° から平均で 3.81° の差があるものの，目標動作の動作に近づくことはできている．

以上の結果より，目標動作の全体像を見て練習する際には，動画による練習よりも VR による練習の方が目標動作に近づくことが出来ることが分かり，その差は 16.44° であった．

次に，右膝の角度を意識するように指示して動画により行った練習の結果を図 4.6 に示す．練習前(平均 = 154.25，標準偏差 = 14.57)に対して，練習後(平均 = 123.33, 標準偏差 = 18.62)であり，練習による有意差が見られた(t = 7.98, p = 0.00001)．つまり，目標動作の右膝関節の角度 134.00° と練習後の平均を比べると 10.67° 屈曲が大きくなるという結果になった．

続いて，右膝の角度を意識するように指示して VR により行った練習の結果を図 4.7 に示す．練習前(平均 = 154.25，標準偏差 = 14.57)に対して，練習後(平均 = 126.18, 標準偏差 = 18.39)であり，練習による有意差が見られた(t = 5.70, p = 0.00029)．つまり，目標動作の右膝関節の角度 134.00° と練習後の平均を比べると 7.82° 屈曲が大きくなるという結果になった．

以上より，膝の角度に意識を向けるように指示した際には，動画による練習とVR に練習共に，右膝関節を屈曲しすぎるという結果になった．VR を利用する方が 2.85° 目標動作に近い，つまり，屈曲しすぎる傾向を抑えることが出来る結果になった．

全練習パートにおいて，練習(2)，練習(4)，練習(3)，練習(1)の順番で実験協力者の右膝関節角度が目標動作に近づくことが分かった．

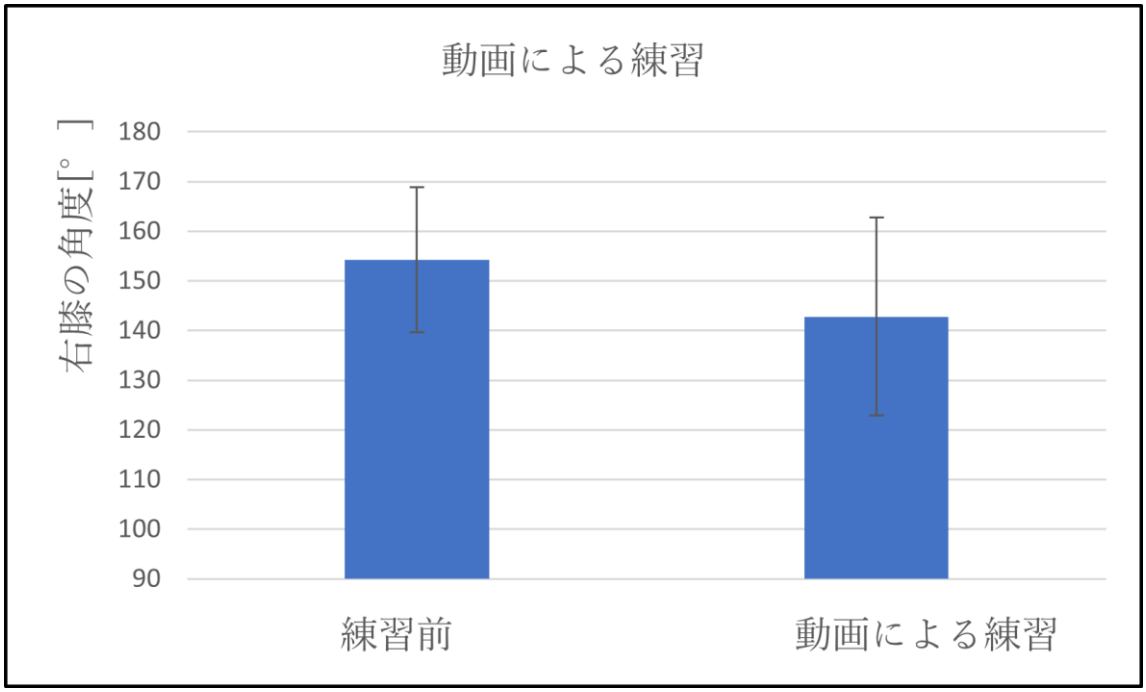

図 4.4：練習(1)による右膝関節角度の変化

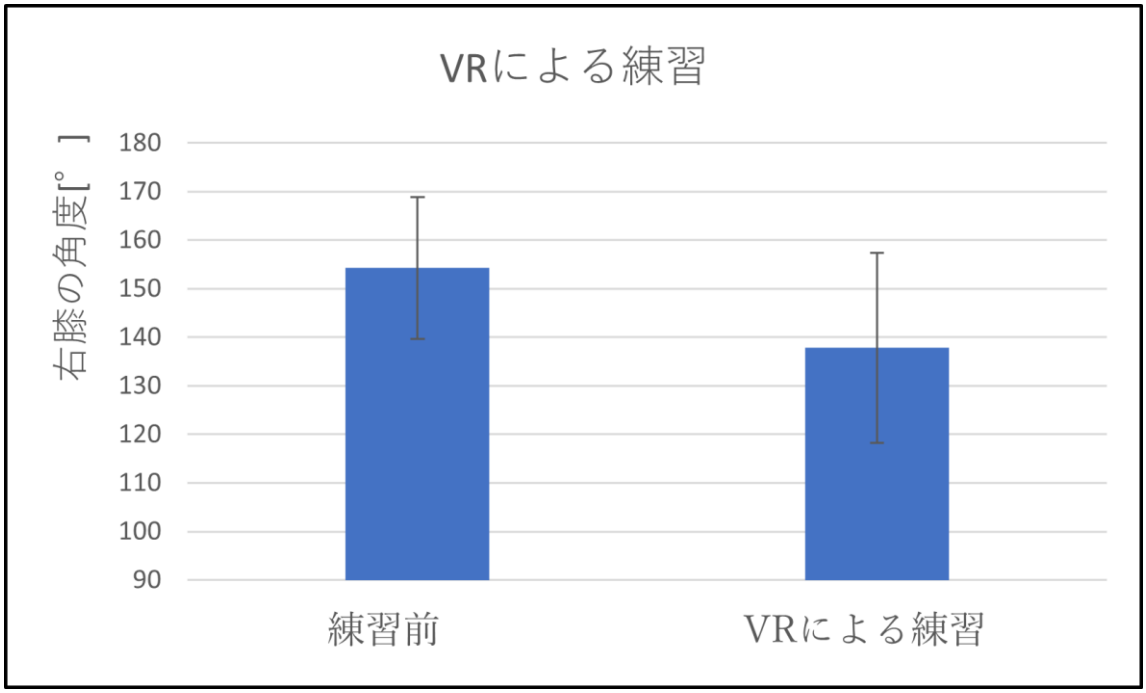

図 4.5：練習(2)による右膝関節角度の変化

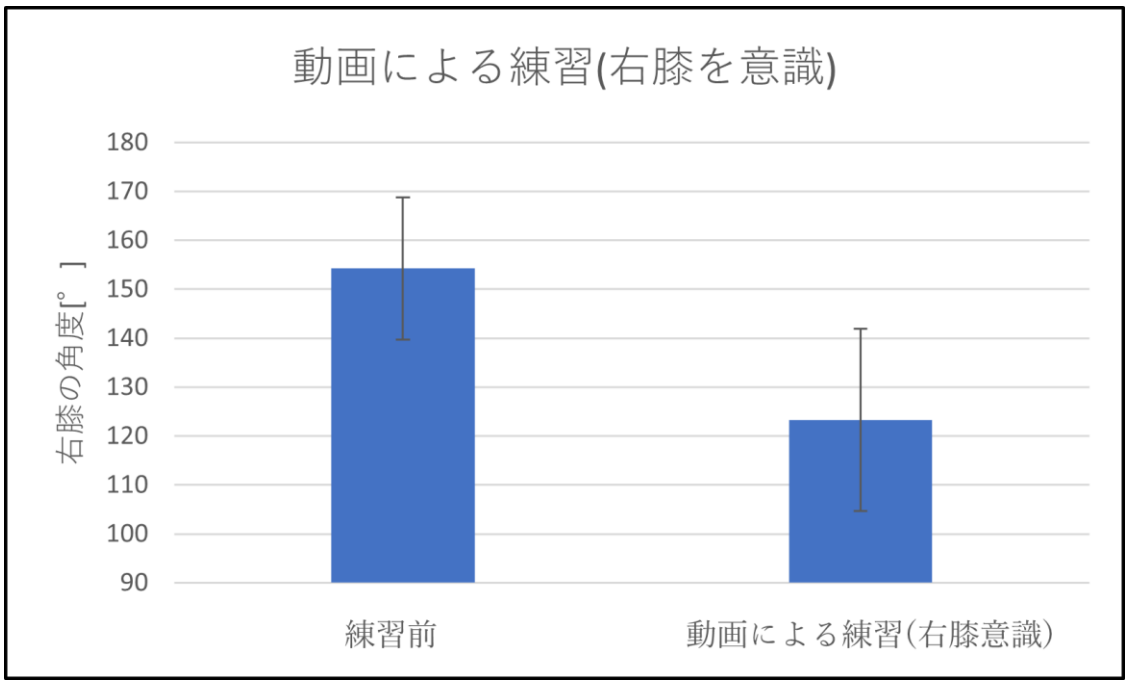

図 4.6：練習(3)による右膝関節角度の変化

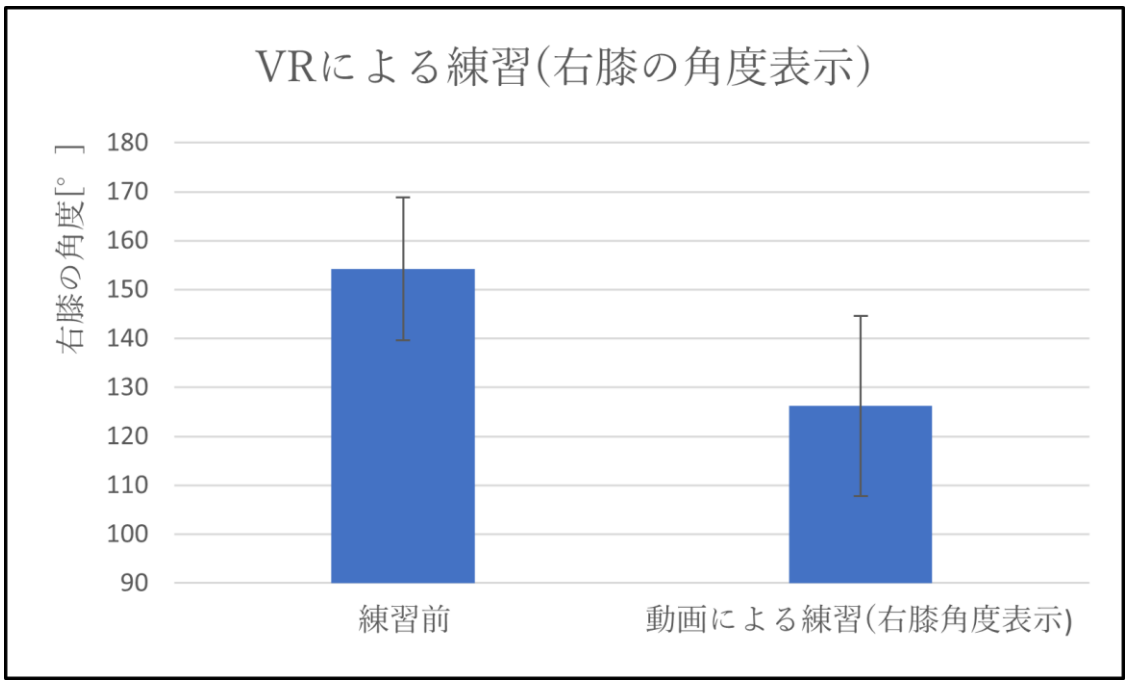

図 4.7：練習(4)による右膝関節角度の変化

4.4.3 実験の結果 2

4.4.2 では，実験協力者全員のデータを用いて結果を述べたが，実験協力者の中には，投球動作を経験したことがない人や，キャッチボールをしたことがない人など，経験レベルが幅広かった．キャッチボールをしたことがない実験協力者は，投球動作についての知識がなく，本システムで練習することが困難であったと考えられる．そこで，表 4.1 を参考に，キャッチボールの経験がある人に限定した結果を表 4.2 に示す．

練習番号	0	1	2	3	4
平均(deg)	152.01	137.81	133.92	118.16	121.11
標準偏差	13.63	19.12	16.60	10.85	10.81
お手本との差(deg)	18.1	3.81	0.08	-15.84	-12.89

表 4.2: キャッチボール経験者の練習結果

4.5 考察

映像のみの練習(1)や VR を用いて 2 者の全体像を比較しながら行う練習(2)においては，結果 1，結果 2 ともに，練習(2)の方が目標動作の膝角度に近づけることが出来ることが分かった．自分自身の動作状態を確認しながら練習を行うことが, 有効であったと考えられる. 右脚関節角度を意識するように指示した練習においても VR を活用した練習の方が，練習前よりも目標動作の膝角度に近づくことはできたが, 屈曲しすぎてしまうことが分かった. 実験協力者全員が, 膝に意識を置くように指示した練習(3)の後，練習(1)，(2)の後よりも膝の角度が屈曲している(表 4.3)．これは，実験に使用した目標動作の投球動作において，右投手の左脚着地時以降の投球動作も反映していたからだと考える．左脚着地時に右脚の回旋が開始するが，回旋時に右膝が身体内側(投球方向側)に向く．この部分の動作が膝がより曲がったように見えていたと考えられる.

番号	練習前	練習1の後	練習2の後	練習3の後	練習4の後
1	161.69	154.23	139.58	123.23	113.29
2	136.54	121.23	105.87	100.01	109.10
3	125.32	101.77	106.14	99.02	110.7
4	174.40	172.32	172.85	170.01	172.00
5	153.68	136.20	142.28	129.09	141.50
6	155.48	144.82	137.98	128.23	133.83
7	160.55	163.421	145.56	124.17	128.30
8	145.07	130.51	138.12	120.19	113.00
9	160.00	126.61	130.60	114.24	115.77
10	173.81	161.50	159.15	125.48	124.49

表 4.3: 左脚地面着地時の膝関節角度

第5章 結論

本研究では,「VR を用いて目標動作を真似する」ことが,「一般的な練習法である動画を見て真似する」ことに比べて，どの程度の有効性があるかを評価することを目的とした. 真似する動作としては, 野球の投球動作の右膝関節角度に着目した．MediaPipe を用いて身体 33 点の 3 次元データを取得し，その中で，右腰と右膝，右踵の 3 点から右膝関節角度を算出した．これらのデータを Python と Unity 間でリアルタイムに送受信できる，そして，HMD を利用して VR 空間において，目標動作とユーザが同時に確認できるシステムを提案し，実装，実験を行った. 実験では, 動画を見て真似する練習(1), VR で目標動作と自分自身(ユーザ)を確認しながら真似する練習(2)，右膝を意識しながら動画を見る練習(3), 右膝を意識しながらVR で目標動作と自分自身(ユーザ)と膝角度の比較を確認しながら真似する練習(4)の 4 つの練習による変化を記録した．実験の結果， 練習(1)と練習(2)を比較すると，結果 1，結果 2 ともに，練習(2)の方が目標動作の膝角度に近づけることが出来ることが分かった．連取後の目標動作との角度差は値は 3.81 と 0.08 であった．また，練習(3)と練習(4)を比較すると練習(4)の方が目標動作に近づいたが，練習(2)ほど有効性がなかった.

スポーツなどにおいて, 特定の動作や技術を習得する際, 上級者の真似をしてコツを掴む，レベルアップのきっかけを掴むことは，一つの練習方法である．本

研究で提案した，リアルタイムで目標動作とユーザの動作が確認できるシステムによって，技術習得が支援できることを期待している．

今後の展望としては，投球動作における重要箇所をより多く比較できるようにすることや，一連の投球動作全てを練習できるようにすることが挙げられる．

謝辞

本研究を進めるにあたり懇切なるご指導，ご助言と格言なるご配慮を賜りました指導教員である北陸先端科学技術大学院大学・知識科学科の藤波努教授に謹んで深謝の意を表します. 本研究に関しまして, 有益なご討論を頂いた北陸先端科学技術大学院大学藤波研究室の諸氏に厚く御礼申し上げます. また, 本研究における実験に参加してくださった方々に心より感謝いたします. 最後に, 研究生活を送る上で，温かいご支援と多大なるご理解を頂いた両親をはじめとする家族に心から感謝とお礼を申し上げます.

参考文献

[1] 川崎 仁史, 脇坂 崇平, 笠原 俊一, 齊藤 寛人, 原口 純也, 登嶋 健太, 稲見 昌彦, “けん玉できた！{VR}：5 分間程度の{VR}トレーニングによってけん玉の技の習得を支援するシステム,” *エンタテインメントコンピューティングシンポジウム 2020 論文集,* pp. 26--32, 2020.

[2] 川西 真美, 土田 修平, 伊藤 貴之, “ダンスモーションの反復練習とその上達過程の可視化,” *情報処理学会　インタラクション 2021 論文集,* pp. 649-654, 2021.

[3] 西本林太郎, 岡本勝, 松原行宏, 岩根典之, “HMD とトラッキングセンサーを用いたテニス練習支援システム,” *人工知能学会第 33 回全国大会論文集,* pp. 1E4J1202--1E4J1202, 2019.

[4] 浦脇浩二, “生体情報可視化を利用したスポーツフォーム練習支援システム,” *奈良先端科学技術大学院大学情報学研究科修士論文,* 2005.

[5] 木村 聡貴, 持田 岳美 ,井尻,哲也 ,柏野,牧夫, “情報科学でスポーツパフォーマンス向上を支援する,” *電子情報通信学会 通信ソサイエティマガジン,* 第 巻 10, 第 1, pp. 23--28, 2016.

[6] 増田 大輝, 田坂 和之, 大岸 智彦, 小花 貞夫, “ウェアラブルセンサを用いたテニス上達支援システムの提案と考察,” *第 76 回情報処理学会全国大会講演論文集,* 第 1, pp. 91--92, 2014.

[7] Kavanagh, Sam and Luxton-Reilly, Andrew and Wuensche, Burkhard and Plimmer, Beryl, “A systematic review of virtual reality in education,” *Themes in Science and Technology Education,* 第 巻 10, 第 2, pp. 85--119, 2017.

[8] Li, Lan and Yu, Fei and Shi, Dongquan and Shi, Jianping and Tian, Zongjun and Yang, Jiquan and Wang, Xingsong and Jiang, Qing, “Application of virtual reality technology in clinical medicine,” *American journal of translational research,* 第 巻 9, 第 9, p. 3867, 2017.

[9] Khan, Rishad and Plahouras, Joanne and Johnston, Bradley C and Scaffidi, Michael A and Grover, Samir C and Walsh, Catharine M, “irtual reality simulation training for health professions trainees in gastrointestinal endoscopy,” *Cochrane Database of Systematic Reviews,* 第 8, 2018.

[10] “https://developers.google.com/mediapipe/ (参照 2024-01-25)”.

[11] Raman, Swati and Patel, Sanchita and Yadav, Surbhi and Singh, Vanchna, “Emotion and Gesture detection,” *International Journal for Research in*

Applied Science and Engineering Technology, 第 10, pp. 3731--3734, 2022.

[12] Thaman, B. and Cao, T. and Caporusso, N., "Face Mask Detection using MediaPipe Facemesh," *2022 45th Jubilee International Convention on Information, Communication and Electronic Technology (MIPRO).*

[13] Calvo-Valverde, Luis, "Performance Evaluation of Face Detection Algorithms for an Emotion Recognition Application in a School in the Department of Narino-Colombia," *International Conference on Ubiquitous Computing & Ambient Intelligence,* 第 卷 842, 第 2, p. 14, 2023.

[14] Indriani and Moh. Harris and Ali Suryaperdana Agoes, "Applying Hand Gesture Recognition for User Guide Application Using MediaPipe," *Proceedings of the 2nd International Seminar of Science and Applied Technology (ISSAT 2021),* pp. 101-108, 2021.

[15] Kavana, KM and Suma, NR, "Recognization of Hand Gestures Using Mediapipe Hands," *International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science,* 第 卷 4, 第 06, 2022.

[16] "https://github.com/google/mediapipe/blob/master/docs/solutions/pose.md/(参照 2024-01-30)".

[17] Bazarevsky, Valentin and Grishchenko, Ivan and Raveendran, Karthik and Zhu, Tyler and Zhang, Fan and Grundmann, Matthias, "Blazepose: On-device real-time body pose tracking," *arXiv preprint arXiv:2006.10204,* 2020.

[18] Bazarevsky, Valentin and Kartynnik, Yury and Vakunov, Andrey and Raveendran, Karthik and Grundmann, Matthias, "Blazeface: Sub-millisecond neural face detection on mobile gpus," *arXiv preprint arXiv:1907.05047,* 2019.

[19] Devanandan, Mithelan and Rasaratnam, Vithurson and Anbalagan, Manoj Karthik and Asokan, Narthanan and Panchendrarajan, Rrubaa and Tharmaseelan, Janani, "Cricket Shot Image Classification Using Random Forest," *2021 3rd International Conference on Advancements in Computing (ICAC),* pp. 425-430, 2021.

[20] Kwon, Yejin and Kim, Dongho, "Real-Time Workout Posture Correction using OpenCV and MediaPipe," *Korean Institute of infomation Technology,* 第 卷 20, 第 1, pp. 199--208, 2022.

[21] ACI, Nurettin and KULUÖZTÜRK, Muhammed Fatih, "Accuracy Detection in Some Sports Training Using Computer Vision and Deep Learning Techniques,"

Bitlis Eren University Journal of Science and Technology, 第 巻 13, 第 2, p. 133-158, 2023.

[22] Chirag Dilip Jawale and Keval Ashok Joshi and Swaroop Kusumakar Gogate and Chetana Badgujar, “Elcare: Elderly Care With Fall Detection,” *Journal of Physics: Conference Series,* 第 巻 2273, 第 1, p. 012019, 2022.

[23] Chaudhary, Isha and Singh, Nongmeikapam Thoiba and Chaudhary, Mahak and Yadav, Komal, “Real-Time Yoga Pose Detection Using OpenCV and MediaPipe,” *2023 4th International Conference for Emerging Technology (INCET),* pp. 1--5, 2023.

[24] Kapoor, Rithik and Jaiswal, Ashish and Makedon, Fillia, “Light-Weight Seated Posture Guidance System with Machine Learning and Computer Vision,” *Association for Computing Machinery,* p. 595-600, 2022.

[25] Nguyen, Hang Thi Phuong and Woo, Yeongju and Huynh, Ngoc Nguyen and Jeong, Hieyong, “Scoring of Human Body-Balance Ability on Wobble Board Based on the Geometric Solution,” *Applied Sciences,* 第 巻 12, 第 12, 2022.

[26] Fleisig, Glenn S and Barrentine, Steve W and Zheng, Nigel and Escamilla, Rafael F and Andrews, James R, “Kinematic and kinetic comparison of baseball pitching among various levels of development,” *Journal of biomechanics,* 第 巻 32, 第 12, pp. 1371--1375, 1999.

[27] 高橋 佳三, 阿江 通良, 藤井 範久, 島田 一志, 川村 卓, 小池 関也, “球速の異なる野球投手の動作のキネマティクス的比較,” *バイオメカニクス研究,* 第 巻 9, 第 2, pp. 36--52, 2005.

[28] Kageyama, Masahiro and Sugiyama, Takashi and Takai, Yohei and Kanehisa, Hiroaki and Maeda, Akira, “Kinematic and kinetic profiles of trunk and lower limbs during baseball pitching in collegiate pitchers,” *Journal of sports science ¥& medicine,* 第 巻 13, 第 4, p. 742, 2014.

付録 A 姿勢推定のためのコード

MediaPipe Pose による姿勢推定と UDP 通信によるデータの送信のためのコードを以下に示す.

main.py

```
1   import cv2
2   import mediapipe as mp
3   import numpy as np
4   import csv
5   import math
6
7   import socket
8   import random
9   import time
10
11  HOST = '127.0.0.1'
12  PORT = 50007
13
14  client = socket.socket(socket.AF_INET, socket.SOCK_DGRAM)
15
16  cap = cv2.VideoCapture(0)
17
18  fps = int(10)
19  #fps = int(cap.get(cv2.CAP_PROP_FPS))
20  w = int(cap.get(cv2.CAP_PROP_FRAME_WIDTH))
21  h = int(cap.get(cv2.CAP_PROP_FRAME_HEIGHT))
22  fourcc = cv2.VideoWriter_fourcc('m', 'p', '4', 'v')
23  video = cv2.VideoWriter('video.mp4', fourcc, fps, (w, h))
24
25  if not cap.isOpened():
26      print('No video')
27      exit()
28
29  mp_drawing = mp.solutions.drawing_utils
30  mp_drawing_styles = mp.solutions.drawing_styles
```

```
31  mp_pose = mp.solutions.pose
32  pose = mp_pose.Pose()
33
34  count = 0
35
36  height = 174
37
38  while True:
39      success, img = cap.read()
40
41      if not success:
42          Break
43
44      h, w, c = img.shape
45      width = height
46
47      imgRGB = cv2.cvtColor(img, cv2.COLOR_BGR2RGB)
48      results = pose.process(imgRGB)
49
50      if results.pose_landmarks:
51
52          p0 = results.pose_landmarks.landmark[0] #nose
53          p1 = results.pose_landmarks.landmark[1] #left_inner_eye
54          p2 = results.pose_landmarks.landmark[2] #left_eye
55          p3 = results.pose_landmarks.landmark[3] #left_eye_oter
56          p4 = results.pose_landmarks.landmark[4] #right_eye_inner
57          p5 = results.pose_landmarks.landmark[5] #right_eye
58          p6 = results.pose_landmarks.landmark[6] #right_eye_outer
59          p7 = results.pose_landmarks.landmark[7] #left_ear
60          p8 = results.pose_landmarks.landmark[8] #right_ear
61          p9 = results.pose_landmarks.landmark[9] #mouth_left
62          p10 = results.pose_landmarks.landmark[10] #mouth_right
63          p11 = results.pose_landmarks.landmark[11] #left_shoulder
64          p12 = results.pose_landmarks.landmark[12] #right_shoulder
65          p13 = results.pose_landmarks.landmark[13] #left_elbow
66          p14 = results.pose_landmarks.landmark[14] #right_elbow
```

```
67          p15 = results.pose_landmarks.landmark[15] #left_wrist
68          p16 = results.pose_landmarks.landmark[16] #right_wrist
69          p17 = results.pose_landmarks.landmark[17] #left_pinky
70          p18 = results.pose_landmarks.landmark[18] #right_pinky
71          p19 = results.pose_landmarks.landmark[19] #left_index
72          p20 = results.pose_landmarks.landmark[20] #right_index
73          p21 = results.pose_landmarks.landmark[21] #left_thumb
74          p22 = results.pose_landmarks.landmark[22] #right_thumb
75          p23 = results.pose_landmarks.landmark[23] #left_hip
76          p24 = results.pose_landmarks.landmark[24] #right_hip
77          p25 = results.pose_landmarks.landmark[25] #left_knee
78          p26 = results.pose_landmarks.landmark[26] #right_knee
79          p27 = results.pose_landmarks.landmark[27] #left_ankle
80          p28 = results.pose_landmarks.landmark[28] #right_ankle
81          p29 = results.pose_landmarks.landmark[29] #left_heel
82          p30 = results.pose_landmarks.landmark[30] #right_heel
83          p31 = results.pose_landmarks.landmark[31] #left_foot_index
84          p32 = results.pose_landmarks.landmark[32] #right_foot_index
85
86          #Calculate the angle of the right knee
87          x1 = int(p24.x * w)
88          y1 = int(p24.y * h)
89
90          x2 = int(p26.x * w)
91          y2 = int(p26.y * h)
92
93          x3 = int(p28.x * w)
94          y3 = int(p28.y * h)
95
96          cv2.line(img, (x1, y1), (x2, y2), (255, 255, 255), 3)
97          cv2.line(img, (x2, y2), (x3, y3), (255, 255, 255), 3)
98
99          cv2.circle(img, (x1, y1), 10, (255, 0 ,0), 5, cv2.FILLED)
100         cv2.circle(img, (x2, y2), 10, (255, 0 ,0), 5, cv2.FILLED)
101         cv2.circle(img, (x3, y3), 10, (255, 0 ,0), 5, cv2.FILLED)
102
```

```
103         angle = math.degrees(math.atan2(y3 - y2, x3 - x2) -
104                 math.atan2(y1 - y2, x1 - x2))
105 
106         cv2.putText(img, str(int(angle)), (x2 -50, y2 - 50),
107         cv2.FONT_HERSHEY_PLAIN, 2, (0, 0, ), 2)
108 
109         p0_x = int(p0.x * width)
110         p0_y = int((1 - p0.y) * height)
111         p1_x = int(p1.x * width)
112         p1_y = int((1 - p1.y) * height)
113         p2_x = int(p2.x * width)
114         p2_y = int((1 - p2.y) * height)
115         p3_x = int(p3.x * width)
116         p3_y = int((1 - p3.y) * height)
117         p4_x = int(p4.x * width)
118         p4_y = int((1 - p4.y) * height)
119         p5_x = int(p5.x * width)
120         p5_y = int((1 - p5.y) * height)
121         p6_x = int(p6.x * width)
122         p6_y = int((1 - p6.y) * height)
123         p7_x = int(p7.x * width)
124         p7_y = int((1 - p7.y) * height)
125         p8_x = int(p8.x * width)
126         p8_y = int((1 - p8.y) * height)
127         p9_x = int(p9.x * width)
128         p9_y = int((1 - p9.y) * height)
129         p10_x = int(p10.x * width)
130         p10_y = int((1 - p10.y) * height)
131         p11_x = int(p11.x * width)
132         p11_y = int((1 - p11.y) * height)
133         p12_x = int(p12.x * width)
134         p12_y = int((1 - p12.y) * height)
135         p13_x = int(p13.x * width)
136         p13_y = int((1 - p13.y) * height)
137         p14_x = int(p14.x * width)
138         p14_y = int((1 - p14.y) * height)
```

```
139         p15_x = int(p15.x * width)
140         p15_y = int((1 - p15.y) * height)
141         p16_x = int(p16.x * width)
142         p16_y = int((1 - p16.y) * height)
143         p17_x = int(p17.x * width)
144         p17_y = int((1 - p17.y) * height)
145         p18_x = int(p18.x * width)
146         p18_y = int((1 - p18.y) * height)
147         p19_x = int(p19.x * width)
148         p19_y = int((1 - p19.y) * height)
149         p20_x = int(p20.x * width)
150         p20_y = int((1 - p20.y) * height)
151         p21_x = int(p21.x * width)
152         p21_y = int((1 - p21.y) * height)
153         p22_x = int(p22.x * width)
154         p22_y = int((1 - p22.y) * height)
155         p23_x = int(p23.x * width)
156         p23_y = int((1 - p23.y) * height)
157         p24_x = int(p24.x * width)
158         p24_y = int((1 - p24.y) * height)
159         p25_x = int(p25.x * width)
160         p25_y = int((1 - p25.y) * height)
161         p26_x = int(p26.x * width)
162         p26_y = int((1 - p26.y) * height)
163         p27_x = int(p27.x * width)
164         p27_y = int((1 - p27.y) * height)
165         p28_x = int(p28.x * width)
166         p28_y = int((1 - p28.y) * height)
167         p29_x = int(p29.x * width)
168         p29_y = int((1 - p29.y) * height)
169         p30_x = int(p30.x * width)
170         p30_y = int((1 - p30.y) * height)
171         p31_x = int(p31.x * width)
172         p31_y = int((1 - p31.y) * height)
173         p32_x = int(p32.x * width)
174         p32_y = int((1 - p32.y) * height)
```

```
175
176         if count == 0:
177             x_c = p30_x
178             y_c = p30_y
179             count = 1
180
181         result = [
182             p0_x - x_c, p0_y, p0.z, p1_x - x_c, p1_y, p1.z,
183             p2_x - x_c, p2_y, p2.z, p3_x - x_c, p3_y, p3.z,
184             p4_x - x_c, p4_y, p4.z, p5_x - x_c, p5_y, p5.z,
185             p6_x - x_c, p6_y, p6.z, p7_x - x_c, p7_y, p7.z,
186             p8_x - x_c, p8_y, p8.z, p9_x - x_c, p9_y, p9.z,
187             p10_x - x_c, p10_y, p10.z, p11_x - x_c, p11_y, p11.z,
188             p12_x - x_c, p12_y, p12.z, p13_x - x_c, p13_y, p13.z,
189             p14_x - x_c, p14_y, p14.z, p15_x - x_c, p15_y, p15.z,
190             p16_x- x_c,  p16_y, p16.z, p17_x - x_c, p17_y, p17.z,
191             p18_x - x_c, p18_y, p18.z, p19_x - x_c, p19_y, p19.z,
192             p20_x - x_c, p20_y, p20.z, p21_x - x_c, p21_y, p21.z,
193             p22_x - x_c, p22_y, p22.z, p23_x - x_c, p23_y, p23.z,
194             p24_x - x_c, p24_y, p24.z, p25_x - x_c, p25_y, p25.z,
195             p26_x - x_c, p26_y, p26.z, p27_x - x_c, p27_y, p27.z,
196             p28_x - x_c, p28_y, p28.z, p29_x - x_c, p29_y, p29.z,
197             p30_x - x_c, p30_y, p30.z, p31_x- x_c, p31_y, p31.z,
198             p32_x - x_c, p32_y, p32.z, angle]
199
200         strings = ', '.join(map(str, result))
201
202         client.sendto(strings.encode('utf-8'),(HOST,PORT))
203
204         with open('live.csv', 'a', encoding='utf^8', newline="") as
205                     fout:
206             writer = csv.writer(fout)
207
208             writer.writerow([
209                 p0_x - x_c, p0_y, p0.z,
210                 p1_x - x_c, p1_y, p1.z,
```

```
211                 p2_x - x_c, p2_y, p2.z,
212                 p3_x - x_c, p3_y, p3.z,
213                 p4_x - x_c, p4_y, p4.z,
214                 p5_x - x_c, p5_y, p5.z,
215                 p6_x - x_c, p6_y, p6.z,
216                 p7_x - x_c, p7_y, p7.z,
217                 p8_x - x_c, p8_y, p8.z,
218                 p9_x - x_c, p9_y, p9.z,
219                 p10_x - x_c, p10_y, p10.z,
220                 p11_x - x_c, p11_y, p11.z,
221                 p12_x - x_c, p12_y, p12.z,
222                 p13_x - x_c, p13_y, p13.z,
223                 p14_x - x_c, p14_y, p14.z,
224                 p15_x - x_c, p15_y, p15.z,
225                 p16_x - x_c, p16_y, p16.z,
226                 p17_x - x_c, p17_y, p17.z,
227                 p18_x - x_c, p18_y, p18.z,
228                 p19_x - x_c, p19_y, p19.z,
229                 p20_x - x_c, p20_y, p20.z,
230                 p21_x - x_c, p21_y, p21.z,
231                 p22_x - x_c, p22_y, p22.z,
232                 p23_x - x_c, p23_y, p23.z,
233                 p24_x - x_c, p24_y, p24.z,
234                 p25_x - x_c, p25_y, p25.z,
235                 p26_x - x_c, p26_y, p26.z,
236                 p27_x - x_c, p27_y, p27.z,
237                 p28_x - x_c, p28_y, p28.z,
238                 p29_x - x_c, p29_y, p29.z,
239                 p30_x - x_c, p30_y, p30.z,
240                 p31_x - x_c, p31_y, p31.z,
241                 p32_x - x_c, p32_y, p32.z,
242                 angle])
243 
244     img.flags.writeable = False
245     img = cv2.cvtColor(img, cv2.COLOR_BGR2RGB)
246     results = pose.process(img)
```

```
247
248     img.flags.writeable = True
249     img = cv2.cvtColor(img, cv2.COLOR_RGB2BGR)
250     mp_drawing.draw_landmarks(
251         img,
252         results.pose_landmarks,
253         mp_pose.POSE_CONNECTIONS,
254         landmark_drawing_spec=
255        mp_drawing_styles.get_default_pose_landmarks_style())
256
257     cv2.imshow('Image', img)
258     video.write(img)
259
260     if cv2.waitKey(5) == ord('q'):
261         Break
262
263 camera.release()
264 cv2.destroyAllWindows()
```

付録 B 3 次元データの受信側のコード

Python MediaPipe Pose によりカメラに写っている人体動作の姿勢を推定し，取得した 3 次元のデータを UDP 通信で Unity に送信することで，図のようにリアルタイムの動作を反映することが出来る．

Main.cs

```
# C# unity 受信側

using System.Collections;
using System.Collections.Generic;
using UnityEngine;
using System.Net;
using System.Net.Sockets;
using System.Text;
using System.Threading;

public class tcp : MonoBehaviour
{
    static UdpClient udp;
    IPEndPoint remoteEP = null;

    GameObject[] children;

    void Start ()
    {
        int LOCA_LPORT = 50007;
        udp = new UdpClient(LOCA_LPORT);
        udp.Client.ReceiveTimeout = 2000;

        children = new GameObject[this.transform.childCount];
        for (int i = 0; i < this.transform.childCount; i++)
        {
            children[i] = this.transform.GetChild(i).gameObject;
        }
        print(this.transform.childCount);
```

```
30      }
31
32      // Update is called once per frame
33      void Update ()
34      {
35          IPEndPoint remoteEP = null;
36          byte[] data = udp.Receive(ref remoteEP);
37          string text = Encoding.UTF8.GetString(data);
38          string[] s = text.Split(',');
39
40          for(int x = 0; x < this.transform.childCount; ++x)
41          {
42              children[x].transform.position = new
43  Vector3((float.Parse(s[3*x]))*0.01f, (float.Parse(s[3*x + 1]))*0.01f,
44            float.Parse(s[3*x + 2]));
45          }
46      }
47  }
```

付録 C 実験協力者の膝関節角度データ

右投手が左脚を上げた時点から，左脚が地面に着く瞬間までの，実験協力者の膝関節角度のデータを以下に示す.

練習0	練習1	練習2	練習3	練習4
168.827	173.656	173.404	169.364	173.678
169.112	168.108	171.626	169.334	171.643
170.973	165.735	159.853	169.159	167.941
176.346	162.579	165.772	171.291	168.646
169.16	165.564	172.131	157.265	167.761
158.871	165.722	156.631	152.326	153.871
157.779	147.164	157.745	154.156	154.894
157.116	148.473	157.813	157.081	156.538
156.515	150.185	158.628	152.756	156.442
155.495	152.139	156.704	157.882	154.506
155.597	156.167	155.635	158.566	152.23
155.447	157.203	155.578	159.778	150.923
154.266	158.155	155.932	159.904	152.103
154.966	157.829	155.471	159.441	152.17
160.859	158.337	154.204	157.903	151.754
166.782	159.117	152.718	156.983	152.459
173.187	158.282	152.718	155.644	155.519
171.552	157.468	151.298	153.361	156.222
170.297	157.451	148.712	152.151	157.642
172.015	156.899	150.078	150.7	158.269
171.689	156.823	149.37	149.328	158.723
168.798	158.067	151.23	152.536	159.075
163.117	156.36	149.979	152.536	159.653
162.45	154.34	150.739	151.274	157.961
161.688	153.918	150.938	151.483	155.011
	154.526	152.726	154.229	151.536
	155.925	151.593	154.529	146.347
	159.476	155.749	154.534	132.489
	161.554	157.686	155.896	124.2
	162.419	155.844	155.669	116.794
	162.227	155.002	157.479	113.292
	162.606	154.135	156.292	
	162.275	154.294	158.169	
	161.884	156.167	158.908	
	162.404	156.521	157.315	
	161.667	152.086	156.389	
	159.416	150.783	155.911	
	160.082	140.706	157.822	
	154.51	139.58	155.764	
	154.228		143.569	
			135.643	
			127.669	
			123.226	

図 C.1：実験参加者 1

170.901	168.375	168.583	166.704	162.973
166.232	167.699	168.176	165.373	164.31
168.653	168.612	165.869	164.21	167.4
169.428	165.51	168.436	164.384	168.422
166.126	163.676	163.55	160.171	164.722
165.896	161.672	165.792	160.354	164.635
166.921	165.319	163.344	162.177	163.76
168.427	166.43	167.026	165.018	163.392
167.374	169.415	166.214	163.899	166.36
166.003	163.839	164.854	164.775	166.834
167.122	170.381	162.613	162.37	165.7
167.068	170.523	161.307	161.78	164.455
159.118	160.267	160.723	159.673	163.062
167.65	163.619	162.23	158.427	162.489
161.723	162.622	161.079	157.137	163.112
162.722	163.763	159.583	156.774	162.643
161.01	164.381	159.992	156.263	162.123
165.59	163.764	157.144	156.263	159.785
163.301	152.695	156.57	149.17	154.285
160.513	157.091	151.279	144.966	120.641
159.624	138.334	146.224	142.851	126.378
158.499	139.827	144.154	136.138	129.068
157.987	138.892	133.678	113.019	125.2
157.31	142.431	131.574	115.958	116.927
155.988	137.318	125.024	121.079	112.072
142.327	136.487	103.425	115.363	109.729
145.294	132.538	113.774	111.613	106.081
135.65	129.738	103.168	122.665	109.994
130.589	127.456	107.799	108	116.15
133.302	124.233	105.866	109.873	118.914
145.89	121.239		99.9132	108.992
143.589				
136.741				
136.539				

図 C.2：実験参加者 2

175.939	169.957	165.19	156.307	162.162
172.789	173.41	166.342	156.369	162.134
170.293	173.246	162.318	151.089	161.406
158.466	178.356	154.804	147.193	160.941
153.147	177.776	165.838	145.706	159.699
151.101	169.547	160.482	145.046	158.372
137.851	155.631	165.063	143.761	155.677
133.414	141.239	156.908	140.614	151.961
131.424	137.557	152.402	139.508	157.986
127.882	128.51	155.126	157.088	168.684
126.585	116.322	156.628	160.584	172.497
135.78	113.179	156.938	158.616	170.24
148.241		158.77	151.058	159.194
151.052		151.519	150.982	159.714
129.159		148.446	161.206	139.829
125.319		146.793	147.497	135.065
125.689		142.843	143.789	141.492
		142.369	138.832	147.448
		142.753	131.055	154.736
		142.942	122.517	150.579
		140.291	122.217	158.228
		138.675	115.725	149.081
		138.27	103.16	155.661
		138.681	109.339	155.126
		144.127	109.264	153.795
		142.307	123.223	144.517
		130.873	107.841	140.862
		140.78	98.9207	107.69
		144.91		106.205
		143.295		114.552
		141.967		119.857
		141.521		123.381
		130.819		127.733
		123.516		124.124
		128.752		134.945
		127.83		116.395
		105.685		110.698
		107.049		
		106.136		

図 C.3：実験参加者 3

169.144	176.068	171.564	167.294	168.137
164.114	174.528	168.956	161.246	167.579
169.389	174.144	164.818	156.878	165.535
177.459	172.786	162.74	158.792	167.124
177.51	173.677	162.108	162.187	170.625
172.899	173.19	158.695	162.35	171.224
172.652	173.941	149.853	163.259	170.908
165.753	174.263	147.549	162.629	169.418
161.439	171.887	153.05	163.856	165.661
158.67	172.635	157.994	166.747	171.569
169.05	174.971	164.299	167.606	170.337
172.773	174.026	167.056	168.345	174.174
174.403	175.064	169.382	168.983	173.53
177.119	174.183	170.33	161.127	172.709
176.301	172.32	172.178	157.256	169.568
177.641		172.926	158.42	170.459
175.674		172.853	164.291	171.288
177.814			170.596	173.556
174.399			173.971	171.536
			170.724	171.553
			170.164	171.985
			170.921	
			169.907	

図 C.4：実験参加者 4

171.225	174.73	176.351	176.022	174.049
171.261	171.941	177.138	173.24	174.689
170.539	172.108	175.711	174.546	172.248
171.518	170.689	174.903	173.752	170.218
169.465	169.994	171.924	173.122	167.517
169.824	167.742	171.893	169.799	171.287
166.007	166.509	171.02	169.467	169.34
170.99	170.574	173.782	165.635	174.382
174.95	172.072	173.58	155.436	167.159
178.53	163.644	174.357	159.619	165.964
177.107	159.386	170.905	154.091	163.843
175.046	156.856	171.076	149.003	171.814
175.045	164.369	170.074	150.607	171.678
172.875	168.944	171.098	150.261	169.267
169.961	165.882	170.794	141.182	92.2127
165.153	176.038	164.123	137.552	128.566
160.354	174.395	166.358	135.013	159.074
158.071	172.266	168.011	135.475	152.335
155.283	168.232	164.037	131.274	148.96
153.679	167.364	154.273	130.395	156.777
	157.698	156.824	133.307	156.326
	153.908	170.26	134.274	146.571
	154.228	171.134	136.533	142.853
	154.733	167.809	132.693	141.499
	157.855	165.878	129.073	
	146.004	165.343	126.88	
	143.715	164.561	129.09	
	138.898	165.275		
	136.197	161.086		
		153.895		
		152.241		
		156.21		
		145.774		
		146.19		
		144.165		
		142.284		

図 C.5：実験参加者 5

174.273	171.519	169.788	169.121	169.866
174.078	168.931	167.738	164.427	166.127
172.755	168.084	165.439	157.785	164.838
172.224	165.459	156.766	153.502	159.055
170.05	159.64	157.61	155.925	155.558
168.654	156.972	156.397	153.35	153.269
164.828	152.849	156.418	149.769	147.066
159.654	142.551	156.602	159.767	145.018
160.195	155.189	156.468	158.336	141.776
163.072	162.552	157.541	160.078	142.26
167.303	163.9	159.099	160.026	139.619
166.045	163.74	161.653	159.363	137.618
162.129	162.99	160.853	160.046	138.047
159.575	154.664	150.882	157.454	138.394
155.479	150.698	141.648	155.489	136.333
	144.848	140.347	149.954	136.717
	146.895	140.814	147.904	135.183
	147.481	137.981	144.225	130.601
	144.813		133.294	150.78
			131.352	144.612
			128.232	133.919
				133.832

図 C.6：実験参加者 6

178.362	173.659	174.218	164.187	165.65
177.617	173.034	174.144	163.483	165.379
177.467	170.392	172.647	160.183	165.071
178.98	169.21	167.4	154.82	156.709
178.139	166.884	163.933	146.958	152.445
180.046	165.548	162.088	156.688	160.689
180.854	165.828	164.392	156.478	164.24
179.644	162.221	163.885	155.248	165.603
180.261	159.389	164.134	160.282	167.65
177.587	163.003	165.634	164.395	167.581
175.421	167.471	162.594	162.344	161.559
172.67	169.884	160.243	162.77	160.495
171.527	170.785	165.792	160.483	161.688
170.88	170.663	166.811	158.764	160.985
171.243	168.324	154.302	159.341	159.813
171.467	164.175	146.524	157.493	157.587
170.278	159.982	151.784	158.02	153.927
171.643	159.319	152.515	158.02	153.893
171.582	158.88	148.914	161.444	152.366
171.655	158.978	152.601	162.131	151.662
174.644	158.378	149.549	162.691	152.28
173.469	159.932	146.118	159.381	151.836
172.741	161.152	145.568	156.159	153.131
171.556	163.488		155.394	154.672
168.096	165.237		151.07	154.12
165.608	168.812		149.439	157.645
164.261	176.028		150.587	152.645
	163.407		145.88	148.338
	163		145.67	143.853
	166.595		148.675	135.387
	168.343		153.827	129.34
	164.851		148.068	128.307
	165.715		133.478	
	168.207		124.174	
	168.042			
	165.264			

図 C.7：実験参加者 7

173.414	169.707	170.283	171.871	173.177
173.114	171.05	170.531	171.18	172.518
171.556	167.711	170.466	166.115	167.39
169.767	162.712	162.712	155.739	157.509
166.882	151.08	146.322	157.776	156.099
168.475	151.04	143.639	147.693	160.984
169.548	155.455	155.748	157.257	160.265
170.523	154.291	155.068	160.32	162.658
168.291	157.263	160.23	158.932	164.335
166.201	158.832	162.947	159.569	163.657
157.862	158.19	163.061	159.668	157.56
151.998	158.298	160.84	159.705	144.218
148.593	158.45	158.623	159.533	148.75
145.037	162.422	155.586	159.569	150.097
	160.739	158.503	159.569	140.777
	158.754	159.906	159.977	129.077
	147.443	158.015	160.824	127.84
	150.2	164.684	142.924	121.875
	154.99	159.686	144.615	120.293
	155.279	152.396	145.734	118.527
	152.554	153.106	129.268	
	150.134	149.047	137.92	
	140.528	143.711	140.183	
	135.012	146.012	139.109	
	130.51	147.255	141.33	
		147.152	139.37	
		143.502	137.394	
		138.121	136.22	
			133.675	
			129.025	
			120.189	

図 C.8：実験参加者 8

176.419	165.104	162.527	170.507	175.834
174.399	160.784	163.749	167.824	173.198
170.757	159.192	163.72	165.443	170.461
171.764	159.43	163.699	162.714	167.522
168.319	160.267	160.088	158.938	161.684
162.654	158.622	157.582	166.822	150.857
167.901	161.793	162.652	163.895	152.113
168.249	165.599	163.442	167.421	158.436
167.888	166.061	167.623	163.032	162.519
164.572	164.431	167.679	169.376	166.367
160.999	162.796	168.174	168.363	166.416
159.417	159.289	167.711	169.092	166.93
163.061	152.965	166.161	167.523	165.49
162.617	147.878	154.669	168.048	164.464
157.782	144.838	153.435	170.457	163.277
156.064	137.581	150.816	169.9	163.632
155.997	138.072	148.423	170.484	163.804
	136.884	143.094	169.143	154.883
	135.298	136.86	166.007	143.338
	134.08	135.658	159.252	137.787
	132.957	140.856	129.744	132.832
	134.207	144.756	137.977	132.402
	129.282	142.668	134.917	126.108
	126.614	135.993	142.3	126.608
	127.903	135.549	130.888	128.516
		130.601	125.623	125.841
			125.838	119.351
			125.164	116.539
			120.622	115.77
			116.347	
			114.236	

図 C.9：実験参加者 9

173.811	172.855	169.368	163.214	160.768
	172.817	168.798	163.4	163.778
	172.395	168.224	164.823	164.622
	171.015	163.872	166.608	169.028
	169.186	160.19	168.841	155.537
	174.192	160.608	158.679	148.1
	177.033	157.177	161.366	149.617
	176.253	161.467	154.116	156.627
	176.659	161.792	152.335	162.646
	176.027	160.108	154.639	160.836
	177.56	167.814	154.396	150.034
	170.998	168.846	154.676	148.182
	162.381	168.268	155.472	130.975
	165.694	167.242	158.175	136.583
	165.532	166.046	153.581	147.368
	163.629	150.871	149.619	133.276
	163.036	159.225	149.991	134.342
	161.497	164.359	142.515	128.299
		164.989	138.895	126.011
		169.371	130.036	124.494
		162.506	128.358	
		159.146	127.819	
			125.479	

図 C.10：実験参加者 10