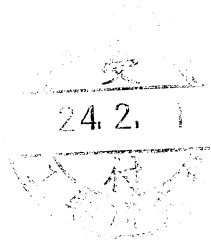


修士論文

視覚による動作速度とタイミングの教示方法 -下手投げ動作への適用-



指導教員 野村由司彦 教授

平成 23 年度

三重大学大学院工学研究科 機械工学専攻

410M141 森川晃延

目次

第1章	まえがき	3
第2章	動的な動作の教示.....	6
2.1	静的な動作教示から動的な動作教示へ.....	6
2.2	既存の静的動作教示システムの問題	6
2.3	既存の動的動作教示システムの問題	7
2.4	提案する速度教示システム	9
2.5	システムを評価するためのベンチマーク動作（下手投げ投球動作）	10
第3章	速度差提示方法	11
3.1	速度差提示方法	11
3.1.1	ゴースト表示	12
3.1.2	メータ表示	14
3.1.3	カラー表示	15
3.1.4	軌跡表示	16
3.2	4つの提示方法に関する教示性能比較実験	17
3.2.1	教示性能比較に用いた装置	17
3.2.2	実験概要	18
3.2.3	実験結果，および考察	18
第4章	投球動作教示システム	20
4.1	動作計測装置	20
4.2	視覚情報提示プログラム	21
4.2.1	多画面表示	22
4.2.2	モデルの変更	22
4.2.3	色変化を加えた軌跡変化	23
4.2.4	リリースポイント提示方法	23
4.2.5	投球位置の特定方法	24
4.3	投球動作教示手順	25
4.4	データの流れ	27
第5章	実験	28
5.1	動作教示システムを用いた投球学習の手順	28
5.2	実験条件および方法	29
5.3	実験結果	31
5.4	考察	35
第6章	むすび	37

参考文献.....	38
謝辞.....	39
付録.....	40

第1章 まえがき

個人でスポーツや踊りなどの高度な動作を学習する場合には、ビデオや本などを参考にすることが多い。しかし、そのような学習方法にはいくつか問題がある。それは学習者自身では、自分の動作の良し悪しを客観的に判断することが難しいということである。すなわち、現在の自身の動作が模範となる動作を再現できているのか、あるいは規範動作と異なっているのか、もし異なっているならば、どこがどう異なっているのか、その判断は学習者自身に委ねられる。もし、学習者が誤った判断を下し、規範動作と異なる動作を学習してしまうと、場合によっては怪我にもつながる。このような問題を防ぐにはコーチの存在が効果的である[1]。コーチがいれば、自分の動作の良し悪しを評価してもらい、動作が適切でなければ、言葉や、手取り、足取りして、適切な動作を教示してもらうことができる。このように、コーチの存在は効果的ではあるが、自分がスポーツや踊りなどを学習したいとき、コーチがいるとは限らない。また、気軽に学びたい人にとっては、コーチを探すことの手間が学習のやる気を削いでしまう要因となろう。

このような背景の下、筆者らは個人でもスポーツや踊りなどを学習できるようにするため、コーチの代わりとなって、学習者の動作を規範となる動作に比較し、その良し悪しを評価して、さらに必要に応じて規範となる動作に近づくように動作を修正することのできるヒューマンインターフェイスの開発に取り組んできた。このインターフェイスの主要な機能は動作計測と動作教示である。動作計測については慣性センサを装備したモーションキャプチャを用いることである程度解決できる。一方の動作教示は容易でなく、視覚情報提示、電気刺激[2]、皮膚刺激、錯覚[3]など、さまざまな手法について研究してきている。本論文では、視覚によるバーチャルリアリティ技術を用いて学習者に動作修正の教示を行う手法について行った研究の結果について述べる。

視覚による動作の教示も様々な手法があるが[4][5]、他のアクチュエータを用いた教示に比べ、装着者の運動やシステムの設置場所など、機械的制約が少ないこと、また、装置としては市販のPCやディスプレイを用いることができ、ローコストであるというメリットがある。

筆者らの研究室では、これまで、モーションキャプチャを用いて静的な位置・姿勢を計測し、規範的な位置姿勢へと修正するための視覚的な教示を行う動作教示システムを開発している[6][7]。しかし、スポーツなどの動作を学習する際に、位置、姿勢のみの情報では投球動作などの動的な動作の教示だけでは不十分であることから、新たな提示情報として速度、加速度情報を提示することを目指す。

なお、本研究と同様に、動的動作を教示する動作教示システムとして、位置・姿勢だけではなく、筋電位の情報を視覚的に提示するものも存在する[8][9]。投球動作の教示において重要なのは、リリースポイントにおいての手先速度と、投球位置である。しかし、どの筋肉をどのように活性化すれば、身体の諸器官がどのように動くのか、実は自分自身でも

よく分かっていないところもある．このように，筋力は，適切にコントロールすることが難しい．加えて，筋肉への力の入れ方，それ自身も動作の修得には重要であるが，力の入れ方は，必ずしも筋肉の動作速度に対応しない．さらに，仮に，特定の筋肉への力の入れ方の情報が学習者に示されたとしても，示された「力の入れ方」を定量的に再現することは難しい．

対象の身体器官とそれに関係する筋肉との関係は既に脳内に形成されていることから，多様な筋肉を個々に意識する必要はなく，早く動かす，遅く動かす，一定で動かすなど，直感的なコントロールが可能であると考えられる．速度情報の提示にはこのような利点があるが，従来の研究は動作終了後にオフラインで学習者に速度情報を提示するものであり[10][11]，動作中に速度，加速度を提示し学習者にフィードバックしているわけではない．

そこで，筆者らは，リアルタイムで速度，加速度情報を学習者にフィードバックする動作学習システムを提案し，開発を進めてきた．具体的には，速度情報提示手法として，既存の研究で提案された手法や，日常的に我々が目にする速度情報の提示の仕方などを参考に，ゴースト表示，メータ表示，カラー表示，軌跡表示の4つの表示方法を考案した．本研究では，予備実験として，それらの表示方法を実際に体験してもらい，その中から最も評価の高かった軌跡表示法を動作学習システムとして採用した．さらに，本システムの評価動作として，下手投げ動作を用いることにより，システムを使用することで目標速度を学習できるかについて評価を行った．

次に本論文の構成は以下のとおりである。第 2 章では、スポーツや踊りなどの時刻ごとに目標位置・角度が変化する動作を教示する際の問題点について投球動作を例に説明する。次にその問題点を対象とした教示問題として筋力を取り扱った研究を紹介し、それらに対する問題点を挙げ、速度、加速度の教示の有意性を述べる。そして、リアルタイムでの教示をテーマとした新たな速度教示システムを提案し、筆者らが目指すシステムの概要と教示対象動作について示す。第 3 章では、既存の研究などを参考に考案した、ゴースト表示法・メータ表示法・カラー表示法・軌跡表示法と命名した速度差提示手法を紹介する。さらに、考案した提示方法を、簡易的なモーションキャプチャにて評価可能なシステムとして実装し、その結果を示す。第 4 章では、このようにして決定した提示方法に基づいた投球動作教示システムの機能と、システムによる教示手順を示す。第 5 章では、投球動作教示システムを用いて行う、下手投げ投球動作教示実験の概要を説明する。さらに、実験結果を元に改良した投球動作教示システムについて説明し、改良したシステムを用いて教示した結果を示し、考察を行う。第 6 章にて本研究における結論を述べる。

第2章 動的な動作の教示

2.1 静的な動作教示から動的な動作教示へ

既存の研究として、筆者らの研究室では位置角度教示システムを開発し(Fig.1), ヨガポーズやパントマイムなどの目標位置が時々刻々と変化しない”静的な動作”の教示を行ってきた。しかしスポーツや踊りなどの、時々刻々と目標位置が変化するような”動的な動作”の教示は行っていなかった。よって筆者らは動的な動作の教示を目指し、研究を行ってきた。

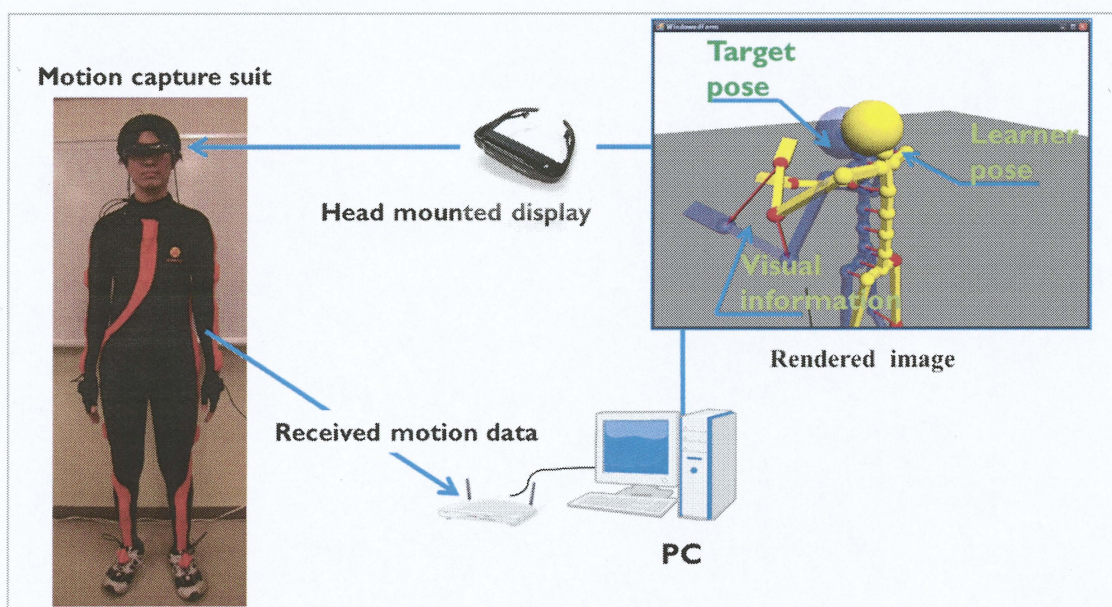


Fig. 1 既存の動作教示システム

2.2 既存の静的動作教示システムの問題

まず Fig2 の図は、投球動作の中で重要と思われるポーズのみを抜き出したものである。あなたはこの一連のポーズを見て投球後の投球軌跡を予測することができるだろうか、恐らく Fig.2 だけでは無理であろう。なぜなら Fig.2 では姿勢のみが表示されているだけであり、これらの一連の動作がどのような速度で行われたかは、この図では読み取れないからである。この問題は筆者らのシステムの問題に直結している。現在のシステムは位置、姿勢を教示することで静的な姿勢を教示するシステムである。よって現在の姿勢から、次の姿勢までどれぐらいの速さで移り変わるかといった情報は教示できない。もちろん、時々刻々と位置・角度を提示することで速度情報を教示することは可能である。しかし目標位置に比べ、現在動作が遅れている場合、現在動作を“加速せよ”、“減速せよ”というような「教示」は現状のシステムでは難しい。

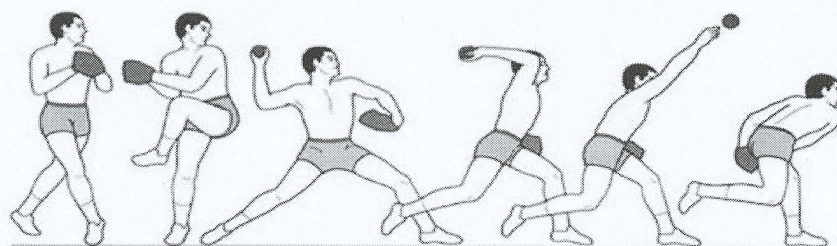


Fig. 2 既存のシステムの問題

2.3 既存の動的動作教示システムの問題

次に以上の問題に対する既存の研究を紹介する．位置・角度以外の情報を視覚的に提示するものも存在する．例えば Fig.3 に示す研究では，筋電位情報を用い，学習者に現在の筋力を提示することで，どの筋力を意識的に動かせばよいかを視覚的に提示し，ゴルフやボレーリングなどのスポーツに応用している[8]．

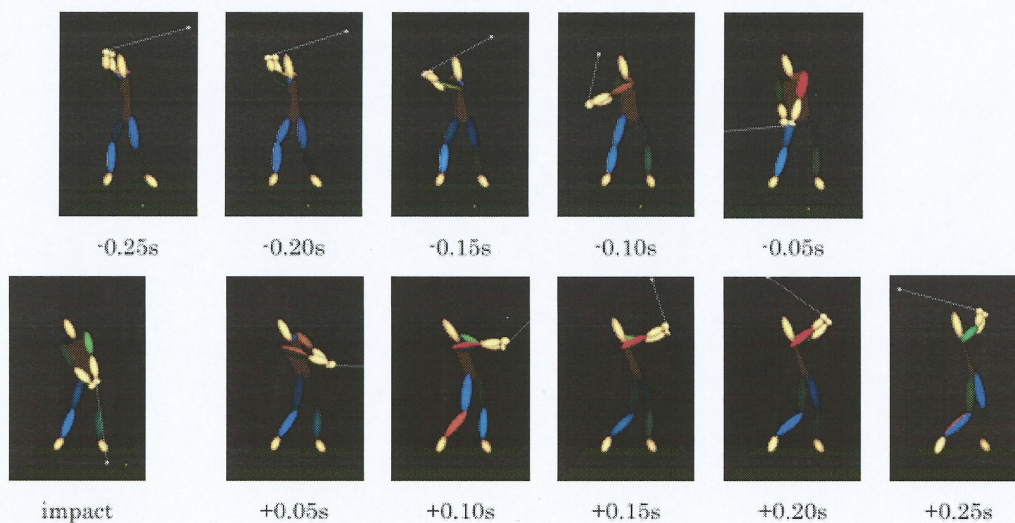


Fig. 3 スポーツ動作分析の支援を目的とした人体センシング情報の可視化提示方法

また Fig.4 に示す研究[9]では、リアルタイムで教示者の筋力と学習者の筋力を提示し、教示者の筋力の模倣を行うことで、動作を学習することができるシステムである。

これらの研究は、表面的にはまず知ることのできない、筋肉という身体内部の情報を学習者に提示することのできるすばらしい研究であると言える。しかし、前記のように、我々が無意識的に動作させている筋力のような、コントロールが難しい情報を提示しても対処は困難である上に、原理的にも、身体の一部の運動状態を絶対量に提示することはできない。したがって、直接的に速度、加速度を提示する方が投球動作のような動作に対しては有用的であると判断した。

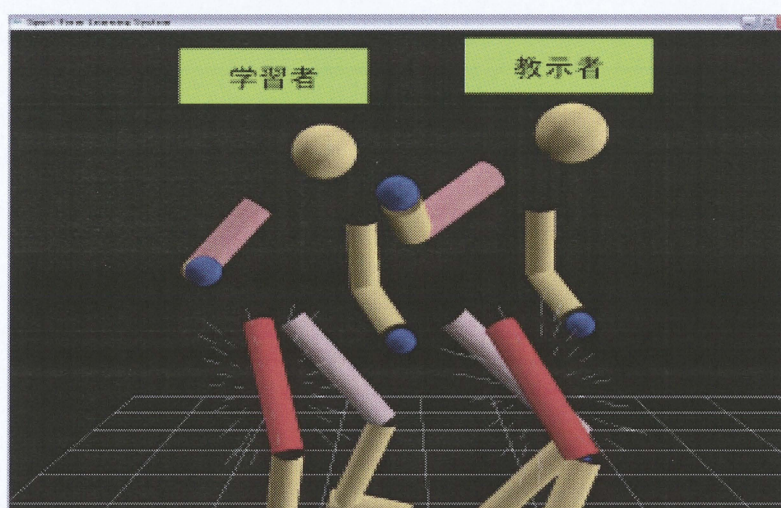


Fig. 4 生体情報可視化を利用したスポーツフォーム練習支援システムの構築

この他、既存の研究には、Fig.5 のように教示者モデルの動作を観察して動作を学習し、動作学習終了時に教示者と学習者の速度データを比較しスコア化し学習者に伝えるシステム[10]や、Fig.6 [11]のように動作中に、現在動作が遅かった場合、言葉により”もっと早く”，”もっと遅く”といった表示を行うことで速度を提示しているものが存在する。

しかし、速度情報を提示するシステムの中には、動作中に学習者と教示者の速度差を学習者にフィードバックするシステムというもの存在せず、速度差を提示することも、簡単な言葉による表示に留まっている。

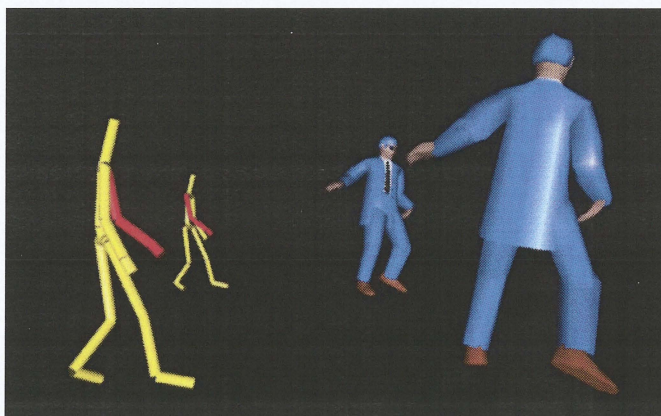


Fig. 5 A Virtual Reality Dance Training System Using Motion Capture Technology

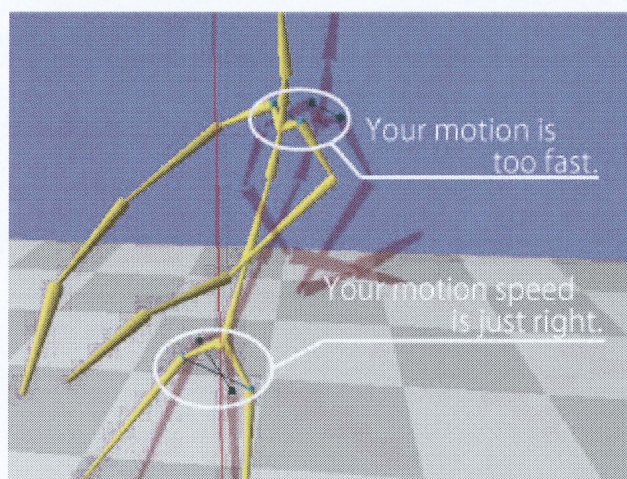


Fig. 6 モーションキャプチャシステムを利用した左右反転動作スキル習得支援環境の構築

2.4 提案する速度教示システム

以上，既存の動的動作学習システムについて説明した．本研究では，教示効果をさらに高めるため，新たに，

- ① 目標速度と現在速度の差を提示する
 - ② その現在速度の差をリアルタイムでフィードバックする
- ことを特徴とするに注目して，リアルタイム速度差提示システムを考案した．

2.5 システムを評価するためのベンチマーク動作（下手投げ投球動作）

今回、システムの評価するためのベンチマーク動作として、簡単な下手投げ投球動作を設定した。これは、被験者に下手投げ動作を行ってもらい、目標の位置にボールを投球してもらう動作である。所定の位置にボールを投げるという動作は、リリースポイントの位置、およびリリース時の速度が結果の良し悪しを左右する重要な要因であり、筆者らが考える速度差を教示するシステムの評価に適した動作である。また、今回設定した下手投げ動作では、肘などの関節を曲げて投球すること禁止することとした。この制約により、腕の動きは1自由度となり、1リンクの動きと考えることができる。

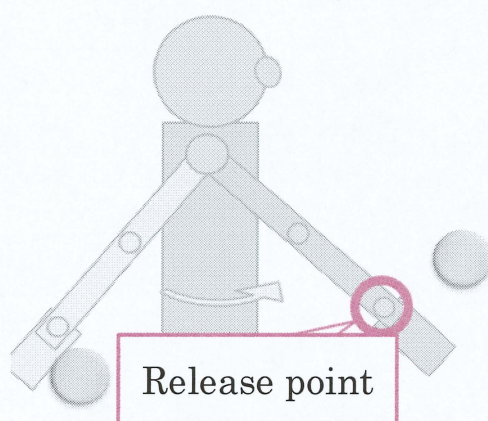


Fig. 7 1自由度の下手投げ投球動作

第3章 速度差提示方法

3.1 速度差提示方法

本節では，本研究で提案するシステムの速度差提示方法の基本的な機能について説明する．提案の投球動作教示システムの重要なポイントの一つは速度差の提示である．これについては，既存の研究の視覚的提示方法や，我々が日常的に体験する速度差の提示手法を考慮し，次の四つの視覚的速度差提示方法を考案した．すなわち，

ゴースト表示

メータ表示

カラー表示

軌跡表示

これらの提示方法はいずれも，式(1)で示される速度差を視覚的变化に変換して，学習者に表示ものである．

$$v_e(t) = v_l(t) - v_r(t) \dots \dots \dots (1)$$

v_e : 速度差

v_r : 目標速度

v_l : 学習者速度

t : 現在時間($t = 0$ は動作開始時)

以下では，これらの速度差提示方法を個別に説明する．

3.1.1 ゴースト表示

既存の研究の視覚的位置提示方法に、目標動作モデルを追いかけながら学習を行うものがある[4] (Fig.8 参照). Fig.8 は教示者モデル(ゴースト)に学習者のモデルを重ね合わせることで、目標位置、角度を学習することができるシステムである. 今までのゴースト表示ではゴーストと学習者モデルとで、目標位置や角度を重ね合わせることで示していた. これに対して、本提案のシステムでは、速度差を位置や角度の差として“仮想的に”表現することにより、位置や角度を重ね合わせれば、結果的に速度差が学習できるように変更している.

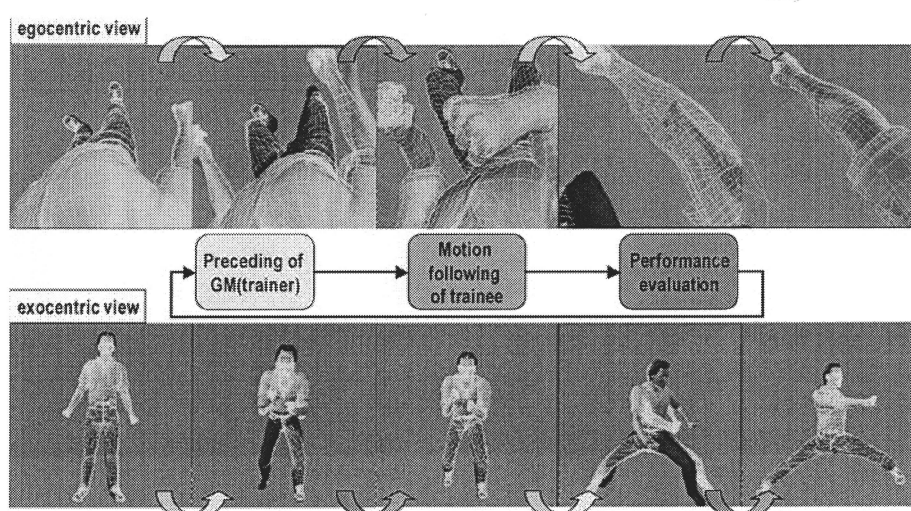
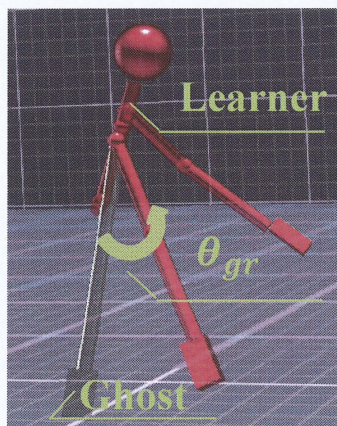


Fig. 8 ゴースト表示の参考研究 "Just Follow Me"

具体的には以下のとおりである. まず, Fig.9 に示すように, ディスプレイ上には Learner (学習者モデル)と Ghost (ゴーストモデル)が表示される. まず, 学習者には右手を動かしてもらい. その時, 目標速度と学習者の現在速度の差によってゴーストモデルは表示され, ゴーストの表示位置はその時の速度差から, 式(2)により算出した角度に基づいて表示される.

仮に, 現時点で, 学習者の速度差が遅い場合, つまり $e_v(t) < 0$ の場合には, $\theta_{gr(t+1)} > \theta_{l(t)}$ となり, Fig.9 右図のようにゴーストモデルは学習者モデルの手前に (図では反時計方向の回転として) 表示される. 逆に, 目標速度に対して学習者の現在速度が速い場合, つまり $e_v(t) > 0$ の場合には, Fig.9 左図のようにゴーストモデルは学習者モデルの後ろに表示される. 表示されたゴーストに体を重ね合わせるように動くことで, 学習者は速度情報を学習することができるものと期待される.

$$\theta_{gr} > 0$$



$$\theta_{gr} = 0$$



$$\theta_{gr} < 0$$



Fig. 9 ゴースト表示

$$\theta_{gr(t+1)} = \theta_{l(t)} - k_g e_v(t) \dots \dots \dots (2)$$

θ_{gr} : ゴーストと学習者モデルとの角度差

θ_l : 学習者モデルの角度

k_g : ゴーストディスプレイのフィードバックゲイン

3.1.2 メータ表示

メータ表示は、速度メータによる速度差提示方法である。この手法は我々が車の運転などで良く体験する方法である。車の速度メータを参考にしつつ、アクセル量を調整することで速度をコントロールすることは誰もが日常的に経験している。よって本研究においても、もっとも一般的な速度差提示方法であるメータ表示を提案、実装することにした。また、メータの表示方法においては連続的な値ではなく、目盛り量として提示することにした。これは連続的な値を用いた場合、微小な動きに対しても機敏に目盛りが動き、学習者が困惑するのではないかと考えたためである。

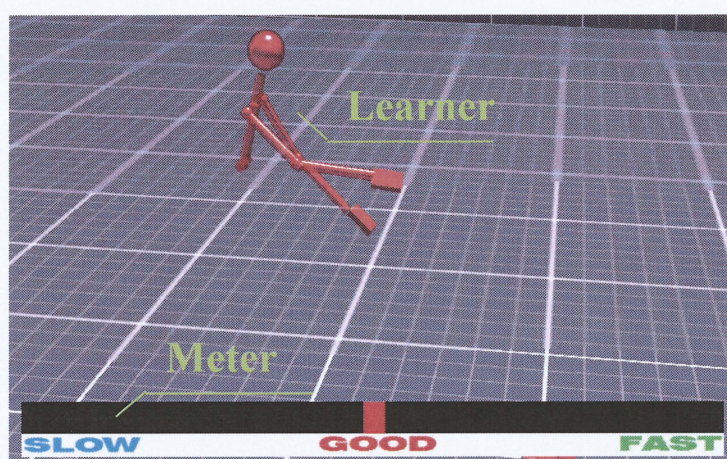


Fig. 10 メータ表示

メータ表示の動きは、図のように、現在動作が速い場合は目盛りを **FAST** の方に移動させ学習者に”速すぎる”と提示する(Fig.11 右側)。またそのときの修正量は速度差に応じて目盛り量 u_{tm} で与えている。逆に、現在動作が目標速度に対して遅い場合は **SLOW** の方に目盛りを増加し学習者に”遅すぎる”提示する(Fig.11 左側)以上がメータ表示である。

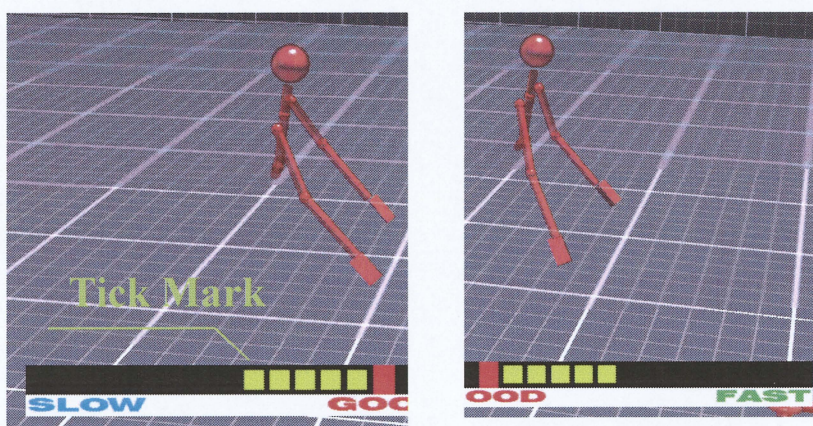


Fig. 11 メータ表示動作画像

3.1.3 カラー表示

カラー表示は、既存の研究である、筋力の提示方法に良く用いられる手法である。そのため本研究においても採用した。本研究では色の変化としてもっとも色の変化の違いを意識できる赤から青までの色の変化を用いて学習者に速度差を提示する(Fig.12)。その際の RGB のパラメータ設定は以下の数式で表される(4)(5)。

もし学習者の速度が速い場合、学習者の腕モデルはその速度差に応じて赤色に変化する。また逆に、学習者の速度が遅すぎる場合、学習者の腕モデルはその速度差に応じて青色から白までの色の変化によって学習者に速度差を提示する。学習者はモデルを白色の変化のまま動かすように動くことで速度を学習することができる。これがカラー表示提示方法である。

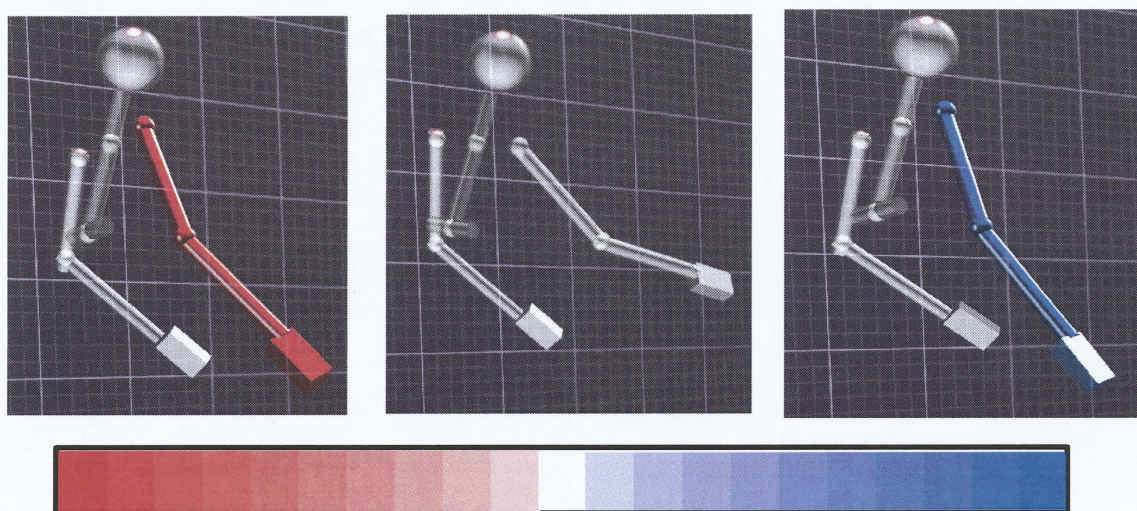


Fig. 12 カラー表示

$$v_{e(t)} > 0$$

$$\begin{cases} r_{(t+1)} = 255 \\ g_{(t+1)}, b_{(t+1)} = 255 - k_c v_{e(t)} \dots \dots \dots (4) \end{cases}$$

$$v_{e(t)} < 0$$

$$\begin{cases} b_{(t+1)} = 255 \\ r_{(t+1)}, g_{(t+1)} = 255 - k_c v_{e(t)} \dots \dots \dots (5) \end{cases}$$

k_c : カラーディスプレイにおけるフィードバックゲイン

r, g, b : RGB パラメータ

3.1.4 軌跡表示

軌跡表示は、他の提示方法とは違い、筆者らが考えた速度差提示方法である。この提示方法は現在の手先速度で投球を行った場合どのような軌跡を描いてボールが落下するかを予測し、現在の手先速度に応じて軌跡が変化する。そして変化する軌跡を調整することで実際に学習者に速度差を提示する方法である。この提示方法において表示されるものは目標位置であるゴールオブジェクト、学習者モデル、さらに投球のリリースポイントを表す球体オブジェクトと時刻ごとの軌跡を表す軌跡オブジェクトで構成される(Fig.13).

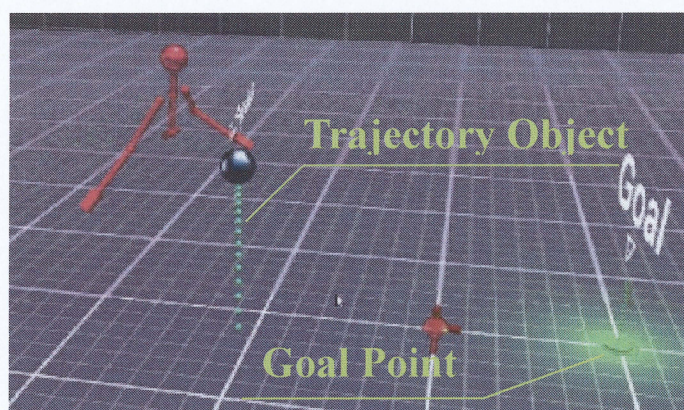


Fig. 13 軌跡表示

提示手順として、まず学習者がリリースポイントに向けて投球動作を開始する。その時の手先速度の状態で投球をした場合どのような軌跡を描いてボールが落下するかを軌跡オブジェクトが時々刻々と変化し学習者に提示する。これにより学習者は時々刻々と変化する軌跡オブジェクトをゴールポイントに接触するように手先速度を調整することで目標速度を学習することができるシステムである(Fig.14).

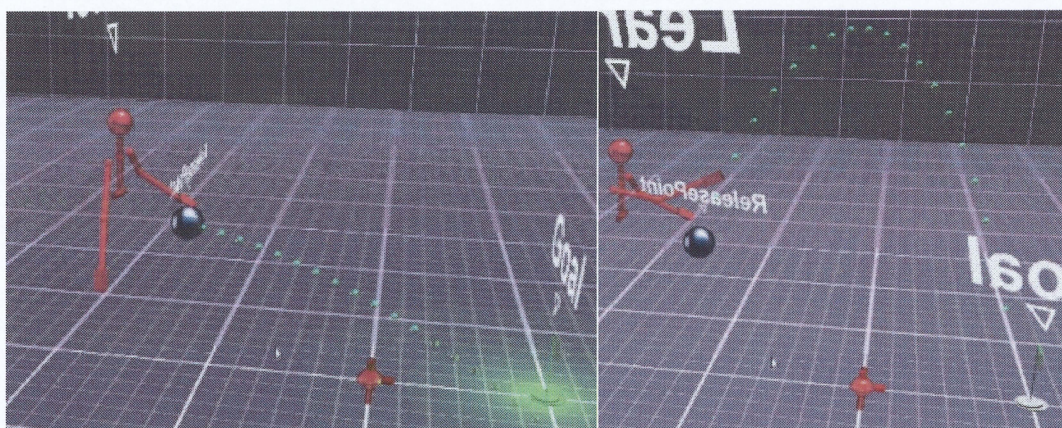


Fig. 14 軌跡表示動作画像

3.2 4つの提示方法に関する教示性能比較実験

前節において，4つの速度差提示方法を提案した．本節では，各提示方法の投球動作教示性能について予備実験を行った結果を述べる．実際に提示方法を評価するための実験システムを実装し，比較実験を実施し，最終的に採用するシステムを決定する．

3.2.1 教示性能比較に用いた装置

(1) モーションキャプチャ装置

4つの提示方法の性能を比較評価するためのモーションキャプチャとして，ASUS 社 Xtion Pro Live を採用した．このモーションキャプチャは「Depth センサ」，「RGB カメラ」，およびマイク」を装備している．また，USB バスパワーで動作するため，場所を選ばず，手軽にモーションキャプチャを行うことができる．



Fig. 15 ASUS 社 Xtion Pro Live

(2) 視覚情報提示評価用プログラム

4つの提示方法を実装するための視覚情報提示ソフトは，OpenNI と Unity を用いて作成した．なお，今回の提示方法では全身モデルは必要ないため，上半身のみのモデルを表示させた(Fig.16)．以上のプログラムと Xtion Pro Live を市販のノート PC に接続した(Fig.17)．

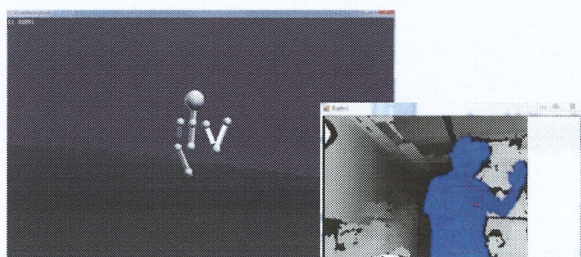


Fig. 166 提示方法評価プログラム



Fig. 17 装置構成

3.2.2 実験概要

被験者 5 名に、4 つの提示方法を体験させ(Fig.18), 各提示方法の教示性能などについてコメントを得た。

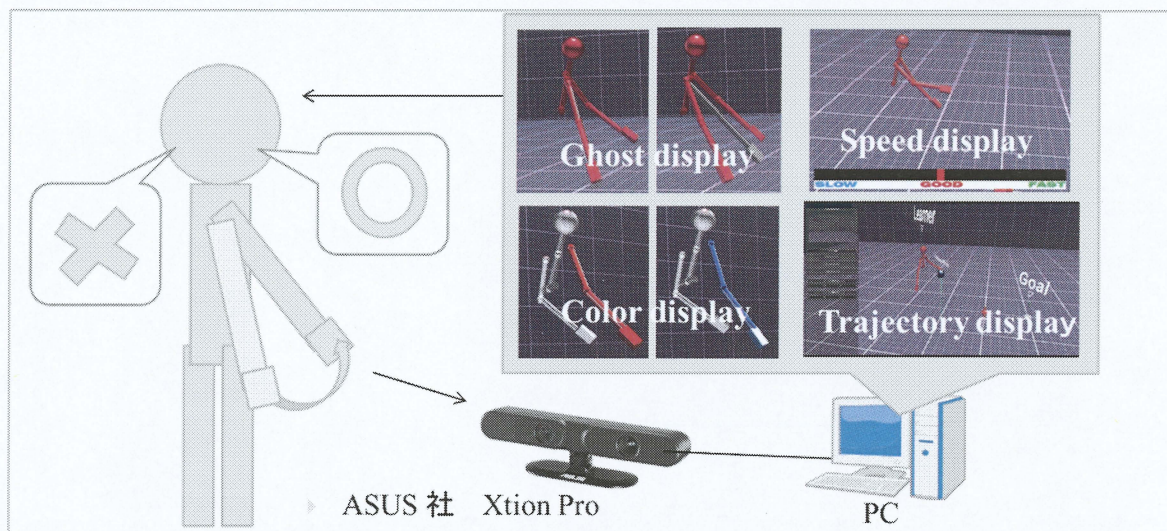


Fig. 17 提示方法評価実験システム図

3.2.3 実験結果, および考察

被験者から得たコメントを、各教示方法別にまとめ、以下に列举する

(a) ゴースト表示

- ・重ね合わせることで目標速度を学習することができるのは興味深く感じた。
- ・ゴーストが学習者モデルに重なっている場合にはゴーストが分かりにくい。そのことばかりに意識が集中してしまって、速度差を学習している気にはならない。
- ・ゴーストを意識するあまり、投球目標の位置を目視できず、投球をしているという感覚にはならない。

(b) メータ表示

- ・目盛りの変化が速く、調整することが難しい。
- ・注視点がスピードメータに固定されてしまう。そのため、速度差は学習できても、体全体で投球動作を学んでいるという感覚を持ちにくい。
- ・目標速度に合わせるといった問題であればメータが一番合わせやすいと思うが、目標速度が 2, 3 つと増加した時、複数のメータで速度差を調整するのは難しく、将来性が低い。

(c)カラー表示

- ・色変化の微妙な変化が分かりにくく、速度差が知覚しにくい。
- ・色変化の切り替えが激しく、目が痛く感じられる。
- ・目標速度の個数が増えたとき、どのように対処するのか？
- ・提示方法が地味である。派手な提示方法の方が楽しい。
- ・結局、色に集中するため、体全体で投球動作を学んでいるという感覚がない

(d)軌跡表示

- ・四つのうち唯一、ディスプレイ上ではあるが、ゴールを見ながら速度差を提示する手法であったので、投球動作をしているという感覚が一番大きい。
- ・軌跡をコントロールすることで投球動作を学べるのは、ゲームのような感覚でとても楽しい。
- ・軌跡の動きが速く、ゴールにヒットしているかがわかりにくい。
- ・目標速度が増えても、軌跡の先（ボールの仮想的な到達点）のみを注意していればよい。
その意味で、複数の関節の動作を学習対象とする場合でも、関節全体の回転を集約した形で手先の速度差を学ぶことができる。

これらのコメントから得られた重要な知見は以下のとおりである。まず、最も多くコメントを得たのは、投球動作をしているという感覚が持てるか否かという点についてである。投球動作は、本来、目標位置を目視し、そこに向かってボールを投げる動作である。よって、学習者の視線は常に目標位置を向いている。しかし、ゴースト表示、メータ表示、カラー表示では提示情報の中に目標位置が含まれていない。そのため、ただ腕を振って速度を合わせるだけで、実際に投球をしているという感覚が乏しくなるようである。これらに対して、軌跡表示では目標位置も表示されているので、投球動作を行っている感覚をもつことができたようである。

次にコメントが多かったのは、目標速度の個数が増えた場合（多自由度化）の対処法についてである。特に、メータ表示は速度差がディスプレイ全体で表示されているという点で最も速度差を知覚しやすい提示方法であると考えられるが、複数のメータを表示させた場合、学習者は提示された情報に対応しきれないだろう。また、カラー表示においては、目標速度ごとに色分けするなどして多自由度化させることも可能であるが、一瞬の動作中にそれらを判別し、動作としてフィードバックすることは難しいと考えられる。これらの目標位置の表示、対象動作の識別などの問題に対して、ゴースト表示と軌跡表示は今回提案の基本的なコンセプトでも対応でき、多自由度化についても可能性がある。

最後に、ゴースト表示と軌跡表示の内、「投球感覚があり、楽しい」というコメントを考慮し、軌跡表示システムが最も投球動作教示に適していると考え、最終的な実験システムとして採用した。

第4章 投球動作教示システム

4.1 動作計測装置

投球動作教示システムにおける動作計測には、4つの教示方法の比較実験で用いた Xtion Pro Live と比較して、高精度かつ、多点の測定が可能な Xsens 社製モーションキャプチャスーツ「MVN」を使用した(Fig.19)。MVN は、3 軸加速度センサ、3 軸ジャイロセンサ、3D 地磁気センサを組み合わせた 6 自由度の姿勢計測が可能な、慣性センサ MTx をスーツ上に 17 個取り付けただのもので、全身 23 か所を同時時に計測することができる。動作計測には付属ソフトウェアの MVN Studio を使用し、MVN Studio で計測されたデータは UDP 通信によってリアルタイムにホストコンピュータに送信することができる。

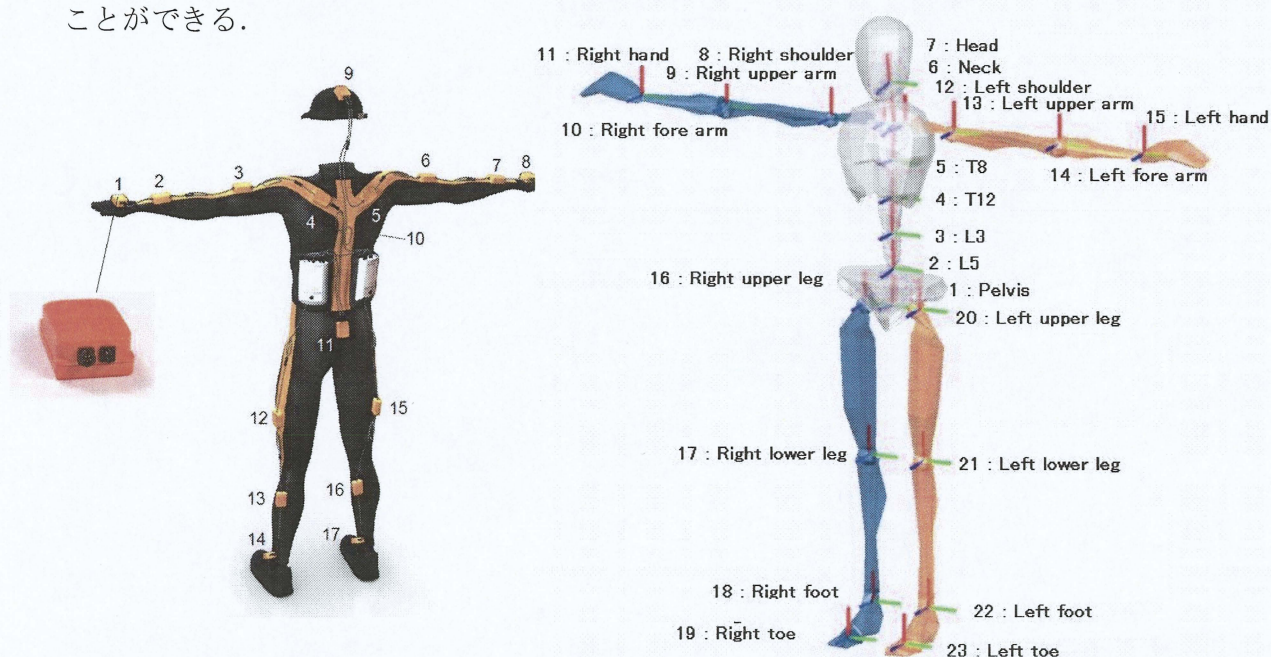


Fig. 18 モーションキャプチャスーツ Xsens 社 MVN

また、今回、学習者に視覚情報を提示する装置として、一般的に用いられているデスクトップモニタではなく、VUZIX 社製のヘッドマウントディスプレイ「iWear VR920」を採用した(Fig.20)。理由は一般的なモニタでは、常にモニタ方向を見る必要があり、姿勢が固定されてしまうが、HMD を装着することで学習者は自由な位置・姿勢でフィードバックされた画像情報を観察することが可能になるからである。



Fig. 19 ヘッドマウントディスプレイ VUZIX 社 iWear VR920

4.2 視覚情報提示プログラム

次に、視覚情報提示プログラムについて説明する。筆者らが開発したプログラムにより提示される視覚情報の一例を Fig.21 に示す。本プログラムは HMD を通して軌跡を学習者に提示する。また、本システムでは Microsoft Visual Studio C# と Unity と呼ばれる、3D ゲーム開発総合環境を使用して軌跡提示プログラムを開発した。3D ゲーム開発総合エンジン Unity を使用し開発した。以上の環境を使用した理由は、それぞれ無料で利用できることに加え、Unity は 3DCG のアニメーション表示を行なうための様々な機能を備えており、システムの開発が容易に行えるためである。

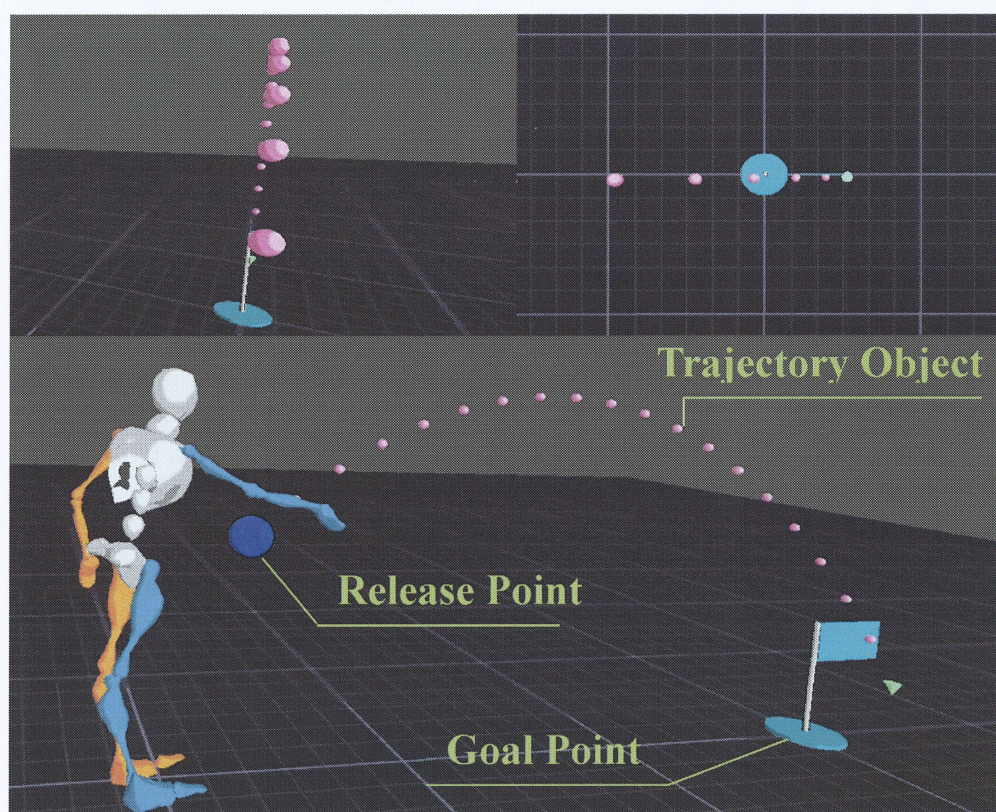


Fig. 20 視覚情報提示プログラム

4.2.1 多画面表示

開発した視覚情報提示プログラムについて説明する．本プログラムは，3つの画面で構成される．予備実験ではマウス操作によって視点を自由に変更可能な一つの画面のみを表示していたが，軌跡の末端部分がゴールに当たっているかわからないという意見もあったことから，ゴールの上方から鉛直下方に向けた視点から軌跡を表示するサブ画面を実装した(Fig.22 右上)．さらに，投球感覚の重要性を考え，自分の視点から見ているかのように表示される一人称視点画像を表示するサブ画面も表示するようにした(Fig.22 左上)．

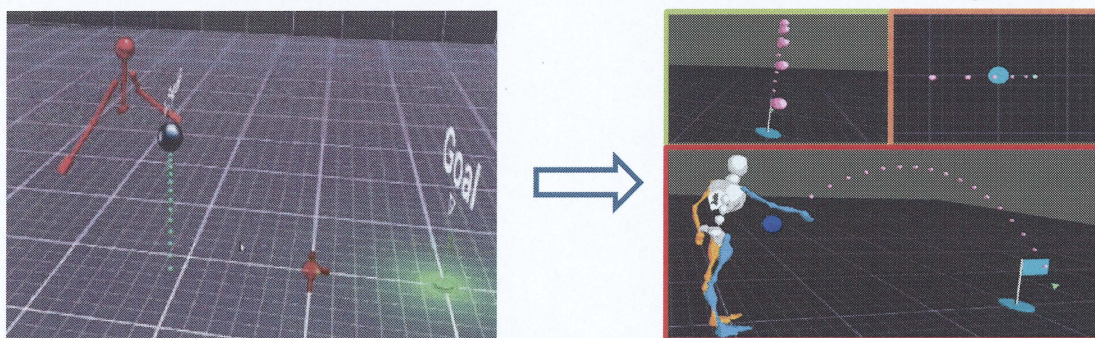


Fig. 21 三つの視点から画面視点

4.2.2 モデルの変更

予備実験の段階で学習者モデルが単純な幾何形状による人体モデルであったため現在自分が動作がつかみにくいといった意見があった．そこで，単純な棒状モデルから MVN Studio で使用されるものを参考に，人型により近づけた学習者モデルに変更した．この学習者モデルの各関節は MVN から受信した学習者の体格データを元にモデルサイズが変換される．さらに，背景色も提示手法や教示オブジェクトを視認しやすくするため，暗い配色を採用し，モデルや教示オブジェクトには明るい色を採用した(Fig.23)．

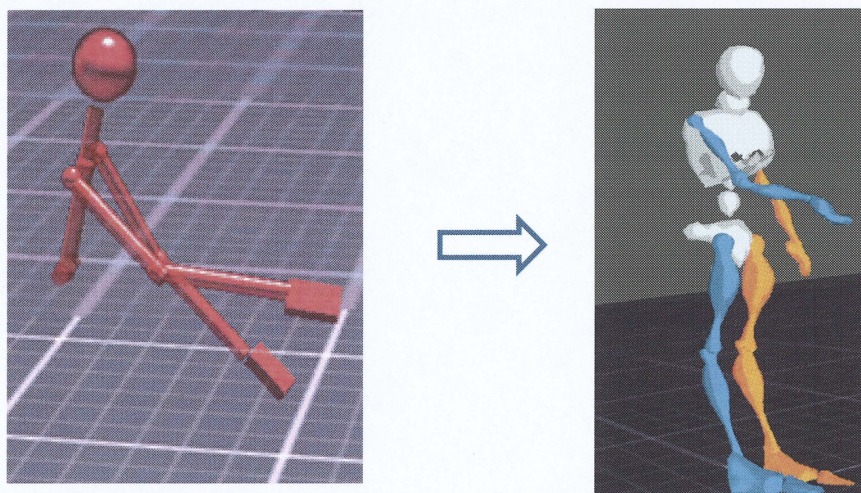


Fig. 22 モデルの変更

4.2.3 色変化を加えた軌跡変化

第3章にて軌跡オブジェクトがゴールポイントに接触しているのがわかりにくいと言ったコメントに対し、軌跡オブジェクトがゴールに接触した際、軌跡とゴールの色を赤色に変化する機能を実装した(Fig.24)。色変化は第3章にて提案した提示方法だが、色の細かな変化が伝わりにくいといった理由で採用を見送った。しかしゴール位置までは軌跡オブジェクトで教示し、ゴールポイントの閾値に入った瞬間のみを色変化で学習者に伝えることで、軌跡表示の問題点を解決できなかと考え実装した。

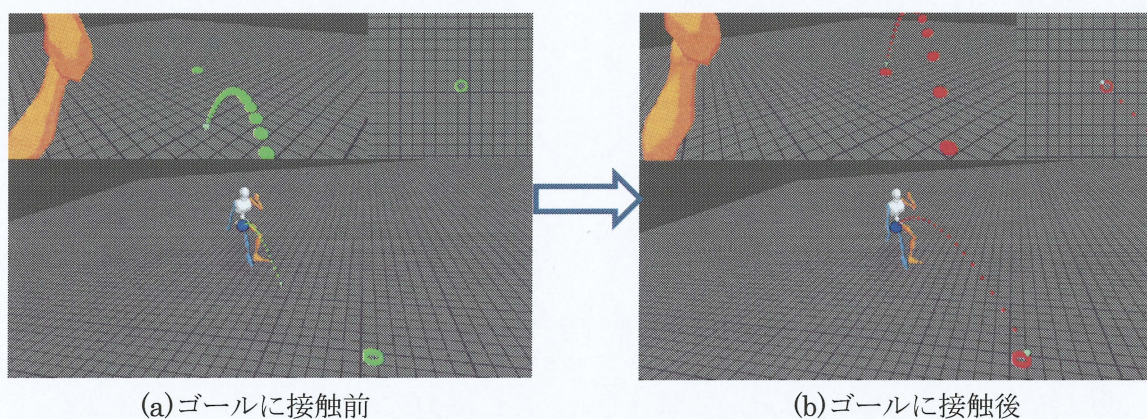


Fig.24 閾値における軌跡の色変化

4.2.4 リリースポイント提示方法

リリースポイントの教示も変更を加えた。第3章では球体オブジェクトの色変化を用いてリリースポイントの教示を行っていたが、投球動作中は軌跡オブジェクトに視点を合わせて投球を行うため、リリースポイントの教示が見えにくい。よってリリースポイントに接触した際リリースポイントの色変化だけではなく画面上の地面オブジェクトの色をグレーから緑色に変化させることで学習者にリリースポイントに達したことを視覚的に伝えるよう変更した(Fig.25)。

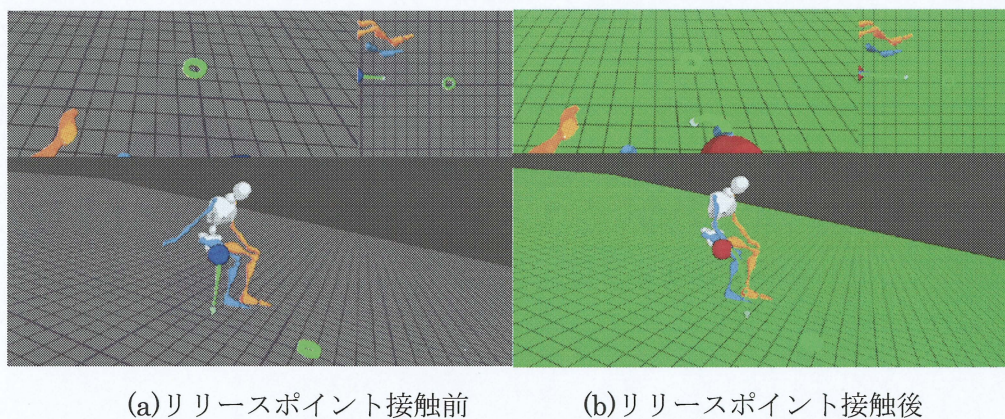


Fig.25 新たに考案したリリースポイント教示方法

4.2.5 投球位置の特定方法

投球位置の特定方法として、当初はモーションキャプチャの右手首速度データの変化から投球位置を割り出すことができないかと考えた、しかし実際の速度データのグラフから投球位置を割り出すことは難しい。そこでシステムに投球位置を調べるための装置を実装した。この装置は無線マウスを接着した手袋で構成された単純な装置である(Fig.26)。投球動作開始時マウスのボタンを押してもらい(Fig.27a)、さらに右手加速中は常にボタンを押し続けてもらい投球時点でマウスのボタンを放してもらい(Fig.27b)ことでマウスのボタンのオンオフが切り替わった地点の手先座標位置を投球位置として特定することができる。

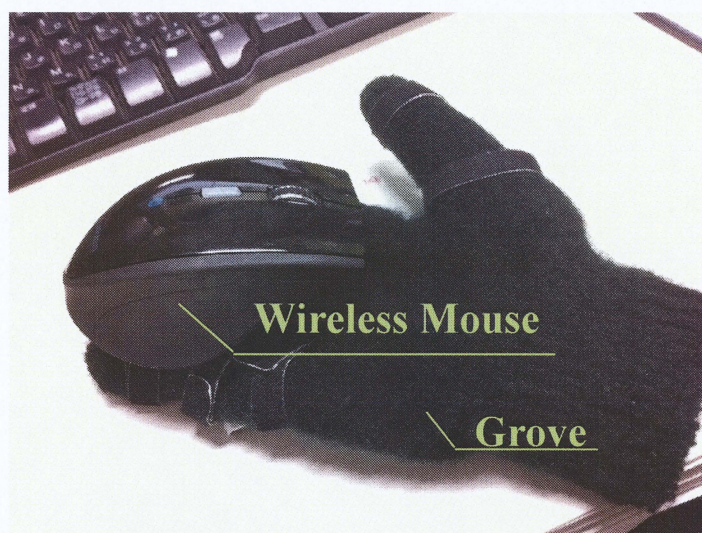


Fig. 26 投球位置計測デバイス



(a) 投球開始時の計測デバイス

(b) 投球時の計測デバイス

Fig.27 投球位置計測デバイス操作方法

4.3 投球動作教示手順

システムによる投球動作教示の手順について説明する．まず，投球動作教示の前に，実験者がゴールポイント(Fig.28 Goal Point)とリリースポイント(Fig.28 Release Point)をセットする．さらに，システム画面の自由視点画面を操作し自分の好きな視点を選択する．

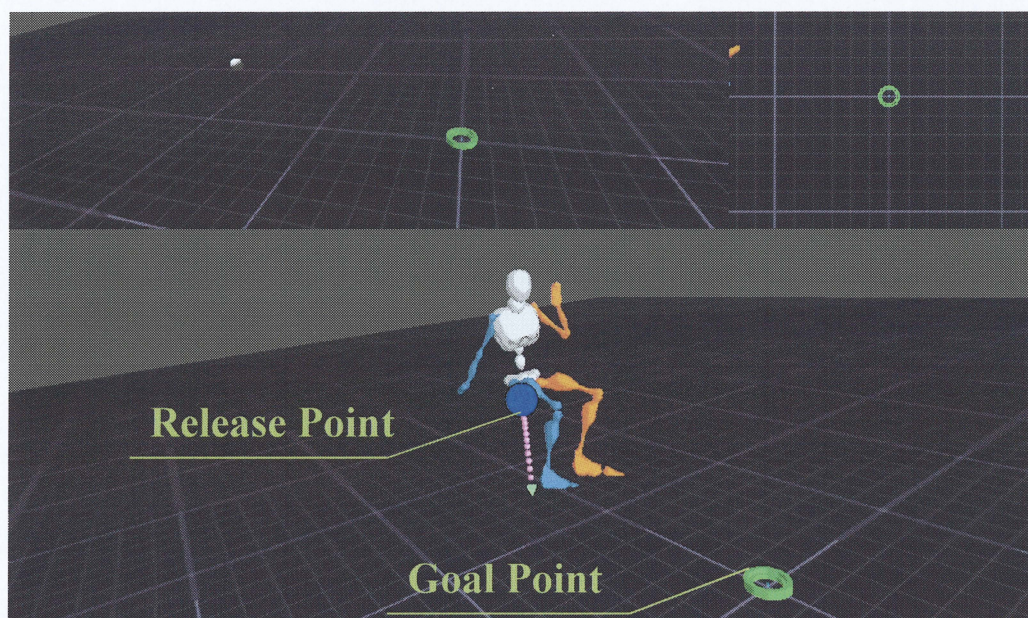
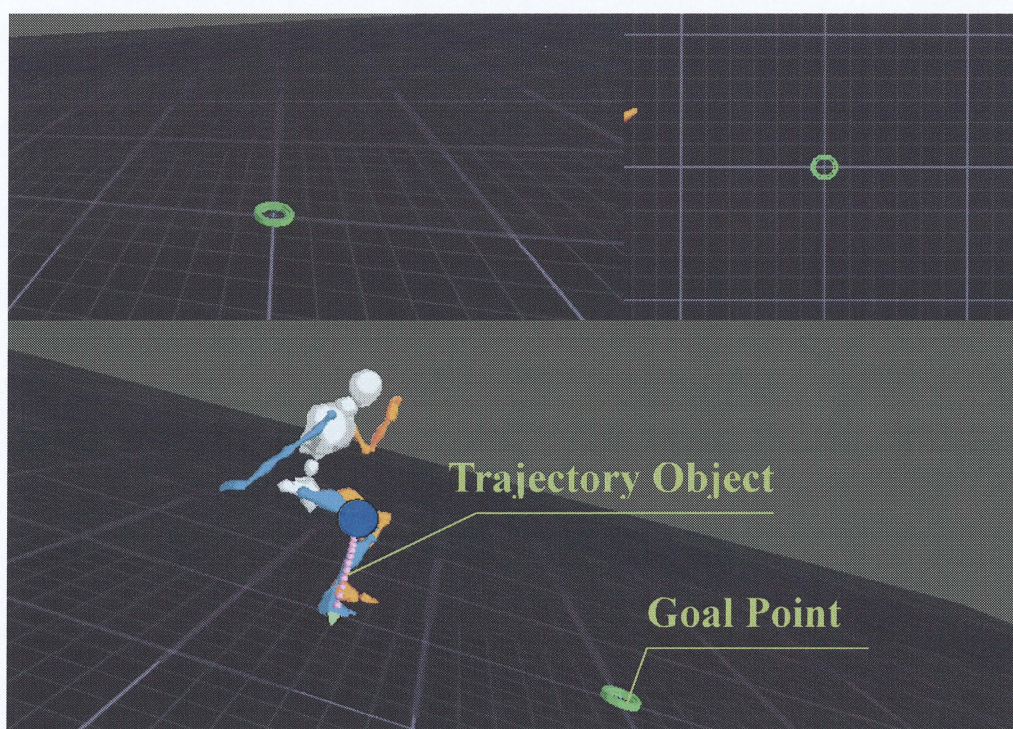


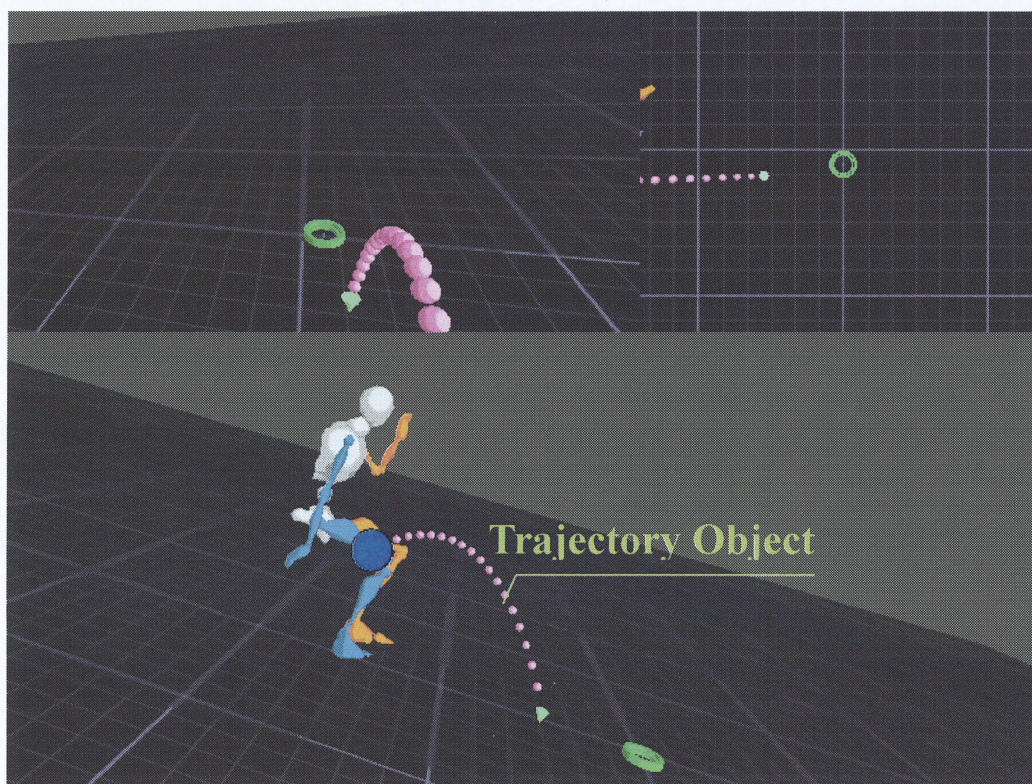
Fig. 28 Goal point と Release point を設定する画面

【システムの動作手順】

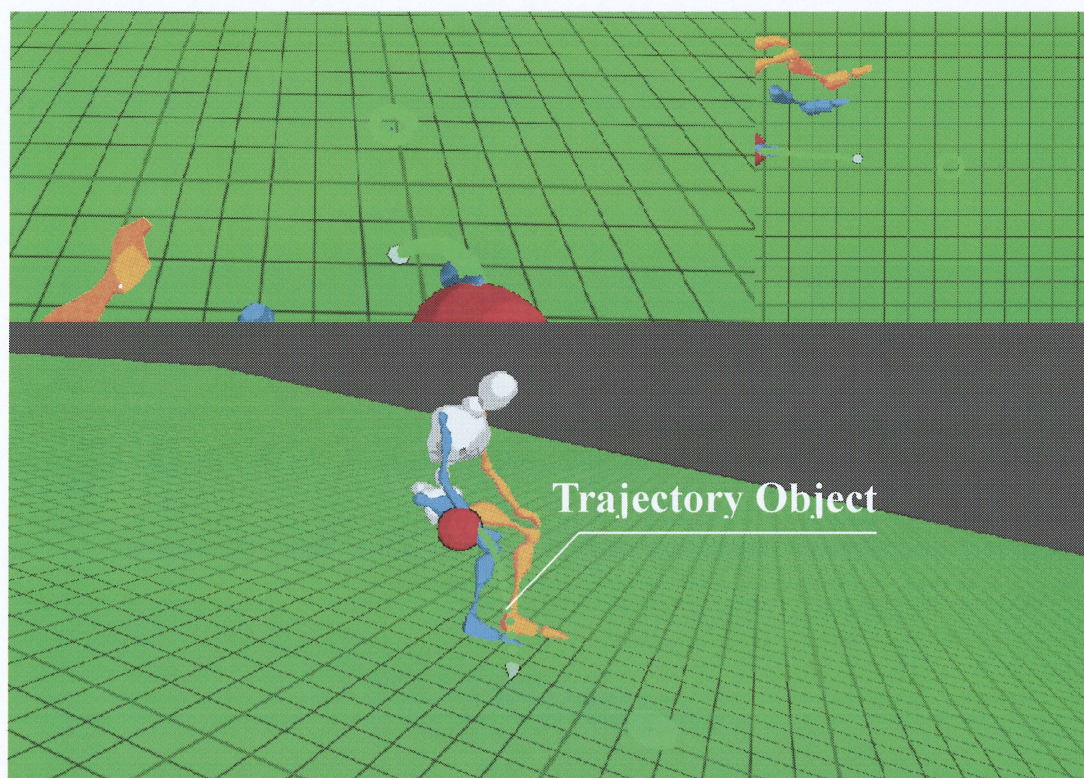
- ステップ1. システムは投球開始時点から所定のサンプルタイムで以下を繰り返す
- ステップ2. モーションキャプチャにより，学習者の投球動作を入力し，手先位置，および手先速度を計測する．その学習者の手先速度がその後のリリースポイントまで保持されたと仮定して，投球後のボールの軌跡を推定する(Fig.29.a).
- ステップ3. ボール着地点が目標点に一致するために必要な手先速度の加・減速の量を計算する．
- ステップ4. HMD 等を介して学習者に仮想的軌跡を表示することにより，手先速度の加・減速の量を教示する(Fig.29.b).
- ステップ5. 手先位置がリリースポイントに到達したとき，リリースポイントの表示画面全体を緑色に変化させることでリリースポイントを教示する(Fig.29.c).



(a) 投球開始時



(b) 投球中



(c) 手先がリリースポイントに達した時

Fig.29 投球動作教示画面

4.4 データの流れ

MVN で計測したデータは、無線により、PC に UDP 送信する。PC 側では受信したデータを元に、視覚情報提示プログラムの画面を更新する。更新された画面は HMD を通して学習者に提示される。(Fig.30 参照)

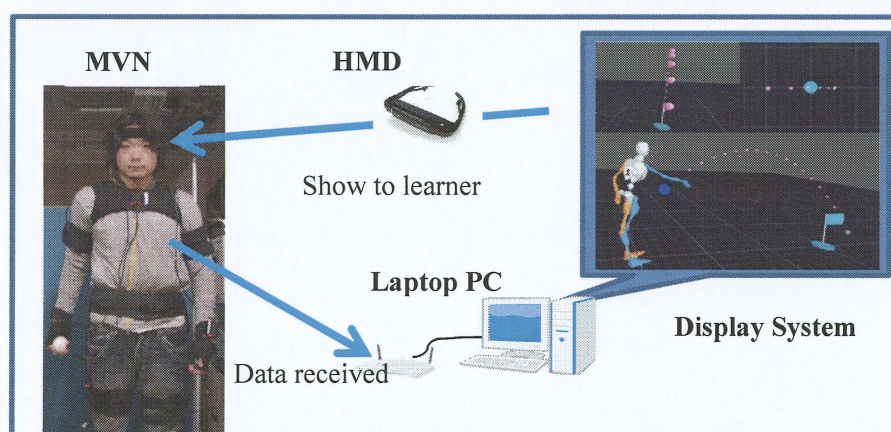


Fig 30 投球動作教示システム

第5章 実験

本提案の動作教示システムを用いて実際に投球動作を学習する実験を行い、システムが学習者にどの程度速度差を教示することができるかを評価した。

5.1 動作教示システムを用いた投球学習の手順

ボールコントロール技能の学習の手順として、学習者が行う動作の手順、およびシステムの動作手順を以下に述べる。

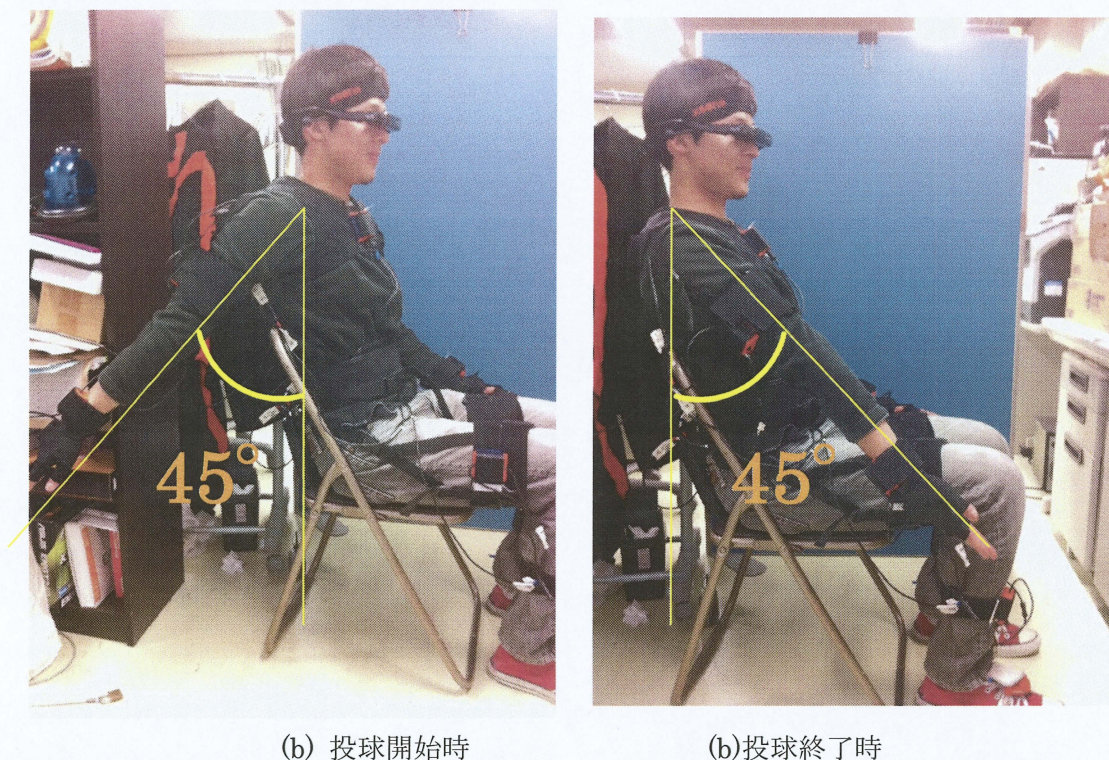


Fig. 31 実際の投球風景

【学習者が行う動作の手順】(Fig.31 参照)

- ステップ1. モーションキャプチャスーツとヘッドマウントディスプレイを装着する.
- ステップ2. 椅子に体を固定するように座する.
- ステップ3. 肘, 手首, 指は動かないように固定する. 特に, 手首, 指は無意識の内に動かしてしまうことがあるので, ホルダーを用いる¹.
- ステップ4. 肩関節の伸展動作を行い, 右腕を後方に約 45 度まで回転させ(Fig.31.a), 投球動作を開始するための準備姿勢をとる.

- ステップ5. 肩関節の屈曲動作を行って投球動作を開始する.
- ステップ6. システムからの視覚的フィードバックに基づいて、腕の屈曲速度を調節して、ボールを加・減速させる. この加・減速は、可能な限り、繰り返す.
- ステップ7. リリースポイントが青丸から赤丸に変化したとき、親指を開いてボールを手放す(Fig.31.b).

5.2 実験条件および方法

提案のシステムの教示効果を比較確認するため、前節で説明した投球動作教示システムを用いる学習だけでなくシステムを用いない練習方法についてもボールコントロールの技能、すなわちボールのリリースポイントとリリース速度を習得する実験を行って、その学習効果を調べた(Fig.32.a と Fig.32.b).

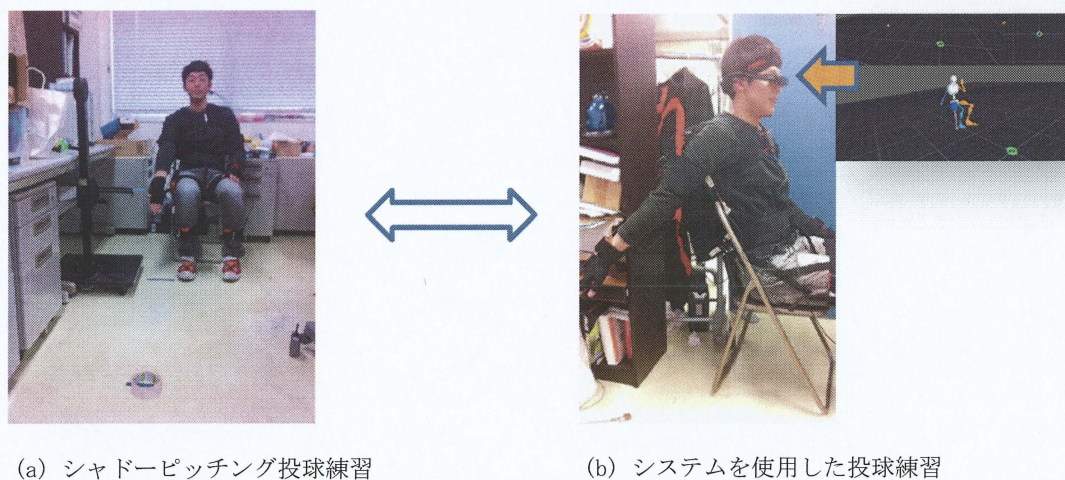


Figure 32 2 パターンの投球練習

本実験では実際の投球練習としてシャドーピッチングを採用した,これは,実験前に予備実験として,実際にボールを投球してもらって実験を行ってもらったが,筆者らは被験者に投球角度を45度で投球すると固定するため,被験者にその角度で投球するよう指示をした,それは被験者には右手速度を調整してゴールポイントにボールをいれるよう動作してもらったためである.しかし,実際の実験において,無意識的にリリースポイントを変更してリリースポイントに投球を行う様子が被験者全てに見受けられた.よって本実験においてはシャドーピッチングによる投球練習と,システムを用いた投球練習を比較することにした.しかし,シャドーピッチングの右手速度と実際に投球した値との速度差を考慮するため実際に投球した場合の速度データを,事前に被験者2名に対して,学習者には体の手前45°の位置をリリースポイントとして,ゴール地点にボールが着地するように腕の回転速度を調節し,リリースポイントとに手が来た時点で投球を行うよう指示し取得した.その際のボールの握り方についてもFig.33のように統一した.またリリースポイントの教示ボールを実際に設置することで,ボールの先には,弾性のある物質が備え付けられており,手がそれに触れた瞬間投球をおこなってもらうよう,被験者に指示をした(Fig.34).

これによりリリースポイントを固定した状態での被験者の実際の投球データを記録することが可能であり,実際の投球速度と,シャドーピッチングによる投球速度がどれだけ差があるかの目安とする.



Fig.33 ボールの握り方(左が投球前, 右が投球後)

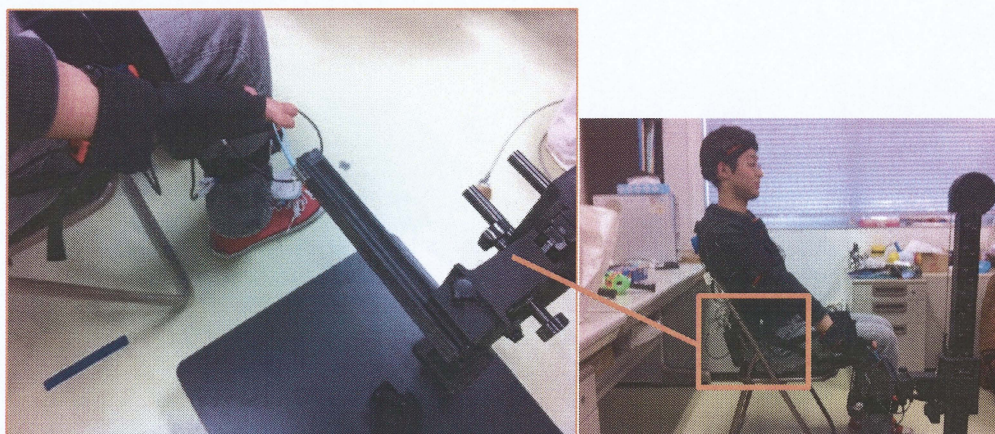


Fig. 34 リリースポイントを固定するポール

そして、シャドーピッチングとシステムを使用した 2 つのパターンの投球練習方法を被験者 4 名にゴールポイント 1m, 3m の設定で行ってもらった。また、4 名を 2 グループに分け、以下の教示順に分け実験を行った。

システムを用いて学習→実際の投球
 実際の投球→ システムを用いての学習。

5.3 実験結果

次に投球動作教示実験結果をまとめる。被験者 A, B, C, D の 1m, 3m 距離のリリースポイントにおけるシステムを使用した場合と、実際の投球の場合の右手速度データを示す。

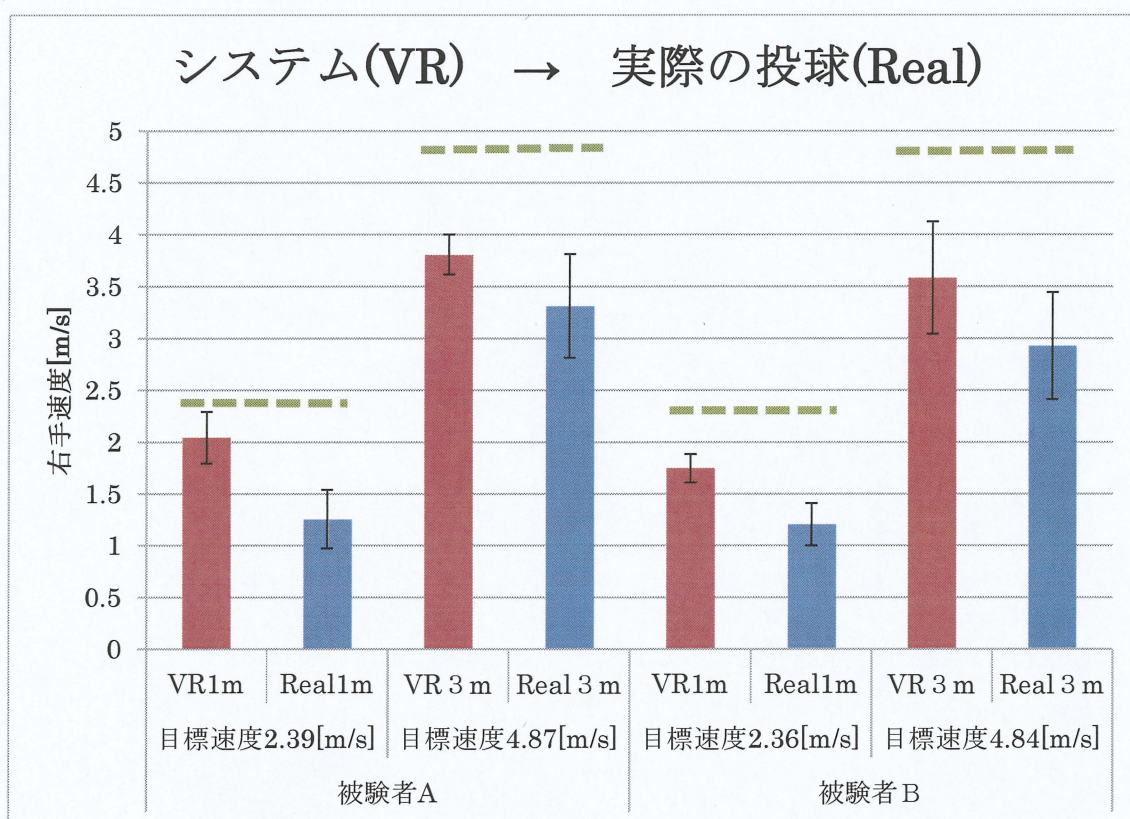
またグラフ中の目標速度 $v_{reference}$ は、リリースポイントにおいて投球角度 45 度で投球を行った場合、1m, 3m の地点に投球するために必要な速度量であり、その値は(6)で求めた。尚その際必要な、リリースポイントの高さはモーションキャプチャにより被験者ごとに計測した値を用いた。

$$v_{reference} = \sqrt{gl^2/l + h} \dots\dots\dots(6)$$

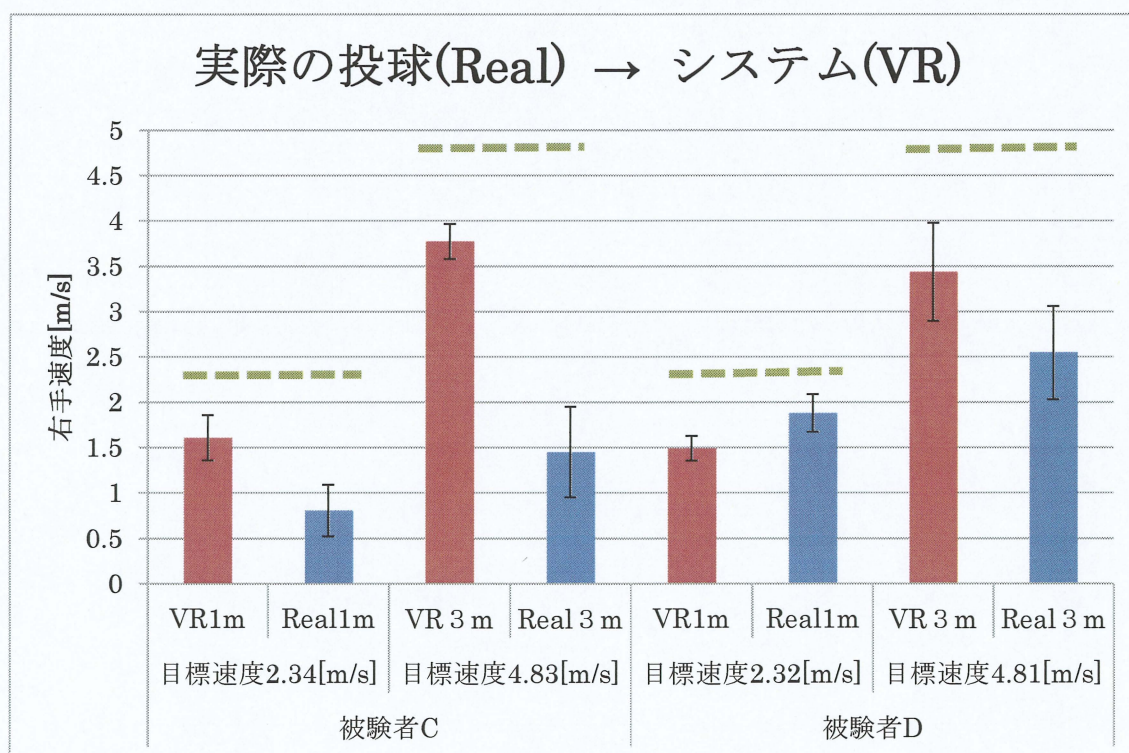
g : 重力加速度

l : 投球距離

h : 投球高さ



(a) システムを用いて学習→実際の投球



(b) 実際の投球→システムを用いて学習

Fig. 35 リリースポイントにおける投球速度

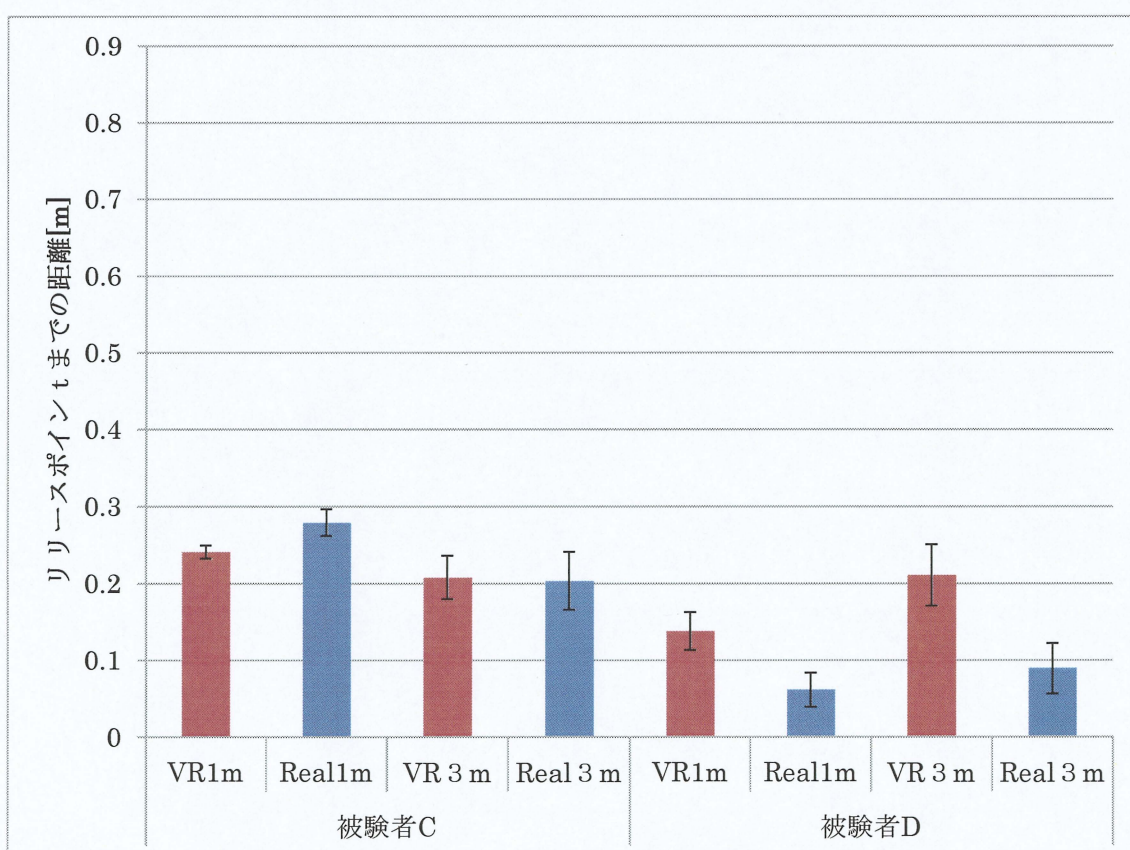
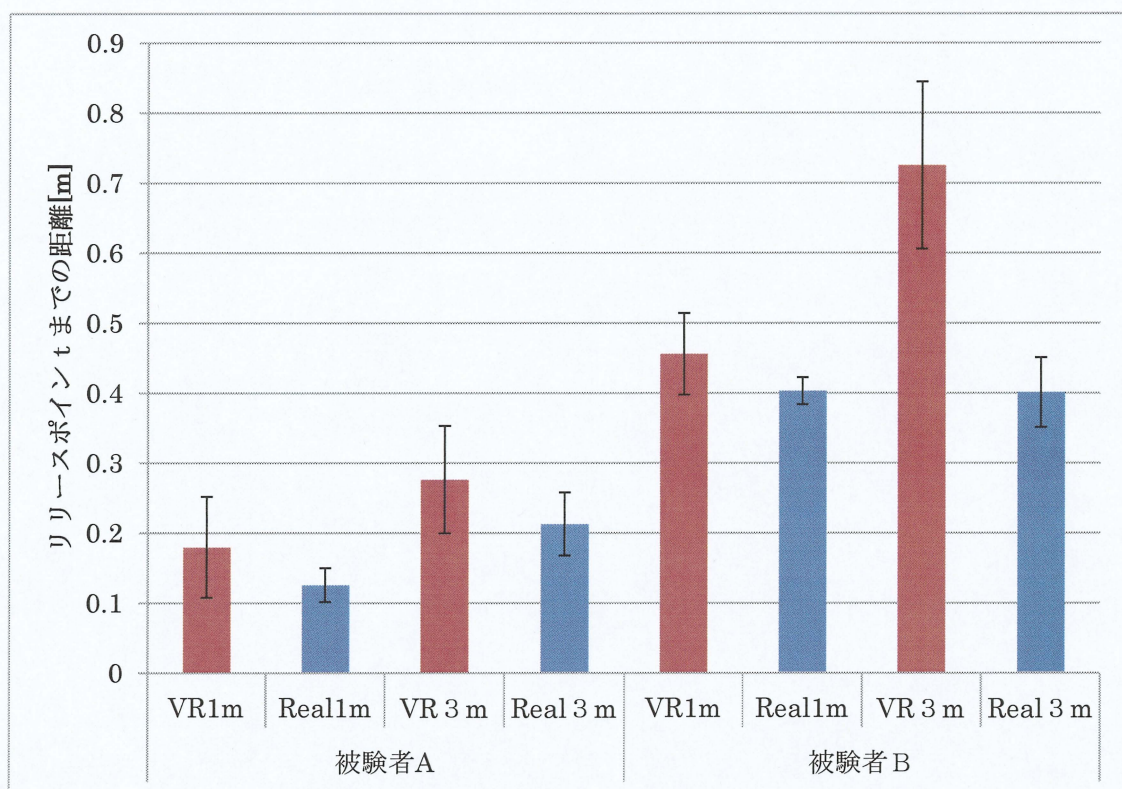


Fig.36 リリースポイントの目標位置からの差

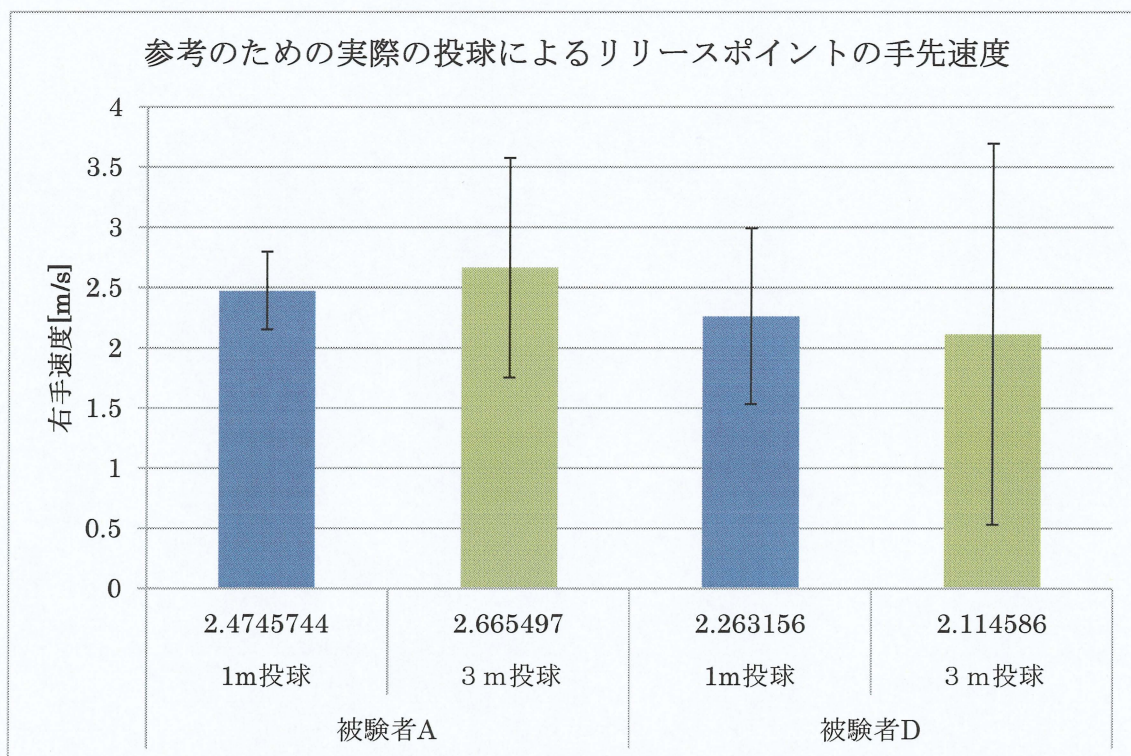


Fig.37 参考のための実際の投球による投球速度

5.4 考察

Fig.35 より実際の投球に比べシステムを使用した場合は、各被験者の投球時の投球速度は、目標速度に近い値を示すことができた。また、Fig.35.a と Fig.35.b を比較すると、実際の投球における右手速度の平均が目標速度に近い値を示した。これはシステムを事前に使用したことによる教示効果の影響ではないかと考える。以上のことからシステムにより速度情報をリアルタイムで提示することで被験者の投球速度を教示することに成功したといえる。しかし、Fig.35 を見る限りシステムを使用した場合も全体を通して目標速度に近づいていない。上記の問題に対し、実際の時刻ごとの速度データをみたところ、実際の投球ではリリースポイントにおいて速度が減速していることが分かる(Fig.38)。

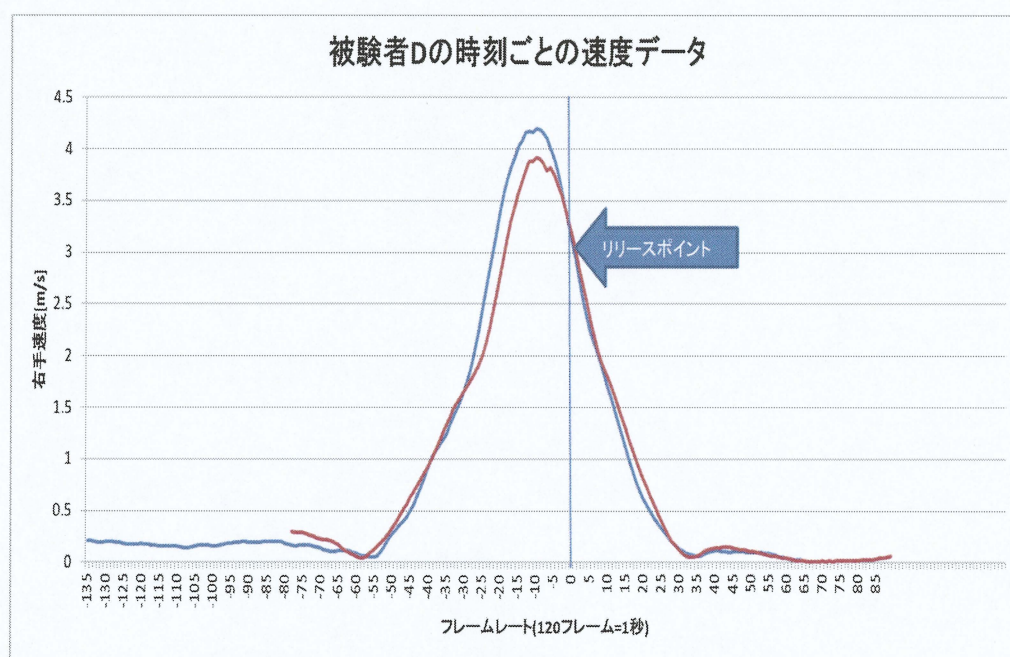


Fig.38 時刻ごとの被験者 D における右手速度変化

これは他の被験者にも同様のことが言えた。この件に対し調査をおこなったところ、投球のボールリリース時、若干手先速度が減速する傾向があるということがわかった[12]。よって今後は、教示情報を若干多めに教示することで以上の問題に対処できないかを検討していく。

さらに 3m の投球の場合システムの値が 1m に比べ悪かった。以上に関しては、フィッツの法則と呼ばれる、身体動作の高速性と正確性の関係性が関わっていると考えられる。これは高速性と正確性はトレードオフの関係にあるといった法則である[12]が、3m の場合のような目標速度が高くなる動作の場合、被験者の手先速度が高くなるため、軌跡を調整するという正確性が減少し、結果として 1m に対し目標速度が悪かったのではないかと考えられる。

そして Fig.37 と Fig.35 被験者 A, Fig.35 被験者 D を比較すると, D は実際の投球速度とシャドーピッチングの投球速度に近い, しかし A の場合は実際の投球速度とシャドーピッチングの投球速度の値に相違が見受けられる. A の場合は, システムを使用してからのシャドーピッチングより, 若干の教示効果はあると考えられるが, 今後はシャドーピッチングの速度は実際の投球値と違うと考え, 実際の投球による実験を行い. その際, リリースポイントを固定せず, 各被験者の自由な投球角度で投球教示を行うことでリリースポイントを無意識のうちに調整してしまう問題を解決できないか検討していきたい.

また Fig.36 より投球時における投球位置とリリースポイントとの距離を比較し, システムが投球位置を教示できたかを考察する. Fig.36 を見る限りリリースポイントと投球位置の距離は実際に投球を行ったほうが小さい. 考察として, システムを使用した場合は軌跡オブジェクトとリリースポイントの両方の視覚情報に反応しなければならず, 軌跡オブジェクトに集中し続けるため, リリースポイントでの視覚教示への反応が遅れてしまうのではないかと考える. 上記については, 振動モータなどの外部刺激を被験者に与えるデバイスを用いることで改善することができないかを今後は検討していく.

第6章 むすび

本論文では、モーションキャプチャとバーチャルリアリティを用い、リアルタイムに目標速度と現在速度の差を提示する、投球動作学習システムを提案、開発した。まず第 2 章にて、今まで一般的であった、位置、角度提示方法の問題点を考察し、新たな教示情報の提示法として、速度、加速度情報の有意性を示した。次に第 3 章にて速度差提示手法として、過去の研究の視覚提示方法を参考にゴースト表示、メータ表示、カラー表示、軌跡表示と名付けた 4 つの速度差提示方法を提案した。さらに Xtion Pro Live と組み合わせた視覚提示方法評価システムを作成し、実際に提示方法を体験してもらうことで、投球動作における軌跡表示の有意性を示した。さらに第 4 章にて軌跡表示を実装した投球動作教示システムを作成し、作成したプログラムの機能について解説した。そして第 5 章にて複数の学生にシステムを用いた場合、実際に投球する 2 パターンの投球動作学習を行ってもらい、学生の動作データを MVN で計測することでシステムの評価を行った。また最初の実験にて問題となったポイントを考慮し、システムの修正や実際の投球位置を計測するシステムを実装し再実験を行った。再実験では実際に投球した場合に比べ、システムを用いた場合においてもリリースポイントでの目標速度を学習することができ、システムを使用した後に実際の投球を行った場合にシステムによる学習効果が得られることを示した。また現状のシステムが抱える、リリースポイントを知覚しにくい問題、速い動作に対しては視覚情報では人間が正確に目標速度に反応することが難しいといった問題を挙げ、それらの解決案を示した。今後は、視覚だけではなくアクチュエータによる物理的なフィードバックを掛けることを考慮し、今後もシステムの改良に努める。

参考文献

- [1] グレッサー, イノマイアー: 選手とコーチのためのスポーツ技術のトレーニング, 大修館書店, (1995)
- [2] 指・手首運動筋の FES 運動点探索装置の開発, 坂本 良太, 竹村 聡一郎, 杉浦 徳宏, 野村由司彦, 年次大会講演論文集 : JSME annual meeting 2010(7), pp.147-148, 2010-09-04
- [3] 錯覚を利用した力覚呈示のための圧覚特性調査, 富田 佳成, 坂本 良太, 加藤 典彦, 野村 由司彦, 日本機械学会情報・知能・精密機器部門講演会講演論文集 2011 頁:pp.249-254
- [4] Ungyeon Yang, Gerard Jounghyum Kim : “Implementation and Evaluation of “Just Follow Me”: an Immersive, VR-based, Motion-Training System”, Presence: Teleoperators and Virtual Environments”, MIT, Vol.11, No.3, pp.304-323, 2002.
- [5] 本荘直樹, 伊坂忠夫, 満田隆, 川村貞夫: HMD を用いたスポーツスキルの学習方法の提案, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 10, No. 1, pp. 63-69, (2005)
- [6] 控えめな身振り教示のための外骨格型上肢動作計測システム, 芳村 友紀, 杉浦 徳宏, 野村 由司彦, 日本機械学会年次大会講演論文集 2008 号:vol.5 頁:pp. 205-206
- [7] 頭部連携視点による身振り誘導情報表示システム, 森川 晃延, 芳村 友紀, 坂本 良太, 野村 由司彦, 杉浦 徳宏, 日本機械学会年次大会講演論文集 2010 号:vol.7 頁:pp141-142
- [8] スポーツ動作分析の支援を目的とした人体センシング情報の可視化提示方法, 稲葉洋, 瀧剛志, 宮崎慎也, 長谷川純一, 肥田満祐, 山本英弘, 北川薫, 芸術科学会論文誌 vol.2 No. 3 pp. 94-100
- [9] 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の構築, 浦脇 浩二, 増田 泰, 真鍋 佳嗣, 千原 国宏, システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集 2004 巻:48th 頁:pp487-488
- [10] “A Virtual Reality Dance Training System Using Motion Capture Technology”, Chan, J.C.P, Leung, H, Tang, J.K.T., Komura, T. IEEE Transaction On Learning Technologies vol.4 (2011)
- [11] モーションキャプチャシステムを利用した左右反転動作スキル習得支援環境の構築, 石井 和喜, 曾我真人, 瀧寛和, 情報処理学会シンポジウム論文集, 20110303, 巻:2011 号:3 頁:pp327-330
- [12] 山田憲政: トップアスリートの動きは何が違うのか, 株式会社化学同人, (2011)

謝辞

充実した設備と教育環境を用意して頂いた野村由司彦教授，プログラミングや研究など様々な面で補助をして頂いた坂本良太助教授，また実験の被験者を快く承諾してくださった学生の皆様，さらに学位論文の審査委員としてご指導をいただいた矢野賢一教授，池浦良淳教授に深く感謝いたします．

付録

実際のボールを投球した際の時刻ごとの右手速度データを載せる(赤と青の線はそれぞれ、リリースポイントと投球目標速度を表す)

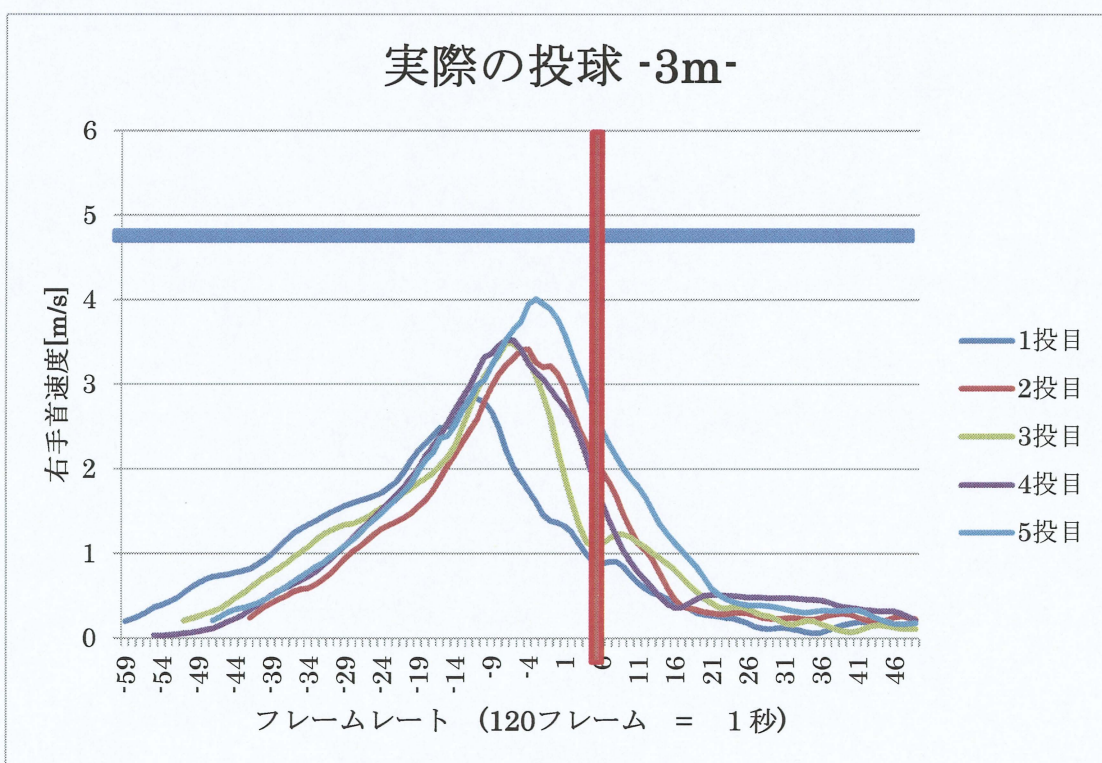
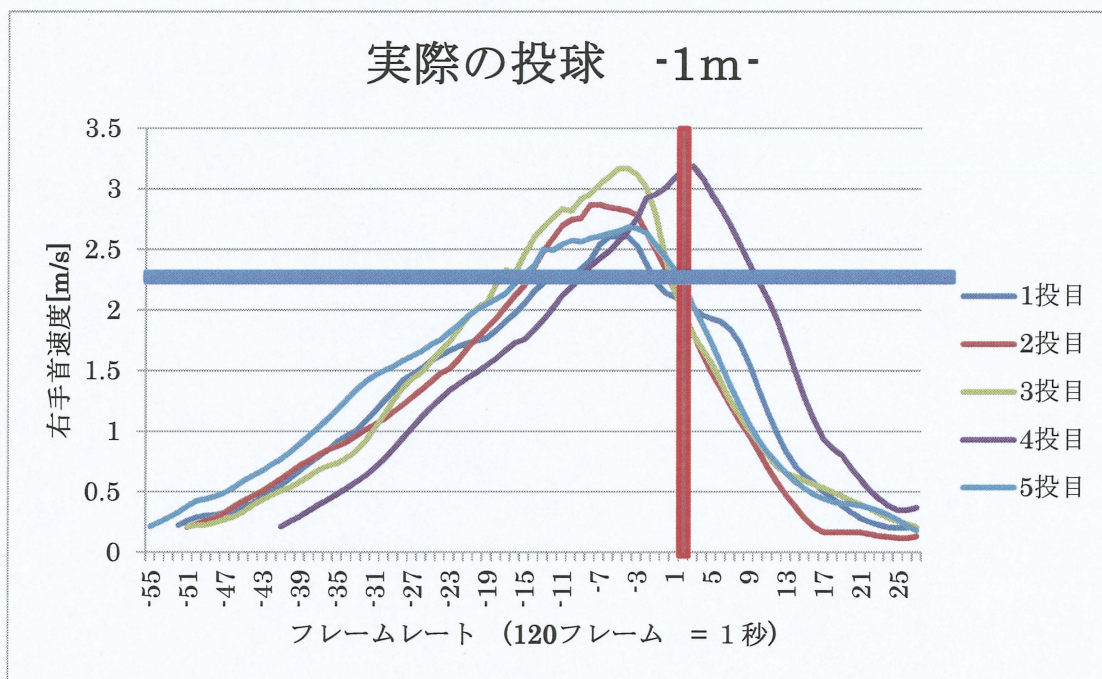


Fig.a.1 学習者 A 3m 投球データ

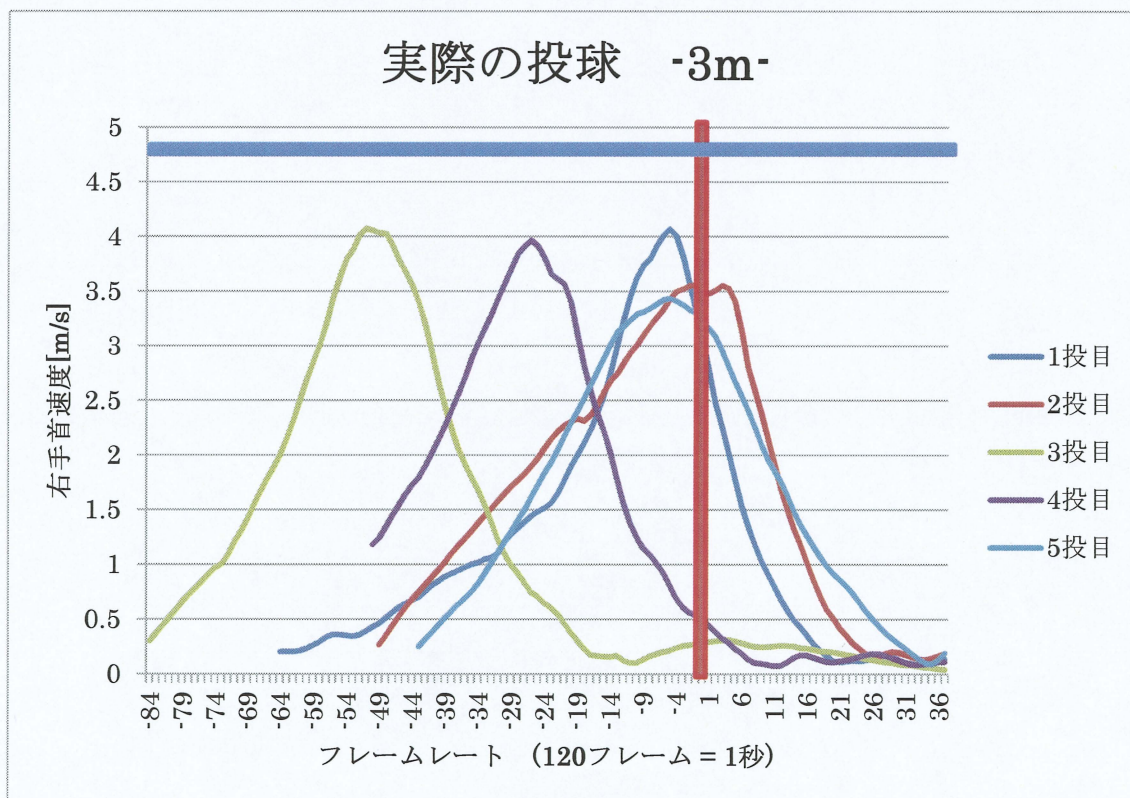
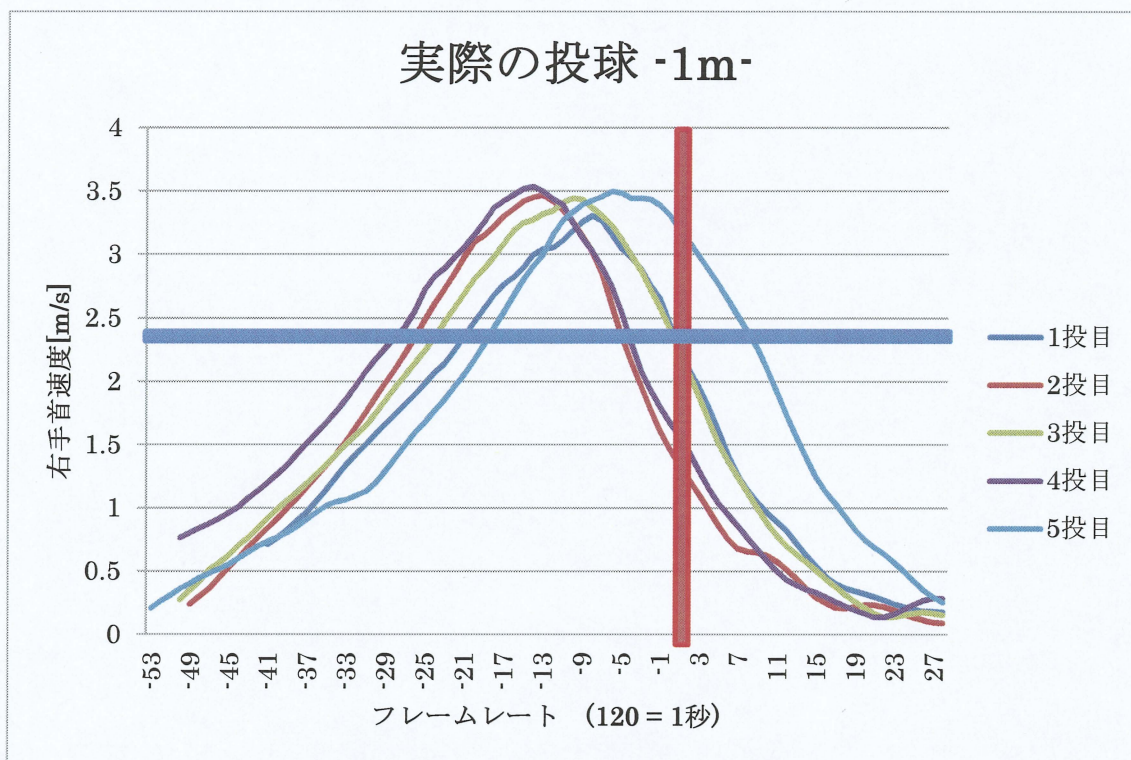


Fig.a.2 学習者 D 3m 投球データ

各被験者の実験データ

被験者A											
	リアル					バーチャル					
	速度	位置x	y	z	距離	速度	位置x	y	z	距離	
1m	1	1.69414	-0.01482	0.628041	0.003394	0.104795	2.471772	0.162799	0.578482	-0.03366	0.252616
	2	1.291525	-0.00305	0.606789	-0.05694	0.161736	1.971189	0.059339	0.611656	0.066582	0.134934
	3	1.285766	-0.03791	0.612588	-0.0326	0.138847	2.032854	0.171442	0.577345	-0.04088	0.262519
	4	0.976737	-0.11357	0.666654	0.015958	0.108126	1.846894	0.029154	0.620175	0.075418	0.111144
	5	1.032946	-0.09218	0.639656	-0.00035	0.116327	1.896778	0.060228	0.609852	0.080075	0.138084
	平均	1.256223				0.125966	2.043897				0.179859
	標準偏差	0.283661				0.024004	0.249469				0.071783
3m	1	3.468879	-0.04462	0.588028	-0.02444	0.15365	3.732464	-0.22917	0.802375	0.36919	0.3784
	2	2.766062	0.063682	0.576535	-0.1286	0.251794	3.777129	-0.1171	0.632095	0.265114	0.237478
	3	2.947293	0.039114	0.572544	-0.11551	0.236288	4.084854	-0.19543	0.698867	0.315968	0.305462
	4	4.048612	0.046757	0.548838	-0.10651	0.247203	3.87934	-0.16876	0.674827	0.308755	0.287722
	5	3.332309	-0.03949	0.581301	-0.0539	0.176405	3.563001	0.000505	0.567982	0.148223	0.172834
	平均	3.312631				0.213068	3.807358				0.276379
	標準偏差	0.499669				0.044941	0.192626				0.07684
リリアルポイント					目標速度						
-0.02778 0.714548 0.061103					1m	2.390772					
角度					3m	4.872831					
226											

Fig.a.3 被験者 A データ

被験者B											
	リアル					バーチャル					
	速度	位置x	y	z	距離	速度	位置x	y	z	距離	
1m	1	1.309783	0.088329	0.770188	0.465481	0.391441	1.804804	-0.04603	0.887483	0.3534	0.364395
	2	1.233895	0.042016	0.795576	0.499571	0.436441	1.956082	-0.11931	0.962066	0.345911	0.434563
	3	1.476244	0.105161	0.744358	0.476367	0.399653	1.675979	-0.14542	1.053481	0.351439	0.502559
	4	0.97145	0.074441	0.769315	0.459917	0.388691	1.704662	-0.1458	1.03494	0.369038	0.502039
	5	1.034021	0.131451	0.762399	0.478306	0.398741	1.603721	-0.14235	0.99474	0.365274	0.476642
	平均	1.205079				0.402994	1.74905				0.45604
	標準偏差	0.20565				0.019274	0.136383				0.058233
3m	1	3.084062	0.06688	0.735484	0.431128	0.363026	3.92045	-0.10267	0.981917	0.569701	0.597712
	2	3.054798	-0.01067	0.761107	0.474515	0.428634	4.000862	-0.09928	0.972825	0.568434	0.591848
	3	3.33046	0.102262	0.663819	0.396034	0.334111	2.652924	-0.25898	1.291962	0.537643	0.817057
	4	3.147151	-0.01784	0.782403	0.473151	0.430923	3.639043	-0.23432	1.312276	0.51337	0.80505
	5	2.026115	-0.03081	0.807513	0.485002	0.44912	3.701832	-0.24164	1.294714	0.544139	0.813847
	平均	2.928517				0.401163	3.583022				0.725103
	標準偏差	0.515711				0.049726	0.541014				0.119067
リリアルポイント					目標速度						
0.158 0.758388 0.08047					1m	2.360781					
角度					3m	4.844327					

Fig.a.4 被験者 B データ

被験者C											
	リアル				バーチャル						
	速度	位置x	y	z	速度	位置x	y	z			
1m	1	0.957044	-0.11121	0.7058	0.314537	0.282312	1.537576	0.070891	0.863651	0.266392	0.241135
	2	1.012829	-0.06229	0.664503	0.28257	0.258276	1.553902	0.069619	0.849184	0.273544	0.242755
	3	0.462714	-0.12214	0.716014	0.330961	0.298047	1.725038	0.118682	0.777079	0.237178	0.229211
	4	0.817377	-0.07002	0.669953	0.29131	0.264639	1.435244	0.076561	0.864036	0.27755	0.253145
	5	0.778789	-0.08593	0.696209	0.329329	0.292244	1.788732	0.119652	0.795795	0.24697	0.237441
	平均	0.805751				0.279104	1.608098				0.240737
	標準偏差	0.214655				0.017211	0.144994				0.008688
3m	1	1.448899	0.100308	0.720076	0.110984	0.151203	3.005642	0.00698	0.934317	0.183846	0.195729
	2	1.429836	0.149696	0.668226	0.088907	0.213228	4.055193	-0.00076	0.936251	0.201474	0.207806
	3	1.426768	0.12437	0.700112	0.113145	0.18101	3.746752	0.0187	0.8958	0.180909	0.169169
	4	1.459931	0.162527	0.662402	0.075535	0.225586	3.960828	0.181848	0.686862	0.138691	0.243139
	5	1.488151	0.170042	0.638239	0.077911	0.245895	4.10303	0.160621	0.67709	0.119469	0.223945
	平均	1.450717				0.203384	3.774289				0.207957
	標準偏差	0.024995				0.037485	0.45093				0.028051
リールポイント					目標速度						
-0.02455					1m		2.341598				
角度					3m		4.825791				
222											

Fig.a.5 被験者 C データ

被験者D											
	リアル					バーチャル					
	速度	位置x	y	z	速度	位置x	y	z			
1m	1	1.63689	0.002582	0.836969	0.119453	0.047336	1.457531	0.123673	0.730508	0.135834	0.130288
	2	1.859357	0.060488	0.756933	0.111502	0.064036	1.421891	0.095468	0.751734	0.157782	0.109427
	3	1.649822	0.032691	0.79866	0.122295	0.032322	1.729654	0.165524	0.712181	0.134477	0.172313
	4	1.919412	0.073754	0.753381	0.118914	0.076267	1.278068	0.117081	0.731857	0.139333	0.126055
	5	2.3332	0.089656	0.748006	0.112045	0.088173	1.565539	0.134417	0.701884	0.120452	0.152811
	平均	1.879736				0.061627	1.490537				0.138179
	標準偏差	0.282601				0.022293	0.168632				0.024572
3m	1	2.028107	0.032443	0.832223	0.171947	0.083007	4.238818	0.241554	0.669402	0.106062	0.25428
	2	2.791248	0.030255	0.799838	0.170864	0.079422	3.06013	0.233959	0.693259	0.135317	0.238847
	3	3.26391	0.015168	0.798125	0.166097	0.076395	3.091982	0.116614	0.760472	0.209147	0.153757
	4	2.721724	0.062994	0.799142	0.143966	0.062412	3.702348	0.179024	0.70245	0.149462	0.192414
	5	1.924482	-0.06566	0.875976	0.181308	0.146613	3.090074	0.205916	0.70657	0.160456	0.21512
	平均	2.545894				0.08957	3.43667				0.210884
	標準偏差	0.561453				0.032829	0.523151				0.039648
リールポイント					目標速度						
		0.03	0.809785	0.092067	1m	2.327017					
角度					3m	4.811539					
222											

Fig.a.6 被験者 D データ