卒業論文 2011 年度 (平成 23 年度)

投球障害予防支援システムのための
投球フォーム変化検出アルゴリズムの提案

指導教員

慶應義塾大学環境情報学部

徳田　英幸

村井　純

楠本　博之

中村　修

高汐　一紀

Rodney D. Van Meter III

植原　啓介

三次　仁

中澤　仁

武田　圭史

加藤　貴昭

慶應義塾大学 環境情報学部

西山 勇毅

tetujin@ht.sfc.keio.ac.jp

卒業論文要旨 2011 年度 (平成 23 年度)

投球障害予防支援システムのための
投球フォーム変化検出アルゴリズム

論文要旨

野球界では野球投球における高い投球障害の発生率が問題となっている．アマチュア野球界では，一つのチームに所属している選手数が指導者の人数より多いため，練習量や体のケアなどのコンディション管理は個人に任されている．またコンディション管理をする上で客観的な情報が重要になるが，実際の練習現場において客観的な情報が少ないのが現状である．スポーツ科学では古くから，投球障害予防のためハイスピードカメラや三次元モーションキャプチャシステムを用いた研究が盛んに行われてきたが，高額な機材や解析時間，計測場所の制限などの問題から，実際の練習現場において日常的に使用する事は困難である．また，近年センサの小型・高性能化によりセンサデバイスを用いた投球動作取得に関する研究も近年盛んに行われているが，投球数の増加に伴う経時的な変化を計測した研究は行われておらず，実際の練習で使用できる投球障害予防支援システムは実現されていない．今後，センサ技術の発展に伴い日常生活だけでなくスポーツ界でも日常的にセンサデバイスを用いた技術支援や，障害予防が発展する事が予想される．

投球障害を引き起こす主な原因として，過度の投球や不適切な投球フォームでの投球が挙げられる．不適切な投球フォームとは，投球動作をワンドアップ期・前期コッキング期・後期コッキング期・アクセレーション期・フォロースルー期に分けた場合，前期コッキング期からアクセレーション期にかけて肩関節外転の減少，肩関節最大外旋の低下した投球フォーム (肘下がり) の事である．投球数の増加に伴い，肩関節周辺の筋力低下により前期コッキングから後期コッキング期にかけての肩関節外転動作が減少することで，肩関節への剪断力が増加し，肩前方関節唇への負荷が増加し投球障害が発生する．

本研究では，投球数の増加に伴う投球フォーム変化検出アルゴリズムを提案する．投球フォーム変化検出アルゴリズムでは，装着型角速度センサを用いて投球フォーム変化を検知する．本論文では，投球フォーム変化検出アルゴリズムの提案・実装を行う．最後に，提案した投球フォーム変化検出アルゴリズムに対して評価実験を行い，アルゴリズムの有用性を検証する．

キーワード

野球，障害予防，投球障害，角速度センサ，ユビキタスコンピューティング

慶應義塾大学 環境情報学部

西山 勇毅

Abstract of Bachelor's Thesis Academic Year 2011

Throwing Form Change Detection Algorithm to Prevent the Baseball Player' s Throwing Related Injuries

Abstract

Baseball players are susceptible to shoulder and elbow injuries due to having an inappropriate throwing form and overload. Fielders are especially dangerous for developing inappropriate throwing form, because they lack knowledge about their own body movements and the way of managing their practice. Whereas the pitchers are have more access to their body movement through kinematic feedback from catcher and coach. Thus, it is important to provide objective feedbacks to those fielders to prevent shoulder and elbow injuries.

The previous researches have developed the algorithms to support the baseball players by providing the kinematic information and analyzing player' s throwing form using Three-dimensional movement analysis. However, those researches have limited support to the players, because it requires longer time to analyze a movement and location for analysis is limited. And it also lacks practicality.

The purpose of this research is to create a new algorithm to improve players' throwing form and manage their practice by using wearable gyroscope sensor. This research achieves it by creating the algorithm to detect the change in throwing form. In the end, this algorithm was evaluated by conducting an experiment, and its usefulness was verified.

Keywords
Baseball , Prevention Support System , Throwing Injuries , Angular Velocity Sensor , Ubiquitus Computing

Keio University Faculty of Environment and Information Studies
Yuuki Nishiyama

目次

第 1 章　序論 1

1.1　本研究の背景 1

1.2　本研究の目的 2

1.3　本論文の構成 3

第 2 章　投球障害予防手法 4

2.1　投球障害 4

2.1.1　野球選手野手の投球動作 4

2.1.2　投球障害とそのメカニズム 5

2.1.3　投球数の増加にともなう投球フォーム・能力の変化 6

2.2　投球障害予防の取り組み 7

2.3　問題意識 9

2.3.1　練習中の客観的な投球疲労度取得は困難 9

2.3.2　既存の投球フォーム変化取得手法では日常的な使用は困難 9

2.4　機能要件 9

2.5　まとめ 10

第 3 章　投球フォーム変化検出アルゴリズム 11

3.1　本研究のアプローチ 11

3.2　投球疲労の生理学的計測 11

3.2.1　血中乳酸値 11

3.2.2　肩関節機能の計測 11

3.2.3　投球数の増加にともなう投球能力の変化計測 12

3.3　投球動作解析による投球疲労の取得 12

3.3.1　光学式モーションキャプチャシステムによる動作解析 12

3.3.2　DLT 法による動作解析 13

3.3.3　装着型センサによる投球動作解析 13

3.4　既存手法のまとめ 14

3.5　装着型センサを用いた投球フォーム変化検出アルゴリズムの構築・検証 14

3.5.1　投球数の増加にともなう投球フォーム変化計測 15

3.5.2　単一の装着型センサデバイスの使用 15

3.6　まとめ 15

第 4 章　設計 16
4.1　投球フォーム変化検出アルゴリズムの設計概要 16
4.2　センサの装着位置の設計 16
4.3　投球動作の定義 17
4.3.1　投球動作モデル 17
4.3.2　投球動作時の角速度データ 18
4.3.3　投球数の増加に伴う投球フォームの変化 19
4.4　投球動作検知の設計 20
4.5　投球フォーム変化検知の設計 22
4.5.1　投球モーションの分解 22
4.5.2　投球フォーム変化率算出の設計 22
4.6　投球フォーム変化検出アルゴリズムの設計 26
4.6.1　ハードウェア構成 26
4.6.2　ソフトウェア構成 26
4.7　まとめ 27

第 5 章　実装 28
5.1　使用センサデバイス 28
5.2　基準投球データ管理モジュールの実装 29
5.2.1　基準投球データの算出 29
5.2.2　基準投球データの保存 30
5.3　投球動作判定層の実装 30
5.3.1　一時保存角速度データ 30
5.3.2　肩関節内外旋動作取得部 30
5.3.3　相関係数算出部 31
5.3.4　相関係数モデルによる投球動作判定の精度 31
5.4　投球フォーム変化算出層の実装 33
5.4.1　投球フェース分解モジュール 33
5.4.2　投球フォーム変化率算出モジュール 35
5.5　まとめ 35

第 6 章　評価 36
6.1　評価実験の概要 36
6.1.1　実験環境 36
6.1.2　被験者 36
6.1.3　実験手順 37
6.1.4　本実験での目的 39
6.1.5　評価手順 40
6.2　評価実験結果 41
6.2.1　制球能力の分散分析結果 41

6.2.2　投球フォーム変化率の分散分析結果 41
6.2.3　肩関節外転角度計測の分散分析結果 43
6.3　考察 44
6.4　まとめ 46

第 7 章　結論 47
7.1　今後の展望 47
7.1.1　投球フォーム変化検知の精度向上 47
7.1.2　実際の練習現場での使用 47
7.2　本論文のまとめ 48

参考文献 50
付録 A　慶應義塾大学・高校野球部への投球障害に関するアンケート 1 52
付録 B　慶應義塾大学・高校野球部への投球障害に関するアンケート 2 53

図目次

1.1 投球障害経験率 2
1.2 投球障害の原因 2
1.3 練習中の痛み 2

2.1 投球フェーズ分類図 5
2.2 投球動作における関節角度の定義 5
2.3 肩関節における関節唇位置 6
2.4 SLAP 損傷発症肩関節唇 6
2.5 ボール速度と投球数の関係 7
2.6 SFC 肩関節外転角度と投球数の関係 7
2.7 100 球連続投球時，三角筋，棘下筋の MF 平均 8

3.1 血中乳酸濃度の計測風景 12
3.2 光学式モーションキャプチャシステムによる実験風景 13
3.3 DLT 法によるキャリブレーション撮影風景 13
3.4 複数センサによる三次元動作解析 14

4.1 肘へのセンサ装着方法 17
4.2 角速度センサの軸方法 17
4.3 肩関節角度と動作の定義 17
4.4 投球動作とその角速度データ 18
4.5 角速度データにおけるモーションポイントと分解方法 23
4.6 Good Form と Bad Form との差 23
4.7 正常な投球フォーム分解結果 24
4.8 投球動作開始位置の検出ミス 24
4.9 分析対象区間 25
4.10 ソフトウェア構成図 27

5.1 使用角速度センサデバイス 28
5.2 内外旋判定閾値と Release 位置 31
5.3 モーションポイント位置 33

6.1 投球距離と方向 37

6.2 ハイスピードカメラ位置と仮想三次元空間 37
6.3 得点範囲 38
6.4 センサ装着例 38
6.5 マーカーポイント設置位置 39
6.6 分散分析手順 40
6.7 100 球連続投球時の投球フォーム変化率の平均 42
6.8 100 球連続投球時の肩関節外転角度の平均値 44

表目次

2.1 投球フェーズの期分け 4
2.2 肩関節角度および肘関節角度の関係 8

3.1 既存投球疲労取得手法の比較 15

4.1 角速度の変化予想とその結果 19
4.2 共通項目モデルによる投球動作判定結果 20
4.3 内外モデルによる投球動作判定結果 21
4.4 内外旋モデルの誤検知評価結果 21
4.5 三点予想投球フォーム変化検出モデルの分散分析 24
4.6 区間限定投球フォーム変化検出モデルの分散分析 25

5.1 28
5.2 基準投球データのデータ保存形式 30
5.3 一時角速度保存データのデータ保存形式 30
5.4 相関関数モデルによる投球動作判定 32
5.5 誤検知評価 32
5.6 区間限定相関係数モデルの分散分析 35

6.1 被験者の身体特徴 37
6.2 制球能力の三群間分散分析結果 41
6.3 100 球連続投球における投球フォーム変化検出アルゴリズムデータの三群間分散分析結果 . . . 42
6.4 Tukey-Kramer の HSD 検定による全てのペアの比較 -センサ- 42
6.5 Dunnett の検定を使ったコントロール群との比較 -センサ- 42
6.6 100 球連続投球における DLT 法による肩関節外転角度データの三群間分散分析結果 43
6.7 Tukey-Kramer の HSD 検定による全てのペアの比較 -DLT 法:肩関節外転角度- 43
6.8 Dunnett の検定を使ったコントロール群との比較 -DLT 法:肩関節外転角度- 43

第 1 章

序論

本章では，はじめに本研究における背景を述べる．ついで，本研究における目的と目的を達成する為の機能要件を述べる．最後に本論文の構成を示す．

1.1 本研究の背景

野球界では選手の多くが肩や肘へ投球投球障害に悩まされている．大倉らが宮崎県高校野球選手に行った調査 [18] によると，72 %の選手が肩や肘の障害経験があると解答したと報告されている．應義塾大学と慶應義塾高校の現役選手 183 人に投球障害の経験に関するアンケートを行ったところ，全体の 53 %の選手が投球障害のため練習を休んだ経験 (表 1.1) があり，さらに全体の 63 %の選手が肩や肘に何らかの痛みを抱えながらプレーしていると解答 (表 1.3) した．高校生や大学生などの，アマチュア野球の多くのチームでは全国優勝や甲子園出場など大きな目標を掲げ，その目標に向かって日々厳しい練習に取り組んでいる．そのため，練習量が増加し肩や肘のオーバーユースにより投球障害は発生する．投球障害の主な原因は不適切な投球フォームでの投球や過度の投球と言われている．

投球障害を予防する上で客観的な投球数の増加ともなう自身の投球フォームの変化を認識する事は，過度な投球や不適切な投球フォームでの投球を予防する上で非常に重要である．しかし，実際のグランドでの練習において選手が客観的に自身の投球動作の変化を認識する事は困難である．野球界では，選手の人数に対して監督やコーチ・トレーナーといった指導者の人数が少ないため，コンディション管理は選手個人に任されている．選手は「肘が下がる」や「腕が重い」など主観を元に判断を行っている．投手の投球は常に捕手が客観的に確認しているが，野手は主観による判断に頼っている．主観による判断は自身の精神状態によって変化するため，非常に不安定である．従来より客観的に投球フォームを取得して，投球動作を解析するためにハイスピードカメラや光学式モーションキャプチャシステムを用いた動作解析などが多く行われてきた．しかし，それらの手法では計測場所の制限や解析のリアルタイム性，費用などの面で課題があり，実際の練習現場での利用やアマチュア選手が気軽に使用することは困難である．

また，近年，センサデバイスの小型・軽量化が進みスポーツ界においてもセンサデバイスを用いた技術支援や障害予防の研究が進んでいる．室伏らの加速度センサと角速度センサを用いたハンマー投げ競技におけるアシストシステム [9] や，仰木らの手首装着型加速度・角速度センサを用いた競泳トレーニング用泳動作表示システム [7] などの開発が行われている．このように，今後，スポーツ界においても日常的にセンサデバイス使用される事が考えられる．

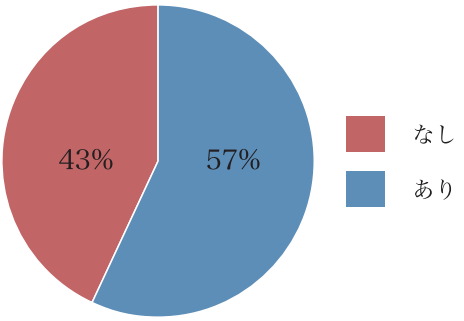


図 1.1　投球障害経験率

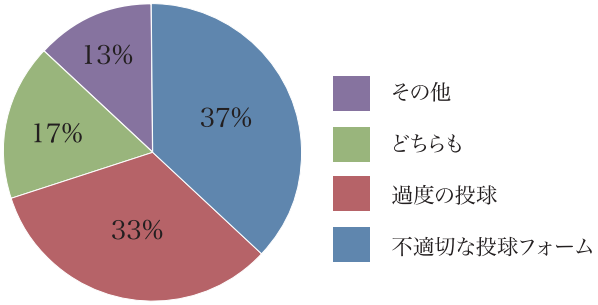


図 1.2　投球障害の原因

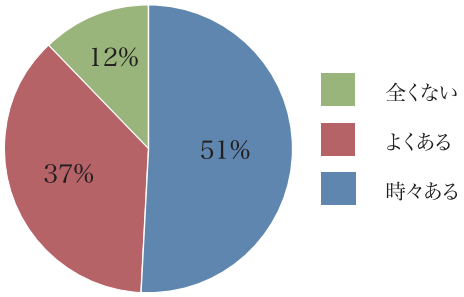


図 1.3　練習中の痛み

1.2　本研究の目的

本研究では，実際のグラウンドでの練習における投球障害予防支援ステムのための，投球フォーム変化検出アルゴリズムの提案を行う．投球障害予防のためには客観的は投球情報を取得する事は非常に重要である．しかし，既存の手法では実際の練習現場において客観的な投球情報を取得することは困難である．そのため，本研究ではセンサを用いた実際の練習現場における客観的な投球フォーム変化情報を取得するためのアルゴリズムの構築を行う．

以下に，本研究の目的を達成するための機能要件と，その要件を解決するためのアプローチについて述べる．

客観的な投球情報の取得

現在グランドなどの実際の練習現場において，野球選手野手が客観的な投球障害に繋がる情報を取得する手法が提案されていない．古くからスポーツ科学の世界ではハイスピードカメラによる動作解析や関節可動域の計測や，最大筋力発揮能力の計測などが行われてきたが，計測場所や解析時間，選手への身体的負担などの問題ある．そこで本研究で提案するアルゴリズムでは，練習中の自然な練習の動作の中から投球障害発生原因の検知を行う．

実際の練習現場での日常的な使用

近年センサデバイスは小型化，高性能化が進んでおり，高速で精密なスポーツ動作計測などでも使用されている．既存研究として，複数センサによる投球動作のキネティク解析や 3 次元解析などが行われ

ている．しかし，複数センサを装着することは選手の負荷を増加させ，日常的に使用する事ができいといった問題がある．本アルゴリズムは実際の練習での日常的な使用を想定しているため，選手への負担を少なくする必要がある．そこで本研究では，単一の小型センサデバイスを用いて投球障害の可能性を検知する．

1.3 本論文の構成

本論文は，本章を含め全 7 章から成る．本章では，本研究における背景と問題意識，目的を述べた．第 2 章では，本研究における野球の投球動作と投球障害，予防支援手法について整理する．そして，投球障害とその予防手法における問題意識を洗い出し，機能要件を導く．第 3 章では，本研究の機能要件を満たす角速度センサを用いた投球フォーム変化検出アルゴリズムを提案し, 関連研究を述べる．第 4 章では，投球フォーム変化検出アルゴリズムの設計について述べる．第 5 章では，投球フォーム変化検出アルゴリズムの実装について述べ，予備実験の結果についても述べる．第 6 章では，投球フォーム変化検出アルゴリズムの結果及び，考察について述べる第 7 章では，本論文の結論と今後の展望について述べる．

第 2 章

投球障害予防手法

本章では，はじめに野球における投球動作と投球障害の発症原因について整理する．その後，現在行われている投球障害予防の取り組みを整理する．つづけて，野球選手野手の投球障害予防における問題意識を洗い出す．最後に，問題意識から投球障害予防手法の機能要件とアプローチを導く．

2.1 投球障害

本節では，まず本研究における野球野手の投球動作について述べる．ついで，その投球動作における投球障害種類とその発症原因を整理する，

2.1.1 野球選手野手の投球動作

投球動作は非常に複雑な運動である．従って，投球動作を解析するためには投球動作をいくつかの期間に分類する必要ある．Jobe[2] らは投手の投球動作を図 2.1 のように，1:ワインドアップ期 (WUP)，2:前期コッキング期 (ECK)，3:後期コッキング期 (LCK)，4:加速期 (ACL)，5:フォロースルー期 (FWT) の 5 つの期間に分類した．

5 つの区間は表 2.1 のように定義されている．1) ワインドアップ期：予備動作から投球腕側の手がグラブから離れるまで，2) 前期コッキング期：グラフから離れてから前足の着地まで，多くの場合はこの時点で最大外転位置であるトップポジションを取る．3) 後期コッキング期：グラブから前足が着地してから肩関節最大外旋まで，4) 加速期：肩関節最大外旋からボールリリース 5) フォーロースルー期．

本研究では，野手を対象とするため，ワインドアップ期は準備期と表現する．また，5 つの期間を投球フェーズと表現する．

	始まり	終わり
準備期	(予備動作)	(投球腕側の手がグラブから離れる)
前期コッキング期	投球腕側の手がグラブから離れる	前足の着地 (トップポジション)
後期コッキング期	前足の着地 (トップポジション)	肩関節最大外旋
加速期	肩関節最大外旋	ボールリリース
フォロースルー期	ボールリリース	巻込み動作の終了

表 2.1　投球フェーズの期分け

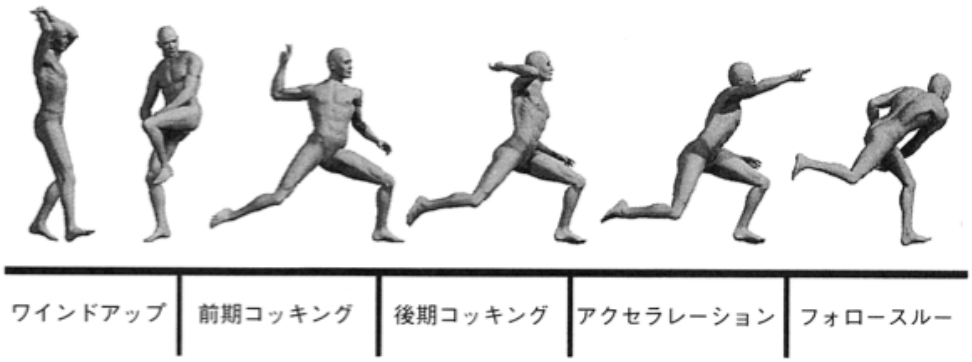
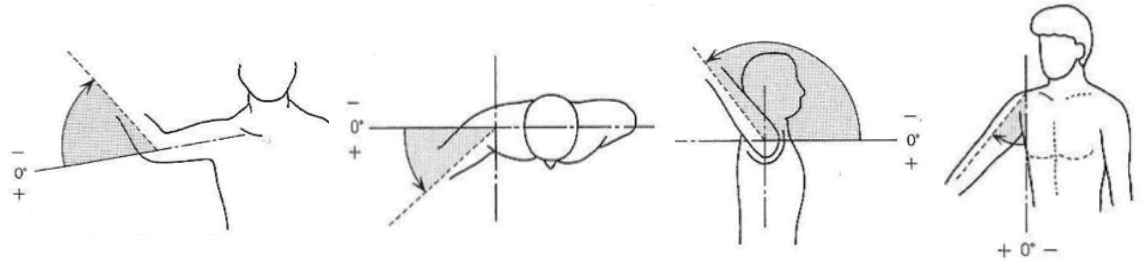


図 2.1　投球フェーズ分類図

また，桜井 [19][20] らは投球動作における関節角度を以下のように定義 (図 2.2) した．本論文でも以下の関節角度定義を用いる．



S1: 肘の伸展・屈曲　　S2: 肩の水平内転・水平位外転　　S3: 肩の内旋・外旋　　S4: 肩の内転・外転

図 2.2　投球動作における関節角度の定義

2.1.2　投球障害とそのメカニズム

投球障害とは投球動作の繰り返しによって発生する肩関節や肘関節などの障害である．投球障害には，ベネット肩棘や，上腕二頭筋長頭腱炎，インピンジメント症候群，デッドアーム症候群，SLAP 損傷などさまざまな症状がある．本研究では SLAP 損傷 [3] に着目する．SLAP 損傷 (図 2.4) とは，上方肩関節唇損傷ともいい上腕頭筋腱付着位置部 2.3 が剥離あるいは断裂する障害である [17]．症状が軽い場合は理学療法による保存治療が行われるが，理学療法の効果が見られない場合には，関節鏡視下手術による剥離関節唇の切除や修復が必要になる [13][5]．どちらにしても長期間での治療が必要なため，野球選手にとっては重大な投球障害である．

投球障害を発症する原因としては，不適切な投球フォームでの投球や，過度の投球，筋力の低下，関節可動域の制限，ウェーミングアップ不足などが上げられる．特に過度な投球や不適切は投球動作が主な原因であると言われている．不適切な投球フォームとは，一般に”肘下がり”と呼ばれ，後期コッキング期から加速期にかけて肩関節外転角度が減少した投球フォームの事である．投球動作は，後期コッキング期から加速期にかけての最大外旋位付近のフェーズにおいて，肩関節や肘関節へのストレスが増大する．そのためこの後期コッキング期から加速期にかけてのフェーズで投球障害が多く発生する．SLAP 損傷では，後期コッキング期から加速

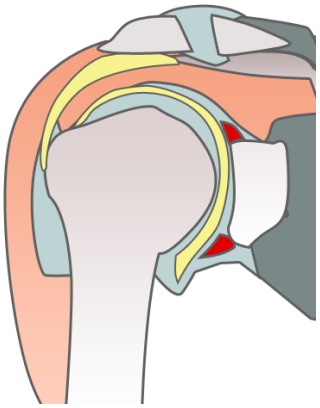


図 2.3　肩関節における関節唇位置

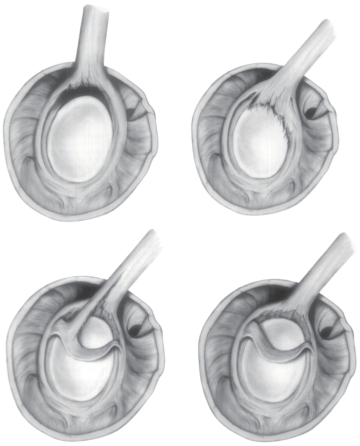


図 2.4　SLAP 損傷発症肩関節唇

期にかけて水平外転動作の際に肩関節への剪断力が増加することで，肩関節唇へのダメージが蓄積される事で関節唇剥離などの症状が生じる．

投球動作は一回の運動が完結する循環運動に分類される動作である．そのため，前のフェーズの動作が次のファーズの動作に影響を与えるため，一つの投球フォームの変化が投球動作全体に影響を与える．つまり前期コッキング期での肩関節外転動作の変化が次の後期コッキング期，加速期での”肘下がり”に繋がる．

2.1.3　投球数の増加にともなう投球フォーム・能力の変化

投球数の増加にともない， 握力の低下 [26]，ボール速度の低下，前期コッキング期における肩関節外転角度・水平外転外転角度の減少，後期コッキング期における肩関節最大外旋角度の減少 [14][25]，肩関節内旋可動域の減少 [12] が報告されている．

平山氏らは大学生投手を対象とし，投球数の増加にともなう投球動作の変容について検討する事を目的に，試合を想定した実験を行った．実験試技は 10 秒間隔で 15 球投げる事を 1 イニングとし，イニング間に 6 分の休息をはさみながら 9 イニング，計 135 球の投球を行い，光学式モーションキャプチャを用いて三次元動作解析からボール速度，投球腕肩関節外転角度，肩関節水平外転角度，肩関節外旋角度，肘関節伸展角度を算出した．投球動作イベントは以下の 3 つの時点とした，踏込み脚が接地する時点（以下，SFC），投球腕の肩関節が最大外旋する時点（以下，MER），ボールリリース時点（以下，REL）の各時点における比較を行った．その結果（図 2.6，表 2.2 ），SFC 肩関節外転角度と SFC 肩関節水平外転角度，MER 肩関節外旋角度は減少を示した．また，投球数の増加にともないボール速度も減少する傾向を示した（図 2.5，表 2.2 ）．前述したように，外転角度が減少した投球フォームでの投球は投球腕側の肩関節唇への負荷を増加させるため．SLAP 損傷に繋がる可能性がある．

石橋の研究 [16] では 100 球連続投球における肩関節周辺筋活動に関す調査を行った．投球映像と三次元解析により算出した初速度と，一回の投球動作における表面電図 (sEMG) から得られた筋出力 (最大随意収縮に対するパーセンテージ% MVC), 中間周波数 (MF) によって，筋疲労程度の評価を行った．100 球の投球動作のうち，1 球目から 10 球目，46 球目から 55 球目，91 球目から 100 球目までのそれぞれ前半 (Group1)，中盤 (Group2)，後半 (Gorup3) の 3 グループに別け，計測結果を 3 グループ間の分散分析を行った結果 2.7，三

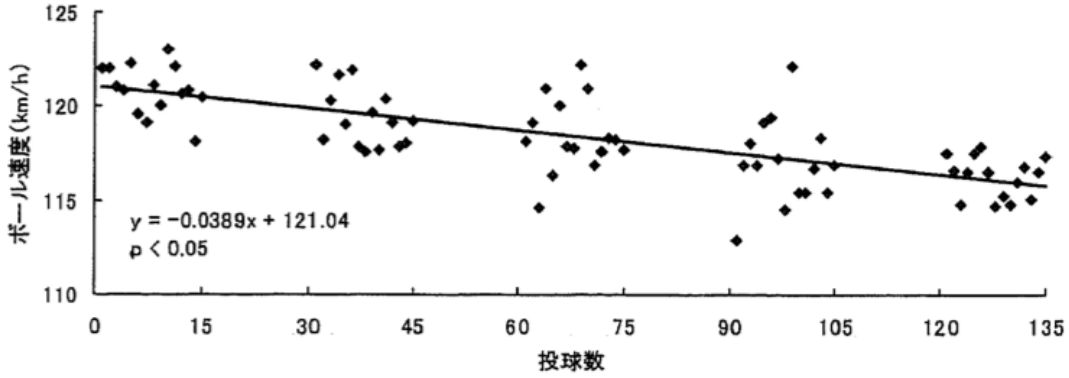


図 2.5　ボール速度と投球数の関係

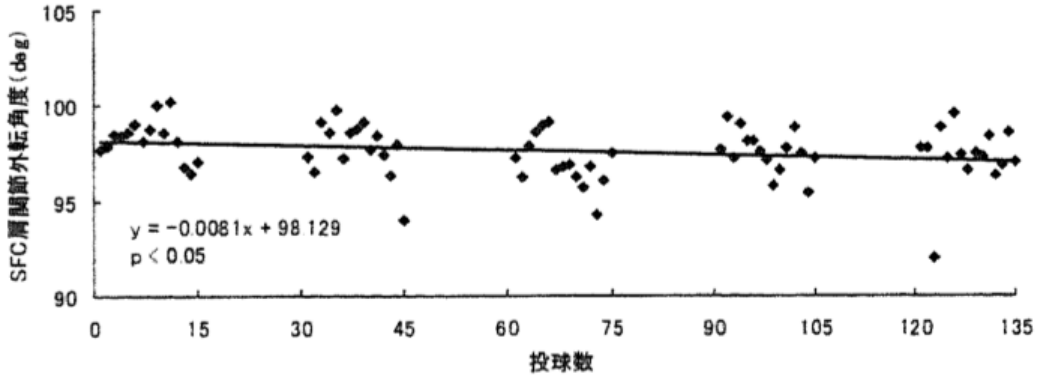


図 2.6　SFC 肩関節外転角度と投球数の関係

角筋の MF が有意に低下したことから，三角筋の筋疲労があった事が分かった．三角筋は上肢を外転・外旋された肢位を保つ役割を果たしているため，三角筋が疲労すると外転効率が低下する肘下がりに繋がると考えられる．

2.2　投球障害予防の取り組み

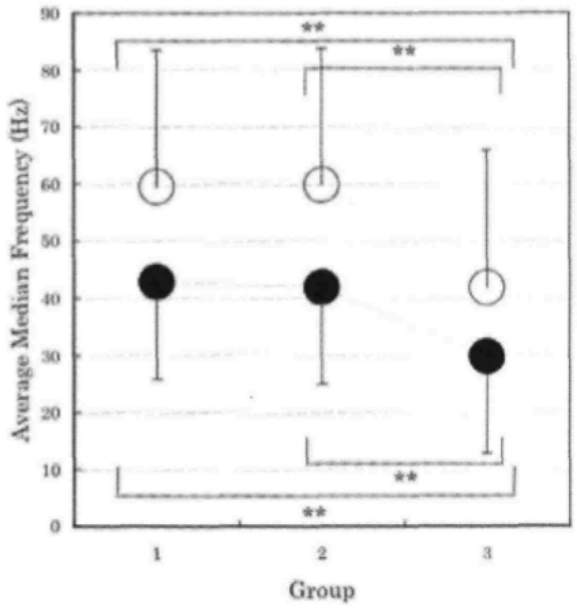
投球障害予防の取り組みとして，定期的に関節可動域や筋力測定を行うメディカルチェック，ストレッチやアイシングといったアフターケア，投球フォーム計測による負荷の少ない投球フォームへの改善，投球数の制限などが行われている．

メディカルチェック [23] では，定期的に身体情報を計測することで筋力バランスの崩れや関節可動域の低下の計測を行う．その傾向から投球障害の兆候を推測して投球障害の予防を行っている．また，練習前のウォーミングアップや投球後の肩関節や肘関節のアイシングやストレッチといったクーリングダウンなども行われている．クーリングダウンやウォーミングアップは日常的に行われており，大倉らが宮崎県の高校野球選手に行ったアンケート調査 [18] によると，投球後のアイシングはいつも行っているが 33.8 %，時々行っている人が 39.9 % と多くの選手が行っている一般的な投球障害予防手法である．投球後にアイシングを行い，筋肉の温度を低下させることで炎症が周囲に広がる (二次的低酸素障害) を防止することができる．

キネマティクスパラメータ	イニング	回帰式	増減	優位性
ボール速度 (km/h)	1 - 9	y=-0.00389x + 121.04	↓	**
SFC 肩関節外転角度 (deg)	1 - 9	y=-0.0081x + 98.129	↓	*
SFC 肩関節水平外転角度 (deg)	1 - 9	y=-0.0105x + 8.2666	↓	**
SFC 肩関節外旋角度 (deg)	1 - 9	-	-	n.s
SFC 肘関節伸展角度 (deg)	1 - 9	y=0.0132x + 57.044	↑	**
MER 肩関節外転角度 (deg)	1 - 9	-	-	n.s
MER 肩関節水平外転角度 (deg)	1 - 9	-	-	n.s
MER 肩関節外旋角度 (deg)	1 - 9	y=-0.0194x + 170.47	↓	**
MER 肘関節伸展角度 (deg)	1 - 9	-	-	n.s
REL 肩関節外転角度 (deg)	1 - 9	-	-	n.s
REL 肩関節水平外転角度 (deg)	1 - 9	-	-	n.s
REL 肩関節外旋角度 (deg)	1 - 9	-	-	n.s
REL 肘関節伸展角度 (deg)	1 - 9	y=-0.0324x + 130.11	↓	*

・回帰式において，y はそれぞれのキネマティクスパラメータ，x は投球数を示す．
・回帰係数の符号が正のときは↑ (増加)，負のときには↓ (減少) を示す．
・有意性の表記 *:p < 0.05, **:p < 0.01, n.s:not significant(非有意)

表 2.2　肩関節角度および肘関節角度の関係



○：三角筋，●：棘下筋，優位性の表記 **:p<0.01
Group:1=1˜10, 2=46˜55, 3=91˜100

図 2.7　100 球連続投球時，三角筋，棘下筋の MF 平均

全日本リトル野球協会 [1] では，11 歳から 12 歳の投手は 1 日 85 球，9 歳から 10 歳の投手は 1 日 75 球と投球数が制限されている．米国では「青少年は 1 試合の投球を 75 球までにすること，1 シーズンの投球数が 600 球に制限すること」[6] と勧告している．プロ野球の投手起用においても 100 球を目安に先発投手を交代させるなどが行われている．

投球フォームの違いによって肩関節にかかる負荷が異なる [28][10] ため，負荷が少なくパフォーマンスも高い投球フォームの改善がチームの指導者によって行われている．そのサポートとしてハイスピードカメラや光学式モーションキャプチャシステムを用いた三次元動作解析により，投球フォームの可視化や肩関節への負荷計測が行われている．

2.3 問題意識

前節において，野球の投球動作と投球障害発症原因とその予防に関する取り組みについて述べた．本節では，以下の 2 つの問題意識を整理する．

2.3.1 練習中の客観的な投球疲労度取得は困難

現在実際の練習での投球障害の予防として，メディカルチェックやウォーミングアップ，クールダウンなどが行われているが，練習前か練習後に行うため投球障害の主な原因である過度の投球やそれに崩れた投球フォームでの投球は計測されていない．例えば，メディカルチェックによる手法では，定期的に関節可動域や最大発揮筋力や体脂肪率，体重，身長なんどを計測し，そこのデータから投球投球障害の可能性を発見することで関節可動域改善のためのストレッチによる予防や投球フォーム改善の指導などが行われている．しかし，この手法では練習前か練習後にメディカルチェックを行うため，練習中における投球障害の危険性を検知できない．また，練習中の投球スピードや握力（最大発揮筋力）の低下を計測する手法もあるが，野手の場合は練習メニューによって投球距離や強度，方向が変わるため，常に投球スピードを計測する事は困難であり，握力の計測においても練習中に最大発揮で筋力を計測することは選手にとって負担になる．投球数の制限は，選手の投球能力によって投球時の疲労度合いが異なる [16] ため，一律に設定する事は不可能である．

2.3.2 既存の投球フォーム変化取得手法では日常的な使用は困難

光学式モーションキャプチャシステムやハイスピードカメラを用いた三次元投球動作解析による，投球フォームの改善や不適切な投球フォームの検知などが行われているが，計測機材が高価である上，操作が複雑であり計測場所が限定される事から日常的な使用は困難である．例えば，光学式モーションキャプチャシステムによる投球動作の取得は，赤外線カメラを用いて反射テープの付いたマーカを認識させるため，全身タイツにマーカーを装着した状態で投球をしなければならず，実際の練習とはかけ離れた環境計測しなけらばならない，また．実験環境においても赤外線カメラを使用するため屋外で使用できない．

2.4 機能要件

本節では前節で述べた問題意識を踏まえ，投球障害予防支援システムための投球フォーム変化検出アルゴリズムを実現するための要件を述べる．本論文における機能要件として練習中の日常的な動作からの投球疲労の取得，実際の練習現場での日常的なデータ取得の 2 つを提案する．

野球練習中の自然な動作中からの投球情報取得

本アルゴリズムでは，選手に練習以外の余計な負荷をかけずに，野球練習中の自然な動作の中から投球疲労を計測する必要がある．既存の投球障害予防手法として，関節可動域や最大発揮筋力の計測が行われてきたが，いずれの手法においても計測のためには連取を一旦中断した上で計測を行わなければならい．練習中の自然な動作から投球疲労を計測する事で，練習の妨げずに投球障害の予防を行う事が可能になる．

練習現場での日常使用

投球障害は慢性的な過度の投球や不適切な投球フォームでの投球によって発症するため，日常的にそれらの原因を予防する必要がある．従来よりハイスピードカメラや光学式モーションキャプチャによる三次元動作解析などによる負荷計測や投球フォームの改善が行われてきたが，計測環境の制限や解析時間などの問題ある．日常的に練習で使用するためには，なるべく少ない設備で実現する必要がある．

2.5 まとめ

本章では，はじめに野球における投球動作と投球障害の発症原因について整理した．次に，投球障害予防の現在の取り組みを整理した．そして，野球選手野手の投球障害予防における問題意識を洗い出し，投球障害予防支援システムのための投球フォーム変化検出アルゴリズムの機能要件を導き出した．次章では，問題意識に基づく機能要件とそれに対するアプローチを示す．

第 3 章

投球フォーム変化検出アルゴリズム

本章では，第 2 章で示した投球障害予防支援システムのためのアルゴリズムの実現の 2 つの問題を解決すべく，アルゴズムの機能要件をまとめ，それを実現する本研究の手法を述べる．

3.1 本研究のアプローチ

本研究では，装着型センサを用いて投球数の増加にともなう野球選手野手の投球フォーム変化検出アルゴリズムを提案する．本節では，投球障害予防のための生理学的な投球疲労取得手法と投球動作解析による投球疲労取得手法の長所と短所を述べた上で，投球フォーム変化検出アルゴリズムの要約と，前章から得られた機能要件に基づいたアプローチを述べる．

3.2 投球疲労の生理学的計測

投球数における負荷計測方法として，血中乳酸値の計測や肩関節機能の変化・投球動作の変容などが既存研究で行われいる．それらの研究の概要を紹介した上で長所，短所を述べる．

3.2.1 血中乳酸値

血中乳酸値の計測とは，採血により全身疲労の目安となる乳酸値を計測するという方法（図 3.1）である．陸上競技や水泳競技などの練習において疲労の目安として使用され，実際の練習現場でも使用されている．柳沢らの研究 [14] では，高校生の高校野球部の投手 7 名を対象とし 20 球 1 セットとして 6 セット行い，120 球の投球を行った．その結果血中乳酸値は各セットにおいて顕著な増減を示さずほぼ一定の値を示した．血中乳酸値は解糖系の運動により増加するが，投球動作は ATP-PC 系の代謝に近い運動であると事から，顕著な乳酸値の増加は示さなかったと柳沢らは結論付けている．また，計測のためには毎回採血する必要があるため選手への身体的負担が問題である．

3.2.2 肩関節機能の計測

場所の制限無くできる手法として肩関節可動域や筋力などの肩関節機能の計測が上げられる．投球数の増加に伴い肩関節内旋可動域と肩関節筋力の低下，外旋可動域の上昇 [29][12][25] が報告されている．

関節可動域の計測は実際の練習現場でも手軽に行う事ができるが，練習中は練習に集中しているため選手自

慶應義塾大学スポーツ医学研究センター 設備紹介より引用
http://sports.hc.keio.ac.jp/cn25/setsubi.html

図 3.1　血中乳酸濃度の計測風景

身が定期的に肩関節機能を計測することは困難である．また，練習後に計測しなければならないため練習中の過度の投球を予防する事は困難である．

最大発揮筋力の測定には徒手テストによる手法と筋電センサを用いて計測する手法がある．徒手テストは理学療法士による検査手法であり特別な技術と訓練が必要である．筋電センサによる最大発揮筋力計測では，肩関節に抵抗をかけそれに対して最大努力で抵抗をかけて計測を行うため，選手への身体的負荷が大きいという問題がある．

3.2.3　投球数の増加にともなう投球能力の変化計測

身体的負担の少ない計測方法として，投球数の増加にともなう投球能力変化の計測が上げられる．投球数の増加に伴い球速の低下 [25][24] が報告されている．球速の変化はスピードガンによって計測されているが，野手は常に移動した状態で投球を行うため一定位置から球速を計測する事ができない．そのため，野球選手野手の投球疲労を球速から判定する事は困難である．

3.3　投球動作解析による投球疲労の取得

身体的負荷の少ない疲労計測手法として，投球数の増加にともなう投球フェーム変化の計測が上げられる．本項では，既存の光学式モーションキャプチャによる動作解析と DLT 法による動作解析，センサを用いた動作解析について整理し，それらの長所，短所を述べる．

3.3.1　光学式モーションキャプチャシステムによる動作解析

投球動作の定量的分析として多くのスポーツ科学の研究において光学式モーションキャプチャを用いた三次元動作解析手法が取り入れられている．中村らの研究 [21][10] より，投球動作においてコッキング期からアクセラレーション期前半に肩や肘に最も負荷がかかる事が分かっている．また，投球フォームの違いにより負荷の大きさが増減する事が報告されている．特に，後期コッキング期から加速期にかけて肩関節外転角度が減少（以下、肘下がり）することで肩や肘への負担が増加する．

この手法では精密な力学データを算出する事ができるが，赤外線カメラを使用するため屋外での使用を困難である．また，室内での計測を行わなければならないため，実際の練習現場とは異なる環境での動作計測となる問題がある．さらに，システムが非常に高価で操作が複雑である事から，アマチュア選手が気軽に使用する

事は困難である．

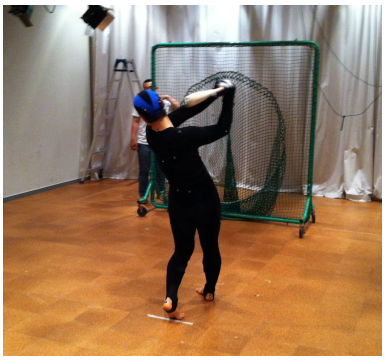


図 3.2　光学式モーションキャプチャシステムによる実験風景

3.3.2　DLT 法による動作解析

DLT 法とは２台以上のハイスピードカメラで撮影した映像をコンピュータで合成し，三次元解析を行う手法のことである．DLT 法ではハイスピードカメラを使用するためグランドなど屋外での動作計測が可能であり，より実戦に近い形で計測する事ができる．しかし，複数カメラとの同期やキャリブレーション（図 3.3）が必要であるため，日常的な練習において使用することは困難である，また，カメラの撮影範囲は限られるため，実際の練習内では使用が不可能である．

図 3.3　DLT 法によるキャリブレーション撮影風景

3.3.3　装着型センサによる投球動作解析

場所の制限が少ない投球動作取得手法として，センサによる投球動作の解析（図 3.4）も行われている．センサによりスポーツ動作解析では，動作撮影による動作解析に比べて空間的制約が少ないという特徴があり，動作撮影によるデータに近い精度で計測する事ができる．複数のセンサを体に装着して，運動連鎖 [22] や投球動作の三次元化 [4] の取得研究などが行われている．しかし，複数センサの装着は選手への身体的負荷は増加するため，実際の練習での使用することは困難である．

佐川らは肘に装着した 3D センサ (加速度センサと角速度センサが搭載されたセンサデバイス) を使用して

投球腕軌道の三次元化 [11] を行っている．しかし，角速度センサのキャリブレーションを行うために投球動作は毎回の同じ位置から開始され，4 割程度の力加減でしか投球されていない．実際のグランドでの野手の投球での使用は困難である．また，センサを用いた投球動作の解析を目的としているため，日常的に装着して投球フォームの変化を計測する事は想定されていない．

以上のように装着型センサを用いて投球動作の解析を行う研究は行われている．しかし，実際の練習において装着型センサデバイスを常に装着する事を想定し，投球数の増加にともなう投球フェーム変化を計測する研究は行われていない．

図 3.4　複数センサによる三次元動作解析

3.4　既存手法のまとめ

前節・前々節で述べた関連研究について比較し，表 3.1 にまとめた．光学式モーションキャプチャや DLT 法では，非常に正確なデータを取得できる．しかしその反面，手軽さや解析時間は肩関節機能計測や投球能力変化の計測の方が優れている．センサによる計測は，複数センサでは三次元解析など，精密な動作を計測する事ができるが動作の妨げとなり選手の負荷になる．単一のセンサでは取得するデータを限定する事で精度の高い動作を計測する事ができる．

3.5　装着型センサを用いた投球フォーム変化検出アルゴリズムの構築・検証

投球フォーム検出アルゴリズムは，実際の練習中のおける投球数の増加に伴う投球フォーム変化の計測による事で，投球障害の危険性の検知を実現する．

本アルゴリズムの実現には，前章で述べられた機能要件より，以下の 2 つが上げられる．

- 練習中の自然な動作中からの投球疲労の取得
- システムの日常的な使用

	光学式モーションキャプチャ	DLT 法	センサ	乳酸値	肩関節機能	投球能力変化
場所の制限	×	△	○	○	△	×
解析時間	△	×	○	○	×	○
費用	×	△	△	×	○	△
手軽さ	×	×	△	×	△	△

有用性の表記 = ○:有用，×:無用，△:一部有用

表 3.1　既存投球疲労取得手法の比較

本アルゴリズムでは前章で述べられた機能要件を満たすために，投球数の増加にともなう投球フォーム変化計測と装着型センサデバイスの使用の 2 つのアプローチを取る． 以下に各機能要件に対するアプローチの詳細を記述する．

3.5.1　投球数の増加にともなう投球フォーム変化計測

本アルゴリズムでは，練習中の投球数の増加に伴う肩関節外転運動と外旋運動の低下，運動連鎖の破綻などの投球フォームの変化に着目し，投球フォームの変化を投球疲労として検知を行う．従来より行われてきた生理学的な投球疲労取得手法では，一時練習中断しての計測や最大筋力発揮での計測など練習の練習の妨げになっていた．そこで，練習中の投球フォームの変化を計測する事で，練習を妨げずに投球疲労の計測を行う．

3.5.2　単一の装着型センサデバイスの使用

投球フォームの解析手法として装着型センサデバイス一つを用いて解析を行う．

装着型センサデバイスを用いるメリットは，DLT 法やモーションキャプチャによる解析に比べて計測場所の限定が少なく，コストが低いためアマチュア選手でも日常的に使用する事ができることである．場所を選ばずに三次元解析がでる複数センサを用いた三次元解析や運動連鎖の計測で複数センサによる計測は有効であるが，複数センサを装着した状態での練習は選手に負荷がかかり，練習の妨げとなるため継続的に使用する事はできない．そのため，本アルゴリズムでは単一センサを用いて練習中の投球フォーム変化の計測を行う．

3.6　まとめ

本章では，既存の投球障害予防のための投球時疲労取得手法と，投球動作解析手法の長所と短所について述べ，まとめた．さらに，前章からの機能要件に基づく投球フォーム検出アルゴリズムのアプローチを述べた．本研究では単一の装着型センサを用いて投球数の増加にともなう投球フォーム変化の検出を行う．次章では，投球フォーム検出アルゴリズムの設計について述べる．

第 4 章

設計

本章では，角速度センサを用いた投球フォーム変化検出アルゴリズムの設計について述べる．まず投球フォーム変化検出アルゴリズムの機能を実現する設計を 示す．ついで，本アルゴリズムの概要と本アルゴリズムが使用される環境を明確にする．投球フォーム変化検出アルゴリズムをモジュール毎に分解しそれぞれの役割について述べる．

4.1 投球フォーム変化検出アルゴリズムの設計概要

本節では投球フォーム変化検出アルゴリズムの概要について述べる．

本アルゴリズムでは装着型の角速度センサデバイス一つを用いて，投球数の増加に伴う投球フォームの変化の検出を行う．そのために，本アルゴリズムでは大きく分けて，投球動作の検知と投球フォーム変化の検知の二点を行う．以下に本アルゴリズムの流れを示す．

投球フォーム変化検出アルゴリズムの流れ

1. 基準投球データを登録
2. 投球動作の判定
3. 投球動作の分解
4. 投球フォーム変化率の算出

あらかじめ，基準値となる基準投球データ配列と投球フォームの登録を行う．そして実際に投球動作を行う．肘に装着した角速度センサから投球時の角速度データを取得し，投球動作の判定を行う．その際，一定期間の角速度データはシステム内に保存される．投球動作が検知されると，保存された投球データを元に投球動作期間の角速度データを取得する．初めに登録した基準値との比較を行うことで，投球フォームの変化の計測を行う．

4.2 センサの装着位置の設計

角速度センサは投球時の肘の動作を計測するために，上腕骨に対してセンサの Y 軸が直行するように設置した．投球動作において，X 軸値は肩関節の外内転運動，Y 軸値は肩関節の内外旋運動，Z 軸値は水平内外転運動の変化意味する．センサ設置位置と方向を図 4.1，図 4.2 に示す．

図 4.1　肘へのセンサ装着方法

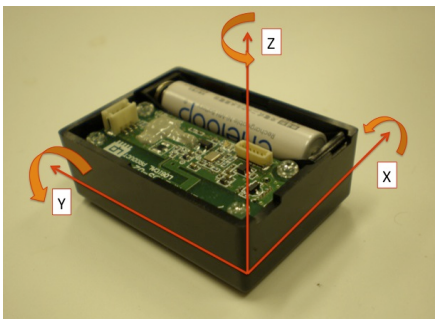


図 4.2　角速度センサの軸方法

4.3　投球動作の定義

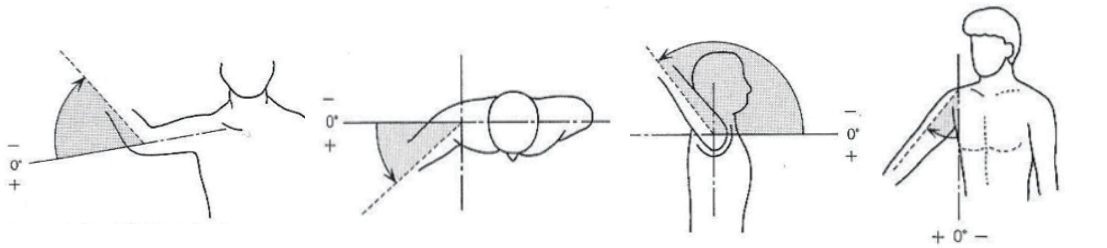
本節では，本研究で考える投球動作の設計を行う．まず初めに一般的な投球動作モデル（投球動作モデル）を述べる．さらに投球動作モデルを元に角速度データにおける，投球フェースの確認を行う．最後に投球数増加に伴う投球フォーム変化箇所の整理を行う．

4.3.1　投球動作モデル

Jobe らは投球動作を 1) ワインドアップ期（準備期），2) 前期コッキング期，3) 後期コッキング期，4) アクセレーション期，5) フォロースルー期の 5 つに定義した．また，それらをフェーズの区分する箇所は，1)-2) グラブからボールが離れた地点，2)-3) 踏込み足の着地または，トップ位置，3)-4) 肩関節最大外旋角度，4)-5) ボールリリースとしている．投球障害は前期コッキングからアクセレーション期にかけてが投球障害の主な原因と考えられているため，準備期とフォロースルー期は本研究では分析の対象外とした．各フェーズにおける身体動作を以下に整理する．

各投球フェーズにおける身体動作

1. 前期コッキング期：肩関節最小角度から肩関節外転運動．ついで肩関節外旋運動
2. 後期コッキング期：肩外転最大角度から水平内転運動
3. アクセレーション期：最大外旋位置から急激な内旋運動



S1: 肘の伸展・屈曲　S2: 肩の水平内転・水平位外転　S3: 肩の内旋・外旋　S4: 肩の内転・外転

図 4.3　肩関節角度と動作の定義

本研究では投球フェーズの切り替わり位置（モーションポイント）を Takeback，Cock，Top，Maxout，Release の 5 点（表 4.1）とした．前期コッキング期開始位置であり投球動作の開始位置を Takeback，肩関節外旋開始位置を Cock，トップ位置を Top，最大外旋位置を Maxout，ボールリリース位置 Release と定義する．

4.3.2 投球動作時の角速度データ

角速度データから投球動作を分解するために，角速度データを前期コッキング期，後期コッキング期，アクセラレーション期の 3 つのフェーズに分解を行う．表 4.1 に，投球動作モデルより予想される，投球時肩関節動作の角速度センサデータ変化を示す．

角速度センサのデータから投球動作を解析するために，ハイスピードカメラと角速度センサを同期させ，実際の投球動作の投球フェーズ移行点とセンサデータの変化移行点の確認を行った．角速度センサは 200Hz，ハイスピードカメラは 300Hz 取得した．角速度センサは 200Hz での計測のみ可能なので，センサデータを Spline 補間 [27] を用いて 300Hz に補間して投球動作変化点の確認を行った．ハイスピードカメラとセンサとの同期は，PC 側のセンサを押すと同時に LED ランプの光らせる事で同期信号を送り，実験終了後の解析時に同期を行った．図 4.4 に結果を示す．Spline 補間とは三次スプライン補間とも呼ばれ，データ点間を三次式で近似し，それぞれの区間を滑らかにつなぐ曲線を取得する手法である．スポーツ科学では，サンプリング間隔のことなる実験機材を使用した際に，補間によりサンプリング間隔を合わす事で時間軸の統一化を行っている．

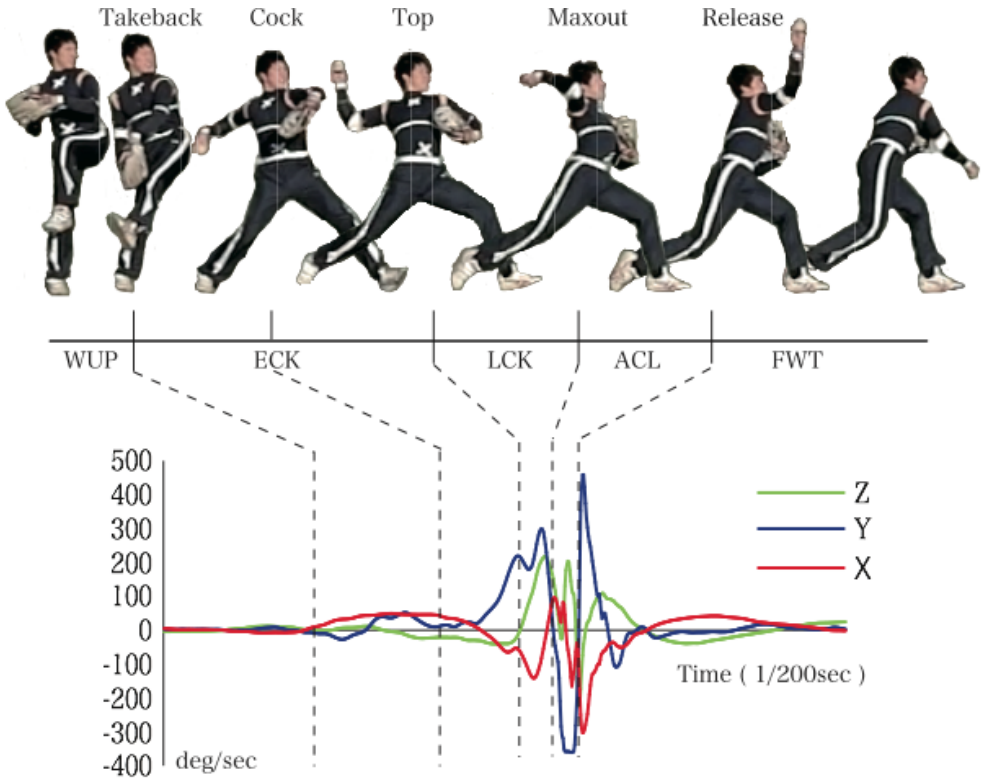


図 4.4　投球動作とその角速度データ

投球特徴動作	略称	肩関節動作	角速度データの変化予想	センサデータ変化の有無
投球動作の開始	TakeBack	外転	X 軸値の増加	○
コッキング動作	Cock	外旋	Y 軸値の増加	○
トップポジション	Top	水平内転	Z 軸値の増加	○
肩関節最大外旋位置	MaxOut	最大外旋角度	Y 軸値が最大値	○
アクセラレーション期	(ACL)	内旋	Y 軸値の急激な減少	○
リリースポイント	Release	内外旋動作の入れ替わり	Y 軸値が 0	○
フォロースルー期	(FWT)	外旋	Y 軸値値の急激な増加	○

○:変化有り，×:変化無し

表 4.1　角速度の変化予想とその結果

予想した角速度の変化は全ての予想した投球動作によって特徴（表 4.1）が見られた．既存研究よりリリースポイント付近での，肘に装着した角速度データの値は後期コッキング期から前期コッキング期にかけての最大外旋からアクセラレーション期からリリースポイントまでは急激な内旋運動が起こる．指先のスピードが最も上昇するボールリリース付近では，肘が伸展し，腕の内外旋角度は 0 度に近い状態となる．さらにリリースポイントからフォロースルー期に移行するにつれて，再び上腕の外旋運動が上昇する．リリースポイント付近で角速度が 0 deg/sec になる事は既存研究から分かっており，今回の予備実験でも既存研究の結果を肯定する結果となった．

4.3.3　投球数の増加に伴う投球フォームの変化

既存研究より，投球数の増加に伴い三角筋や棘上筋などの肩関節周辺筋による肩関節外転角度の低下，肩関節最大外旋角度の低下（肘下がり）が報告されている．トップ位置における肩外転角度が低下し，最大外旋角度が低下する事で肩関節への負荷が増加する．

さらに重心の位置の低下や，膝関節角度の低下が報告されている．それの投球フォームの変化に伴う運動連鎖の崩れも予想される．運動連鎖とは投球動作のような指先を加速させるための身体動作で，下半身から指先にかけて順々に加速度を増加させる動作である．運動連鎖の崩れは効率的な動作の妨げになり身体への負荷を上昇させる可能性がある．

本研究では，投球数の増加に伴う前期コッキング期における肩関節角度の低下 ，後期コッキング期における肩関節最大外旋角度の減少と運動連鎖の崩れを投球における疲労の目安として，投球フォームの変化を取得する．以下，本研究で取得する 3 つの投球フォーム変化をまとめる．

投球フォームの変化

1. 肩関節外転角度の低下
2. 肩関節最大外旋角度の減少
3. 運動連鎖の崩れ

4.4 投球動作検知の設計

本節では，角速度センサを用いた投球動作検知の設計について述べる．初めに予備実験として 3 つの投球動作判定アルゴリズムを作成した．各投球判定アルゴリズムの設計と特徴，予備実験の結果を元に投球フォーム変化取得アルゴリズムで使用する投球判定アルゴリズムについて述べる．予備実験は慶應義塾大学野球部の部員 10 人に 100 球投球を行い，その際の投球動作判定数の評価を行った．投球距離は野球において投球距離の基準となる塁間 (27.43m) とした．さらに，投球動作以外の動作での評価実験として野球動作の代表的なジャンプ動作・ランニング（ダッシュ）動作・バットスイング動作に対してアルゴリズムによる投球動作判定を行った．

共通項目による投球動作判定:共通項目モデル

三軸角速度センサより取得した，X・Y・Z 軸値の比較と閾値から投球動作の判定を行った．事前実より取得した 5 人分のでデータを元に，5 人に共通する 7 つの項目を設定した．時系列の角速度データに対して，7 つの項目を一定期間内にクリアすると投球動作と判定される仕様とした．一定期間内に投球動作が判定されない場合は，投球動作の判定が初期化される．尚，予備実験の被験者と，共通項目を作成した元の被験者とは別の被験者とした．表 4.2 に予備実験結果を示す．

ユーザ	投球動作検知数 (100 球)	誤検知数
A	100	0
B	97	0
C	31	0
D	69	0
E	19	0
F	7	0
G	2	0
H	0	0
I	0	0
J	0	0

表 4.2　共通項目モデルによる投球動作判定結果

予備実験より，共通項目による投球動作判定では，被験者 A や B では 100 %近くの投球動作の検出率であったが，H や I・J での検出率は 0 %であった．また，投球動作以外の動作の検知（誤検知）は無かった．

以上の結果より，投球フォームには個人差があるため，共通項目が同じユーザは投球動作が検知さるが，共通項目に該当しないユーザは投球動作が全く検知されない事が分かった．また，共通項目を 7 箇所に設定したため誤検知はなかったが，項目数が多すぎたため 3 項目や 4 項目で共通項目をクリアしない事が多くあった．

肩関節内外旋動作による投球動作判定:内外旋モデル

肩関節内外旋動作による投球動作判定では，後期コッキング期の最大外旋位置からボールリリースにかけて起こる，肩関節の急激な内外旋動作に絞って投球動作判定を行った．事前実験より，ボールリリース前の内外旋運動では Y 軸値が-350deg/sec を越えることから，閾値は-350deg/sec とした．

予備実験の結果を以下の表 4.3 に示す．

ユーザ	投球動作検知数 (100 球)	誤検知数
A	100	0
B	100	0
C	100	0
D	101	1
E	103	3
F	101	1
G	100	0
H	101	1
I	100	0
J	100	0
平均	32.5	0

表 4.3　内外モデルによる投球動作判定結果

ユーザ	ダッシュ (30m × 2 本)	ジャンプ (10 回)	バットスイング (10 スイング)
A	0	0	0
B	0	0	6
C	0	0	14
D	0	0	9

表 4.4　内外旋モデルの誤検知評価結果

内外旋モデルによる投球動作判定では，被験者 10 人の全ての投球を検知する事ができた．しかし，同時に被験者 D・E・F・H において誤検知があった．内外旋回モデルでは 1 箇所の閾値だけに頼っているため．投球動作以外の動作でも誤検知をする可能性がある．そこで投球動作以外での投球動作の判定の評価（誤検知評価）を行った．その結果を表 4.4 に示す．

ジャンプ動作やダッシュ動作は，上腕の動作が直線的な動作をするため，誤検知はまったく無かった．しかし，バットスイングでは誤検知があった，これは，バットスイングも投球動作と同じようにスイング時にバットを加速させるために，肩関節の内外旋動作を用いているためと考えられる．肩関節内外旋による投球動作判定では，投球動作の検出するは増加するが，投球動作の判定項目が少ないために誤検知が増加することが分かった．

相関係数を用いた投球動作検知の設計:相関係数モデル

共通項目モデルでは，誤検知は少ないが共通項目が合わない人では全く投球動作が検知されないという問題点がある．さらに内外旋モデルでは，全ての投球動作を検出する事ができたが，バットスイング動作のような投球動作以外でも肩関節の急激な内外旋運動を共なう動作において誤検知が起こるという問題がある．

共通項目モデルと内外旋モデルの問題点を解決する手法として，相関係数を用いた投球判定を行う．まず，内外旋モデルによって判定した投球動作位置に，事前に登録した基準投球データとの X 軸，Y 軸，Z 軸それぞれの相関係数を求める．その X,Y,Z 軸それぞれの相関係数に閾値を定め，閾値以上であれば投球動作と判定する．これにより内外旋モデル問題点であった投球動作以外の動作での誤検知を

防止する．基準投球データは投球フォームの個人差に対応するために，事前にユーザそれぞれの投球動作時の角速度データを計測し，登録を行う．

本アルゴリズムでは，相関係数を用いた投球動作判定を実装し評価を行う．以下に計算式を記述する，検出した角速度 y(t) は時刻 x(t) における角速度を表し，基準角速度 y'(t) は時刻 x'(t) における角速度を表す．式 4.1 を用いて検出した角速度と基準角速度との相関係数 r を求める．

$$r = \frac{\sum_t \left\{ (x_{(t)} - x'_{(t)}) \times (y_{(t)} - y'_{(t)}) \right\}}{\sqrt{\sum_t (x_{(t)} - x'_{(t)})^2} \times \sqrt{\sum_t (y_{(t)} - y'_{(t)})^2}} \tag{4.1}$$

4.5 投球フォーム変化検知の設計

本節では角速度センサを用いた投球フォーム変化検知の設計について述べる．投球フォームの変化を計測するために，投球時に計測した角速度データを各モーションに分解し，そこから投球フォームの変化を算出する．まずはじめに，投球モーションの分解について述べる．ついで，取得した投球モーション区間から投球フォーム変化率の算出について述べる．

4.5.1 投球モーションの分解

投球モーションの分解は 4.3.2 で定義した，Release（ボールリリース），Maxout（最大外旋位置），Top（トップ位置），Cock（外旋動作開始位置），Takebaxk（外転動作開始位置）の 5 つのモーションポイントの検出を行う．投球動作では連鎖的にモーションが移り変わって行き，モーションポイントも同様に連鎖的に起こる．また投球動作検知の時点で Release の検出されている．そこで，Release から時系列とは逆方向（図 4.5）に，Release，Maxout，Top，Cock，Takeback の順で投球モーションの分解を行う．

4.5.2 投球フォーム変化率算出の設計

本項では，投球フォーム変化率の算出についての設計について述べる．投球フォーム変化の算出は，事前に登録したユーザの基準投球データと比較する事で算出する．基準投球データは，ユーザが健常な状態での投球フォーム (Good Form) と，意図的に崩した投球フォーム (Bad Form) での角速度データを登録する．

投球動作が検知されると，その投球フォームでの角速度データ (Now Form) を比較することで，投球フォームの変化率 (Per) を算出する．以下に投球フォーム変化率の算出と式（式 4.2，式 4.3）と Good Form と Bad Form での投球それぞれ 10 球ずつのデータを図 4.6 に示す．

$$Gap = GoodForm - BadForm \tag{4.2}$$

$$Per = (GoodForm - NowFrom)/Gap \times 100 \tag{4.3}$$

予備実験は，健常な状態での投球フォームと意図的に崩した投球フィームでの投球動作を行い，GoodForm と BadForm との投球フォーム変率を算出した．

さらに，その二つの投球フォーム変化率の差に意味があるかを確認するために，分散分析を用いて 2 群間の有意差の検定を行った．有意水準 (p) は 5 %とした．被験者は慶應義塾大学体育会野球部の現役選手 5 人にそ

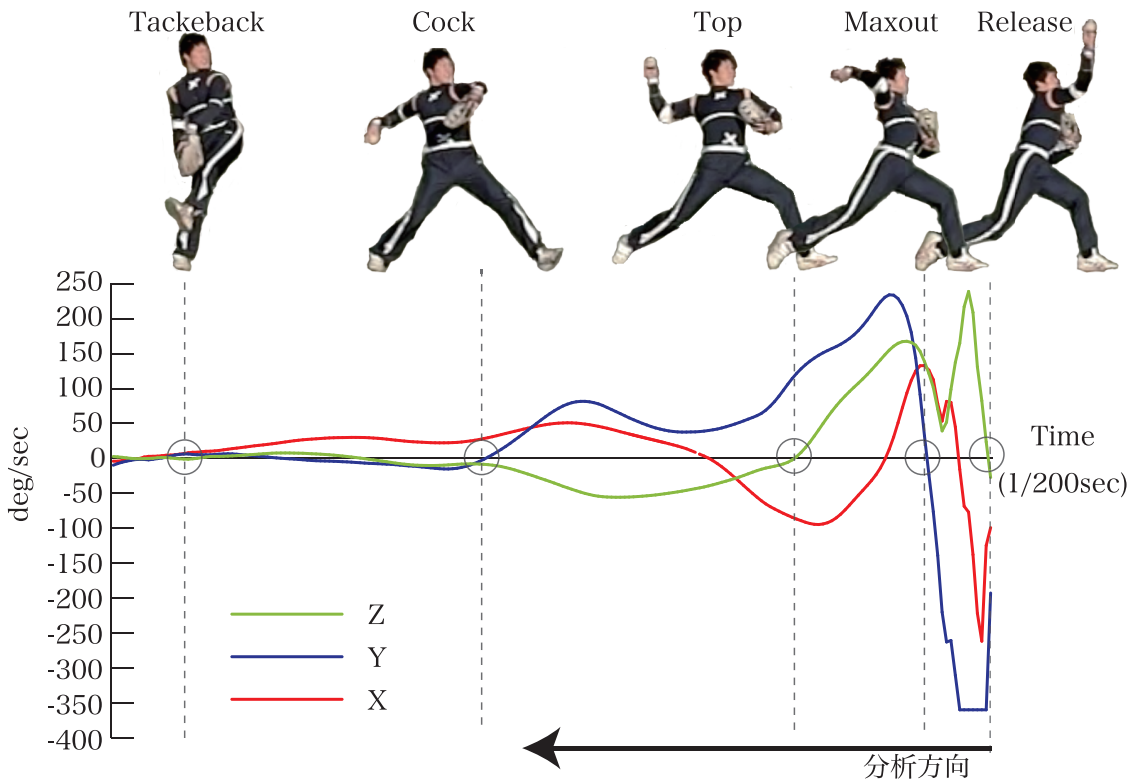


図 4.5　角速度データにおけるモーションポイントと分解方法

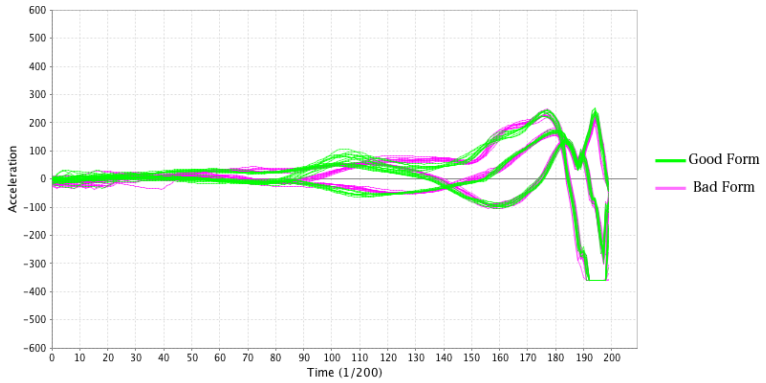


図 4.6　Good Form と Bad Form との差

れぞれ，GoodForm を 10 球，BadForm を 10 球の投球を行った．

分散分析では GoodForm と Bad Form の投球フォーム変化値の間に有意差が無い事を「帰無仮説」とし，有意差がある事を「対立仮説」とする．有意水準とは帰無仮説を棄却する確率であり，統計学的有意差検定における「偶然性」の起こる確率のことである．有意水準が設定した値より小さい値をとれば，帰無仮説が棄却され，対立仮説が採択される．つまり 2 群間には有意な差がある事が証明される．以降の 2 群間の分散分析による有意差の検定においては，全て同様に検定を行った．

三点予想投球フォーム変化検出モデル

全項の投球モーション分解より取得したモーションポイントより，4.3.3 で定義した 3 つの投球フォーム変化について投球フォーム変化率の算出を行う．投球モーション間の値の積分から投球フォーム変化値を求める．1) 肩関節外転角度の低下は，投球動作の開始位置からトップ位置までの積分値．2) 肩関節最大外旋角度の低下は，コッキング動作からボールリリース前 Y 軸値の最大値までの積分値．3) 運動連鎖の崩れは，投球データでの最大外旋タイミングと差とした．投球数の増加に伴い，肩関節角度に変化が出ることから，1),2) 区間での変化を見るために最少単位を台形に見立てた積分を行った．以下に，計算式（式 4.4）を記述する．f(x) は投球時の角速度の変化を表す．t は時刻を表し検出対象区間の始まりから終わりまで積分をことで，積分値 S を求める．

$$S = \sum_{t=0}^{t} \{(f_{t+1} + f_t) \times ((t+1) - t) \times 0.5\} \tag{4.4}$$

ユーザ	平均値 (±標準偏差)		p 値
	Good Form	Bad Form	
A	33.99(± 19.60)	46.32(± 27.72)	0.3095
B	20.17(± 20.83)	69.42(± 12.96)	0.0001
C	14.53(± 12.98)	59.28(± 31.48)	0.0006
D	34.78(± 19.09)	67.04(± 31.6)	0.0128
E	42.55(± 31.68)	71.42(± 23.10)	0.00317
ALL	29.20(± 23.25)	62.96(± 27.26)	0.001

表 4.5　三点予想投球フォーム変化検出モデルの分散分析

分散分析の結果（表 4.5）より，p が 5 %以下であった事から 2 つの投球フォーム変化率には有意な差が認められた．個別に分散分析の結果を確認すると，被験者 A だけが投球フォームの有意差無しと判定された．詳しく分析すると，モーションポイントの誤検出が原因であった．投球動作の分解は Release に近い方が区別精度が高く（図 4.7），Takeback に近づくと検出精度が低下する（図 4.8）．

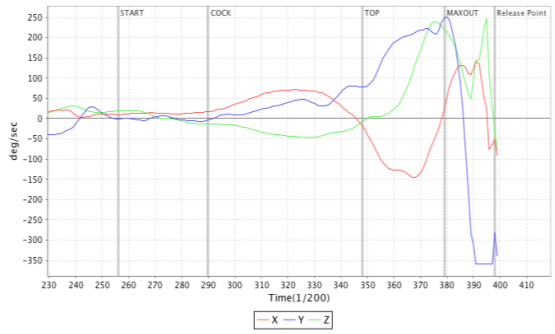


図 4.7　正常な投球フォーム分解結果

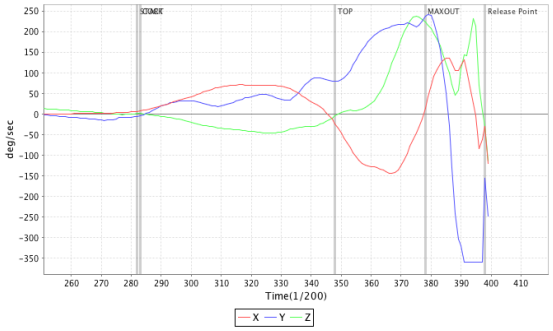


図 4.8　投球動作開始位置の検出ミス

区間限定積分モデル

投球フォームの分解は，トップ位置の判定と最大外旋，リリースポイントの判定は高い精度で分解されている．また，図 4.6 からも分かるように，トップ位置から最大外旋角度位置にかけて角速度の変化が顕著に現れている．そこで，投球フォーム変化の検出期間をトップ位置から最大外旋位置区間に限定（図 4.9）して投球フォーム変化率の算出を行う．区間限定積分モデルではトップ位置から最大外旋回角度位置までの積分値を算出する．

区間限定積分においても三点予想フォーム変化と同様に，Spline 補間を用いて配列数を基準値のデータと同数にする．補間したデータから台形積分を行い，積分値を求めた．

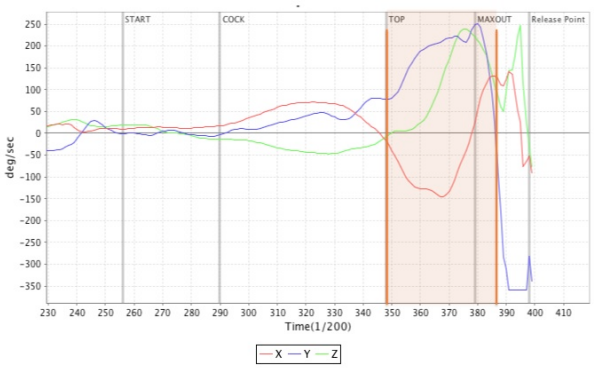


図 4.9　分析対象区間

ユーザ	平均値 (±標準偏差)		p 値
	Good Form	Bad Form	
A	52.58(34.81)	43.62(28.25)	0.549
B	35.56(22.22)	66.04(25.23)	0.0075
C	39.76(31.04)	68.78(21.27)	0.00253
D	41.09(34.28)	52.96(27.12)	0.4019
E	51.19(24.77)	58.1(26.25)	0.5524
ALL	44.03(29.4)	58.5(26.20)	0.0104

表 4.6　区間限定投球フォーム変化検出モデルの分散分析

区間限定積分モデルでは，全体としては有意差が見られた．しかし，被験者個別に分析すると，5 人中 3 人に有意な差がない事が分かった．これらの原因は，最大値が減少している分他の部分が増加しているからと考えられる．

区間限定相関係数モデル

三点予想投球フォーム変化検出モデルでは，Release から Top に近づくについて投球フォーム分解精度が落ちるという問題がった．区間限定積分モデルでは，投球フォーム分解精度の影響を少なくするため，投球動作の分析区間を Release から Top までに限定し台形積分を行った．しかし，積分計算では面積を求めるため，最大値が減少していたとしても，他の部分で値が大きい場合は同じになってしまうために，有意差が得られなかったと考えられる．

そこで，予備実験の問題点を元に，区間限定相関関数モデルによる投球動作の判定を行う．分析範囲を限定し角速度の波形を比較するため，区間を限定して Now Form と Good Form との相関係数を求める．さらに，算出した相関係数から GoodForm と BadForm 間でのパーセンテージを取得する．区間限定相互相関モデルでは投球動作の分析期間を限定し，相互相関計算により Good Form との相関係数を求める．Good Form との相関係数が小さくなるほど，崩れた投球フォームになっていると考えられる．

本投球フォーム変化検出アルゴリズムでは，区間限定相関モデルを用いて投球フォーム変化の算出を行う．

4.6 投球フォーム変化検出アルゴリズムの設計

本節では，本研究が提案する投球フォーム変化検出アルゴリズムの概要を述べる．本アルゴリズムでは，装着型センサデバイス一つを使用し，投球数の増加に伴う投球フォームの変化を検出する．ハードウェア構成とソフトウェア構成について述べ，ソフトウェア構成では各モジュールに分解し，各モジュールの役割について述べる．

4.6.1 ハードウェア構成

投球フォーム変化検知アルゴリズムでは，将来的には肘に装着した小型デバイス内で投球フォーム変化を計測する事で目標としている．本論文では，アルゴリズムの提案のため，投球時に肘に装着した角速度センサから計測値をセンサ内の記憶領域に保存し，投球終了後に PC に取り込み解析を行った．

4.6.2 ソフトウェア構成

投球フォーム変化検出アルゴリズムでは，大きく分けて投球動作判定層と投球フォーム変化算出層で構成される．これらは複数のモジュールとソフトウェアコンポーネントから構成される．図 4.10 にソフトウェア構成図を示す．また，以下にそれぞれの層の概要を述べる．

投球動作判定層

投球動作判定層は，角速度センサと投球動作判定モジュールから構成される．投球動作判定モジュールは一時角速度保存角速度データと内外旋動作取得，相関レベル判定から構成される．角速度センサより計測した三軸角速度データを投球判定モジュールに渡す．投球動作判定モジュール内では．まず一時保存角速度データに角速度データを保存する，次に肩関節内外動作の判定を行い，投球動作候補位置 (リリースポイント候補) を取得する．相関レベル判定において，投球動作候補位置を元に一時保存角速

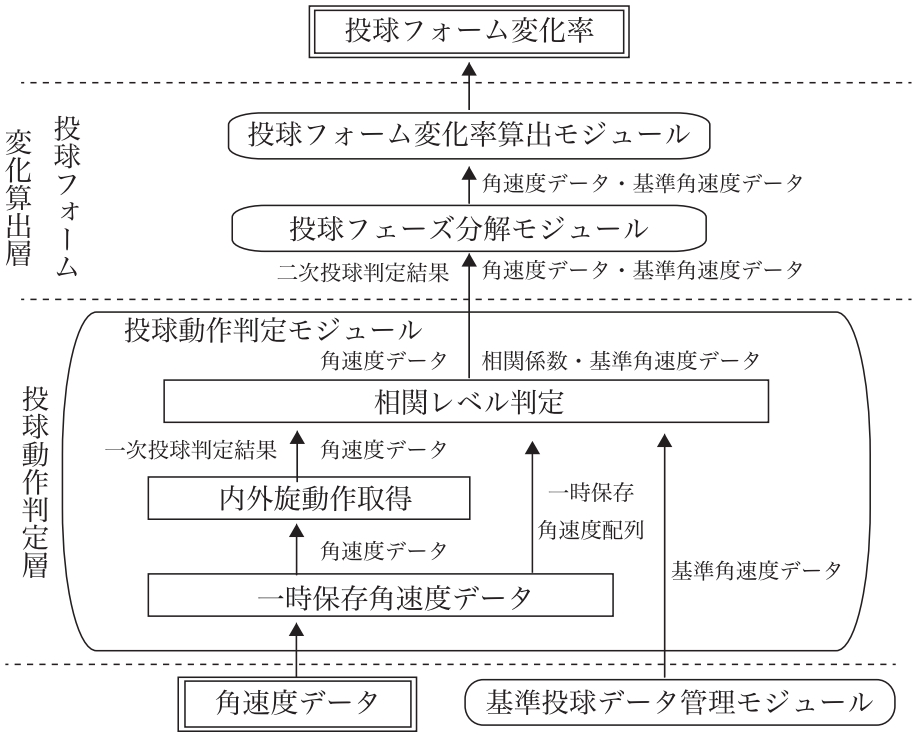


図 4.10　ソフトウェア構成図

度データから一時保存角速度配列を取得し，基準角速度と相関係数を算出しする．さらに閾値を元に投球動作の判定を行う．

投球フォーム変化算出層

投球フォーム偏差算出層は投球モーション分解モジュールと投球フォーム変化算出モジュールから構成される．投球動作判定層より取得した Release を元に，各投球モーションの区切りとなる Maxout・Top・Cock・Takeback を取得する．さらに，投球フォーム変化算出モジュールにおいて，取得したモーションポイントと基準投球データを用いて投球フォーム変化率を算出する．

基準投球データ管理モジュール

基準投球データモジュールでは実際の練習中とは事なるタイミングでユーザが理想的だと考える投球フォーム（GoodForm）10 球と疲れた時の投球フォーム (BadForm)10 球の角速度を事前に計測する．さらに，10 球分の GoodForm での角速度データ配列の平均角速度配列とモーションポイント，10 球分の BadForm での平均角速度配列を保存する．

4.7　まとめ

本章では，投球フォーム変化検出アルゴリズムの設計について全身の構成とモジュールごとの機能，処理を述べた．次章では，本章で行った設計に基づき投球フォーム変化検出アルゴリズムの実装について述べる．

第 5 章

実装

本章では，角速度センサを用いた投球フォーム変化検出アルゴリズムの実装について述べる．まず使用センサデバイスについて説明する．ついで基準投球データベースの実装について述べる．最後に投球フォーム変化検出アルゴリズムにおける投球動作判定層，投球フォーム変化算出層の実装について説明を行う．

5.1 使用センサデバイス

本節では，本投球フォーム変化検出アルゴリズムで使用する角速度センサを述べる．投球フォーム変化算出アルゴリズムでは，200Hz，1500dps で計測可能な角速度センサを用いて投球動作の計測を行った．投球動作は非常に高速動作であるため，肘へは 50G 近い遠心力がかかっているため，高速動作で計測可能な角速度センサが必要である．角速度センサはロジカルプロダクト社製の 9 軸ワイヤレスモーションセンサ (図 5.1, 表 5.1) を使用した．

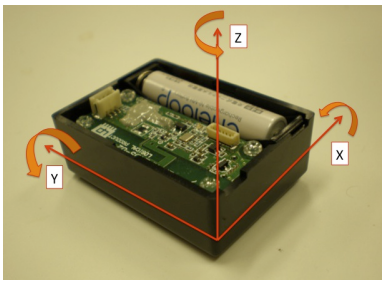


図 5.1　使用角速度センサデバイス

	仕様
角速度センサ	± 1500dps
サンプリング周波数	1〜1000Hz(9 段階)
寸法	55mm × 40mm × 22mm
重量	35g(電池を含む)

表 5.1

5.2 基準投球データ管理モジュールの実装

本節では，基準投球データモジュールの実装について述べる．基準投球データモジュールでは基準投球データとして，任意の理想的な投球フォーム (Good Form) での投球と意図的に崩した投球フォーム (Bad Form) での投球の二つの投球動作時の角速度データ配列を保存する．さらに，最終的な投球フォーム変化率の対象とするため，Good Form と Bad Form の相関係数を算出し，基準投球データに保存する．

まず基準投球データの算出方法について述べる．ついで，基準データの構造について説明を行う．尚，相関係数の算出と投球動作の判定部分については後述する．

5.2.1 基準投球データの算出

本項では，基準投球データの算出手法について述べる．

基準投球データでは，Good Form と Bad Form の 2 つの投球フォームの基準投球データを算出する．Good Form と Bad Form での 3 軸角速度センサデータ配列を取得し，Good Form と Bad From との投球フォーム変化算出アルゴリズムより取得した相関係数を算出する．以下に基準投球データの手順を記述する．

基準値投球データの作成手順

1. 十分なウォーミングアップ
2. Good Form での投球 10 球と，Bad Form での投球 10 球
3. 肩内外旋投球動作判定アルゴリズムによる投球動作の判定
4. Good Form と Bad Form 投球データの平均波形 (Good Form Ave，Bad Form Ave) の算出
5. Bad Form での 10 投球を投球フォーム変化算出アルゴリズムかけ相関係数を取得

1) まず初めに怪我を予防するために，全力投球が可能な状態まで十分なウォーミングアップを行った．

2) その状態から Good Form での投球を 10 球行い，ついで Bad Form での投球を 10 球行った．Good Form では何も意識せずに投球動作を行うように指示した．Bad Form では，意図的に前期コッキングでの最大外転角度を減少させ，後期コッキング期における最大外旋角度の減少を意識した投球を行うように指示した．これにより．肩関節に負荷のかかる肘下がりの投球フォームを意図的に作りだした．

3) 基準投球データを作成する段階では，相関係数モデルを用いた投球動作判定アルゴリズムを使用する事ができないので，内外旋モデルを用いた投球動作判定アルゴリズムにより投球動作の判定を行う．

4) 投球動作判定アルゴリズムより Release が取得できるので，Release から 400 フレームの分を角速度データを取得し，Good Form と Bad Form それぞれの平均波形を取得する．

5) 次に取得した Bad Form の平均波形 (Bad Form Ave) を投球フォーム算出アルゴリズムにかけ，各軸の相関係数を取得する．

5.2.2 基準投球データの保存

算出した基準投球データを表 5.2 のように保存する．

型	変数名	備考
double[400]	goodFormXAve	GoodForm での X 軸角速度データ配列
double[400]	goodFormYAve	GoodForm での Y 軸角速度データ配列
double[400]	goodFormZAve	GoodForm での Z 軸角速度データ配列
double	xCorelation	BadForm と GoodForm の X 軸相関係数
double	yCorelation	BadForm と GoodForm の Y 軸相関係数
double	zCorelation	BadForm と GoodForm の Z 軸相関係数

表 5.2　基準投球データのデータ保存形式

5.3 投球動作判定層の実装

本節では，投球フォーム変化検出アルゴリズムにおける投球動作判定層の実装について述べる．投球動作判定層では相関係数モデルを用いて投球動作の判定を行った．まず，計測した角速度データを一時的に一時保存角速度データに保存し，次に内外旋モデルを用いて投球動作を判定しリリースポイント（Release）の取得を行う．Release から逆算した現在の投球フォームデータ (Now Form) を一時保存角速度データより取得し，基準投球データに保存されている Good From との相関係数を求める．各軸の相関係数が閾値以上の時，投球動作と判定する．

5.3.1 一時保存角速度データ

時系列で取得される三軸の角速度データを一時保存角速度データに保存する．最大保存データ数は 400 フレームとした．400 フレーム分の配列を確保しそこにデータを追加する．投球動作判定モジュールの相関係数算出部よりリクエストがあった場合に配列データを返す．三軸角速度データは表 5.3 のように保存した．

型	変数名	備考
double[400]	nowFormXBox	X 軸一時保存角速度データ配列
double[400]	nowFormYBox	Y 軸一時保存角速度データ配列
double[400]	nowFormZBox	Z 軸一時保存角速度データ配列

表 5.3　一時角速度保存データのデータ保存形式

5.3.2 肩関節内外旋動作取得部

本項では肩関節内外旋動作部の実装について述べる．ボールリリース付近で発生する肩関節の急激な内外旋動作を閾値から判定する．1000 球 (10 人分) の投球データを確認した結果，投球動作において肩関節の内外旋

動作あり，かつ肩関節内外旋動作において Y 軸値が-300deg/sec 以下になる事が分かった．そこで，閾値は Y 軸値が-300deg/sec 以下になった時とした．また，既存研究 [8] よりボールリリース付近で角速度が 0 になる事が分かっている．そこで急激な内旋速度 0 になった位置を Release と仮定した．図 5.2 に投球時の角速度データにおける内外旋判定閾値と Release 位置を示す．

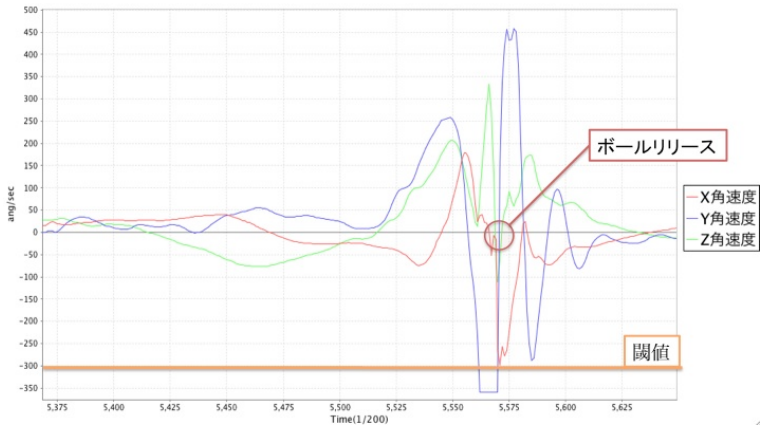


図 5.2　内外旋判定閾値と Release 位置

5.3.3　相関係数算出部

本項では相関係数算出部について述べる．肩関節内外旋動作取得部より肩関節外内旋動作が検知がされると，一時保存角速度データに接続し保存投球配列 (Now Form) を取得する．さらに，基準投球データに接続し，Good From を取得する．GoodForm と NowForm の 2 つの配列の類似性を確認するために，式 4.1 を用いて相関係数を求める．相関係数はふたつの配列に類似性を確認するために使われる．相関係数 (r) は-1 から 1 までの実数値をとり，相関係数が 1 に近づけば正の相関あることを意味し，-1 に近づけば負の相関関係がある事を意味する．0 に近ければ，相関関係が低い事を意味する．

5.3.4　相関係数モデルによる投球動作判定の精度

肩関節内外旋動作取得部より Release 位置が検出されている．そこで Release を基準にして，時間軸とは逆方向に分析を行った．まず初めに，一時保存角速度データと基準投球データの GoodForm からそれぞれ 200 フレーム分の角速度データを取得し，各軸の相関係数を算出する．算出した各軸の相関係数が閾値以上となった場合に投球動作と判定した．閾値は Y 軸値が 0.9 以上，X 軸値と Z 軸値がそれぞれ 0.5 以上とした．肩関節内外旋動作判定部において，Y 軸値の変化を元に投球動作判定を行っているため，Y 軸値は高い値に設定した．表 5.6，表 5.5 に相関係数モデルを用いた投球動作判定の予備実験の結果を示す．予備実験として，共通項目モデルと内外旋モデルでの評価と同じ手法を用いて，相関係数モデルによる被験者 10 人の投球動作の判定と投球動作以外の動作での誤検知の検証を行った．

投球動作判定の結果，1000 球全ての投球動作を検知する事ができた．また，投球動作以外の動作での誤検知の検証のためにスイング動作 40 回 (4 人) とジャンプ動作 40 回 (4 人)，20m ダッシュ 8 本の分析も行ったが，いずれの動作においても誤検知は無かった．

ユーザ	投球動作検知数 (100 球)	誤検知数
A	100	0
B	100	0
C	100	0
D	100	0
E	100	0
F	100	0
G	100	0
H	100	0
I	100	0
J	100	0
ALL	100	0

表 5.4　相関関数モデルによる投球動作判定

ユーザ	ダッシュ (30 × 2 本)	ジャンプ (10 回)	バットスイング (10 スイング)
A	0	0	0
B	0	0	0
C	0	0	0
D	0	0	0

表 5.5　誤検知評価

以下に相関係数を用いた投球動作判定アルゴリズムのソースコードを示す.

相関関数投球判定アルゴリズム

```
public class CorrelationTUmpire extends Umpire {

  private boolean throwState = false;
  private final int NEED_WIDTH = 200;
  private final int XR_LEVEL = 50; //X 軸相関係数閾値
  private final int YR_LEVEL = 80; //Y 軸相関係数閾値
  private final int ZR_LEVEL = 50; //Z 軸相関係数閾値

  public CorrelationTUmpire(double[] xNow, double[] yNow, double[] zNow,
                            double[] xGood, double[] yGood, double[] zGood){
  //=====相関関数の計算
   CorrelationCoefficient CC_x = new CorrelationCoefficient(xNow, xGood);
   CorrelationCoefficient CC_y = new CorrelationCoefficient(yNow, yGood);
   CorrelationCoefficient CC_z = new CorrelationCoefficient(zNow, zGood);
   boolean judgeOfThrow = compareNowAndGood(CC_x.getR(),CC_y.getR(),CC_z.getR());
   if(judgeOfThrow == true)throwState = true;
  }

  private boolean compareNowAndGood(double xR, double yR, double zR) {
   boolean judge = false;
   double showx = (100 - (xR*100));
   double showy = (100 - (yR*100));
   double showz = (100 - (zR*100));
   if(XR_LEVEL<xR && YR_LEVEL<yR && ZR_LEVEL<zR)judge = true;
   return judge;}
  public boolean getThrowState(){return throwState;}
}
```

5.4　投球フォーム変化算出層の実装

本節では投球フォーム変化検出アルゴリズムにおける投球フォーム変化算出層の実装について述べる．投球フォーム変化算出層は投球モーション分解モジュールと投球フォーム変化率算出モジュールの 2 つのモジュールから構成される．投球フォーム変化検知アルゴリズムでは，投球動作判定モジュールより取得した投球データ配列を投球モデル 4.3.2 を元に投球フェーズを分解する．投球した分解位置を基準に投球フォーム変化率を算出し，基準投球データベースの GoodForm と BadForm の相関係数と比較する事で投球フォーム変化率を算出する．以下に各モジュールの実装について述べる．

5.4.1　投球フェース分解モジュール

本項では投球フェーズの分解について述べる．投球フェーズの分解は投球フェーズ 4.3.2 で定義した投球モデルを元に，Release・MaxOut・Top・Cock・TackBack の 5 点のモーションポイント (図 5.3) を取得する事で行った．

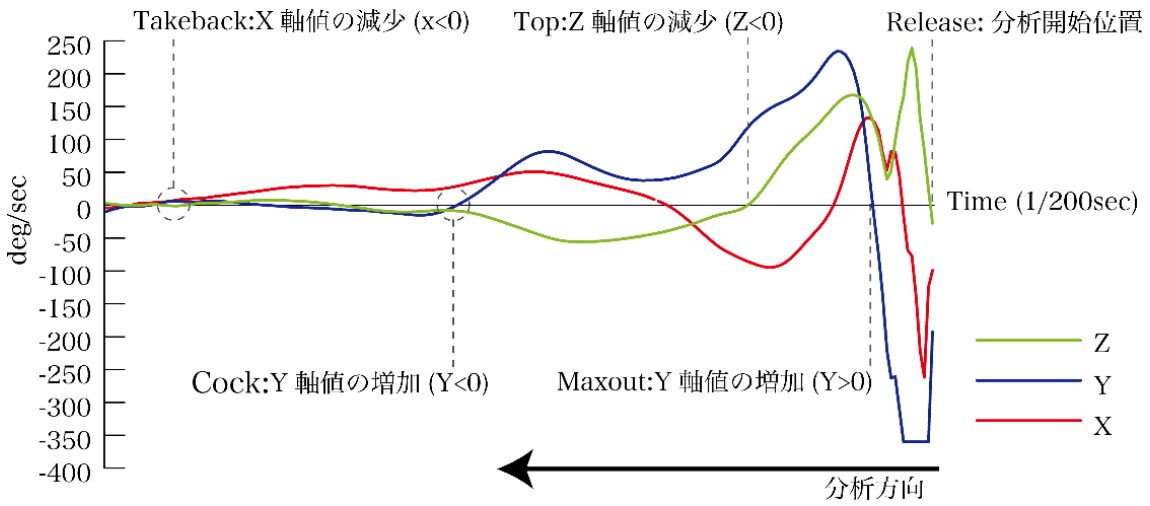


図 5.3　モーションポイント位置

以下に，実装した投球フォーム分解アルゴリズムのソースコードを示す．

投球モーション分解アルゴリズム

```
public class ThrowMotionClassify {

 int start, cock, top, maxout, release;
 boolean startCheack =true, cockCheack =true, topCheack=true ,maxoutCheack=true ;
 int topLev=0, cockLev=0, startLev=0;
 int p = 0 , cockLimit = 0 , topLimit=0;

 public ThrowMotionClassify(double[] x, double[] y, double[] z) {
   int size = x.length;
   for(int i=1; i<size; i++){ //release point から逆算して投球モーション分解を行う
    p = size - i;
    if(maxoutCheack==true ) getMaxout(y[p] , y[p-1] , p); //1)Maxout
    if(topCheack==true&&maxoutCheack==false)getTopPosition(z[p], z[p-1],p); //2)Top
    if(cockCheack==true&&topCheack==false)getCockPosition(y[p],y[p-1],p); //3)Cock
    if(startCheack==true&&cockCheack==false)getStartPosition(x[p],x[p-1],p);//4)Takeback
 }}

 //-------get Takeback point--------
 private void getStartPosition(double xNow, double xNext, int p) {
   if(xNow < 10){
    start = p;
    startCheack = false;}}

 //-------get Cock point-------
 private void getCockPosition(double yNow, double yNext, int p) {
   if(yNow < 0){
    cock = p;
    cockCheack = false;}}

 //-------get Top point-------
 private void getTopPosition(double zNow, double zNext, int p) {
   if(zNow < 0){
    top = p;
    topCheack = false;}}

 //-------get Maxout Point-------
 private void getMaxout(double yNow, double yNext, int p) {
   if(yNow>yNext && yNow>0 && yNext>0){
    maxout = p;
    maxoutCheack = false;}}

 //---Return Method----
 public int getStartPoint() { return start; }
 public int getCockPoint()  { return cock; }
 public int getTopPoint()   { return top; }
 public int getMaxoutPoint(){ return maxout; }
}
```

5.4.2 投球フォーム変化率算出モジュール

事前実験として三点予想投球フォーム変化検出モデル（4.5.2）と区間限定積分モデル 4.5.2 の問題点を元に，分析範囲を限定にし角速度の波形を比較する区間限定相関係数モデルによる投球フォーム変化率の算出を行う．区間限定相関係数モデルでは，分析区間を限定して Now Form と Good Form との相関関数計算を行う．さらに，算出した相関係数と GoodForm と BadForm の相関係数を比較することで投球フォーム変化率を取得する．従って，区間限定相関係数モデルでは Good Form との相関係数が小さくなるほど，崩れた投球フォームであると言える．

予備実験として，三点予想投球フォーム変化検出モデルと区間限定積分モデルの予備実験と同様に，通常の投球フォームと意図的に崩した投球フォームのでの投球フォーム変化率の評価を行った．結果を表 5.6 に示す．

ユーザ	平均値 (±標準偏差)		p
	Good Form	Bad Form	
A	30.4(± 24.20)	68.68(± 17.01)	0.0007
B	12.55(± 5.54)	80.86(± 15.17)	0.0001
C	10.07(± 8.4)	82.46(± 15.17)	0.0001
D	37.9(± 26.56)	84.86(± 13.61)	0.0001
E	50.11(± 21.33)	78.54(± 13.21)	0.0021
ALL	28.21(± 23.97)	79.15(± 15.35)	0.0001

表 5.6　区間限定相関係数モデルの分散分析

区間限定相関係数モデルでは，全体として 2 つの投球フォームには有意差がある事が証明された．さらに被験者を個別に確認しても全ての被験者の有意水準である p が 0.05 以下となっている．つまり，区間限定相関係数モデルを用いて投球フォーム変化を検知可能である．

5.5 まとめ

本章では，角速度センサを用いた投球フォーム変化検出アルゴリズムについての実装について述べた．次章では，本アルゴリズムの正当性を評価するための評価実験について述べる．

第 6 章

評価

本章では，装着型角速度センサを用いた野球選手野手の投球フォーム変化検出アルゴリズムの評価実験の概要を説明し，実験結果を示す．最後に，実験から得られた結果をもとに投球フォーム変化検出アルゴリズムについての考察を行う．

6.1 評価実験の概要

本節では，本論文における投球フォーム変化検出アルゴリズムの評価実験の概要を述べる．初めに，実験環境や被験者，実験手順について説明する．その後，実験結果を示し，本評価実験に対する考察を述べる．

6.1.1 実験環境

本研究では，実際の練習での投球における投球フォーム変化の検出を想定しているため，野球場にて評価実験を行った．グランドは慶應義塾大学体育会野球部の下田グランド野球場を使用した．本実験では，石橋 [15] の実験を参考に 100 球連続での投球を行った．評価項目は，提案するアルゴリズムによる計測とその比較対象として DLT 法による投球動作解析（図 6.2），ボールコントロール能力の計測の 3 つの評価を行った．投球距離は野球における投球距離の基準となる，塁間を想定し 27.431 メートル（図 6.1）とし，任意のタイミングで 8 割以上の力加減での投球を行った．本実験による肩関節症の発生を予防するため，十分にウェオーミングアップをした状態から実験を行った．センサは，投球による横ずれを防ぐため．スポーツ用アームバンド (Phiten 社製:ファイテン パワースリーブ) の上に，マジックテープを用いてセンサを固定した．さらにその上から伸縮性のあるスポーツ用キネシオテープ (DOME 社製 キネティックプラス) と非伸縮性のテ―プで選手の投球の妨げにならない程度の強さで固定した．

6.1.2 被験者

被験者は現役の慶應義塾大学体育会野球部員 5 名とし，部員の中から無作為に選択した．被験者のポジションは本システムでは，システム利用を野手に想定してるため，投球以外の捕手・内野手・外野手とした．表 6.1 に被験者の身体特徴の分布を示す．

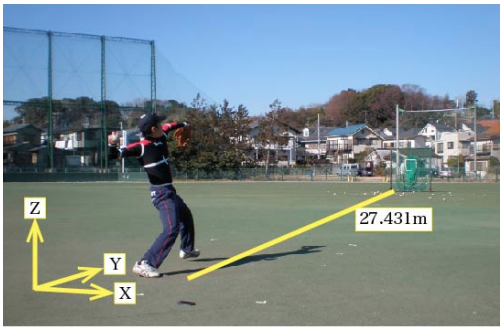


図 6.1　投球距離と方向

図 6.2　ハイスピードカメラ位置と仮想三次元空間

	平均値 (±標準偏差)
身長 (cm)	171.4 (± 1.62)
体重 (kg)	68.6 (± 5.46)
年齢 (歳)	20 (± 0.49)

表 6.1　被験者の身体特徴

6.1.3　実験手順

まず初めに被験者に本実験に関する説明を行う．本実験の危険性を理解してもらった上で，実験中に肩や肘に痛みを感じた場合は直ちに中断する事とした．

実験では 27.431 メートル離れた集球ネットに向かって 100 球連続して投球を行った．この際，角速度センサによる計測とコントロール精度の判定は 100 球全てに対して行った．ハイスピードカメラによる撮影は 1〜10 球目，46〜55 球目，91〜100 球目までの 3 群間で計測を行った．

ボールコントロール能力 : 制球能力

本実験では，実際にグランドで行われている判断基準との，比較を行うために投球数の増加に伴うコンロール能力の変化の計測を行う．慶應義塾大学・高校野球部に対して行った実際の練習での投球疲労の判断基準に関するアンケートによると，「平常時よりもボールコントロール能力が低下する時」が疲労の判断基準であるという解答が多く得られた．そこで，連続投球時のボールコントロール精度の評価を行った．的の大きさは集球ネットの中心から半径 50cm ずつ四角形が大きくなる的（図 6.3）とした．得点は的の中心から 5,4,3,2,1 点とし，的を外れると 1 点とした．

なお，野球では投球能力の評価を行う場合に，スピードガンによる球速の評価がしばしば使われる．しかし，本システムでは対象が野手の日常的な練習のであり，スピードガンを用いて日常的に球速を計測する事は現実的に不可能でことから球速の計測は行わなかった．

投球フォーム変化計測アルゴリズム : センサ

実験中は角速度センサによる角速度データのロギングのみを行い，実験終了後に PC に角速度データを csv 形式で読み込み，提案アルゴリズムによる投球フォーム変化率の算出を行った．角速度センサは

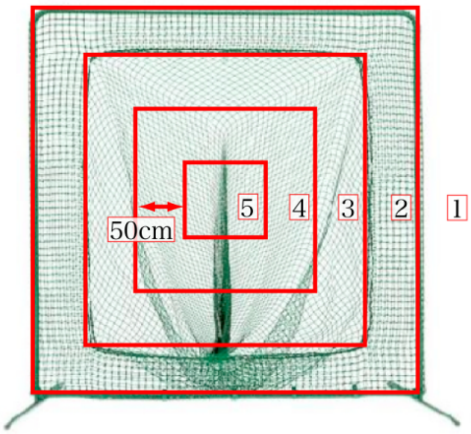


図 6.3　得点範囲

ロジカルプロダクト社製の 9 軸ワイヤレスモーションセンサを使用し，サンプリングレートは 200Hz で計測を行った．

図 6.4　センサ装着例

DLT 法による三次元投球動作解析 ： 肩外転角度

DLT 法による三次元動作解析では，対象となる物体を立体的にとらえるために同一動作を 2 台以上のハイスピードカメラでの撮影 (CASIO EXILIM PRO EX-F1) を行った．さらに，キャリブレーション，ハイスピードカメラの同期，被験者へのマーカーの装着を行い，解析ソフトを用いて合成し解析を行った．

キャリブレーションポイントは，投球方向を Y 軸として右手座標系になるように原点を定め，Y 軸方向に 4 メートル，X 軸方向に 2 メートル，Z 軸方向に 2.5 メートルの空間に設定した．

ハイスピードカメラの同期は，試技直前に LED ライトによる同期信号を撮影し，後の処理でカメラ間での同期を行った．

被験者へのマーカーの装着は図 6.5 のように，投球側の肩峰 (RSholder,LSolder) と，上腕骨外顆

(RElbow,LElbow)，撓骨茎状突起 (RWrist)，胸骨検鏡突起 (Chest)，胸骨最上部 (Neck)，頭 (Head) の 8 点とした．服装は，上半身は黒色のスポーツ用フィット系アンダーシャツとした．解析ソフトはディケイエイチ社製の Frame-DIAS 4 System を使用し，撮影したマーカの仮想中点にデジタイジングを行い，肩関節角度の算出を行った．肩関節角度は既存研究より，投球数の増加に伴い投球フォームの変化が指摘されている，ECK における肩関節最大外転角度の低下の計測を行った．肩関節外転角度は Neck から RSholder を結ぶベクトルと RSholder から RElbow を結ぶ 2 つのベクトルの内積から算出した．

図 6.5　マーカーポイント設置位置

6.1.4　本実験での目的

本研究の目的は，グランドでの練習において日常的な取得が困難である，客観的な投球時の疲労状態を装着型角速度センサを用いて検知することである．本実験では，投球数の増加に伴う提案アルゴリズムによる投球フォーム変化率と DLT 法による投球フォーム変化，制球能力の変化の計測を行い，比較する事で提案アルゴリズムの有用性を評価する．

本研究の背景でもあるように，主観的な判断では客観的な疲労状態の判断は困難であると考えられる．そこで第一段階として，実際に日常的に行われている投球疲労取得手法が正確でない事を証明する．

第二段階として，センサによる投球フォーム変化率の算出と既存手法である DLT 法による投球フォーム変化との比較を行う．比較の結果，提案アルゴリズムと DLT 法が同じ傾向を示す場合は，提案アルゴリズムを用いて投球数の増加に伴う投球フォームの変化を検知可能であるとする．

6.1.5　評価手順

本実験の評価として．ボール制球能力と本提案アルゴリズムにより取得した投球フォーム変化率，DLT 法より取得した肩関節外転角度の 3 つの結果をそれぞれ Group1:1〜10 球目・Group2:46〜55 球目・Group3:91〜100 球目の 3 群に別け，3 群間の分散分析を行った．3 群以上ある分散分析では，3 群全体の検定と群ごとの検定の二段階の検定を行う必要（図 6.6）がある．第一段階として，3 群全体の F 検定を行う．F 検定からデータ全体に有意差があると判定された場合，第二段階として多重比較を行い，全ての群同士の比較を行った．多重比較は Takey-Framer の HSD 検定を用いた．さらに，Dunnett の検定を用いて Group1 をコントロール群とした際の有意差の検定も行った．尚，有意水準 (p) は 5 %とした．帰無仮説を「2 群間 (又は 3 群間，全体) には有意差が無い」とし，対立仮説を「2 群間 (又は 3 群間，全体) には有意差がある」とすると，有意水準を満たせば帰無仮説は棄却され，対立仮説か採択されるため有意差がある事が証明される．三群間の分散分析は SAS Institute 社の統計解析ソフト JMP8 を用いて分析を行った．

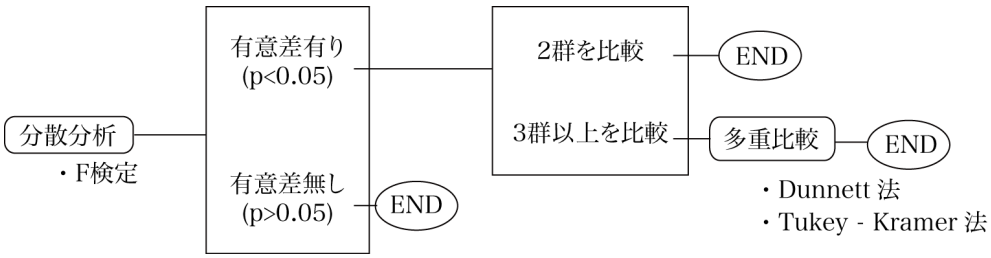


図 6.6　分散分析手順

6.2 評価実験結果

本節では制球能力と，本アルゴリズムによる投球フォーム変化率，DLT 法による肩関節外転角度の変化の 3 つの実験データの分散分析結果について述べる．

6.2.1 制球能力の分散分析結果

3 群間の分散分析の結果 (表 6.2)，Group1 における制球能力の平均±標準偏差は 3.44(± 1.24)，Group2 では 3.46(± 1.36)，Group3 では 3.3(± 1.28) であった．分散分析の結果，制球能力全体には有意差はみられなかった (F=0.23,p=0.8)．被験者別に分散分析の結果を見ても，全ての被験者において有意差が見られない事から，投球数の増加に伴い制球能力は低下しないと言える．つまり，実際の練習において投球疲労判定手法として用いられている制球能力の低下では，定量的に投球疲労判定する事は困難であると考えられる．

被験者名	平均値 (±標準偏差)			F	p
	Group1	Group2	Group3		
A	3.4 (± 1.17)	3.6 (± 1.35)	3.4 (± 1.17)	0.09	0.92
B	2.8 (± 1.62)	3.0 (± 1.63)	3.2 (± 1.4)	0.17	0.85
C	3.4 (± 1.17)	3.2 (± 1.69)	3.2 (± 1.48)	0.01	0.94
D	4.1 (± 0.88)	3.4 (± 1.17)	3.3(± 1.25)	1.54	0.23
E	3.5 (± 1.08)	4.1 (± 0.74)	3.4 (± 1.35)	1.22	0.31
ALL	3.44(± 1.24)	3.46(± 1.36)	3.3(± 1.28)	0.23	0.8

表 6.2　制球能力の三群間分散分析結果

6.2.2 投球フォーム変化率の分散分析結果

投球フォーム変化検出アルゴリズムより取得した投球フォーム変化率の分散分析の結果を表 6.3 に示す．分散分析の結果，センサによる投球フォーム変化検出アルゴリズムには計測結果全体に有意差が見られた (F=20.38, p=0.001)．

第二段階として Turkey-Kramer HSD 検定による多重比較と，Group1 をコントロール群とした Dunnett の検定を行った．Abs(Dif)-LSD が正の値の場合，ペアになっている平均値との間に有意差がある事を示す．有意性の表記は*: p<0.05, **:p<0.01, n.s:not significant(非有意) とした．

Turkey-Kramer HSD 検定の結果を表 6.4 に示す． Group1-Group3，Group2-Group3 に有意差が見られた．

さらに，Group1 をコントロール群とした Dunnett 検定の結果（表 6.5，図 6.7）より，Group1-Group2，Group1-Group3 に有意差が見られた．

被験者名	平均値 (±標準偏差)			F	p
	Group1	Group2	Group3		
A	24.19(± 11.05)	30.78(± 4.46)	22.11(± 4.46)	1.03	0.3707
B	52.23(± 9.72)	80.91(± 11.71)	87.35(± 13.18)	25.88	0.0001
C	22.48(± 2.82)	99.73(± 2.82)	100(± 2.82)	250.99	0.0001
D	36.62(± 4.78)	46.96(± 4.78)	57.82(± 4.78)	4.92	0.0151
E	68.03(± 4.16)	94.84(± 4.16)	99.73(± 4.16)	16.84	0.0001
ALL	40.71(± 22.21)	70.64(± 29.9)	73.04(± 32.12)	20.38	0.0001

表 6.3　100 球連続投球における投球フォーム変化検出アルゴリズムデータの三群間分散分析結果

	Abs(Dif)-LSD		
	Group1	Group2	Group3
Group1	-13.44	-10.69	19.24
Group2	-10.69	-13.45	16.49
Group3	19.24	16.49	-13.45

表 6.4　Tukey-Kramer の HSD 検定による全てのペアの比較 -センサ-

	Abs(Dif)-LSD	p	有意性
Group3	20.01	0.0001	**
Group2	17.25	0.0001	**
Group1	-12.7	1.0000	n.s

表 6.5　Dunnett の検定を使ったコントロール群との比較 -センサ-

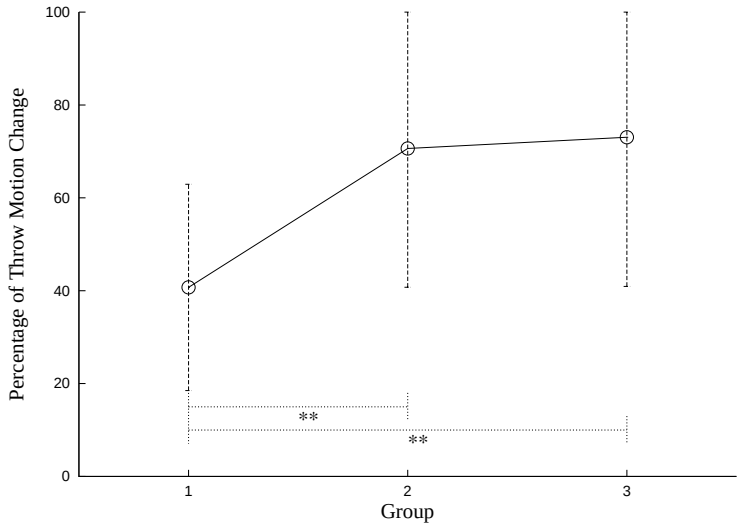


図 6.7　100 球連続投球時の投球フォーム変化率の平均

6.2.3 肩関節外転角度計測の分散分析結果

DLT 法による肩関節外転角度の分散分析の結果を表 6.6 に示す．分散分析の結果，肩関節外転角度の結果には全体に有意差が見られた (F=19.0042, p=0.001).

被験者名	平均値 (±標準偏差)			F	p
	Group1	Group2	Group3		
A	11.77(± 5.65)	11.43(± 7.12)	21.94(± 5.6)	9.021	0.001
B	11.78(± 2.99)	13.08(± 3.98)	12.43(± 3.12)	0.3645	0.6979
C	10.81(± 2.83)	12.22(± 3.43)	11.08(± 2.01)	0.7094	0.5009
D	10.72(± 4.74)	15.33(± 2.91)	20.33(± 3.88)	15.0515	0.0001
E	11.99(± 3.43)	10.08(± 2.28)	11(± 1.98)	1.3068	0.2873
ALL	11.41(± 3.95)	12.43(± 4.48)	15.36 (± 5.99)	8.7928	0.0002

表 6.6　100 球連続投球における DLT 法による肩関節外転角度データの三群間分散分析結果

第二段階として，Turkey-Kramer HSD 検定の結果を表 6.7 に示す．その結果．Group1-Group3，Group2-Group3 にかけて有意差が見られた．

	Abs(Dif)-LSD		
	Group1	Group2	Group3
Group1	-2.31	-1.3	1.63
Group2	-1.3	-1.31	0.62
Group3	1.63	0.62	-2.31

表 6.7　Tukey-Kramer の HSD 検定による全てのペアの比較 -DLT 法:肩関節外転角度-

さらに，Group1 をコントロール群とした Dunnett 検定の結果（表 6.8，図 6.8）より，Group1-Group2 には有意差は見られなかったが，Group1-Group3 に有意差が見られた．

	Abs(Dif)-LSD	p	有意性
Group3	1.76	0.0002	**
Group2	-1.17	0.4793	n.s
Group1	-2.18	1.0000	n.s

表 6.8　Dunnett の検定を使ったコントロール群との比較 -DLT 法:肩関節外転角度-

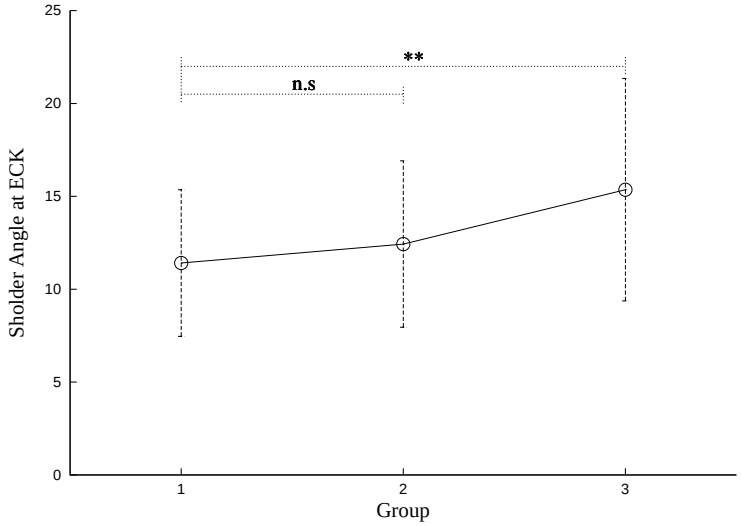


図 6.8　100 球連続投球時の肩関節外転角度の平均値

6.3　考察

本節では，評価実験結果を元に考察を述べる．

提案アルゴリズムの有用性

投球精度の分散分析結果より，データ全体には有意差が見られなかった事から，投球数の増加に伴い投球精度は変化しないため，投球精度を用いて投球疲労を判定する事は有用では無いと言える．

投球フォーム変化率と肩関節外転角度の分散分析結果より，計測データ全体に有意差があり，Turkey-Kramer HSD 検定においても双方の Group1 と Group3，Group2 と Group3 に有意差があった．投球フォーム変化算出アルゴリズムと肩関節外転角度の双方から同じ Group において有意差を取得できたことから，提案アルゴリズムを用いて投球数の増加に伴う投球フォームの変化を計測する事が可能であると言える．つまり，本提案アルゴリズムは投球フォーム変化の計測において有用であると言える．

しかし，Dunnett 検定において投球フォーム変化率では Group1 と Group2，Group1 と Group3 に有意差があったが，肩関節外転角度においては Group1 と Group3 にのみ有意差があった．この現象の原因は，投球フォーム変化率の算出の際に BadForm を意図的に作りだした値で設定したためと考えられる．投球フォーム変化率では，100 %以上になった投球フォーム変化率は 100 %になるように設定していたため，Group3 付近で投球フォーム変化率が 100 %に達する試技があった．つまり，基準投球データに登録した変化率よりも実際の投球じ発生した投球フォーム変化率の方が大きかったために，投球フォーム変化率が正確に計測できなかったと考えられる．

この問題は日常的に投球フォーム変化率を計測して行き，基準投球データを学習する事で解決可能であると考えられる．Group3 の投球フォーム変化率を正確に取得する事ができれば，相対的に Group2 の値が小さくなるので，肩関節外転角度の Dunnett 検定と同様の Group に有意差が計測できると考えられる．

DLT 法による投球動作解析の負担

ECK における肩関節最大外転角度を計測するために，DLT 法を用いた三次元動作解析を行った．DLT 法は屋外でもハイスピードカメラが 2 台だけで計測が可能であるが，解析には非常に多くの時間が必要である．今回動作解析の対象とした ECK の動作時間は投球動作の開始 (Takeback) からトップ位置 (Top) までの約 0.5 秒間の動作の解析を行った．マーカポイント位置の指定は（デジタイジング）は全て手動で行わなければならず．ハイスピードカメラは 300fps で撮影を行っているため 1 球当たり 150 フレーム存在する．さらに，肩関節外転角度を算出するためには Neck，RSholder，RElbow の 3 点のデージタジングと，2 方向から投球動作の撮影を行っているため別方向のカメラから同様のデジタイジングを行う必要がある．つまり 1 球当たり，900 点のデジタイジングが必要であり，1 球の投球動作の解析にだけでも 45 分の時間を要した．今回の実験では，1 人当たり 30 球の解析を 5 人を行ったので，全ての投球動作のには約 112.5 時間の時間を要した．DLT 法を用いて投球の増加に伴う投球動作の変化の計測は可能であるが，解析には非常に時間が必要であるため日常的に使用する事は現実的ではない．

投球フォーム変化検出アルゴリズムの精度と課題

投球動作判定は，ユーザの基準投球データを用いた事で検知値率が飛躍的に向上した．今回行った評価実験では 500 球中 500 球全ての投球動作を検知することができた．しかし，今回の実験では投球動作のみしか行っていない，実際の練習において選手に装着させ投球数を計測するなど，今後は実際の練習を考慮する必要である．

投球フェーズ分解では，ECK における上腕の使い方に個人差が大きい事ため Takeback と Cock の検知精度が低かった．そこで，投球フェーズ分解においても基準投球データを用いることで検知精度が向上すると考えられる．区間限定相関係数モデルでは Maxout から Top の区間のみを用いて投球フォーム変化率を算出したが，Takeback や Cock の検知精度が向上する事で，運動連鎖変化を取得や Takeback 付近での投球フォームの変化計測が可能になるなど，別の視点から投球フォ―ム変化を検出する事が可能になる．

実際の練習での投球では，様々な投球強度やフォームでの投球を行う．今回は，投球数の増加に伴う投球フォーム変化の計測を念頭に置いたため投球距離や投球強度・投球フォームはほぼ一定の動作となったが実際の練習を想定した場合，投球強度も考慮する必要がある．

投球数の増加に伴う疲労計測の実験モデル

実際の練習では投球動作だけでなく，バットスイングやランニングなど様々な動作同時に行っている．今回の実験では，既存実験手法を参考に 100 球連続投球を行った．しかし，より実戦に近い状態での投球フォーム変化を検出するためには，練習前・練習中・練習後での計測や，100 球連続投球時に 10 球毎にランニングやジャンプ，バットスイングなどの工夫が必要である．また，今回の実験では被験者に投球動作以外の動作を行わさないために三次元動作解析と装着型センサによる角速度計測，投球精度の評価を行った．しかし，投球時の疲労を検出する上で，最大発揮筋力や関節可動域などの生理学的な指数も疲労度を計測する上では計測する必要があった．

6.4 まとめ

まず初めに，実際の練習現場で日常的に行われている客観的な投球疲労取得手法として制球能力の評価を行った．分散分析の結果，全体にも被験者別にも有意差が見られなかったため，投球疲労の目安として制球能力の低下を用いることは不十分である．

提案アルゴリズムより取得した投球フォーム変化率と DLT を用いた肩関節外転角度の分散分析を行った．分散分析の結果，Turkey-Kramer の HSD 検定において同じ群にかけて有意差が見られた事から，本提案アルゴリズムを用いて投球数の増加に伴う投球フォーム変化の検知が可能である．

次章では，本研究の結論について述べる．

第 7 章

結論

本章では，本研究における今後の展望，本論文のまとめを述べる．

7.1 今後の展望

実際に世の中で利用することを想定した場合，本論文での角速度センサを用いた投球フォーム変化率検出アルゴリズムの設計・実装では十分ではない．本節では投球フォーム変化率検出アルゴリズムの設計・実装における問題点と解決策を述べ，今後の展望を述べる．

7.1.1 投球フォーム変化検知の精度向上

本研究で提案した投球フォーム変化検出アルゴリズムでは，大学生野球部員の塁間投球時の角速度データを元にアルゴリズムを実装した．

実際の練習では，野手は全ての投球を全力で行っているわけではなく，練習メニューや守備位置に応じた投球強度での投球を行っている．従って，投球距離と投球強度も考慮した投球フォーム変化検出を行う必要がある．現在 3 つの解決策を考えている．1 つ目は，共通モデルの作成である．複数の投球距離と強度に分けた予備実験を行い，投球距離と速度に共通する傾向モデルを作成する．2 つ目は，学習システムを実装である．本システムは日常的なシステムの使用を考えているので，基準投球データを学習する事で精度の向上が期待できる．3 つ目は，個人情報の登録による解析である．投球動作は年齢 (身体成長段階) によって投球動作の様式が異なる事 [19] や，守備位置によって投球内容に特徴があると考えられる．年齢やポジション情報により重みを変化させることで，精度が向上できると考えられる．

今回のアルゴリズムでは，事前に個人情報を登録する事で，登録した投球データとの比較から，投球フォームの変化率を算出した．その結果，投球フォームの変化を検知する事ができた．しかし実際の投球動作において，その変化が実際にはどの程度投球フォームが変化したかは評価できていない，そこで今後，光学式モーションキャプチャシステムによる比較を行う予定である．

7.1.2 実際の練習現場での使用

本アルゴリズムを搭載した Ripken：装着型の投球フォーム変化検出デバイスの作成を行う．実際の練習での使用において，センサの小型・軽量化は必要不可欠である．そこで本アルゴリズムを搭載することができるセンサデバイスを自作を行う予定である．

実際に本アルゴリズムを搭載したシステムを実装するためには，処理速度やバッテリーの問題からアルゴリズムの処理を軽量化する必要がある．現在は，検出した投球データの配列を，複数回繰り返し分析する事で投球フォーム変化率の計算を行っている．アルゴリズムを最適化する事で処理の軽量化に繋がると考えている．

投球フォーム変化検出アルゴリズムより取得した投球フォームの変化状態をフォードバックする機構の実装も行う．スポーツ科学ではバイオフィードバックと呼ばれる手法があり，ユーザ自身では感じる事が難しい，心拍数の体温など身体情報などを光や音を用いてユーザにフィードバックすることで，ユーザに気付きを与える手法である．投球フォーム変化状態をフィードバックする事でユーザの過度の投球や崩れた投球フォームでの投球を予防を行う．

Ripken システムを実装する事で，少年野球の選手からプロ野球選手まで様々な競技レベルの選手が，日常的に自身の疲労状態を認識できるようになり，野球選手の投球障害の発生率を低下させる事に繋げると考えている．また．野球だけでなく，テニスや陸上競技といった他のスポーツでも応用可能であると考えている．

7.2 本論文のまとめ

本論文では，野球選手野手のための実際の練習中での日常的な使用を想定した，投球数の増加に伴う投球フォーム変化検出アルゴリズムの提案を行った．野球における投球障害の主な原因である，投球数の増加に伴う投球フォームの崩れを肘の装着した単一の角速度センサを用いて取得した．

アルゴリズムでは事前に登録した投球データから，1) 投球動作の検出, 2) 投球モーションの分解 3) 投球フォーム変化率の算出を行った．

投球フォーム変化率算出アルゴリズムの評価するために，100 球連続投球による投球動作の変化計測実験を行った．その結果，投球数の増加に伴い投球フォームの変化が検出され，投球疲労を検出する事ができた．

謝辞

本研究を進めるにあたり，ご指導を頂きました慶應義塾大学環境情報学部教授徳田英幸博士に深く感謝いたします．また，慶應義塾大学環境情報学部准教授高汐一紀博士，慶應義塾大学環境情報学部選任講師中澤博士には，本論文の執筆に当たって御助言を賜りました事を深く感謝致します．慶應義塾大学徳田研究室の諸先輩方には折りに振れ貴重なご助言を頂きました．特に政策・メディア研究科専任助教授米澤拓郎氏，政策・メディア研究科研究員伊藤友隆氏，政策・メディア研究科博士課程生田目直哉氏，政策・メディア研究科修士課程唐津豊氏，政策・メディア研究科瀧本拓哉氏には本論文を執筆するにあたってご指導頂きました．HORN グループの徳田義幸氏，山本純平氏にはご卒業後にも関わらず，多くの励ましとご指導を頂きました，ここに深く感謝の意を表します．

慶應義塾大学環境情報学部准教授仰木裕嗣博士，慶應義塾大学環境情報学部加藤貴昭博士には異なる研究会であるにも関わらず，使用機材や実験手法など様々な面でご指導いただきました．慶應義塾大学スポーツ医学研究所石橋秀幸氏，サクラグループ日吉センター接骨院院長上野歩氏には医学的な知識の面で深くご指導を頂きました．ここに深く感謝の意を表します．

実験やアンケートにご協力下さった慶應義塾大学体育会野球部と慶應義塾高等学校野球部の監督，コーチをはじめ選手に深く感謝致します．

そして，研究の日々を共に過ごした西條晃平氏，Nguyen Gia 氏，勝治宏基氏，加藤碧氏に深く感謝します．また，論文執筆時にイラスト作成やデータ整理など多大な協力をして下さった，小鷲麻奈美氏，kanikama 氏を初めτ 20 の皆様に深く感謝します．

最後に，大学 4 年間に渡る生活を支えてくれた家族に感謝致します，

2012 年 2 月 14 日

西山 勇毅

参考文献

[1] 全日本リトル野球協会 html/. Japan little league.

[2] Frank W. Jobe and Marilyn M. Pink. *Operative techniques in upper extremity sports injuries.* St. Louis : Mosby, 1996.

[3] Cheng Joseph, C and Karzel Ronald, P.『superior labrum anterior posterior lesions of the shoulder: Operative techniques of management』. *Advanced Arthroscopic Techniques in Shoulder Surgery*, Vol. 5, pp. 249–256, 1997.

[4] M. Lapinski, E. Berkson, T. Gill, M. Reinold, and J.A. Paradiso.『a distributed wearable, wireless sensor system for evaluating professional baseball pitchers and batters』. *International Symposium on Wearable Computers 2010*, pp. 131–138, 2009-7-4.

[5] Brukner Peter and Khan Karim.『臨床スポーツ医学』. 医学映像教育センター, 2009.

[6] Laman S, Fleising GS, Andrews JR, and Osinski ED.『effect of pitchi type, pitchi count, and @itching mechanics on risk of elbow and sholuder pain in youth baseball pitches』. *Am J Sports Med.*, 2002.

[7] 中島求, 仰木裕嗣, 秋山絵理, 風見直亮.『手首装着型加速度・角速度センサを用いた競泳トレーニング用泳動作表示システムの開発 (水泳)』. ジョイント・シンポジウム講演論文集 : スポーツ工学シンポジウム : シンポジウム:ヒューマン・ダイナミックス : symposium on sports engineering : symposium on human dynamics, Vol. 2007, pp. 200–203, 2007-11-13.

[8] 齋藤健治, 渡辺正和, 井上一彦. 野球投球における上肢・体幹運動の慣性センサ計測. 名古屋学院大学論集, 人文・自然科学篇, Vol. 48, No. 1, pp. 33–48, 2011-07.

[9] 太田憲, 梅垣浩二, 室伏広治, 小宮根文子, 桜井伸二.『振り子モデルに基づくハンマー投競技用アシストシステムの開発』. 日本機会学会 シンポジウム講演論文集, No. 270–274, 2008.

[10] 中村康雄, 林豊彦, 中村真里, 中溝寛之, 信原克哉, 加藤直, 飯塚大輔. 投球フォームとボール・リリース時の肩関節負荷 (2 部 運動機能). バイオメカニズム, No. 17, pp. 123–132, 2004-08-25.

[11] 佐川貢一, 青山靖子, 塚本利昭, 近藤和泉.『装着型センサによる投球上腕の 3 次元位置測定』. 計算自動制御学会東北支部 台 216 回研究集会, 2004.

[12] 松本剛, 濱田太郎, 上野隆司.『投球後の肩関節可動域の経時的変化 (骨・関節系理学療法, 一般演題 (ポスター発表演題), 第 43 回日本理学療法学術大会)』. 理学療法学, Vol. 35, No. 2, p. 114, 2008-04-20.

[13] 信原克哉.『肩:その機能と臨床』. 医学書院, 2001.

[14] 柳沢修, 宮永豊, 白木仁, 下條仁士, 向井直樹, 佃文子.『投球動作が投手の身体的疲労に及ぼう経時的変化-いわゆる 100 球肩の検証-』. 体力科學, Vol. 47, No. 6, p. 732, 1998.

[15] 石橋秀幸.『100 球連続投球時の肩関節周辺筋活動に関する研究』. 慶應義塾大学大学院 健康マネジメン

ト研究科 スポーツマネジメント専修修士論文, 2006.
[16] 石橋秀幸. 『投げ込みによる疲労度を考える-100 球連続投球時の肩関節周囲筋活動に関する研究-』. 月刊トレーニング・ジャーナル, Vol. 29, No. 3, pp. 30–34, 2007-03.
[17] 鳥居俊. 『基礎から学ぶ！スポーツ障害』. 株式会社ベースボール・マガジン社, 2008.
[18] 大倉俊之, 園田典生, 黒木龍二, 矢野浩明, 山本恵太郎, 帖佐悦男, 田島直也. 『宮崎県高校野球選手に対する傷害調査』. 整形外科と災害外科, Vol. 52, No. 2, pp. 287–289, 2003-03-25.
[19] 桜井伸二. 『投げる科学』. 大修館書店, 1992.
[20] 桜井伸二, 池上康男, 矢部京之助, 岡本敦, 豊島進太郎. 『野球の投手の投動作の 3 次元動作解析』. 体育學研究, Vol. 35, No. 2, pp. 143–156, 1990-09-01.
[21] 中村真里, 中村康雄, 林豊彦, 福田登, 駒井正彦, 橋本淳, 信原克哉, Edmund Y. Chao. 『投球動作解析システムによる top ポジションの運動学的解析』. バイオメカニズム, Vol. 16, pp. 13–25, 2002.
[22] 北村政嗣, 佐川貢一. 投球動作解析のためのポータブルデータロガーの開発. 計測自動制御学会東北支部第 258 回研究集会, 2010.
[23] 石井壮郎. 投球障害肩の病変予測システムの開発. 筑波大学学位論文, 2011.
[24] 平山大作, 藤井範久, 小池関也, 阿江通良. 『野球投手の投球数の増加による下肢関節の力学的仕事量の変化』. 体力科学, Vol. 59, No. 2, pp. 225–232, 2010.
[25] 平山大作, 藤井範久, 阿江通良, 小池関也. 『投球数の増加にともなう投球動作の変容』. 筑波大学体育科学系紀要, No. 32, pp. 189–192, 2009.
[26] 二瓶智樹, 佐藤佑. 野球投手のボールスピード低下に及ぼす握力の影響. 仙台大学大学院スポーツ科学研究科研究論文集, 2003.3.
[27] 阿江通良, 藤井範久. スポーツバイオメカニクス 20 構, 第 4 巻. 朝倉書店, 2002.
[28] 井尻朋人, 宮下浩二, 浦辺幸夫, 藤川博樹, 武本有紀子. 『体幹アライメントが投球時の肩関節運動に与える影響』, 2009-02-01.
[29] 車谷洋, 村上恒二, 金子文成. 540. 投球数の増加が肩関節周囲筋に与える影響 (スポーツと疾患, 第 62 回日本体力医学会大会). 体力科學, Vol. 56, No. 6, p. 848, 2007-12-01.

付録 A　慶應義塾大学・高校野球部への投球障害に関するアンケート 1

練習中の投球疲労に関するアンケート調査

今回、卒業論文として「野手の投球障害予防支援システムの構築」というテーマで研究を行うこととなりました。そこで、野球選手の“投球障害の実態”と“練習中の投球疲労”の調査を目的にアンケートを行うことになりました。お忙しいところ大変申し訳ありません。ご協力どうぞよろしくお願い致します。

尚、データの秘匿や取り扱いは十分に注意を払い、研究目的以外では利用いたしません。

慶應義塾大学　環境情報学部
徳田・村井・楠本・中村・高汐・重近・バンミーター・植原・三次・中澤・武田合同研究室
4 年　西山 勇毅
(tetujin@ht.sfc.keio.ac.jp)

1. 個人に関する事をお聞きします
   (1) あなたの名前を教えて下さい　：　（　　）
   (2) 年齢を教えて下さい　：　（　　）歳
   (3) 野球歴を教えて下さい　：　（　　）年
   (4) 所属学校名と学年を教えて下さい　：　（　　）（　　）年
   (5) ポジションを教えて下さい　：　投手　・　捕手　・　内野手　・　外野手

2. 投球障害に関する事をお聞きします
   (1) あなたは今までに、肩や肘を故障して練習を休んだ経験があります？
   はい　・　いいえ
   (2) “はい”とお答えして頂いたかたにお聞きします。
   故障をした時期を教えてください（複数回ある場合は全て書いて下さい）

   (3) 故障の原因を詳しく教えてください（例：過度の投球や不適切な投球フォームでの投球など）

   (4) 現在、練習中または練習後に痛みを感じることはありますか？
   よくある　・　時々ある　・　全くない　・　その他（　　）

3. 日頃の練習についてお聞きします
   (1) 一週間の練習日数を教えて下さい　：　（　　）日 ／ 1 週間
   (2) 一日の練習時間と投球数を教えて下さい　：　約（　　）時間 ・ 約（　　）球

付録 B　慶應義塾大学・高校野球部への投球障害に関するアンケート 2

(3)　練習中に投球疲労を感じる時はどんな時ですか？判断基準を教えてください。

(4)　投球疲労により体のどの部位の**動作**が変化すると感じていますか？(複数選択化)

肘　・　肩　・　腰　・　頭　・　下半身　・　その他(　　)

(5)　具体的に(4)で選択した部位の**動作**がどのように変化しますか？詳細に教えて下さい。

(6)　その症状が出た時は、その場ではどのように対応しますか？（例：投球フォーム修正、休むなど）

4.　投球障害の予防に関することでお聞きします。

(1)　練習前に投球障害予防のために実践している事はありますか？（複数選択化）

ストレッチ ・ インナートレーニング ・ マッサージ ・ なし　・　その他 （　　）

(2)　(1)で選択した項目の実践頻度を教えてください。

毎回行っている　・　時々行っている　　・　まれに行っている　・　全くしない

(3)　練習後に実戦している事はありますか？（複数選択化）

ストレッチ ・ アイシング ・ インナートレーニング ・ マッサージ ・ なし ・ その他(　　)

(4)　(3)で選択した項目の実践頻度を教えてください。

毎回行っている　・　時々行っている　　・　まれに行っている　・　全くしない

(5)　**練習中**に投球障害予防のために意識・実戦していることはありますか？**詳細**に教えてください。

ご協力どうもありがとうございました。