

平成16年度  
電気通信大学 大学院 修士論文

ボールの投げ上げ運動を題材とした  
運動安定化の研究

|          |               |
|----------|---------------|
| 学 籍 番 号  | 0 3 5 1 0 2 3 |
| 氏 名      | 佐藤 未央         |
| 情報システム学科 | 情報ネットワーク学専攻   |
| 指 導 教 官  | 阪口 豊 助教授      |
| 提 出 日    | 平成17年3月10日    |

# 目次

|       |                         |    |
|-------|-------------------------|----|
| 第 1 章 | 緒論                      | 1  |
| 第 2 章 | 背景                      | 2  |
| 2.1   | 運動学習と運動安定化              | 2  |
| 2.2   | 運動安定化に関する仮説             | 3  |
| 2.2.1 | ばらつきの要因                 | 3  |
| 2.2.2 | 終点分散最小化仮説に基づく仮説         | 4  |
| 2.2.3 | 環境学習の能動的制御に基づく仮説        | 4  |
| 2.2.4 | 筋肉の特性変化に基づく仮説           | 5  |
| 2.2.5 | 信号伝送路増強に基づく仮説           | 6  |
| 第 3 章 | 実験方法                    | 8  |
| 3.1   | 実験装置                    | 8  |
| 3.1.1 | 腕の位置計測装置                | 8  |
| 3.1.2 | ボールの位置計測装置              | 8  |
| 3.1.3 | 実験課題                    | 8  |
| 3.2   | 解析事項                    | 11 |
| 3.3   | ボール軌道の補完と投げ上げ時刻の抽出      | 12 |
| 3.4   | 等分散性の検定                 | 12 |
| 3.4.1 | Hartley 検定              | 12 |
| 3.4.2 | Bartlett 検定             | 13 |
| 3.5   | AR(Auto Regressive) モデル | 14 |
| 第 4 章 | 実験結果                    | 16 |
| 4.1   | ボールの解析結果                | 16 |
| 4.1.1 | ボールの頂点の高さ               | 16 |
| 4.1.2 | ボールの水平面内のばらつき           | 21 |
| 4.1.3 | ボールの初速                  | 27 |

|              |                         |           |
|--------------|-------------------------|-----------|
| 4.1.4        | 時系列の解析 . . . . .        | 29        |
| 4.2          | 腕の動作の解析結果 . . . . .     | 32        |
| 4.2.1        | 被験者ごとの腕の動き . . . . .    | 32        |
| 4.2.2        | 部位ごとの解析 . . . . .       | 34        |
| 4.2.3        | 動作のばらつきの時間的变化 . . . . . | 53        |
| <b>第 5 章</b> | <b>結論</b>               | <b>55</b> |
|              | <b>謝辞</b>               | <b>56</b> |
|              | <b>参考文献</b>             | <b>56</b> |

# 第1章

## 緒論

我々が通常行うどんな運動でも，同じ運動を繰り返し練習することで上達する．例えば，ゴルフを例に挙げると，練習を繰り返すうちに毎回スイングが同じ軌跡を描くようになるといわれている．また，弓道を例に挙げると，当初は狙った位置に矢を当てられなかったものが，徐々に狙い通りの位置に矢を当てられるようになる．これらのことは，運動の上達には「ばらつきの減少」と「平均誤差の減少」の2つの側面があることを示しており，人間は同様の運動を繰り返すことでそれらを学習していると考えられる．つまり，人間の脳には運動のばらつきを減少させる機構及び目標とのずれを減少させる機構があると考えられる．

運動の習熟に関する研究は，脳科学の分野，スポーツ科学の分野など，いくつかの側面から行われている．しかし，脳科学の分野では，結果と目標との平均誤差を減らすことに注目したものが主流であり，運動のばらつきに関して議論されたことはほとんどない．また，スポーツ科学の分野では，平均誤差とばらつき両方を含めた技能上達の研究が行われているが，「どのように動作をしたら上手に運動ができるか」を検討するのみであり，そのように振舞うことに如何なる合理性があるのかまで踏み込んだ議論は行われていない[1]．運動安定化のメカニズムを理解するためには，単に現象論だけでなく，運動安定化がどのような要因によって生じるのかを検討する必要がある．また，そのようなメカニズムを明確にすることは，なぜばらつきが発生するのかを解明することにも繋がるであろう．

本論文では，訓練によって運動結果のばらつきが減るときに人間の振る舞いがどのように変化するかを行動実験を行って調べ，ばらつき減少のメカニズムを検討する．研究の題材として，本研究ではボールの投げ上げ運動を用いた．計算論的な運動学習の研究では，主に到達運動，指示運動，把持運動などが題材として利用されているが，これらの運動は我々が日常的に行っており，既に十分上達していると考えられる．したがって，「繰り返しによる変化」を調べる今回の研究には不適切である．そこで，今回は日常あまり行わない動作の1つとして投げ上げ運動を選択した．

## 第 2 章

### 背景

#### 2.1 運動学習と運動安定化

運動学習には、「平均誤差の減少」と「ばらつきの減少」の2つの側面がある。的を狙って球を何度も投げる状況を例に挙げて、これらの違いについて説明する。

試行開始当初と試行を何度も繰り返した後の運動の変化は、大きく分けて2種類あると考えられる。1つは、球の当たった平均位置が当初は目標とずれていたものが、徐々に目標に近くなっていく（図 2.1(a)）というものである。このような変化が「平均誤差の減少」である。また、もう1つは、試行開始当初は球の当たる位置が広範囲にわたっていたものが、試行繰り返すうちにその範囲が狭くなっていく（図 2.1(b)）というものである。これが「ばらつきの減少」である。

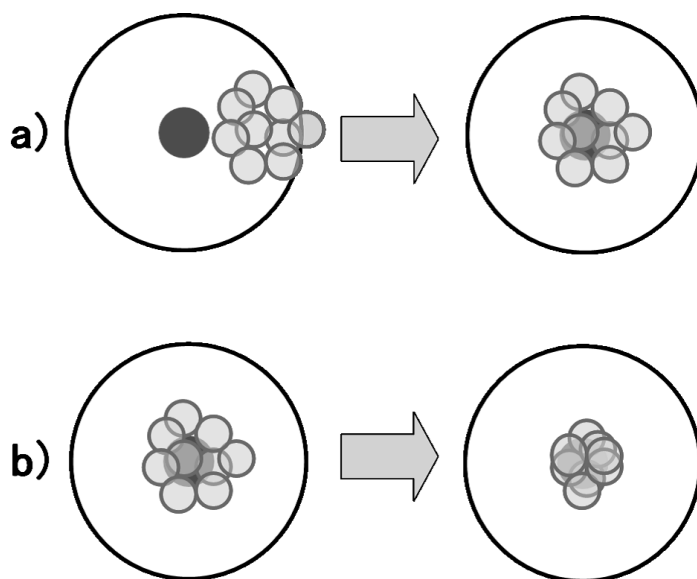


図 2.1 運動学習の2つの側面 [a:平均誤差の減少 b:ばらつきの減少]

平均誤差の減少に関する代表的な研究としては、プリズム適応 (prism adaptation) と呼ばれる現象を扱ったものが挙げられる[3][4][5]。プリズム適応とは、プリズム眼鏡の装着などにより視野をずらすと視覚目標に手を伸ばす到達運動に誤差が生じるが、試行を繰り返し行くとその誤差が減少するという現象である。運動学習においてこのテーマは広く研究されており、例として目標に手を伸ばす到達運動[6][7]や、的に向かって球を投げる運動を題材としたもの[8]などがある。

このように平均誤差に関しては活発に議論が行われている一方で、運動学習のもう一つの側面であるばらつきの減少に関する研究は、いくつかの仮説が提案されている[2][9]が、まだ少ない。

しかし、近年、終点分散最小化仮説[10]や最適フィードバック制御理論[11]などの運動制御モデルが提案され、運動制御の分野では「ばらつき」に関する議論は盛んになってきている。特に終点分散最小化仮説は運動学習の分野にも影響を与え、それを学習で実現しようという試み[12]や、それに関連した運動安定化の仮説の提案が出ている[2]。

次節では、運動安定化に関する仮説を紹介する。

## 2.2 運動安定化に関する仮説

### 2.2.1 ばらつきの要因

運動がばらつく要因として、井口らは「生体ノイズ」[1]、運動学習における試行錯誤[2]を、阪本らは「目標点の位置知覚のばらつき」を挙げている[9]。

さらに井口らは先の2つの要因を基に、運動の安定化を説明する次の4つの作業仮説を提案している。

- 終点分散最小化仮説に基づく仮説
- 環境学習の能動的制御に基づく仮説
- 筋肉の特性変化に基づく仮説
- 信号伝送路増強に基づく仮説

前半の二つは、運動パフォーマンスの向上に伴って運動が安定化すると考える点で共通の土台を持ち、後半の二つは運動指令の伝達経路が複数化することによりノイズの影響が小さくなるという考え方に基づいている[2]。

以下では、これらの仮説について紹介する。

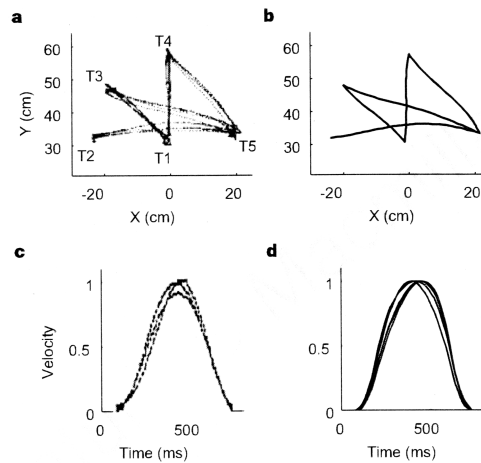


図 2.2 実際のヒトの腕の軌道と終点分散最小化原理に基づく運動軌道 [a:実際のヒトの腕の軌道, b:終点分散最小化原理に基づいて計算された運動軌道, c:実際のヒトの腕の速度, d:終点分散最小化原理に基づいて計算された速度][ 10 ]

### 2.2.2 終点分散最小化仮説に基づく仮説

Harris と Wolpert は、ノイズは細胞の平均発火頻度に比例する (Signal Dependent Noise (SDN)) という仮定の下で、「脳は運動終点でのばらつきを最小化するような運動指令を計画している」という軌道計画モデルを提案した[ 10 ]。ヒトの腕の到達運動には

- 緩やかに曲がったほぼ直線の軌跡を描く
- 接線方向の速度は時間に対して対称なベル型の軌道を描く
- 加速度の波形は滑らかである

といった特徴があるが、Harris と Wolpert は、終点分散最小化原理に基づく運動軌道が、このようなヒトの特徴をよく再現できることを示した (図 2.2)。

実際に脳がこの原理に基づいて運動を計画しており、また、その運動指令を学習しているのならば、学習の進む過程では運動の終点のばらつきは減少するはずである、とするのが終点分散最小化に基づく仮説である。

この仮説の下では、運動指令の最適化に伴って運動の軌道が変化するものと考えられる。

### 2.2.3 環境学習の能動的制御に基づく仮説

環境学習の能動的制御に基づく仮説は、運動学習の際の試行錯誤が、学習の進行とともに減少するために運動のばらつきが減少するというものである。

終点分散最小化に基づく仮説とこの仮説は運動パフォーマンスの向上に伴って運動が安

定化すると考える点では共通している。しかし、終点分散最小化に基づく仮説は運動のばらつきを要因を生体ノイズとし、終点における誤差がより小さくなる軌道、すなわちノイズの影響をより抑えられるような軌道を学習した結果として運動が安定化すると考えるのに対し、この仮説はその学習方法の一つであり、またその学習の過程そのものが運動のばらつきを要因であると考えており、これらが着目するレベルは本質的に異なっている。

#### 2.2.4 筋肉の特性変化に基づく仮説

同じ運動を繰り返せば、その運動に関わる筋肉の特性が変化することは十分に考えられる。このような筋肉の特性変化に運動安定化の原因を求めるのが第三の仮説である。筋特性変化による安定化を説明する前に、筋肉の構成について説明する。

筋は収縮することで力を発揮する。筋収縮は脊髄にある「運動神経」(motoneuron)と呼ばれる抹消神経細胞によって制御されている。運動細胞からは1本の軸索が出ており、軸索は途中で何度も枝分かれをして数十から数千の筋繊維と結合する。1個の運動神経と、それが支配する筋繊維の集団を合わせて「運動単位」(motor unit)と呼ぶ。神経と筋は、ともに「全か無」の興奮をするため、運動単位もまた全体として「全か無」の2値的な作用を示す[13]。図2.3の模式図を例に説明する。図は筋力増強の過程の7個の運動単位からなる筋繊維を示しており、図中の黒丸は活動している運動単位、白丸は活動していない運動単位を表している。1つの運動単位が発揮する力を1とすると、この筋が発揮できる筋力は0,1,2,3,4,5,6,7の8通りであり、図中では左の筋繊維は3、中央の筋繊維は6の筋力を発揮している。

筋力はトレーニングを行うことで増強するが、図のように、まずは筋力発生に寄与する運動単位が増加する(ただし、筋は極めて高いポテンシャルを持っているため、最大の努力をして最大筋力を発揮しても、神経系の働きや運動単位全体の7,8割しか使うことができないと考えられている[14])。さらにトレーニングを続けると、個々の筋繊維が太くなり各繊維が発生する力が増強される。

このように、筋力増強は神経系の適応と筋肥大の2つの段階からなっているが、筋肉の特性変化に基づく仮説では神経系の適応の段階に注目している。

筋力発生に関与する運動単位の数が増加すれば、同じ筋力を生成するときに個々の運動単位が発生する力は小さくて済むようになる。すなわち、筋力増強により個々の運動細胞の活動頻度は小さくなり、signal dependent noiseも減少する。

ここで、このノイズの影響がそのまま合算されるのであれば、筋肉全体としてのS/N比(信号対雑音比)は変化しない。しかし、異なる運動細胞において生じるノイズが互いに独立であるとすれば、運動単位で生成される力が和となって筋力に変換される過程でノイズの影響は減少する。これは、中心極限定理により、 $n$ 個の独立な確率変数の平均の標



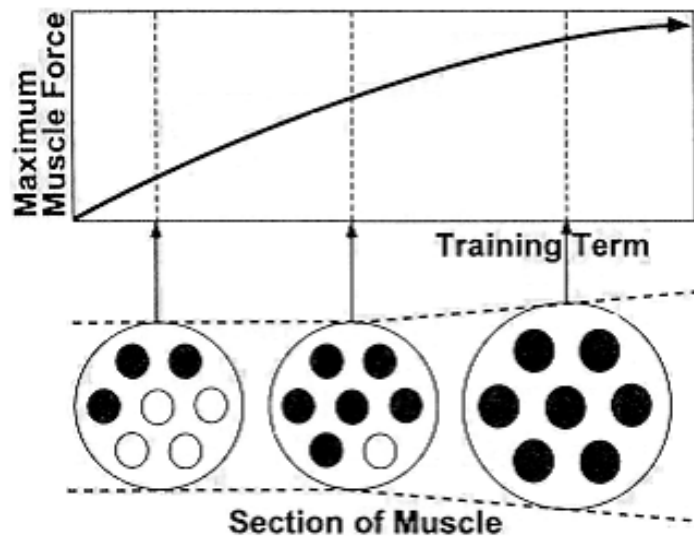


図 2.3 筋力増強の様子 ([15]より引用, 改変)

標準偏差は元の確率変数の標準偏差の  $1/\sqrt{n}$  倍になるからである。したがって、例えば、各運動単位が生成する力が皆等しいという仮定の下で、運動単位の数が増えたとして、筋肉全体で力の和を取る過程で  $1/\sqrt{2}$  倍になる。

筋肉の特性変化に基づく仮説では、このように複数の運動単位を個別に考え、運動細胞ごとに生じるノイズの独立性を仮定することによって、筋力発生に関する運動単位の増加が運動を安定化することを説明している。

この仮説の特徴は、筋肉の特性（正確には筋力増加に関わる神経系の性質）が変化しさえすれば、運動のパフォーマンスとは無関係に安定化が進行する点である。既に述べた二つの仮説では、運動の安定化には運動結果のフィードバックが必要であるのに対し、この仮説では、運動を繰り返すだけで運動が安定化する [2]。

### 2.2.5 信号伝送路増強に基づく仮説

この仮説は、筋力増強によるモデルを、筋肉だけではなく脳までを含んだより一般的な形にしたものである。中心極限定理を利用した S/N 比減少の原理は、脳波計測などの計測技術でも使用されている。図 2.4 はその仕組みを図示したもので、図中の  $c$  は信号、 $w$  はノイズを表す。多数の伝送路を使って平行して信号を送りその平均を取ることで、伝送先におけるノイズの影響を小さくすることができる [2]。

この仮説は、大脳運動野から筋肉に向けて運動指令が送られる過程を信号伝送経路とみなし、運動指令を伝える伝送路の数、あるいは情報伝達容量を増やすことによりノイズの影響を減少させて運動の安定性を向上させるというものである。

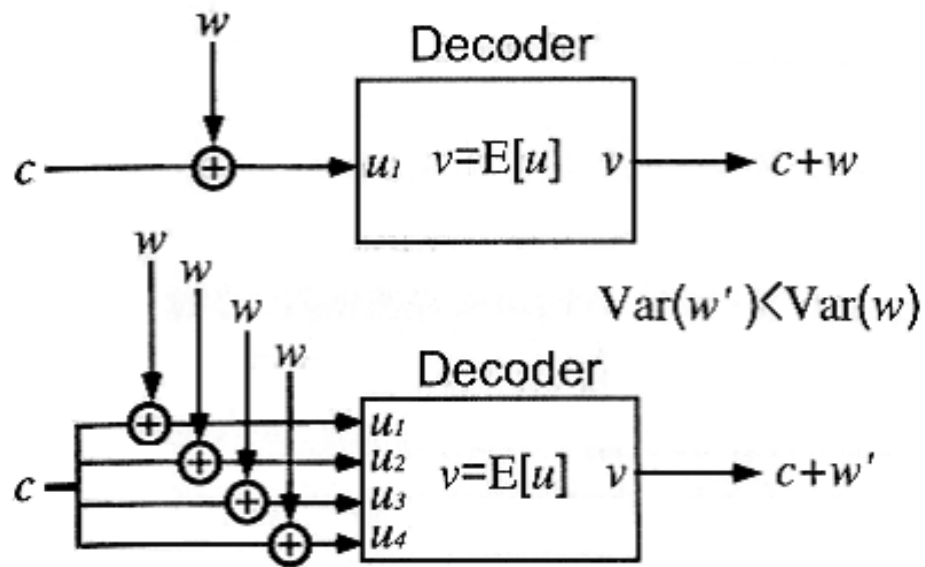


図 2.4 伝送経路増強によるノイズの減少[2]

井口らは、細胞の平均発火頻度に比例した signal dependent noise (SDN) が発生する条件の下ではこの仮説は成立するが、細胞の平均発火頻度が増加しても細胞のノイズがほとんど変化しないという仮定の下では、運動指令の伝送路増強は運動のばらつきを増加させると報告している[16]。

また、先に述べた2つの仮説では、運動の学習は強化学習によって行われているのに対し、この仮説を含む後者2つの仮説は教師なし学習によって運動学習が進むとしている点で違いがある。

## 第 3 章

# 実験方法

同様の身体運動を何度も繰り返すことで、運動結果のばらつきが実際に減少しているのか確認し、その際の動作の変化を調べるための実験を行った。この章ではその実験の概要について説明する。

### 3.1 実験装置

#### 3.1.1 腕の位置計測装置

腕の姿勢の計測には Northern Digital 社の Optotrak3020 を使用した。この装置は赤外線 LED マーカの 3 次元位置を 3 つの 1 次元 CCD センサによって計測するシステムで、サンプリング周波数 1200Hz、分解能 0.01mm、RMS 精度 0.1mm で計測できる（カタログ値）。

本実験では、サンプリング周波数 200Hz で肩、肘、手首、親指の付け根、人差し指の付け根、人差し指の中心にマーカを装着して計測した<sup>\*1</sup>。

#### 3.1.2 ボールの位置計測装置

ボールの位置計測には、株式会社 応用計測研究所 (OKK INC.) の Quick Mag III を使用した。この装置は、カラーマーカを 2 台のビデオカメラで撮影し、3 次元座標を計測するもので、特定の「色」の領域の重心を計算し、それを位置座標にする。

#### 3.1.3 実験課題

実験の様子を図 3.1 に、実験の概略図を図 3.2 に示す。

---

<sup>\*1</sup> 親指の付け根、人差し指の中心に関しては今回の腕の解析で使用していない。

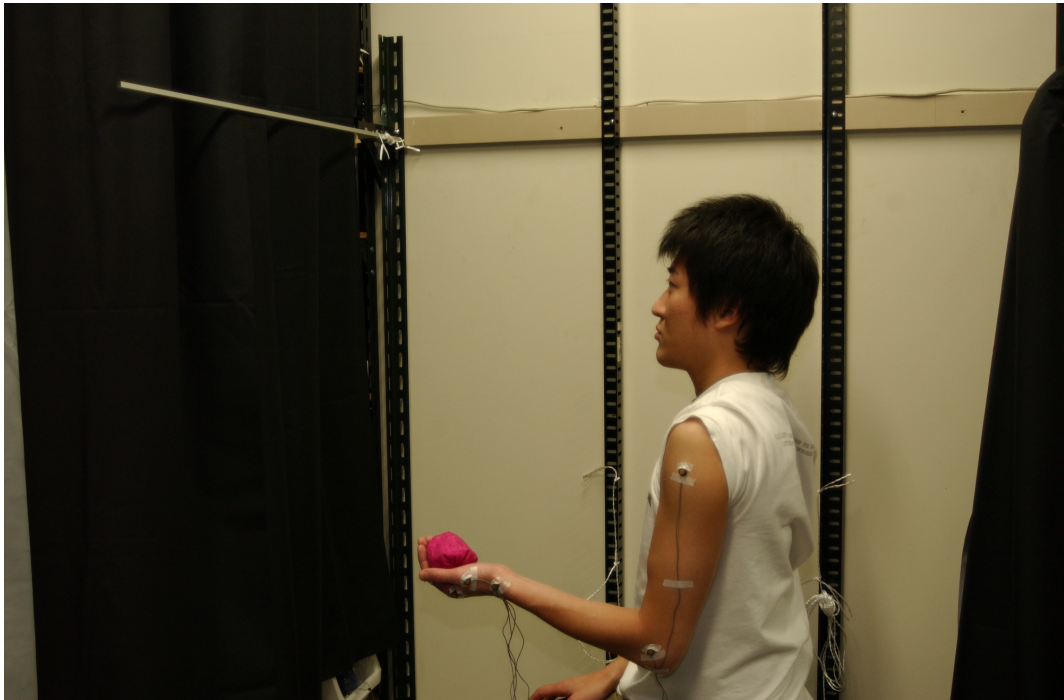


図 3.1 実験風景

被験者は、椅子に座った状態でボールの投げ上げ運動を利き手と逆の手で繰り返し行う。ボールを投げ上げる高さの目標があり、その高さに合わせて投げる。ターゲットとボールの合わせ方は、ボールの最上部または最下部とターゲットを合わせるのではなく、ボールの中心とターゲットを合わせる(図 3.3)。被験者が自分のリズムで行うのを防ぐため、2.5 秒から 3.5 秒の間でランダムにブザーを鳴らして投げ上げを指示した。

実験では、3 人の被験者に、1 ブロック 10 回、1 日 10 ブロック、計 100 回の投げ上げ運動を 10 日間続けて行ってもらった。

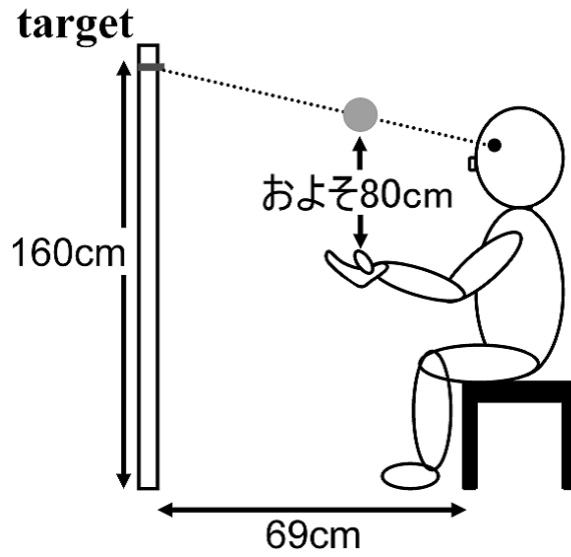


図 3.2 投げ上げ実験の概略図

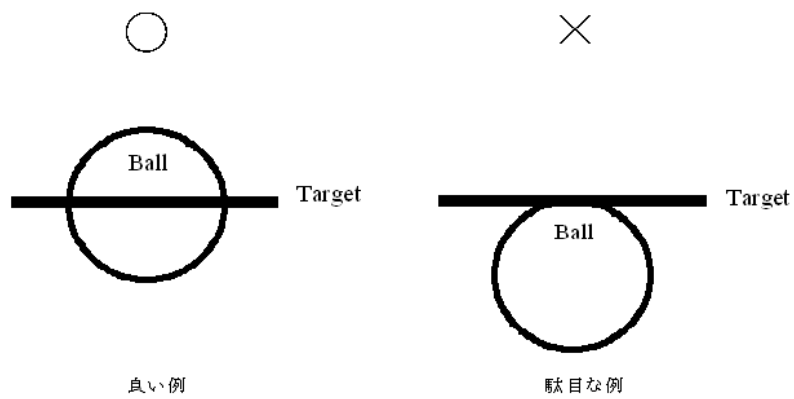


図 3.3 ボールとターゲットの合わせ方

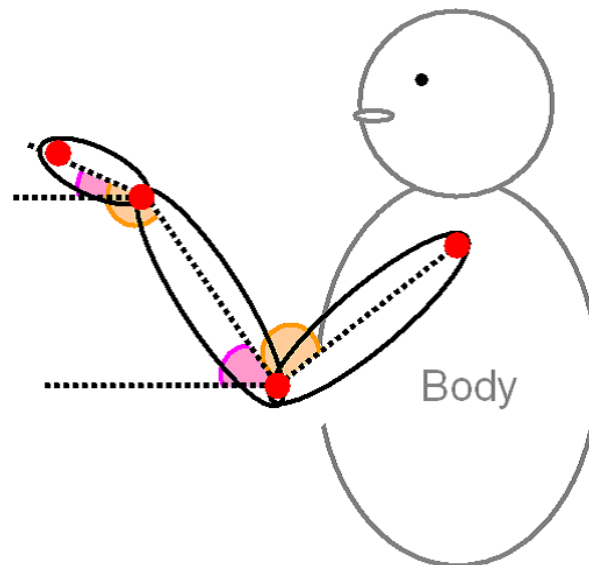


図 3.4 腕の解析事項

## 3.2 解析事項

実験で計測した項目について、実際に解析した事項を挙げる。

まず、ボールに関しては、

- 初速度
- 頂点の水平面内位置
- 頂点の高さ
- 投げ上げから頂点までの水平移動距離

を解析した。

また、腕の姿勢に関しては、

- 示指付け根、手首、肘、肩の各関節位置
- 手の平と水平のなす角度
- 前腕と水平のなす角度
- 手首の関節角
- 肘の関節角

を解析した。

### 3.3 ボール軌道の補完と投げ上げ時刻の抽出

ボールの計測データは 1/60sec 毎の離散的なものである。しかし、手から離れているときのボールは鉛直方向には自由落下運動、水平方向には等速直線運動を行っている。そこで、ボールの軌道を最小 2 乗法を用いて補完した。補完には、投げ上げ毎にデータ上の頂点を中心とした前後 25 フレーム分の計 51 点をフレーム分のデータを使用した。

また、補完軌道とボールが手の中にあるときの軌道は異なることを利用し、計測データと補完軌道の誤差を取り（図 3.5 右）、誤差が一定以上の大きさになる点を投げ上げの時間とした（図 3.5 の \* 印）。今回は、その閾値を 5mm と設定した。

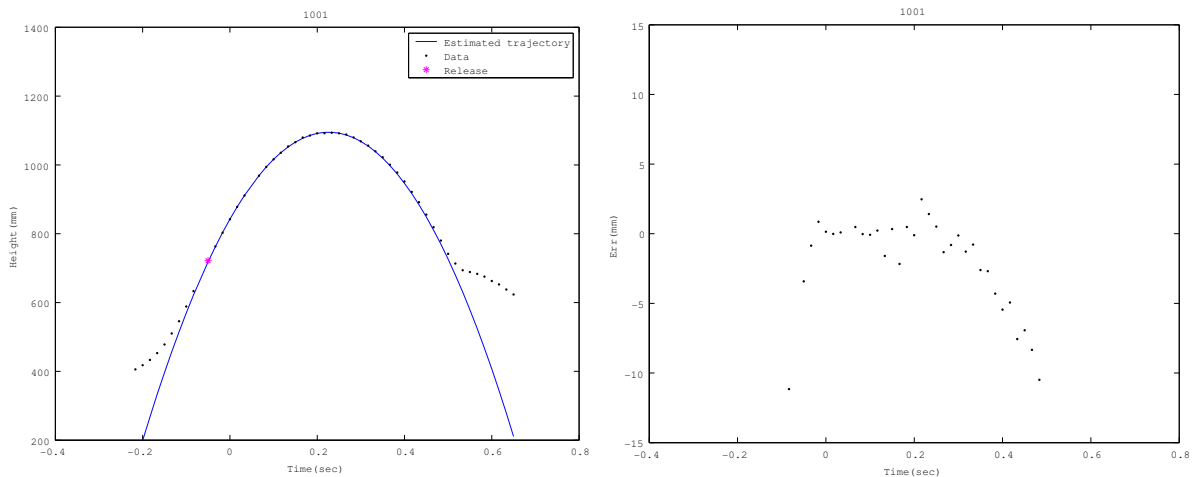


図 3.5 左：計測データと補完軌道，右：計測データと補完軌道の誤差

### 3.4 等分散性の検定

「ばらつきが減少した」というには、それぞれの日の 100 回投げ上げをした結果の母分散が異なるといえなければいけないが、3 つ以上の母分散の差の検定（等分散の検定）方法として、Hartley 検定、Bartlett 検定といった方法がある[17]。

#### 3.4.1 Hartley 検定

Hartley 検定は水準  $A_i$  の繰り返し数が等しいときに使用できる。Hartley 検定の原理を簡単に説明する。もし各水準における母分散  $\sigma^2$  が等しいのならば、標本分散  $S_i^2$  も互いに

$$s_1^2 = s_2^2 = \dots = s_i^2 \quad (3.1)$$

となると考えられる。もしこれが正しければ、最小分散  $\min\{s_i^2\}$  と最大分散  $\max\{s_i^2\}$  の比

$$F_{\max} = \frac{\max\{s_i^2\}}{\min\{s_i^2\}} \quad (3.2)$$

は 1 に近くなり、逆に少なくとも 1 つの水準  $A_i$  の母分散が異なれば、 $F_{\max}$  は 1 より大きくなるはずである。したがってこの比の値  $F_{\max}$  を検定統計量とすることができる。

$F_{\max}$  の分布については  $100\alpha\%$  点  $F_{\max(a,n-1)}(\alpha)$  が数表で与えられている。そこで

仮説  $H_0$ : 水準  $A_1, \dots, A_a$  間の母分散は等しい

に対して、有意水準が  $\alpha$  のときの棄却域  $R$  は図 3.6 のようになる。よって、

$$F_{\max} < F_{\max(a,n-1)}(\alpha) \quad (3.3)$$

ならば、仮説  $H_0$  は捨てられないので、水準  $A_1, \dots, A_i$  間の母分散は互いに等しいと仮定される。今回の実験の場合、Hartley 検定の仮説と対立仮説は

仮説  $H_0$ : 各日付間のボールの母分散は互いに等しい

対立仮説  $H_1$ : 少なくとも 1 日の母分散は異なる

となる。

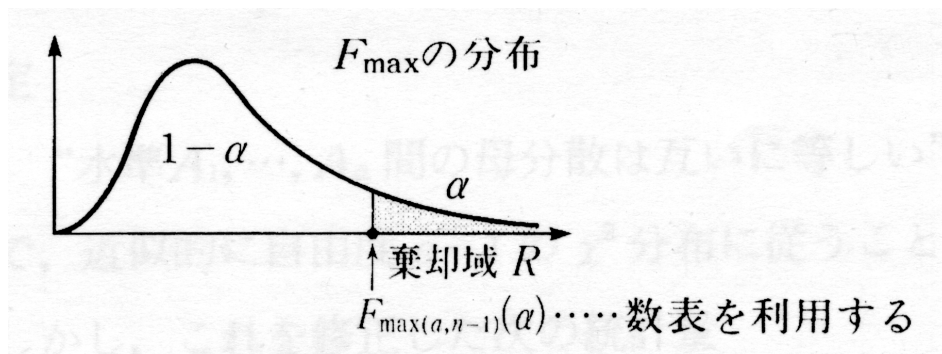


図 3.6 等分散性の棄却域

### 3.4.2 Bartlett 検定

各水準  $A_i$  の繰り返し数が異なっても使用できるのが Bartlett 検定である。ただし、Bartlett 検定は繰り返し数が小さいときは使えない。



水準数が  $a$  , 水準  $A_i$  のデータ数が  $n_i$  , 全体のデータ数が  $N$  のとき , 統計量

$$-2 \log_{10} \lambda = (N - a) \left\{ \log \frac{\sum_{i=1}^a (n_i - 1) s_i^2}{N - a} - \frac{1}{N - a} \sum_{i=1}^a (n_i - 1) \log s_i^2 \right\} \quad (3.4)$$

は , 仮定

“水準  $A_1, \dots, A_a$  間の母分散は互いに等しい”

のもとで , 近似的に自由度  $a-1$  の  $\chi^2$  分布に従うことが知られている . しかし , これを修正した次の統計量

$$B = \frac{(-2 \log_{10} \lambda) \times 2.3026}{1 + \frac{1}{3(a-1)} \left( \sum_{i=1}^a \frac{1}{n_i - 1} - \frac{1}{N-a} \right)} \quad (3.5)$$

の方がより近似的に自由度  $a-1$  の  $\chi^2$  分布に従うので , この  $B$  を Bartlett 検定統計量という .

有意水準が  $\alpha$  のとき ,

$$B < \chi_{a-1}^2(\alpha) \quad (3.6)$$

ならば , 有意水準  $100\alpha\%$  で仮説  $H_0$  は捨てられない . 今回の実験の場合 , Bartlett 検定の仮説と対立仮説は Hartley 検定同様に

仮説  $H_0$ : 各日付間のボールの母分散は互いに等しい

対立仮説  $H_1$ : 少なくとも 1 日の母分散は異なる

となる .

### 3.5 AR(Auto Regressive) モデル

AR モデル (自己回帰モデル) は , 等時間間隔で計測された時系列に対して , 現在の自分を過去の自分の線形和として表すモデルであり , 太陽の黒点数の変動や株価の解析などに用いられている . このモデルでは , 時系列  $x_n$  は次のように表現される .

$$x_n = \sum_{i=1}^k a_i x_{n-i} + \varepsilon_n \quad (3.7)$$

ここで ,  $a_i$  は AR 係数 ,  $\varepsilon_n$  は予測誤差 ,  $k$  は次数である . AR 係数の絶対値が大きい項ほど  $x_n$  への影響が大きい . また ,  $\sum_{i=1}^k a_i < 1$  である .

このモデルでは , 次数  $k$  が大きくなるにつれて , 予測誤差  $\varepsilon_n$  の分散  $\sigma^2$  は小さくなる . しかし , 単に次数  $k$  を大きくするだけでは , ある時系列を生成するメカニズムのモデルを求めることはできない .

最適なモデル次数を決定する基準のひとつとして、AIC(Akaike's Information Criterion) が挙げられる。  $k$  次 AR モデルに対する AIC は

$$AIC = n \log(D^2) + 2k \quad (3.8)$$

で表現される。ここで、 $n$  はデータ数、 $D^2$  は平均二乗誤差、 $k$  は次数である。そして、AIC の値が小さいものほど良いモデルとみなすことができる。

## 第 4 章

# 実験結果

### 4.1 ボールの解析結果

まず，繰り返し練習することで運動結果（ボール）のばらつきが実際に減少しているのかを確認した．

#### 4.1.1 ボールの頂点の高さ

まずはボールの頂点の高さに関して解析を行った．頂点の高さは課題で設定してある為，最もばらつきの減少が現れやすいのではないかと考えられる．被験者ごとにボールの頂点の高さに関して説明する．

#### 結果

まず被験者 1 だが，日の経過によるボールの高さの標準偏差の変化では，(図 4.1 下段)，5 日目に一度標準偏差が増加しているが，大きく分けて 1 日目から 2 日目，7 日目から 8 日目にかけて減少している．また，平均値はほとんど変化がない．10 日間の分散に差があるかどうか検定した結果，有意差があった ( $F_{\max}=3.16$   $p < 0.01$ ， $B=63.04$   $p < 0.01$ )．

被験者 2 は，ボールの高さの標準偏差 (図 4.2 下段) には減少傾向がある．平均値は 2 日目と 8 日目以降がやや低めである (図 4.2 上段)．被験者 2 においても，10 日間のばらつきに有意差があった ( $F_{\max}=2.56$   $p < 0.01$ ， $B=40.77$   $p < 0.01$ )．

被験者 3 は，図 4.3 下段より，8 日目までボールの頂点の高さのばらつきは単調減少している．頂点の高さの平均値は最初の 2 日間が他の日よりも少し高い (図 4.3 上段) が，これは被験者がボールとターゲットの合わせ方を間違えていたためである．被験者 3 も，10 日間のばらつきに有意差があった ( $F_{\max}=4.90$   $p < 0.01$ ， $B=112.87$   $p < 0.01$ )．

3 人の結果をまとめると，ボールの鉛直方向では初日から最終日にかけて，

- 平均値に変化はない
- ばらつきは減少する

となる .

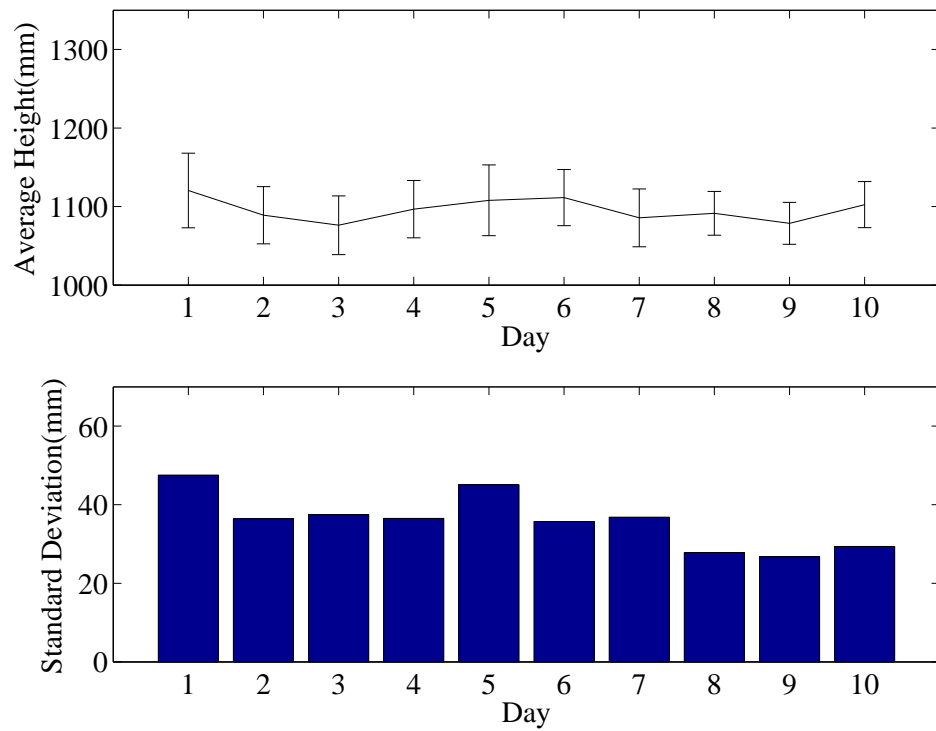


図 4.1 被験者 1 ボール頂点の高さ 平均 (上) と標準偏差 (下)

表 4.1 被験者 1 ボール頂点の高さ 2 つの日付間の等分散検定 p 値 [\*:有意差あり]

| DAY | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 9      | 10     |
|-----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1   | *0.009 | *0.018 | *0.009 | 0.600  | *0.005 | *0.012 | *0.000 | *0.000 | *0.000 |
| 2   | —      | 0.783  | 0.977  | *0.035 | 0.852  | 0.912  | *0.008 | *0.002 | *0.034 |
| 3   | —      | —      | 0.805  | 0.066  | 0.644  | 0.869  | *0.003 | *0.001 | *0.016 |
| 4   | —      | —      | —      | *0.037 | 0.830  | 0.935  | *0.007 | *0.002 | *0.031 |
| 5   | —      | —      | —      | —      | *0.022 | *0.045 | *0.000 | *0.000 | *0.000 |
| 6   | —      | —      | —      | —      | —      | 0.766  | *0.013 | *0.004 | 0.052  |
| 7   | —      | —      | —      | —      | —      | —      | *0.006 | *0.002 | *0.025 |
| 8   | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | 0.690  | 0.591  |
| 9   | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | 0.350  |

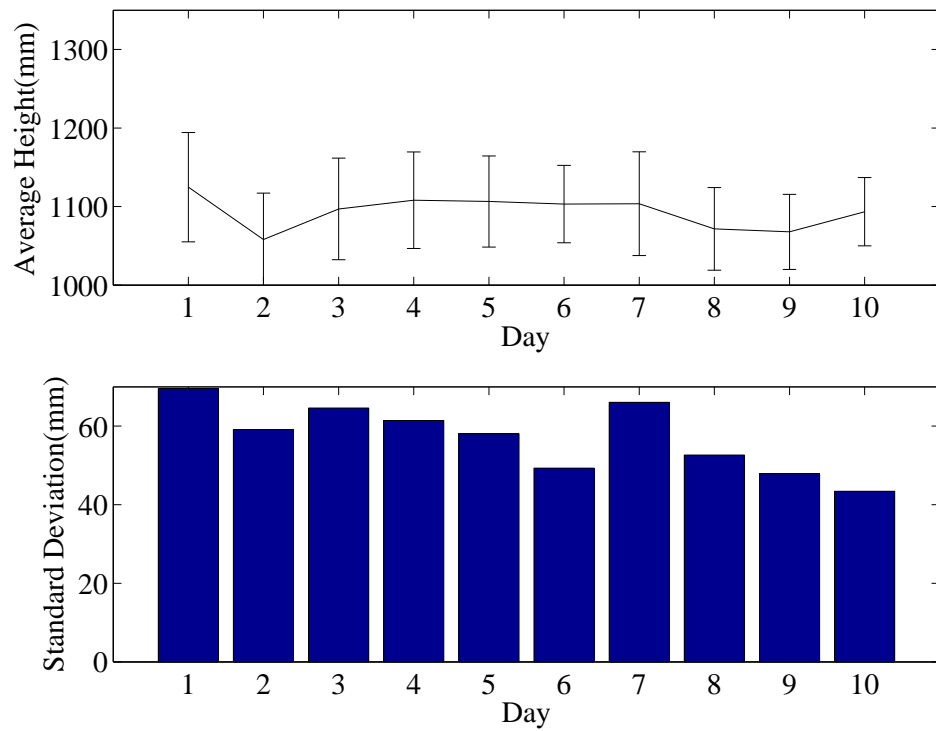


図 4.2 被験者 2 ボール頂点の高さ 平均 (上) と標準偏差 (下)

表 4.2 被験者 2 ボール頂点の高さ 2 つの日付間の等分散検定 p 値 [\*:有意差あり]

| DAY | 2     | 3     | 4     | 5     | 6      | 7      | 8      | 9      | 10     |
|-----|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1   | 0.108 | 0.467 | 0.220 | 0.074 | *0.001 | 0.610  | *0.006 | *0.000 | *0.000 |
| 2   | —     | 0.378 | 0.702 | 0.855 | 0.072  | 0.272  | 0.250  | *0.037 | *0.002 |
| 3   | —     | —     | 0.618 | 0.287 | *0.008 | 0.827  | *0.043 | *0.003 | *0.000 |
| 4   | —     | —     | —     | 0.572 | *0.029 | 0.473  | 0.126  | *0.014 | *0.001 |
| 5   | —     | —     | —     | —     | 0.106  | 0.200  | 0.333  | 0.057  | *0.004 |
| 6   | —     | —     | —     | —     | —      | *0.004 | 0.514  | 0.772  | 0.210  |
| 7   | —     | —     | —     | —     | —      | —      | *0.025 | *0.002 | *0.000 |
| 8   | —     | —     | —     | —     | —      | —      | —      | 0.347  | 0.057  |
| 9   | —     | —     | —     | —     | —      | —      | —      | —      | 0.334  |

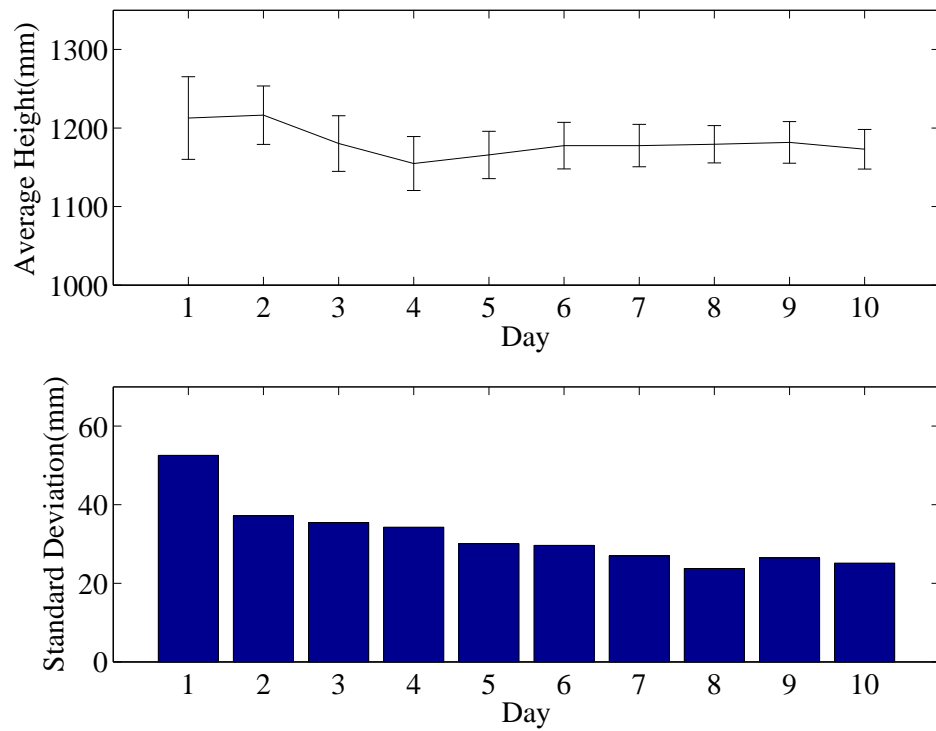


図 4.3 被験者 3 ボール頂点の高さ 平均 (上) と標準偏差 (下)

表 4.3 被験者 3 ボール頂点の高さ 2 つの日付間の等分散検定 p 値 [\*:有意差あり]

| DAY | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 9      | 10     |
|-----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1   | *0.001 | *0.000 | *0.000 | *0.000 | *0.000 | *0.000 | *0.000 | *0.000 | *0.000 |
| 2   | —      | 0.630  | 0.417  | *0.036 | *0.025 | *0.002 | *0.000 | *0.001 | *0.000 |
| 3   | —      | —      | 0.741  | 0.106  | 0.078  | *0.007 | *0.000 | *0.004 | *0.001 |
| 4   | —      | —      | —      | 0.198  | 0.152  | *0.018 | *0.000 | *0.011 | *0.002 |
| 5   | —      | —      | —      | —      | 0.885  | 0.279  | *0.019 | 0.201  | 0.076  |
| 6   | —      | —      | —      | —      | —      | 0.348  | *0.028 | 0.257  | 0.102  |
| 7   | —      | —      | —      | —      | —      | —      | 0.206  | 0.844  | 0.485  |
| 8   | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | 0.285  | 0.570  |
| 9   | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | —      | 0.616  |

#### 4.1.2 ボールの水平面内のばらつき

課題への目標がある頂点の高さに関しては、ばらつきの減少が確認された。そこで、次に、課題への目標が設定されていなかった水平面内では、ばらつきに変化が生じたのかを調査する。

ここでは、頂点の時刻の絶対位置では被験者の腕の長さなどに依存してしまうため、投げ上げられてから頂点に達するまでに移動した距離を、体に対して前後方向、左右方向それぞれについて分析する。<sup>\*1</sup>

#### 結果

被験者 1 は、図 4.4 上段より、初日から水平面のばらつきは少ないが、分散楕円の長軸と短軸の長さは徐々に減少している傾向がある。10 日間のばらつきに差があるか検定を行った結果、このばらつきには有意差あった ( $F_{\max}=1.92$   $p < 0.05$ ,  $B=25.67$   $p < 0.01$ )。また、ばらつきの中心は、(0,0) よりもやや右にずれる傾向がある。

被験者 2 は、図 4.4 中段より、前後方向の移動距離のばらつきが大きいことが分かる。被験者 1 と同様に、分散楕円の長軸と短軸の長さは徐々に減少する傾向があるようだが、有意差はなかった ( $F_{\max}=1.70$   $p > 0.05$ ,  $B=16.18$   $p > 0.05$ )。また、ばらつきの中心は投げ上げ時の位置の真上よりもやや手前にある傾向がある。

被験者 3 は、図 4.4 下段より、初日と他の日のばらつき具合を比較すると明らかに減少傾向がある。検定の結果、このばらつきの変化は有意であった ( $F_{\max}=3.69$   $p < 0.01$ ,  $B=81.51$   $p < 0.05$ )。また、被験者 3 も、ばらつきの中心が真上よりもやや手前にある傾向がある。

まとめると、水平方向のばらつきには全日程を通して減少傾向が見られるが、被験者 2 ではその有意性が確認できなかったとなる。

#### 考察

ボールの頂点の高さと水平面内のばらつきには、初速度が大きかったために滞空時間が長期になり、頂点が高く水平面内の移動量も増加するという正の相関関係、もしくは真っ直ぐ投げ上げられたため余計な方向（水平方向）にエネルギーを消費せず、頂点が高くなるという負の相関関係があると考えられる。そこで、ボールの頂点の高さと水平面内

---

<sup>\*1</sup> 22 ページ以降の図中で X, Y という表記が出てくることがあるが、体から見て前後方向を X, 左右方向を Y としている。但し、装置と被験者の位置関係によってはこれに準拠しないこともある。



の移動量の関係を調査したが、前述したような傾向は特に確認できなかった（図 4.5～図 4.7）。しかし、これは先に挙げた要素が両方混ざった結果の可能性もあると考えられる。

また、この結果は、水平方向のばらつきの減少は特に目標がなかったにもかかわらず減少している事を踏まえると、誤差減少の機構とは別に、ばらつき減少の機構があることを示唆している。4.1.1 小節の結果および、被験者 3 の、3 日目からボール頂点の高さ平均値が変化しているが、2 日目から 3 日目にかけてのばらつきの変化は有意でなかった（表 4.3）という結果は、このことを傍証している。

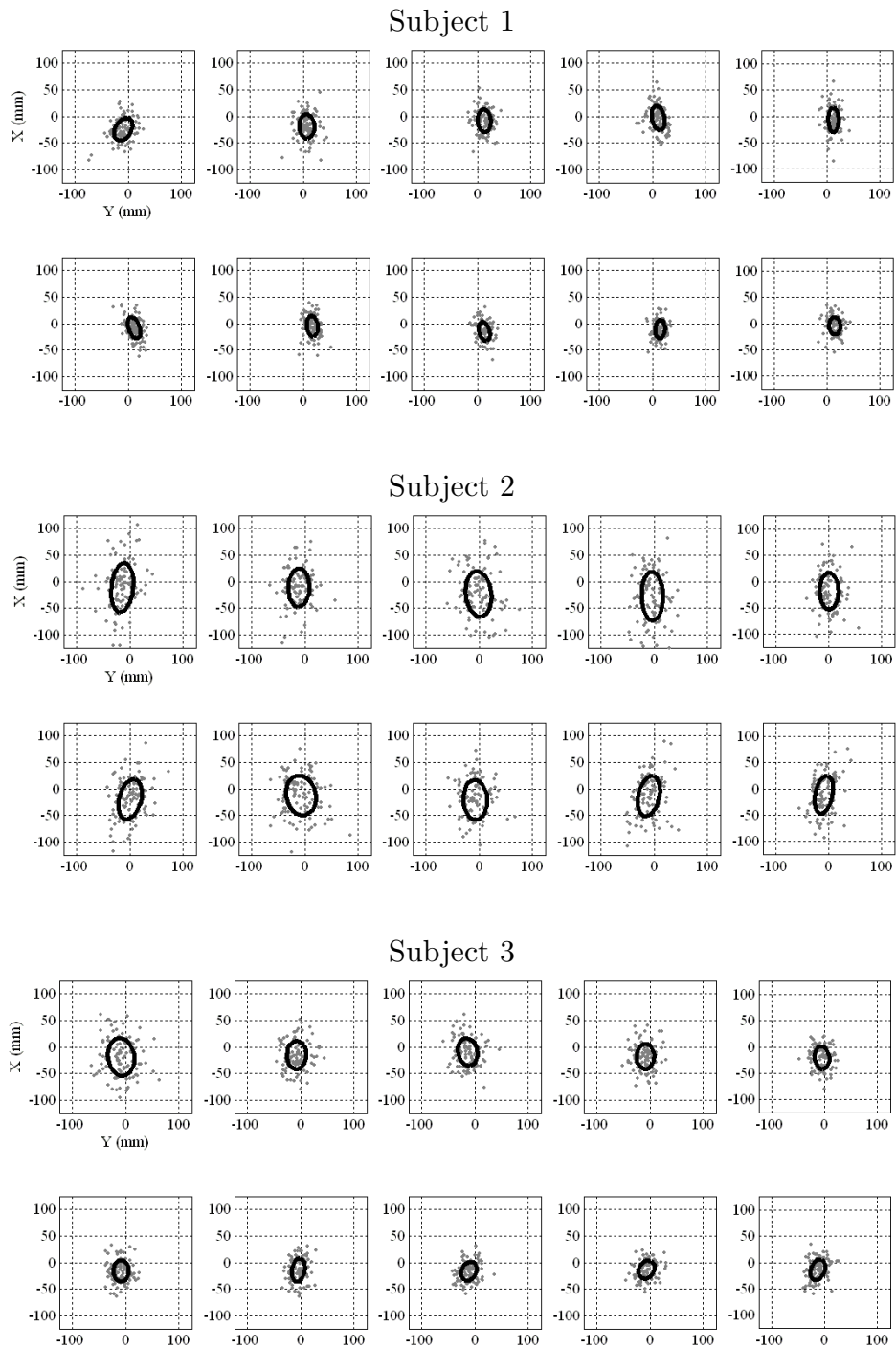


図 4.4 投げ上げから頂点までの水平移動距離

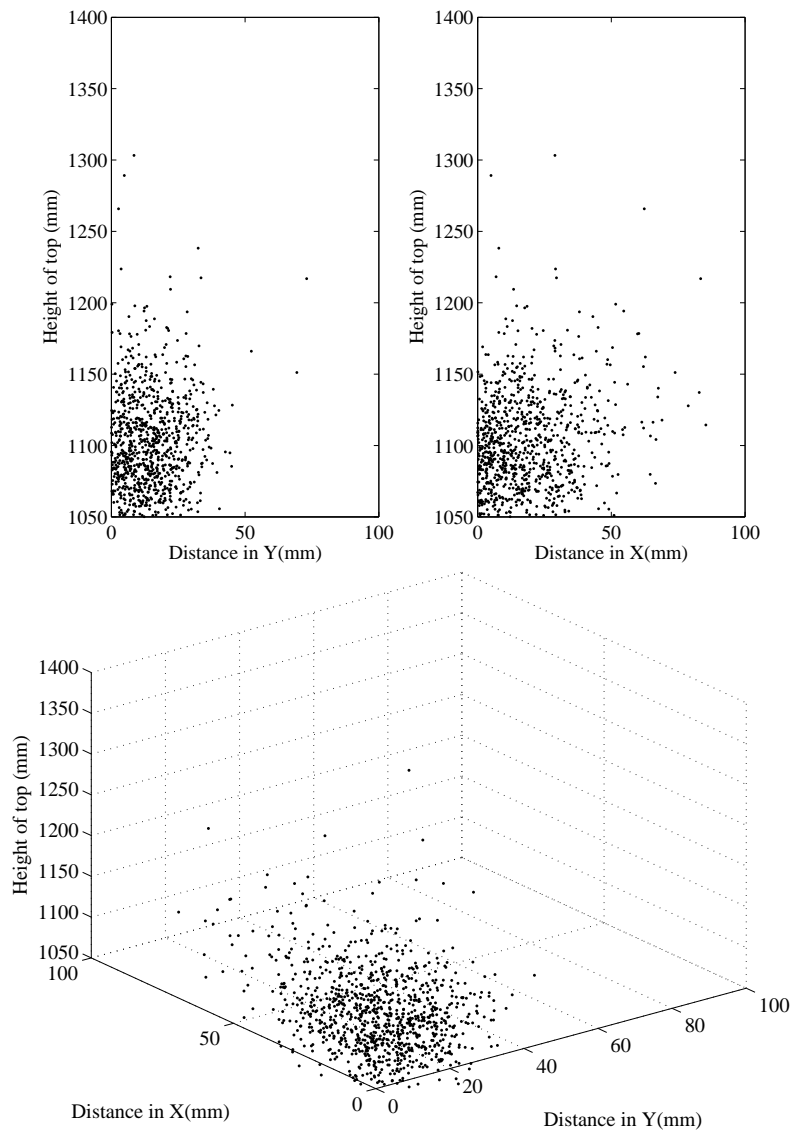


図 4.5 被験者 1 ボール頂点の高さと水平移動量の関係 上段: Y-Z (左), X-Z (右), 下段: XYZ

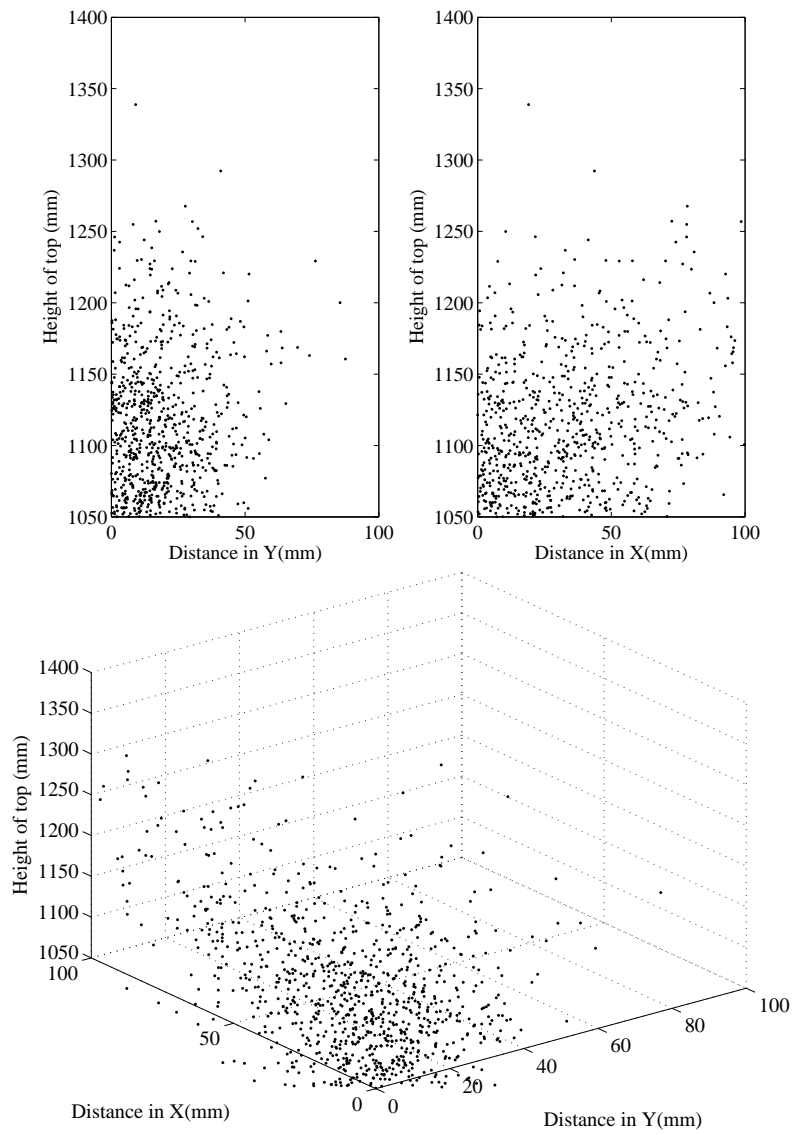


図 4.6 被験者 2 ボール頂点の高さと水平移動量の関係 上段: Y-Z (左), X-Z (右), 下段: XYZ

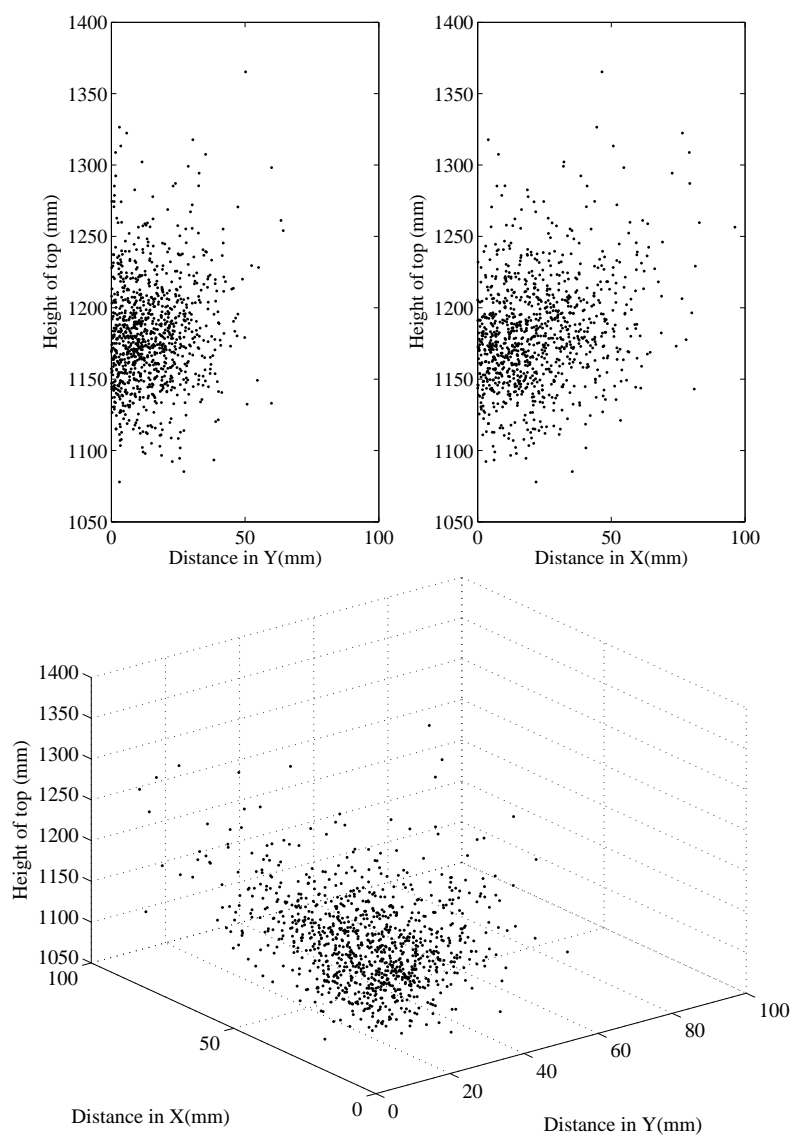


図 4.7 被験者 3 ボール頂点の高さと水平移動量の関係 上段: Y-Z (左), X-Z (右), 下段: XYZ

### 4.1.3 ボールの初速

被験者 1 のボールが投げ上げられたときの初速には、速さ、ばらつき共に特に目立った傾向はない(図 4.8)。

被験者 2 では、平均値の変化はほとんどないが、ばらつきには減少傾向があるように見える(図 4.9)。

被験者 3 のボールの初速度は 1 日目から 6 日目にかけて徐々にゆっくりとなっていく、7 日目で更に遅くなった後は安定する(図 4.10 下段)。また、そのばらつきには 1 日目から 6 日目にかけて減少傾向があるが、7 日目以降では増加している(図 4.10 上段)。

これらから、ボールの初速度とそのばらつきには個人差があるといえる。

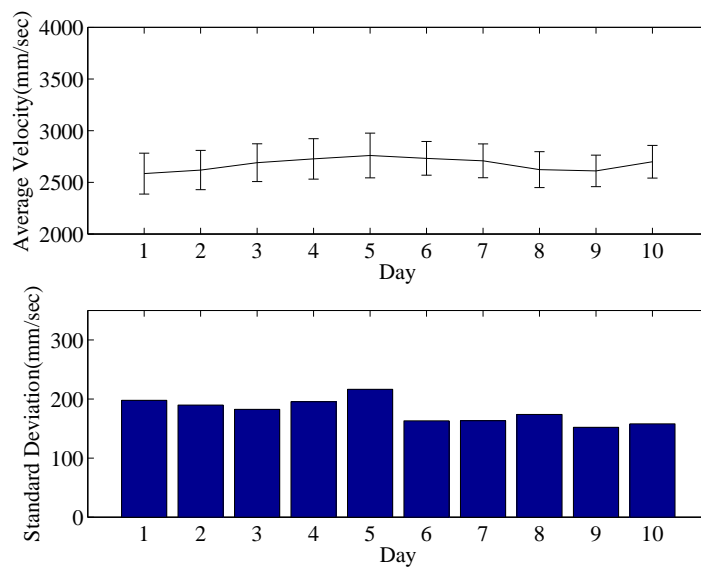


図 4.8 被験者 1 ボール速度 平均(上)と標準偏差(下)

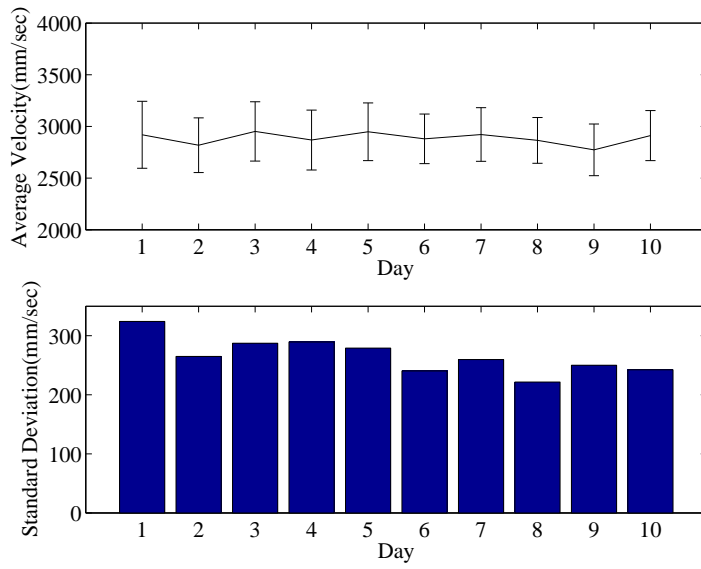


図 4.9 被験者 2 ボール速度 平均 (上) と標準偏差 (下)

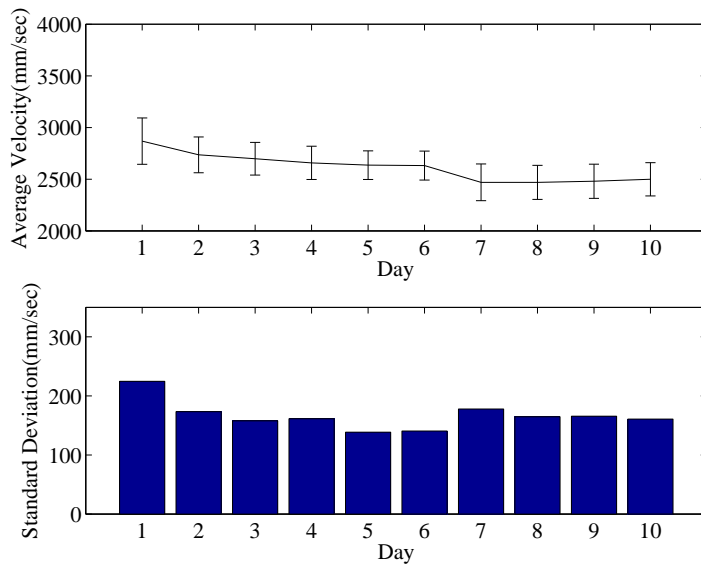


図 4.10 被験者 3 ボール速度 平均 (上) と標準偏差 (下)

#### 4.1.4 時系列の解析

ボールの頂点の高さは毎回変動している（図 4.11）が，このことから「前回ボールを高く投げすぎたので次は低く投げる」というような試みを被験者が行っているのではないかと考えられる．そこで，AR モデルを用いて前の試行がその後の試行にどの程度影響を与えているかを調査した．次数は 1 次から 4 次の場合について計算し，最適な次数は AIC を求めて決定した．その結果を表 4.4～4.6 に示す．

##### 結果

表より，全体的に相関係数の値が低い．また，次数が 1 次のとくと 4 次のとくと比較しても決定係数の値に大きな差はない．AIC の結果を踏まえると，今回の解析では AR の次数は 1 次で十分であることがわかる．

##### 考察

1 次のとときの相関係数の値が低いことから，直前の試行の結果は次の試行の結果へ影響している訳ではないことがわかる．このことは，目標とするボールの頂点の高さは試行毎に変化せずに一定であることを示していると考えられる．

また，被験者 1 の 3 日目と 5 日目や被験者 2 の 7 日目では，1 次の相関係数が正にやや高く，また決定係数もやや高い．被験者 1 の 5 日目と被験者 2 の 7 日目はボールのばらつきが大きい（4.1.1 小節の図 4.1 と 4.2）ことから，前の試行結果に次の試行結果が引きずられてしまったのではないかと考えられる．



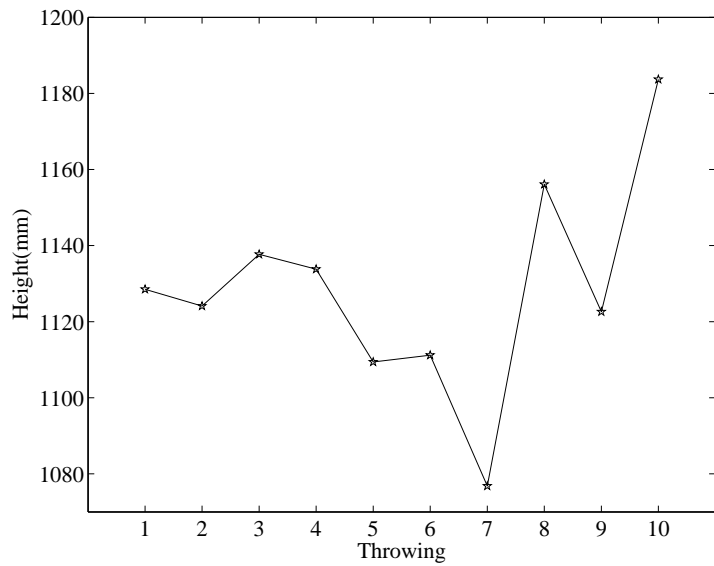


図 4.11 1 ブロック間のボールの頂点の高さの変動

表 4.4 被験者 1 AR モデルによる解析結果

| 相関係数と決定係数 |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| k\Day     | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      | 9      | 10     |
| 1         | 0      | 0.18   | 0.23   | 0.03   | 0.28   | 0.02   | 0.15   | 0.19   | -0.24  | -0.01  |
| $R^2$     | 0      | 0.03   | 0.05   | 0      | 0.07   | 0      | 0.02   | 0.04   | 0.05   | 0      |
| 1         | 0      | 0.2    | 0.23   | 0.01   | 0.29   | 0.03   | 0.14   | 0.18   | -0.24  | -0.01  |
| 2         | -0.02  | -0.11  | 0.06   | 0.36   | -0.02  | -0.1   | 0.09   | 0.12   | -0.06  | 0.02   |
| $R^2$     | 0      | 0.04   | 0.05   | 0.11   | 0.07   | 0.01   | 0.03   | 0.05   | 0.06   | 0      |
| 1         | -0.05  | 0.15   | 0.24   | 0.03   | 0.3    | 0.05   | 0.15   | 0.17   | -0.24  | -0.01  |
| 2         | -0.05  | -0.06  | 0.04   | 0.37   | -0.09  | -0.12  | 0.12   | 0.11   | -0.06  | 0.02   |
| 3         | -0.22  | -0.2   | 0.12   | -0.06  | 0.22   | 0.08   | -0.09  | 0.07   | 0      | 0.05   |
| $R^2$     | 0.06   | 0.08   | 0.07   | 0.11   | 0.11   | 0.02   | 0.04   | 0.06   | 0.06   | 0      |
| 1         | 0.05   | 0.18   | 0.23   | 0.02   | 0.26   | 0.05   | 0.15   | 0.17   | -0.24  | 0      |
| 2         | 0.03   | -0.02  | 0.05   | 0.26   | -0.07  | -0.1   | 0.12   | 0.1    | -0.07  | 0.03   |
| 3         | -0.18  | -0.25  | 0.07   | -0.15  | 0.09   | 0.07   | -0.15  | 0.06   | -0.01  | 0.06   |
| 4         | 0.27   | 0.15   | 0.27   | 0.37   | 0.32   | 0.06   | 0.11   | 0.06   | -0.05  | -0.14  |
| $R^2$     | 0.14   | 0.11   | 0.15   | 0.24   | 0.18   | 0.02   | 0.06   | 0.06   | 0.06   | 0.02   |
| AIC       |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| 1         | 456.2  | 420.35 | 430.36 | 431.14 | 457.23 | 408.58 | 423.38 | 397.13 | 390.72 | 409.17 |
| 2         | 458.18 | 421.6  | 432.15 | 426.17 | 459.21 | 409.95 | 424.88 | 398.22 | 392.46 | 411.14 |
| 3         | 456.25 | 421.02 | 433.13 | 427.89 | 458.89 | 411.5  | 426.31 | 399.84 | 394.46 | 413.01 |
| 4         | 452.9  | 421.7  | 429.65 | 420.37 | 455.36 | 413.19 | 427.46 | 401.57 | 396.29 | 413.97 |

表 4.5 被験者 2 AR モデルによる解析結果

| 相関係数と決定係数 |       |       |       |       |       |       |       |       |      |       |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|
| k\Day     | Day1  | Day2  | Day3  | Day4  | Day5  | Day6  | Day7  | Day8  | Day9 | Day10 |
| 1         | -0.03 | 0     | -0.22 | 0.09  | -0.19 | 0.02  | 0.5   | 0.21  | 0.11 | -0.13 |
| $R^2$     | 0     | 0     | 0.05  | 0.01  | 0.03  | 0     | 0.28  | 0.05  | 0.01 | 0.01  |
| 1         | -0.04 | 0.01  | -0.21 | 0.09  | -0.18 | 0.02  | 0.49  | 0.22  | 0.1  | -0.08 |
| 2         | 0.09  | -0.07 | 0.09  | -0.06 | 0.15  | 0.1   | 0.02  | -0.01 | 0.18 | 0.21  |
| $R^2$     | 0.01  | 0.01  | 0.06  | 0.01  | 0.06  | 0.01  | 0.28  | 0.05  | 0.04 | 0.06  |
| 1         | -0.05 | 0.02  | -0.23 | 0.12  | -0.23 | -0.03 | 0.49  | 0.22  | 0.07 | -0.08 |
| 2         | 0.09  | -0.07 | 0.1   | -0.04 | 0.14  | 0.08  | -0.16 | 0.02  | 0.16 | 0.2   |
| 3         | 0.13  | -0.14 | 0.13  | -0.15 | 0.19  | 0.4   | 0.35  | -0.15 | 0.15 | -0.04 |
| $R^2$     | 0.03  | 0.02  | 0.08  | 0.03  | 0.09  | 0.14  | 0.37  | 0.06  | 0.07 | 0.06  |
| 1         | -0.05 | 0.01  | -0.23 | 0.11  | -0.24 | 0     | 0.46  | 0.22  | 0.07 | -0.09 |
| 2         | 0.09  | -0.07 | 0.09  | -0.04 | 0.12  | 0.09  | -0.15 | 0.02  | 0.14 | 0.21  |
| 3         | 0.13  | -0.15 | 0.13  | -0.13 | 0.18  | 0.41  | 0.32  | -0.18 | 0.14 | -0.07 |
| 4         | -0.01 | -0.06 | -0.04 | -0.09 | 0.09  | -0.09 | 0.07  | 0.09  | 0.1  | -0.16 |
| $R^2$     | 0.03  | 0.03  | 0.08  | 0.03  | 0.09  | 0.15  | 0.38  | 0.07  | 0.07 | 0.08  |

| AIC |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|-----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1   | 503.34 | 481.73 | 489.94 | 488.67 | 488.95 | 477.68 | 487.76 | 483.01 | 466.47 | 458.84 |
| 2   | 504.82 | 483.39 | 491.44 | 490.49 | 489.58 | 479.14 | 489.72 | 485    | 466.56 | 458.19 |
| 3   | 505.64 | 484.15 | 492.34 | 491.47 | 489.61 | 472.64 | 483.71 | 485.92 | 467.23 | 460.08 |
| 4   | 507.64 | 485.89 | 494.23 | 492.98 | 491.22 | 474.29 | 485.33 | 487.59 | 468.69 | 460.58 |

表 4.6 被験者 3 AR モデルによる解析結果

| 相関係数と決定係数 |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| k\Day     | Day1  | Day2  | Day3  | Day4  | Day5  | Day6  | Day7  | Day8  | Day9  | Day10 |
| 1         | -0.08 | -0.04 | -0.04 | 0.05  | -0.09 | 0.04  | 0.08  | -0.01 | -0.03 | -0.1  |
| $R^2$     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0.01  | 0     | 0.01  | 0     | 0     | 0.01  |
| 1         | -0.08 | -0.04 | -0.04 | 0.05  | -0.07 | 0.04  | 0.08  | -0.01 | -0.03 | -0.11 |
| 2         | -0.04 | -0.04 | 0.06  | -0.19 | 0.34  | -0.03 | -0.03 | -0.04 | -0.04 | 0.09  |
| $R^2$     | 0.01  | 0     | 0.01  | 0.04  | 0.12  | 0     | 0.01  | 0     | 0     | 0.02  |
| 1         | -0.08 | -0.05 | -0.04 | 0.09  | -0.08 | 0.04  | 0.1   | -0.01 | -0.07 | -0.1  |
| 2         | -0.04 | -0.04 | 0.08  | -0.19 | 0.34  | -0.03 | -0.03 | -0.04 | -0.03 | 0.1   |
| 3         | -0.04 | -0.05 | -0.12 | 0.17  | 0.04  | -0.04 | -0.16 | 0.04  | -0.34 | 0.2   |
| $R^2$     | 0.01  | 0     | 0.02  | 0.06  | 0.12  | 0.01  | 0.04  | 0     | 0.11  | 0.06  |
| 1         | -0.09 | -0.05 | -0.04 | 0.09  | -0.1  | 0.05  | 0.09  | -0.01 | -0.06 | -0.11 |
| 2         | -0.03 | -0.04 | 0.08  | -0.2  | 0.28  | -0.04 | -0.03 | -0.04 | -0.03 | 0.1   |
| 3         | -0.03 | -0.05 | -0.12 | 0.17  | 0.04  | -0.05 | -0.15 | 0.04  | -0.34 | 0.21  |
| 4         | -0.14 | -0.04 | 0.04  | -0.06 | 0.2   | 0.05  | -0.17 | 0.03  | 0.03  | 0.07  |
| $R^2$     | 0.04  | 0.01  | 0.02  | 0.06  | 0.15  | 0.01  | 0.07  | 0     | 0.11  | 0.06  |

| AIC |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|-----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1   | 458.03 | 445.18 | 426.2  | 432.46 | 416.92 | 407.98 | 395.88 | 384.25 | 405.04 | 393.62 |
| 2   | 459.89 | 447.11 | 427.98 | 432.49 | 411.96 | 409.92 | 397.84 | 386.15 | 406.95 | 395.12 |
| 3   | 461.74 | 449    | 429.18 | 433.16 | 413.87 | 411.79 | 398.2  | 388.06 | 402.59 | 394.68 |
| 4   | 461.98 | 450.91 | 431.07 | 434.98 | 414.12 | 413.64 | 398.22 | 389.99 | 404.53 | 396.41 |

## 4.2 腕の動作の解析結果

### 4.2.1 被験者ごとの腕の動き

まずは被験者ごとの投げ上げ方の特徴を調査した。各被験者の1日目と10日目の平均的な投げ上げ動作の様子を図4.12に示す。図中において、青線は投げ上げ運動開始時刻の平均的な腕の姿勢を表しており、黒線は投げ上げ運動開始時刻より300msec前、赤線は投げ上げの瞬間の姿勢を表している。各点線は投げ上げ運動開始から250msec後までの姿勢を25msec毎に表しており、投げ上げ後の姿勢は赤い点線で示している。

以下に訓練による変化の特徴を被験者ごとに記す。

被験者1

- 投げ上げ動作前に反動をつける量が増加した。
- 運動開始から投げ上げまでの時間が減少した。

被験者2

- 投げ上げ動作前に反動をつける量が減少した。
- 運動開始から投げ上げまでの時間はあまり変わらない。

被験者3

- 運動開始から投げ上げまでの時間が増加した。
- 投げ上げ動作が腕を前に突き出すように変化した。

といった事項が挙げられる。

以上から、投げ上げの動作の特徴は3者3様であり、共通の傾向が見られないことが分かった。

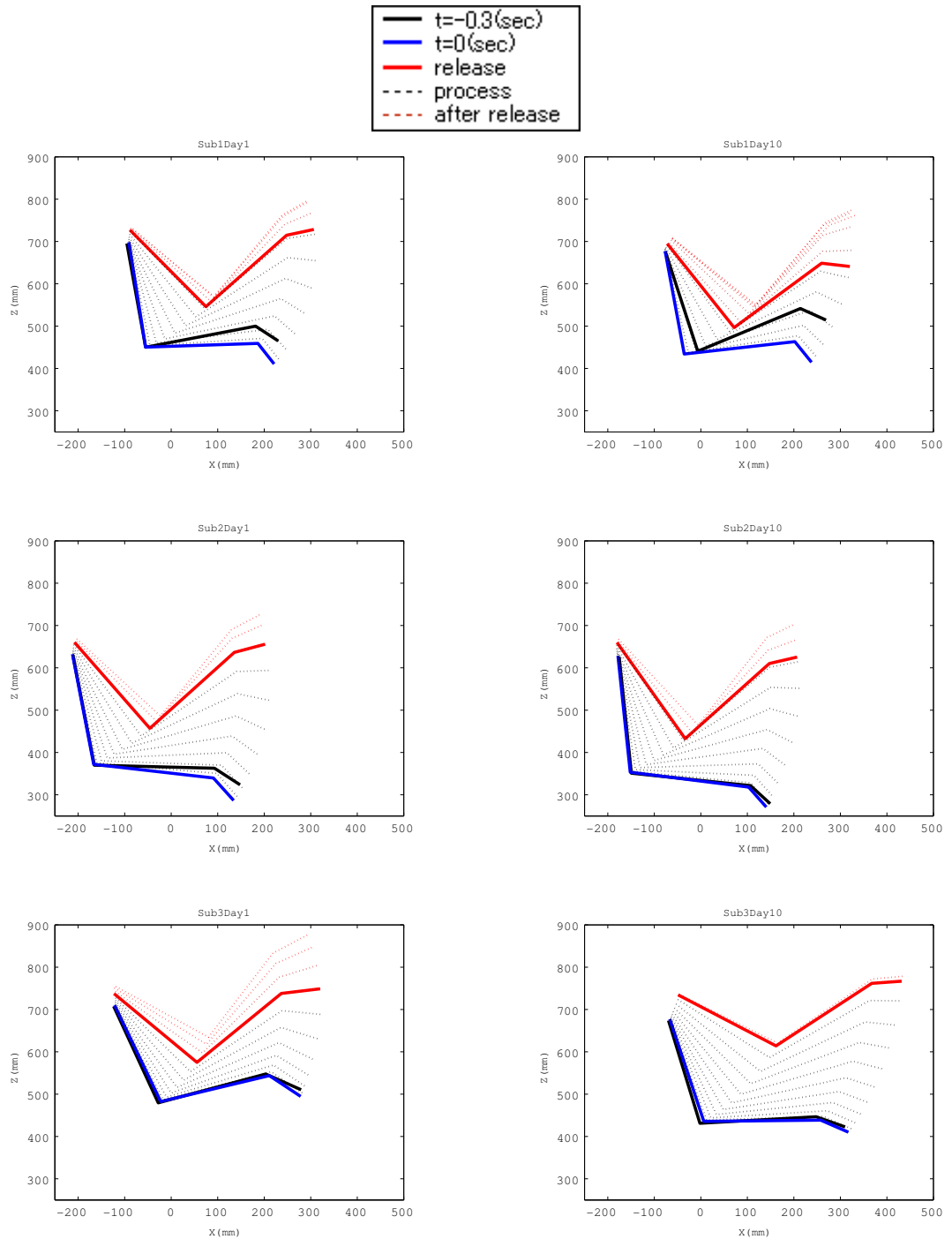


図 4.12 被験者 1・1 日目 (上) と 10 日目 (下) の平均的な投げ上げ動作

## 4.2.2 部位ごとの解析

腕全体の投げ上げ動作の特徴においては、被験者共通の日数の経過による変化はなかった。そこで、部分ごとに解析を行い、被験者に共通の傾向を探った。

解析は、まず大体の傾向を把握するために手首関節角と肘関節角に関して行った。また、ボール保持中にボールに近い部位である、示指付け根に加え、肘関節、肩関節に関しても解析を行った<sup>\*2</sup>

以降では、投げ上げの時刻を  $T_R$  と表現する。

### 手首関節角の解析結果

手首関節角の解析結果を以下に示す。被験者被験者ごとに傾向を説明する。

まず、被験者 1 では、図 4.13 上段より手首関節角動作の特徴として、

- 投げ上げ動作前 ( $T=0$  より前) に反動をつける動作を行う
- 投げ上げ動作中 ( $T=0$  から  $T_R$  の間)、手首関節角が反る方向に動かず、増加する方向にのみ変化する
- 平均軌道の標準偏差が、投げ上げの時刻にわずかに増加する
- 投げ上げ後に標準偏差が大きく増加する

ことが挙げられる。

また、日付間で比較すると、

- 反動をつける量が増加する
- 手首関節角が増加するタイミングが早くなる
- 投げ上げ後 ( $T_R$  より後の時刻) の冗長な動作が増加する
- 投げ上げ動作開始から投げ上げまでにかかる時間が減少する (図 4.14 左)
- 前半の日では標準偏差の小ピークの時刻に投げ上げを行っていたが、後半ではピーク前に投げ上げを行うようになる
- 標準偏差が減少する

ことが挙げられる。

次に、被験者 2 では、図 4.13 中段より、

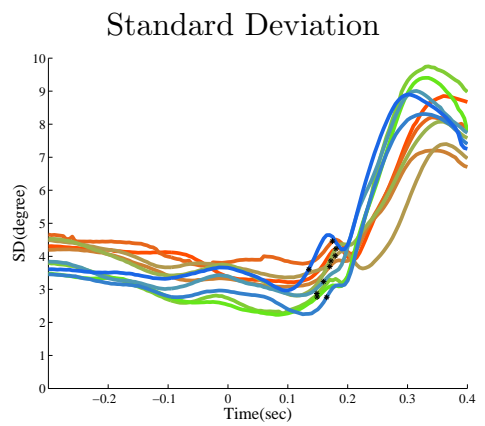
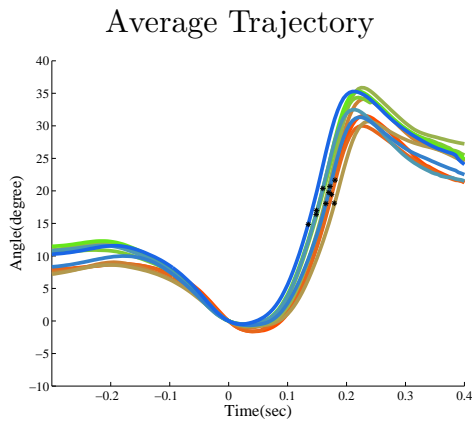
- 投げ上げ動作前に反動をつける動作を行う

---

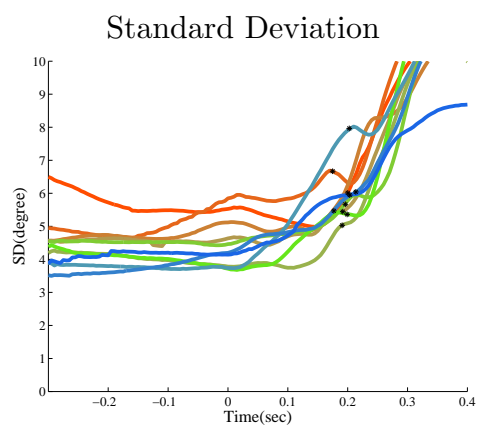
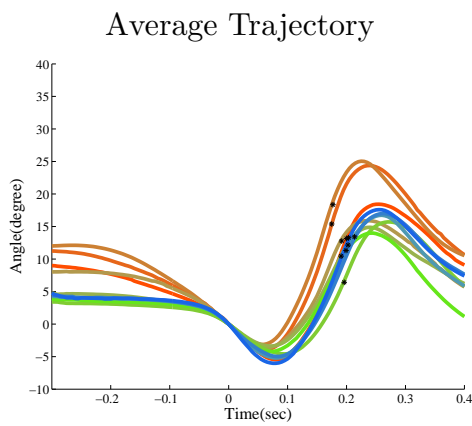
<sup>\*2</sup> 手首関節の解析も行ったが、示指付け根と傾向が酷似していたため、省略する。



Subject 1



Subject 2



Subject 3

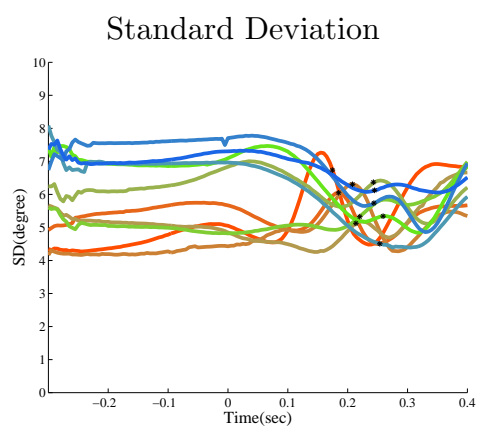
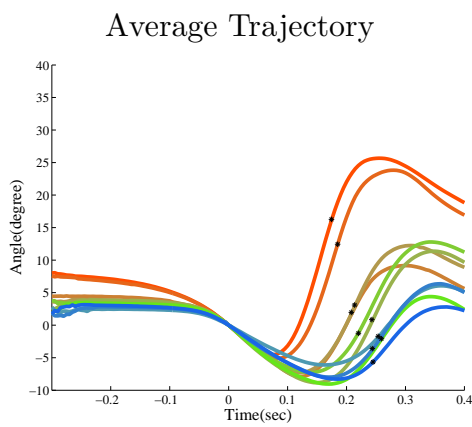


図 4.13 手首関節角の時間変化の様子 [図中の\*は平均的な投げ上げの時刻を示している。なお、各平均軌道は  $T=0$  の角度でアライメントしてある。]

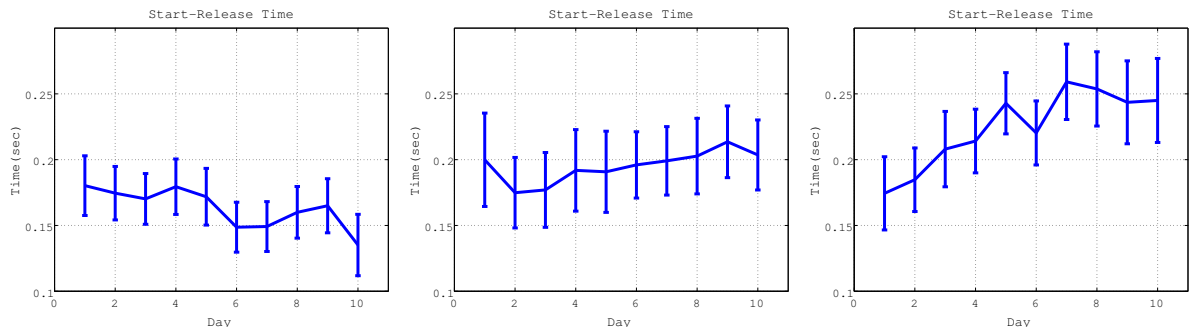


図 4.14 投げ上げ動作開始から投げ上げまでにかかった時間 [左から被験者 1, 被験者 2, 被験者 3]

- 投げ上げ動作中に, 手首関節角が, まず反る (減少する) 方向に変化した後に増加する
- 平均軌道の標準偏差が, 投げ上げの時刻にわずかに増加する
- 投げ上げ後に標準偏差が急増する

ことが挙げられる.

また, 日付間で比較すると,

- 反動をつける量が減少する
- 投げ上げ動作中の反り速度 (傾き) および反り量が増加する
- 標準偏差が減少する
- 投げ上げ動作開始から投げ上げまでにかかる時間が増加する (図 4.14 中央)

ことが挙げられる.

最後に, 被験者 3 の投げ上げ動作の特徴は, 図 4.13 下段より,

- 投げ上げ動作前に反動をつける動作を行っている
- 投げ上げ動作中に, 手首関節角が, まず反る (減少する) 方向に変化した後に増加する

ことが挙げられる.

また, 日付間で比較すると,

- 反動をつける量が減少する
- 投げ上げ動作中の反り速度 (傾き) は減少するが, 反り量は増加する
- 反りから戻る量が減少する
- 標準偏差が増加する

- 標準偏差が、初期の日は投げ上げ時刻付近で増加のピークを迎えているが、後半の日では動作開始から投げ上げに向かってばらつきが減少している
- 投げ上げ動作開始から投げ上げまでにかかる時間が増加する (図 4.14 右)

ことが挙げられる。

以上より、被験者共通の傾向として、投げ上げの動作前の反動をつける動作及び投げ上げの動作に手首を使用していることがわかった。但し、どの被験者も反動の量は手首関節角で表現すると  $10^\circ$  以下程度の微小なものであり、投げ上げ動作中の手首の振る舞いは被験者間で異なる。

また、被験者 3 人に共通する日数の経過による変化はない。

#### 肘関節角の解析結果

肘関節角の解析結果を以下に示す。図 4.15 において、degree の+の方向は  $T=0$  の時刻よりも腕が伸びる方向、-の方向は  $T=0$  の時刻よりも腕が曲がる方向である。

被験者ごとに特徴を説明する。図 4.15 上段より、被験者 1 の肘関節角動作の特徴として、

- 投げ上げ動作前 ( $T=0$  より前) に反動をつける動作を行っている
- 肘関節角が曲がる方向に動く
- 標準偏差に、投げ上げ動作開始時刻から投げ上げ時刻までの間で減少傾向がある

ことが挙げられる。

また、日付間で比較すると、

- 反動をつける量が増加する
- 肘関節角の動作のタイミングが早くなる
- 投げ上げ後 ( $T_R$  より後の時刻) の冗長な動作が減少する
- 軌道平均の標準偏差には減少傾向がある

ことが挙げられる。

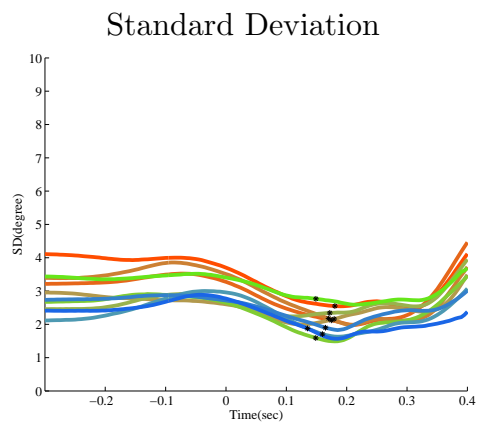
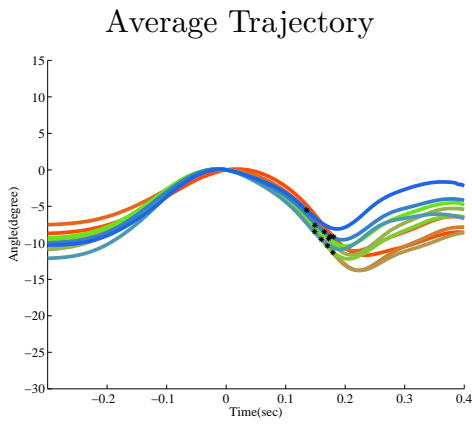
次に、被験者 2 の肘関節角動作の特徴として、図 4.15 中段より、

- 肘関節角が曲がる方向に動く
- 投げ上げ動作開始時刻から投げ上げ時刻までの間での肘関節角の変化量が他の被験者と比較して大きい (図 4.16)

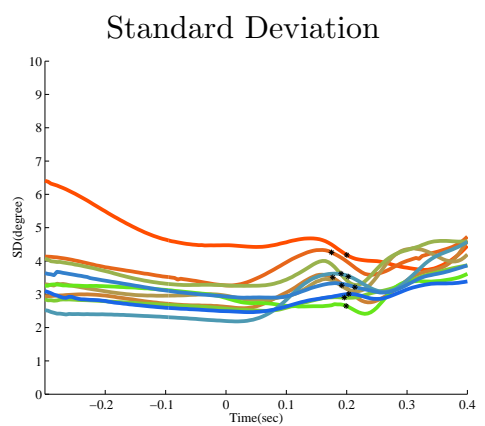
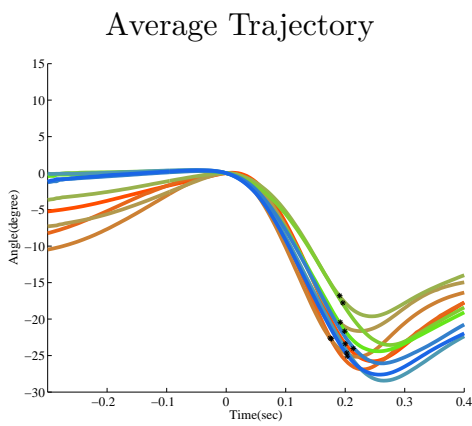




Subject 1



Subject 2



Subject 3

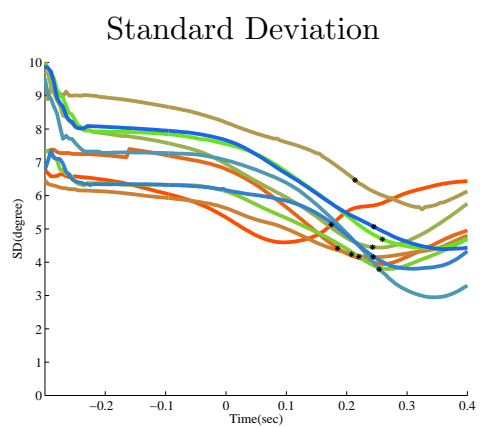
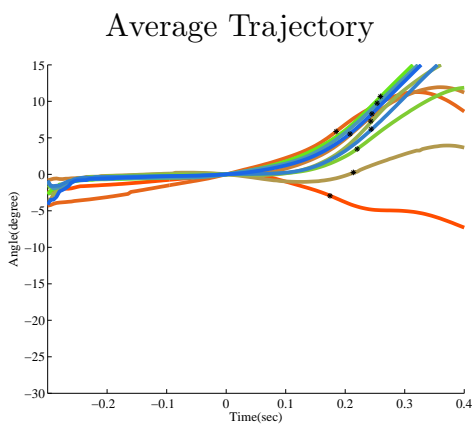


図 4.15 肘関節角の時刻変化の様子 [図中の\*は平均的な投げ上げの時刻を示している．なお，各平均軌道は  $T=0$  の角度でアライメントしてある．]

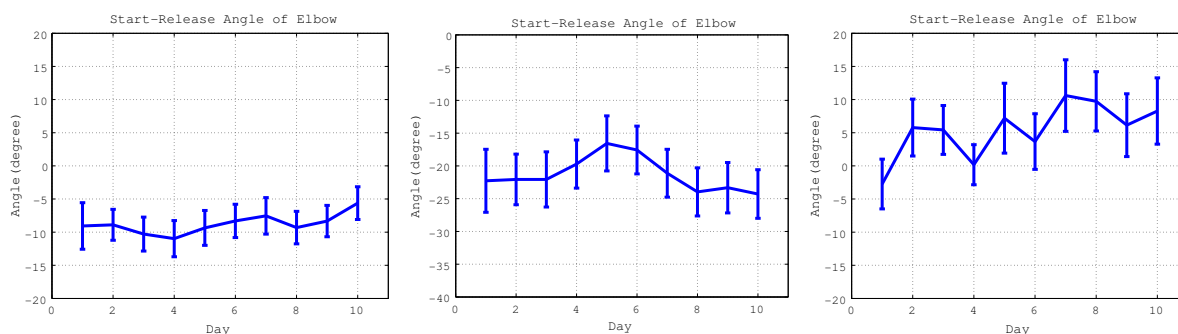


図 4.16 投げ上げ動作開始から投げ上げまでにかかった時間 [左から被験者 1, 被験者 2, 被験者 3]

ことが挙げられる。

また、日付間の変化では、

- 反動量が減少する
- 標準偏差が減少する

ことが挙げられる。

被験者 3 では、投げ上げの軌道に一貫した特徴が無い (図 4.15 下段左) が、平均軌道の標準偏差 (図 4.15 下段右) には、投げ上げ動作開始時刻から投げ上げ時刻までの間で減少傾向がある。

日付間で比較すると、図 4.15 下段より、

- 初日のみ肘が曲がる方向に動作するが、2 日目以降は伸びる方向に動作する
- 初期状態の肘関節角が大きくなる (図 4.17 右)

している。ことが挙げられる。

以上より、被験者共通の傾向として、投げ上げの動作に肘を使用していることが挙げられる。但し、肘関節の投げ上げ動作中の振り舞いは被験者間で異なる。また、被験者 3 人に共通する日数の経過による変化はない。

#### 示指付け根の解析結果

以下に示指付け根の解析結果を示す。なお、図 4.20 ではスケールが異なっている。

図 4.18, 4.20 より、示指付け根の動作の特徴は被験者 3 人に共通して、

- 投げ上げ動作中 ( $T=0$  から  $T_R$  の間)、体に対して前進しつつ鉛直上方向に動作する

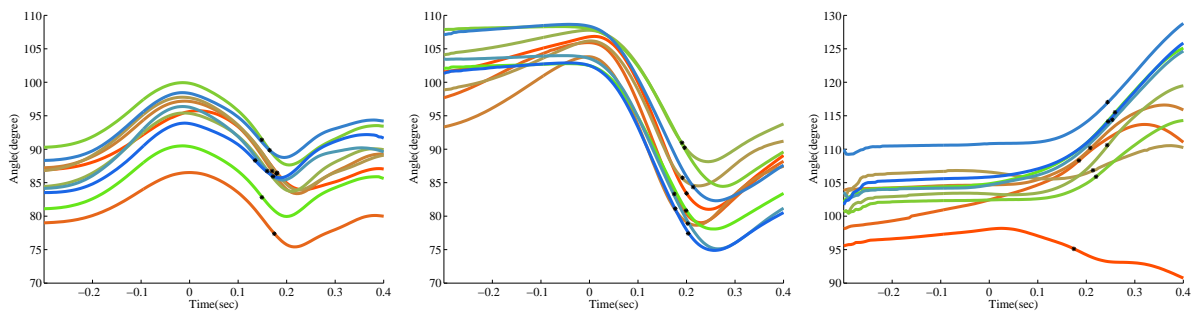


図 4.17 T=0 の角度でアライメントする前の肘関節角の平均軌道 [左から被験者 1, 被験者 2, 被験者 3]

- 鉛直方向では、投げ上げ動作開始後に標準偏差が急増し、投げ上げの時刻付近でそのピークを迎える (図 4.20 右側)
- 鉛直方向のばらつきは前後方向のばらつき (図 4.18 右側) と比較して大きい

ことが挙げられる。

訓練による変化は被験者ごとに異なるため、個別に説明する。

まず、被験者 1 の示指付け根動作を前半の日と後半の日で比較すると、

- 前方に進む速度 (傾き) が減少する (図 4.18 上段)
- 前後方向の動作の標準偏差には減少傾向がある (図 4.18 上段)
- 左右方向の動作の標準偏差には減少傾向がある (図 4.19 上段)
- 鉛直方向の動作の標準偏差には、初日を除いて増加傾向がある (図 4.20 上段)

ことが挙げられる。

また、被験者 2 の変化の特徴は、

- 前方に進む速度 (傾き) が減少する (図 4.18 中段)
- 鉛直上方向に進む速度 (傾き) が減少する (図 4.20 中段)
- 前後方向の動作の標準偏差には減少傾向がある (5, 9 日目除く) (図 4.18 中段)
- 鉛直方向の動作の標準偏差には減少傾向がある (5, 7 日目除く) (図 4.20 中段)

ことが挙げられる。

被験者 3 の変化の特徴は、

- 投げ上げ動作開始から投げ上げ時刻までの前方への変化量が日増しに増加する (図 4.18 下段)

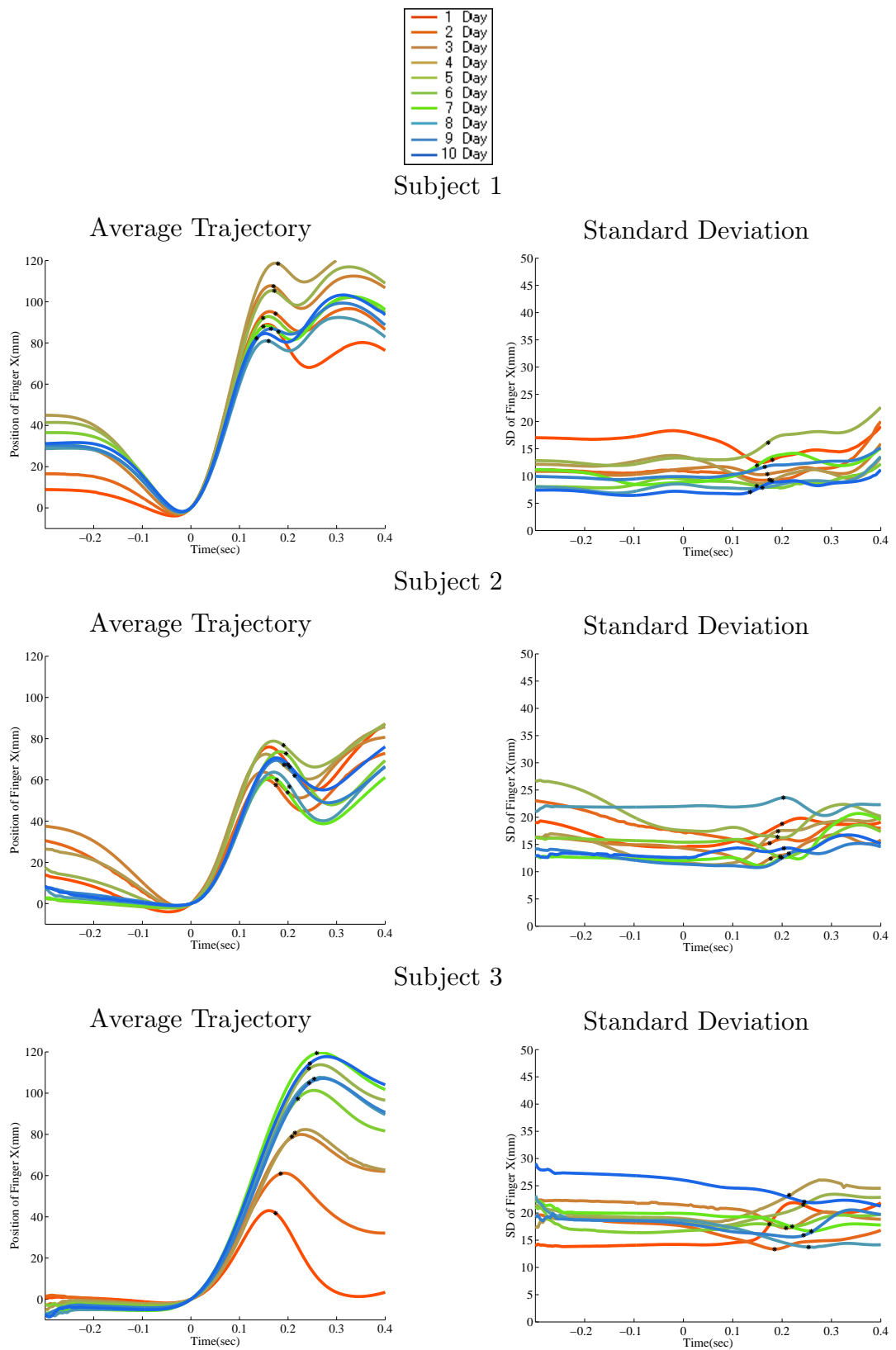
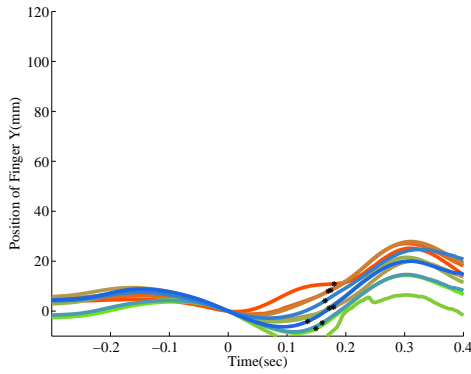


図 4.18 示指付け根の X 方向の時間変化の様子 [図中の \* は投げ上げの時刻を示している．なお，各平均軌道は T=0 の位置でアライメントしてある．]

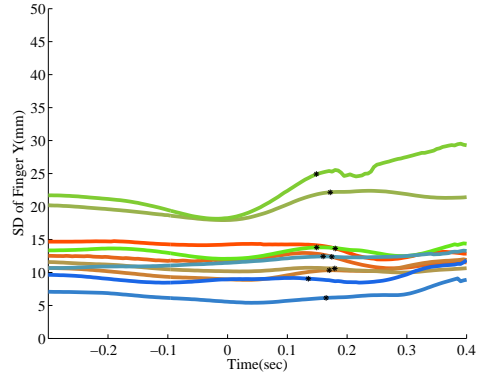


Subject 1

Average Trajectory

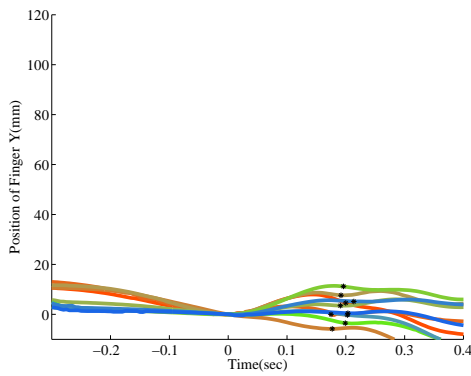


Standard Deviation

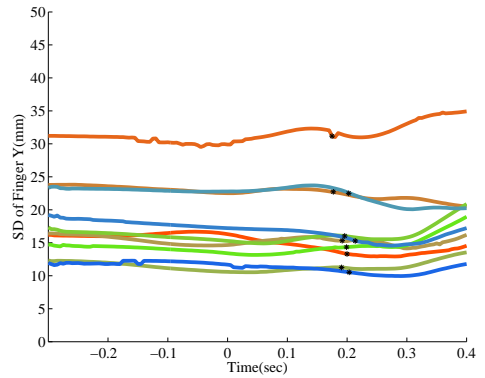


Subject 2

Average Trajectory

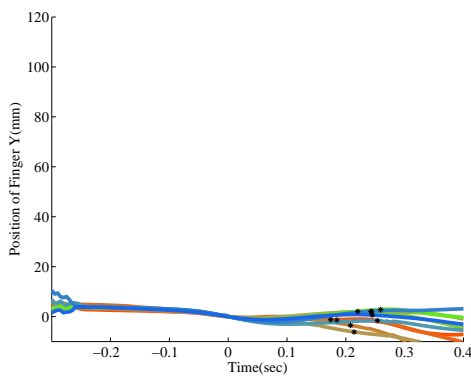


Standard Deviation



Subject 3

Average Trajectory



Standard Deviation

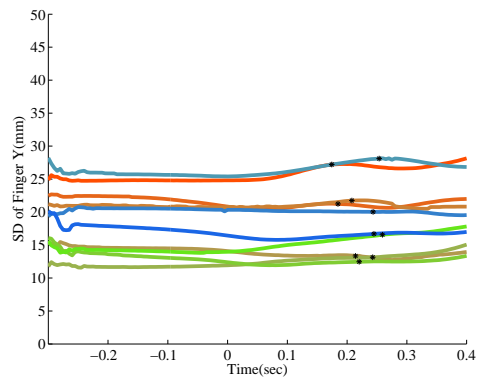
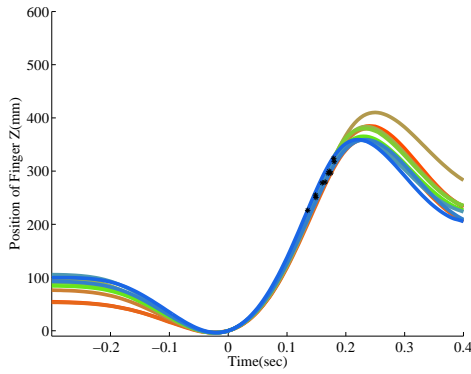


図 4.19 示指付け根の Y 方向の時間変化の様子 [図中の \* は投げ上げの時刻を示している。なお、各平均軌道は  $T=0$  の位置でアライメントしてある。]

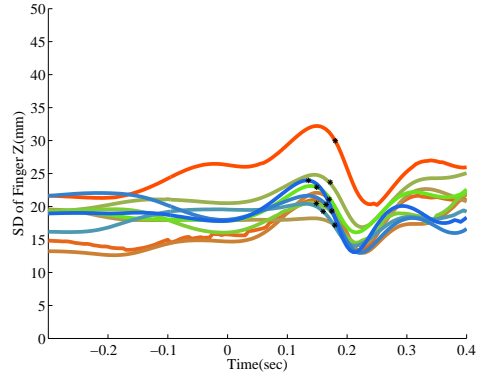


Subject 1

Average Trajectory

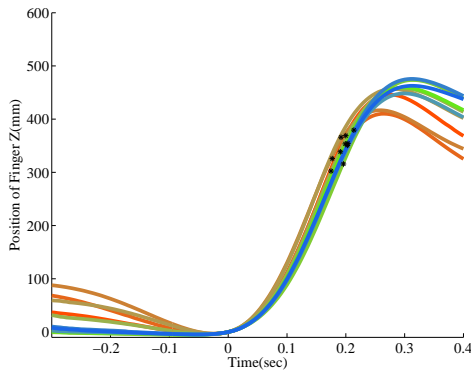


Standard Deviation

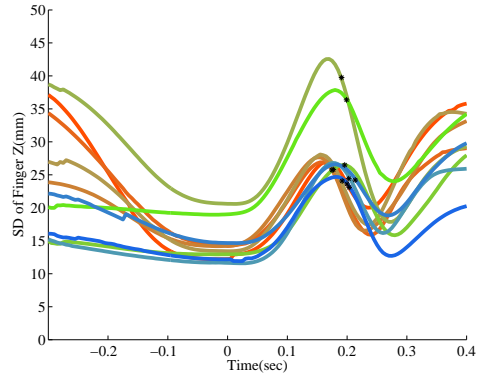


Subject 2

Average Trajectory

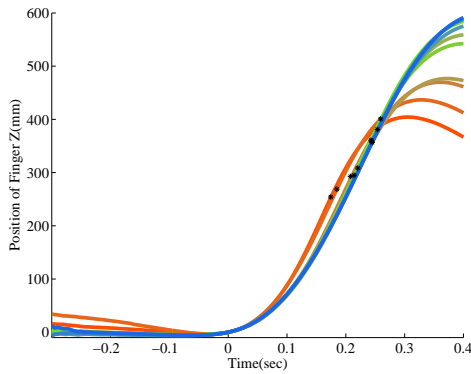


Standard Deviation



Subject 3

Average Trajectory



Standard Deviation

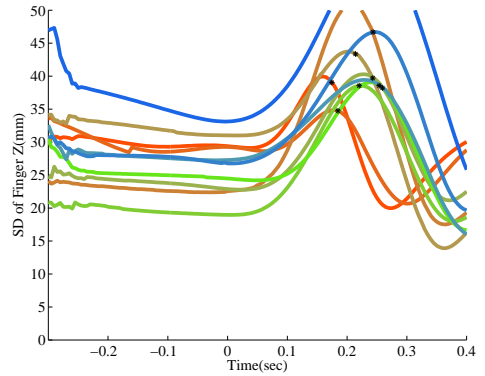


図 4.20 示指付け根の Z 方向の時間変化の様子 [図中の \* は投げ上げの時刻を示している．なお，各平均軌道は  $T=0$  の位置でアライメントしてある．]

- 前方に進む速度（傾き）が増加する（図 4.18 中段）
- 鉛直方向へは，3 日目以降ほとんど軌道が変化していない（図 4.20 下段）

ことが挙げられる．

#### 肘関節の解析結果

以下に肘関節の 3 次元の位置解析結果を示す．なお，図 4.23 ではスケールが異なっている．図 4.21,4.23 より，肘関節の動作の特徴は，3 人の被験者に共通して

- 投げ上げ動作中 ( $T=0$  から  $T_R$  の間)，体に対して前進しつつ鉛直上方向に動作する
- 鉛直方向では，投げ上げ動作開始後に標準偏差が急増し，投げ上げの時刻付近でその傾きが変化する（図 4.23 右側）
- 鉛直方向のばらつきは前後方向のばらつき（図 4.21 右側）と比較して小さい

ことが挙げられる．

日数の経過による変化は被験者ごとに異なるため，個別に説明する．

まず，被験者 1 の肘関節動作の訓練前と訓練後を比較すると，図 4.21，図 4.22，図 4.23 より，

- 後方に肘をスライドさせて反動をつける動作を行う（左右，鉛直方向では変化なし）
- 鉛直方向への移動速度（傾き）が徐々に増加する
- 前後方向の動作の標準偏差には減少傾向がある
- 鉛直方向の動作の標準偏差には増加傾向がある

ことが挙げられる．

次に，被験者 2 では，図 4.21，図 4.22，図 4.23 中段より，

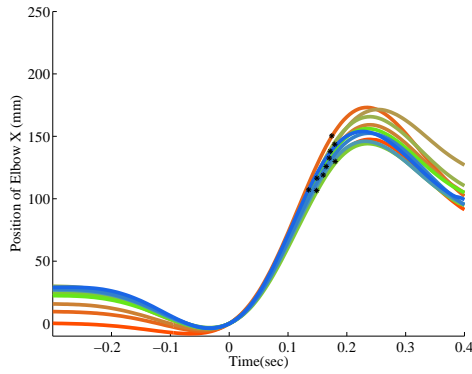
- 後方に肘をスライドさせて反動をつける動作量が徐々に減少し，6 日目以降は行わない（左右，鉛直方向では変化なし）
- 前後方向と鉛直方向への移動速度の変化のタイミングが遅くなる
- 左右方向の動作の標準偏差には増加傾向がある
- 鉛直方向の動作の標準偏差には増加傾向がある

ことが挙げられる．

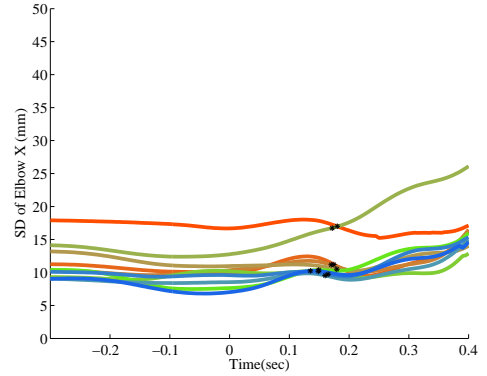


Subject 1

Average Trajectory

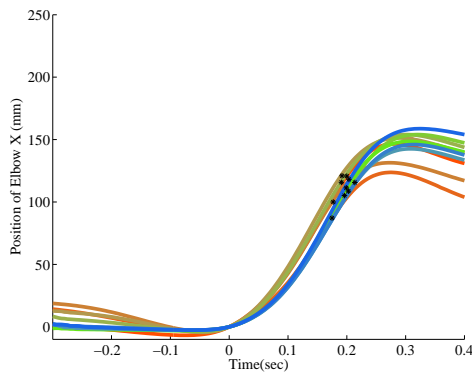


Standard Deviation

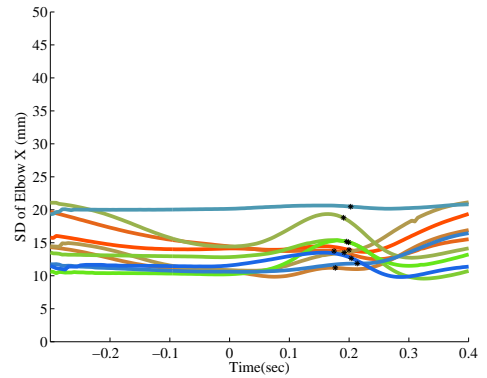


Subject 2

Average Trajectory

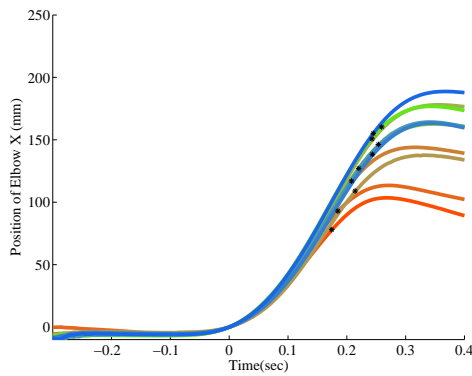


Standard Deviation



Subject 3

Average Trajectory



Standard Deviation

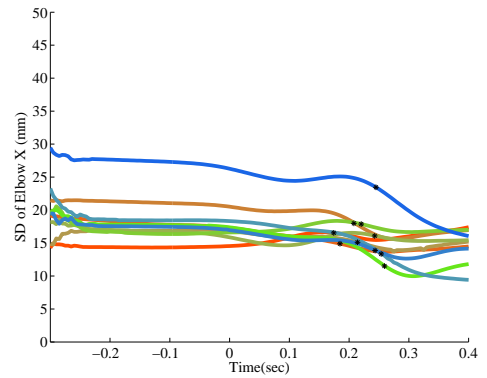


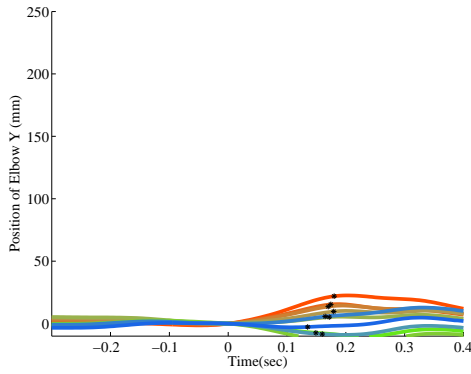
図 4.21 肘関節の X 方向の時間変化の様子 [図中の \* は投げ上げの時刻を示している . なお , 各平均軌道は  $T=0$  の位置でアライメントしてある . ]



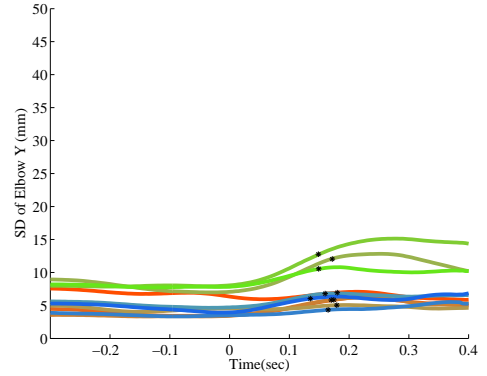


Subject 1

Average Trajectory

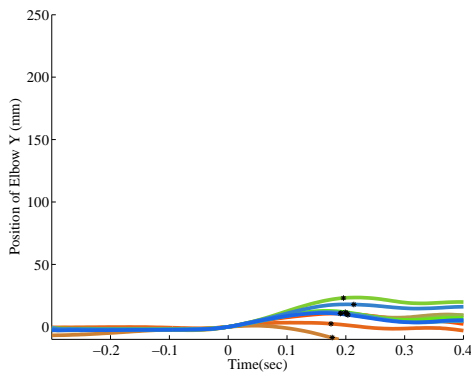


Standard Deviation

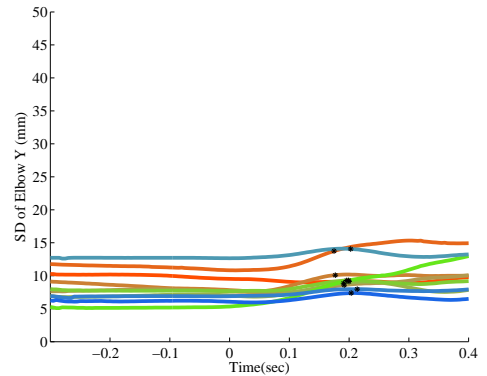


Subject 2

Average Trajectory

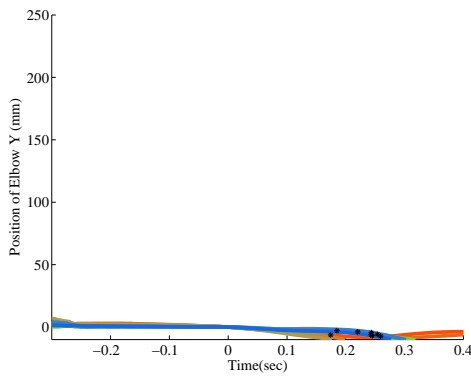


Standard Deviation



Subject 3

Average Trajectory



Standard Deviation

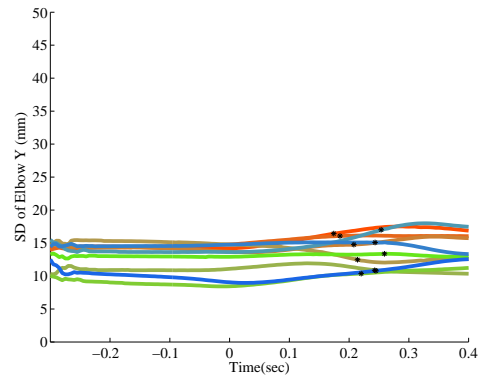
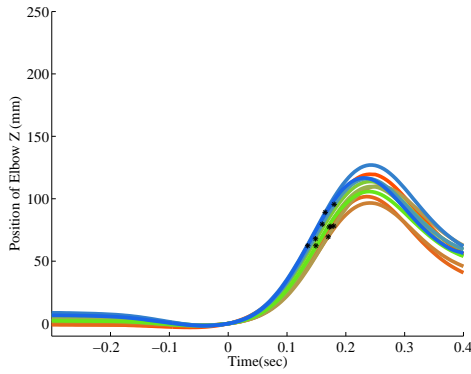


図 4.22 肘関節の Y 方向の時間変化の様子 [図中の \* は投げ上げの時刻を示している . なお , 各平均軌道は T=0 の位置でアライメントしてある . ]

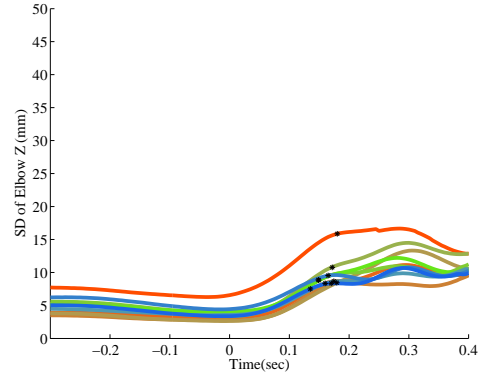


Subject 1

Average Trajectory

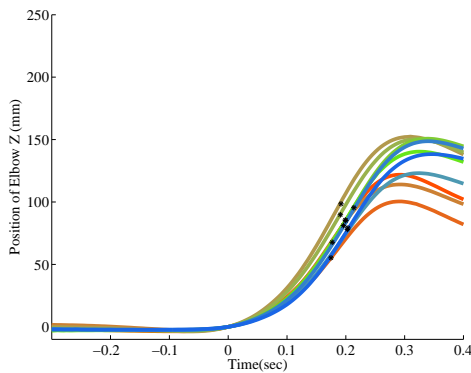


Standard Deviation

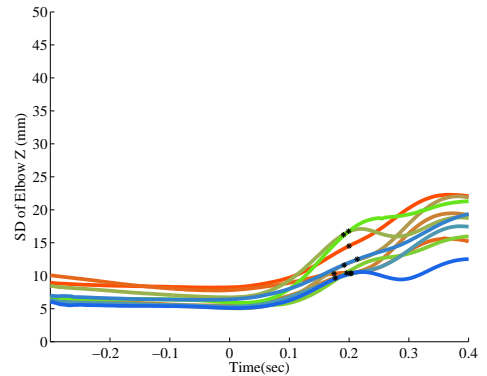


Subject 2

Average Trajectory

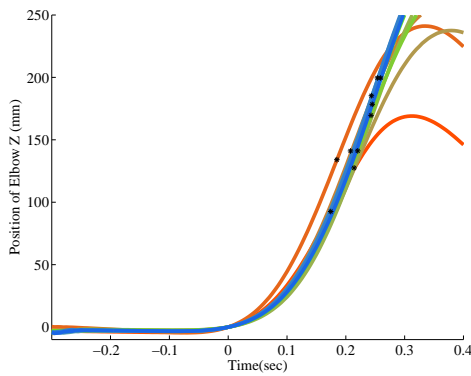


Standard Deviation



Subject 3

Average Trajectory



Standard Deviation

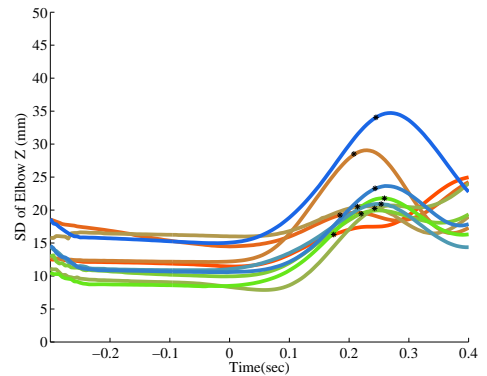


図 4.23 肘関節の Z 方向の時間変化の様子 [図中の \* は投げ上げの時刻を示している . なお , 各平均軌道は  $T=0$  の位置でアライメントしてある . ]

最後に，被験者 3 では，図 4.21，図 4.22，図 4.23 下段より，

- 投げ上げ運動開始から投げ上げ時刻までの間の，前方への移動量が増加する
- 投げ上げ運動開始から投げ上げ時刻までの間の，上方への移動量が増加する
- 前後，左右，鉛直，どの方向にも動作の標準偏差に特徴的な変化が無い

ことが挙げられる．

### 肩の解析結果

以下に肩の 3 次元位置解析結果を示す．ボールの投げ上げ運動は肩から先のみで行える運動であるが，肩は重心を保つために前後方向に動くと思われる．

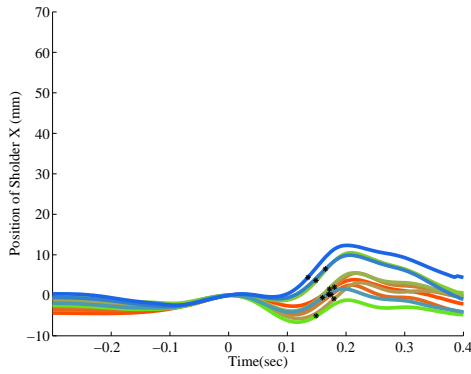
図 4.24,4.25,4.26 より，どの被験者の肩も投げ上げ動作中 ( $T=0$  から  $T_R$  までの間)，前後，鉛直方向に数センチのスケールで動いているが，左右方向にはほとんど動いていない．

また，被験者 1 は前後方向の動きが，後半の日の方が増加しているが，被験者 2 は逆に減少している。

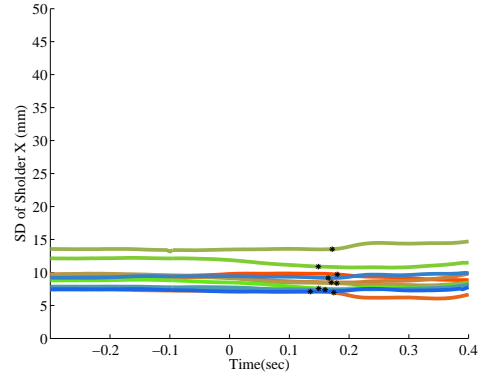


Subject 1

Average Trajectory

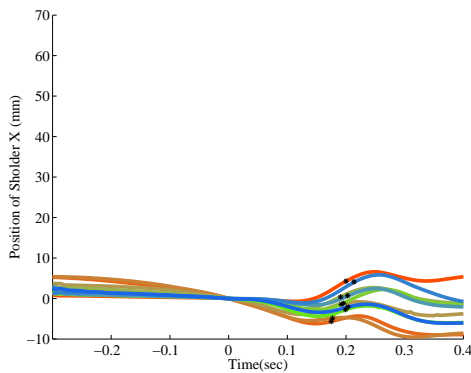


Standard Deviation

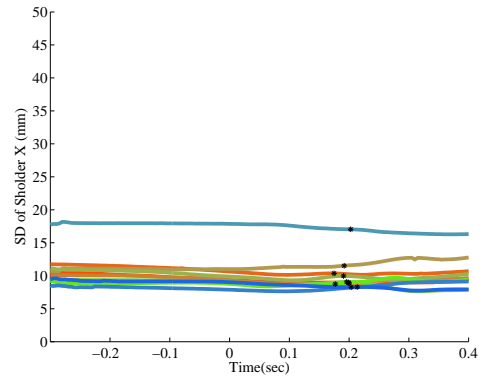


Subject 2

Average Trajectory

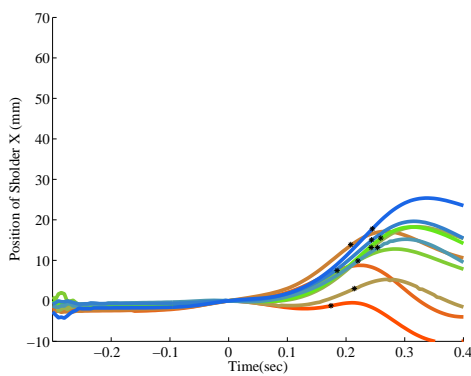


Standard Deviation



Subject 3

Average Trajectory



Standard Deviation

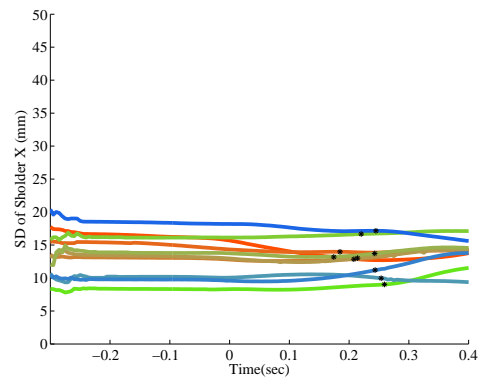
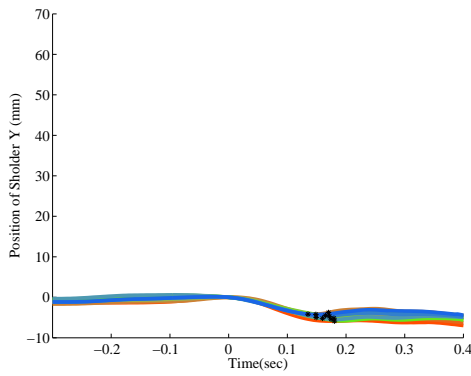


図 4.24 肩の X 方向の時間変化の様子 [図中の \* は投げ上げの時刻を示している .  
 なお , 各平均軌道は T=0 の位置でアライメントしてある . ]

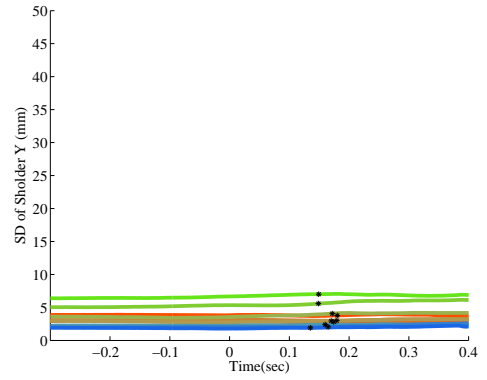


Subject 1

Average Trajectory

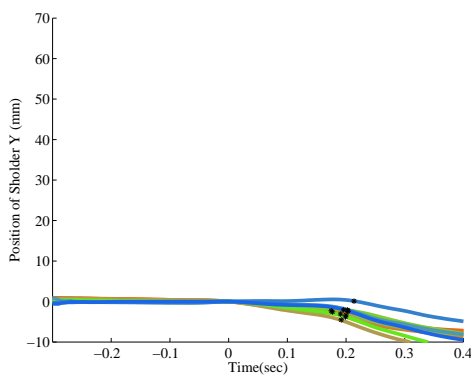


Standard Deviation

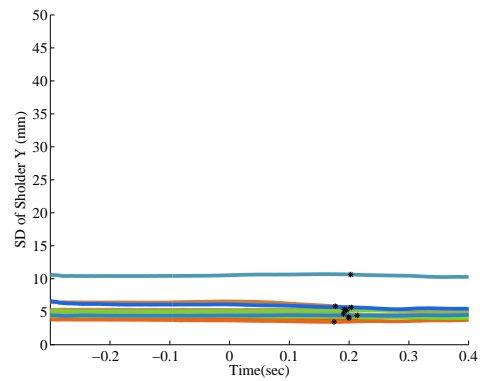


Subject 2

Average Trajectory

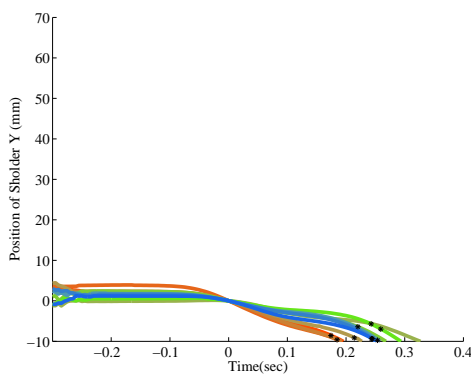


Standard Deviation



Subject 3

Average Trajectory



Standard Deviation

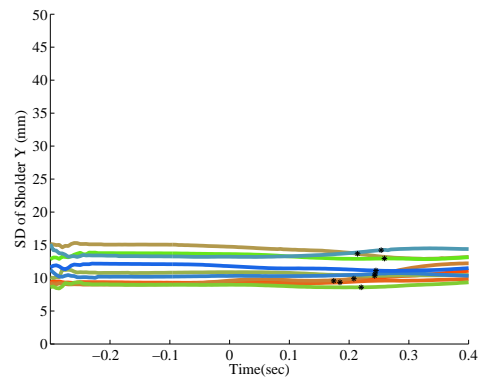
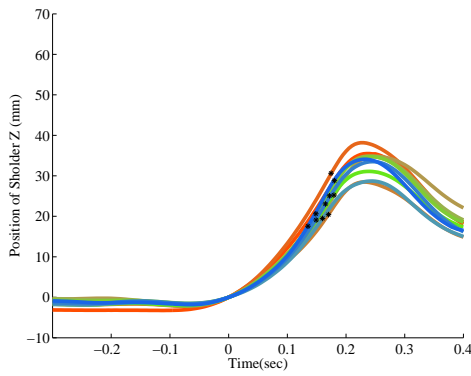


図 4.25 肩の Y 方向の時間変化の様子 [図中の \* は投げ上げの時刻を示している .  
 なお , 各平均軌道は T=0 の位置でアライメントしてある .]

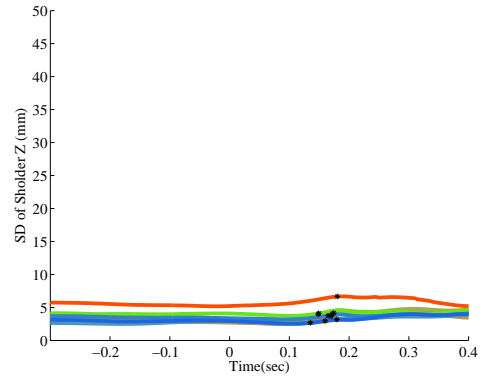


Subject 1

Average Trajectory

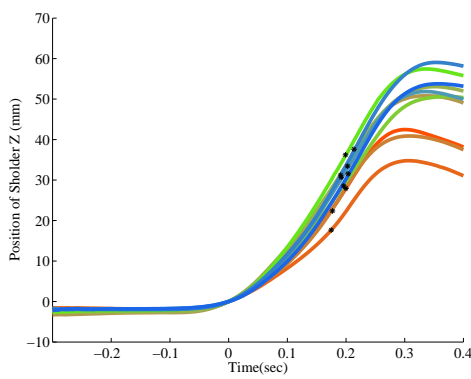


Standard Deviation

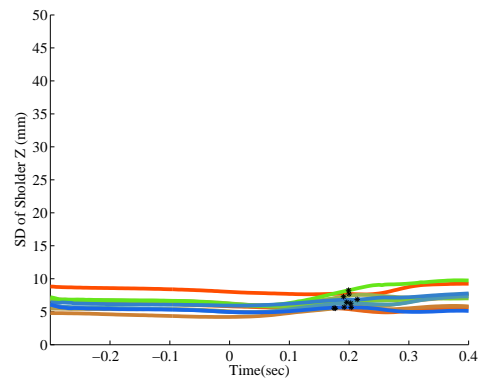


Subject 2

Average Trajectory

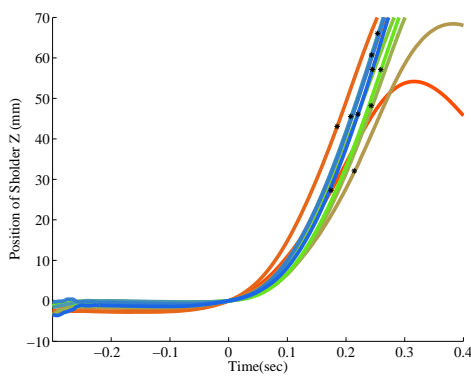


Standard Deviation



Subject 3

Average Trajectory



Standard Deviation

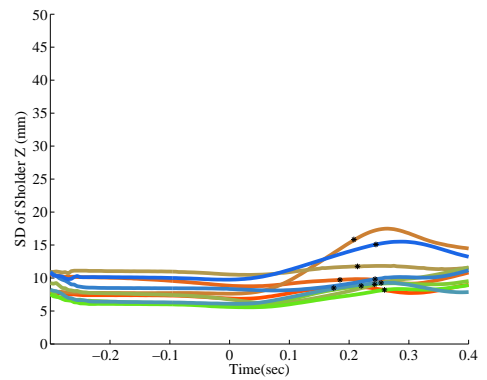


図 4.26 肩の Z 方向の時間変化の様子 [図中の \* は投げ上げの時刻を示している .  
 なお , 各平均軌道は T=0 の位置でアライメントしてある . ]

表 4.7 平均軌道とばらつきの変化

|         | 被験者 1 |    | 被験者 2 |    | 被験者 3 |    |
|---------|-------|----|-------|----|-------|----|
|         | AV    | SD | AV    | SD | AV    | SD |
| 手の平     | 小     |    | 小     |    | 大     |    |
| 前腕      | 小     |    | 小     |    | 小     |    |
| 肘角度     | 小     |    | —     |    | —     | —  |
| 手首角度    | 小     |    | 小     |    | 大     |    |
| 示指付け根 X | 中     |    | 中     |    | 大     | —  |
| 示指付け根 Y | —     |    | —     | —  | —     | —  |
| 示指付け根 Z | 小     |    | 小     |    | 小     | —  |
| 手首 X    | 中     |    | 中     |    | 大     |    |
| 手首 Y    | —     | —  | —     | —  | —     | —  |
| 手首 Z    | 小     | —  | 小     |    | 小     |    |
| 肘 X     | 小     |    | 小     |    | 小     | —  |
| 肘 Y     | —     | —  | —     |    | —     | —  |
| 肘 Z     | 小     | —  | 小     |    | 小     |    |
| 肩       | —     | —  | —     | —  | —     | —  |

AV:平均軌道の変化の大きさ

SD:ばらつきの増減傾向

#### 部位ごとの解析結果のまとめ

解析した部位の平均軌道と軌道のばらつきの変化をまとめて表 4.7 に示す。この表より、被験者 1,2 の平均軌道の変化が小さく、そのばらつきには減少傾向があることがわかる。これとは対照的に、被験者 3 は平均軌道の変化が大きく、軌道のばらつきも増加傾向がある。また、どの被験者においても肘、肩の平均軌道に大きな変化はみられない。

#### 環境学習の能動的制御に基づく仮説の検討

手首の関節角を例に挙げて考える。図 4.13 より、被験者 2 は 1 日目から 2 日目にかけて平均軌道が変化しているが、4 日目以降は 1 日目と同様の軌道に戻っている。また、被験者 3 は日々軌道が変化しているが、2 日目から 3 日目にかけての軌道の変化が特に顕著

である．このようなことから，彼らはより良い投げ上げ動作を求めて試行錯誤しているといつてよいだろう．

試行錯誤がばらつきの原因であるならば，運動軌道の変化に伴ってボールのばらつきが増加するはずである．しかし，被験者 2 の 1 日目と 2 日目及び 3 日目と 4 日目のボールの頂点のばらつきを比較すると，2 日目，4 日目の方がばらつきが少ない (図 4.2)．また，被験者 3 の 2 日目と 3 日目のボールの頂点のばらつきを比較しても，3 日目のばらつきは減少している (図 4.2)．これらのことから，試行錯誤は運動のばらつきの主たる要因ではないと考えられる．

#### 4.2.3 動作のばらつきの時間的变化

熟練者の運動においては，課題の目的に直接関係する軌道のばらつきが他の部分でのばらつきに比べて小さいといわれている [18 [11]]．「薪割り」を例に挙げれば，斧を振り下ろした地点を一定に保つ必要がある．このような場面では実際に動作のばらつきが小さいが，斧を振り上げた位置や振り下ろす途中の軌道はばらついている，ということが知られている．

投げ上げ動作について同じ考察を行うと，薪割りにおける斧を振り下ろした位置に相当するのは，投げ上げ運動における投げ上げの瞬間であると考えられる．

しかし，図 4.13，図 4.20 右に示されるように，手首関節角度や示指付け根の鉛直成分では投げ上げの瞬間にばらつきが増加していた．また，手の平の水平角度，手首関節といったボール保持期間中のボールに近い部位でも，同様の傾向があった (表 4.8)．

この結果は，上記の説とは異なるものである．

ところで，投げ上げの瞬間だけでなく投げ上げ動作期間のばらつきの変化をみると，被験者 1 と被験者 3 の肘の関節角では運動開始から投げ上げの瞬間にかけて動作のばらつきが減少している．

全日程を通して被験者 1 と 3 は被験者 2 よりもボールのばらつきが少ない傾向があったことから，ボールの投げ上げ運動には手先ではなく肘関節の動作の安定化が重要であると考えられるが，今回の結果だけでは言い切れない．



表 4.8 投げ上げ時刻のばらつき増加の有無

|         | 被験者 1 | 被験者 2 | 被験者 3 |
|---------|-------|-------|-------|
| 手の平     |       |       |       |
| 前腕      | —     |       | —     |
| 肘角度     | —     | —     | —     |
| 手首角度    |       |       | —     |
| 示指付け根 X | —     | —     | —     |
| 示指付け根 Y | —     | —     | —     |
| 示指付け根 Z |       |       |       |
| 手首 X    | —     | —     | —     |
| 手首 Y    | —     | —     | —     |
| 手首 Z    |       |       |       |
| 肘 X     | —     | —     | —     |
| 肘 Y     | —     | —     | —     |
| 肘 Z     |       |       |       |
| 肩       | —     | —     | —     |

## 第5章

# 結論

本研究では、同じ運動を繰り返し行ったときに運動のばらつきがどのように減少するのか、また、それに応じて人間の振る舞いがどのように変化するかをボールの投げ上げ運動を題材にして分析した。

日の経過による変化では、ボールのばらつきに関しては被験者に共通して鉛直・水平方向ともにばらつきが減少することを確認した。投げ上げの動作に関しては、変化した部位や変化の内容に個人差があった。また、「熟練者の運動においては、課題の目的に直接関係する軌道のばらつきが他の部分でのばらつきに比べて小さい [18][11] という説に倣うと、ボールの投げ上げ運動には手先ではなく肘関節の安定化が重要である可能性が示唆された。

今回の研究では、ボールのばらつきを減少させるための動作の変化に被験者共通の傾向がみられず、運動安定化の要因を特定することはできなかった。その原因の一つとして、本研究では被験者が3人と少なかったことが挙げられる。今後は被験者を増員して検討する必要がある。また、投げ上げ運動において肘関節の安定化が重要である可能性を述べたが、これは被験者を増やして実験を行う際に、手先を固定するグループと肘関節を固定するグループに分けて、結果を比較することで確認できる。

さらに、運動安定化の要因を特定した後は、それぞれの行動変化が運動制御の立場から見てどのような意味を持つのかを検討する必要がある。

# 謝辞

本研究を進めるにあたり，ご指導，ご助言いただいた電気通信大学大学院情報システム学研究科情報ネットワーク学専攻ヒューマンインターフェース学講座の阪口 豊教授，出澤正徳教授，石田文彦助手，島井博行助手，ならびに，意見や激励をいただいたヒューマンインターフェース学講座の学生，修了生，職員の皆様に感謝いたします。

## 参考文献

- [ 1 ] Ken Hashizume, Tomoyuki Matsuo:“ Temporal and spatial factors reflecting performance improvement during learning three-ball cascade juggling ”, Human Movement Science, 23, 207-233, 2004.
- [ 2 ] 井口, 阪口: “ 運動の安定化に関する一考察 ”, 信学技法, NC2001-202, 53-58, 2002.
- [ 3 ] Welch, R.B.:“ Adaptation of space perception ”, Handbook of perception and human performance, sensory process, and perception, vol.1(K.R.Boff, L.Kaufman, and J.P. Thomaseds.), 24.1-24.45, 1996.
- [ 4 ] 北澤: “ 小脳と手の運動学習 ”, 神経研究の進歩, 42, 124-137, 1998.
- [ 5 ] Thach, W.T.:“ A role for the cerebellum in learning movement coordination ”, Neurobiol. Learn. Mem., 70, 177-188, 1998.
- [ 6 ] Kitazawa, S., Kohno, T.and Uka, T.:“ Effects of delayed visual information on the rate and amount of prism adaptation in the human ”, J.Neuroscience, 15, 7644-7652, 1995.
- [ 7 ] Kitazawa, S., Kimura, T.and Uka, T.:“ Prism adaptation of reaching movements : specificity for the velocity of reaching ”, J.Neuroscience, 17, 1481-1492, 1997.
- [ 8 ] Martin, T., Keating, J., Goodkin, H., Bastian, A.J. and Thach, W.:“ Throwing while looking multiple gaze-throw calibrations ”, Brain, 119, 1199-1211, 1996.
- [ 9 ] 阪本, 福村, 宇野:“ ヒト腕の到達運動におけるばらつきはターゲットの知覚に依存する ”, 信学技法, NC2002-175, 19-24, 2003.
- [ 10 ] C.M.Harris and D.M.Wolpert:“ Signal-dependent noise determines motor planning ”, Nature, vol.394, no.20, pp.780-784, Aug. 1998.
- [ 11 ] E.Todorov and M.I.Jordan:“ Optimal feedback control as a theory of motor coordination ”, Nature Neuroscience, 5, 1226-1235, 2002.
- [ 12 ] Kitazawa, S.:“ Optimization of goal-directed movements in the cerebellum : a random walk hypothesis ”, Neuroscience Research, 43, 289-294, 2002.
- [ 13 ] 石井:筋と筋力の科学 1 重力と戦う筋, 山海堂, 2001
- [ 14 ] 石井:筋と筋力の科学 2 筋を鍛える, 山海堂, 2001

- [ 15 ] 中村, 齊藤:基礎運動学第 4 版, 医歯薬出版, 1997.
- [ 16 ] 井口:“ 神経細胞モデルに基づく運動安定化の研究 ”, 修士論文, 2003
- [ 17 ] 石村:分散分析のはなし, 東京図書, 2000.
- [ 18 ] Bernstein N.,“ The Co-ordination and Regulation of Movement ”, Pergamon, Oxford, 1967.