

慣性センサを使用した体育運動の計測と特徴の抽出

穂苅真樹

岡山県立大学

Abstract

This paper is aimed at describing how to measure the sports form. The measurements can be used for the quantitative sports skill evaluation and skill formation. Here we focus our discussion on the baseball pitching form which is most difficult to measure and is one of the difficult sport forms to skill up.

The presented measurement derived by the system developed by using the three dimensional acceleration and gyro sensors set at the several body positions can catch the three dimensional translational motions and the three dimensional rotation motions of hand and forearm. The system can measure the baseball pitching forms by various players correctly. Form the data caught by the measurement system, the correlation of these data and initial rate was requested. As the result, 17 parameters and initial rate had a high correlation (correlation value 0.7 or more). Next, it proposed the method of estimating initial rate from 17 parameters by neural network.

1. はじめに

野球(投球動作)や陸上競技(ランニング動作)などスポーツにおける上肢の運動を計測する主な手段として、高速度カメラを2台以上使用した方法がある^{1)~4)}。この方法はフォーム解析に時間がかかり、システムも高コストかつ大規模となり企業や大学など研究施設に設置場所が限定され、汎用性が低い。そのために、学校教育科目である体育に科学的な方法で技能向上を進めることは、ほとんど行われていない。このような問題点を解決するためには、利便性に優れた計測方法の確立や指導方法の確立が必要である。

本研究では、簡易に運動を計測するための手段として、加速度センサやジャイロセンサをベースとした運動計測システムの構築をし、その結果から得られる運動の特徴を数量化することを目的とする。この目的を実現することによって、取り組む新たな方法は運動の技能向上につながる一つの手段となりえる。学校教育科目の体育で行われる運動(野球や陸上競技など)の技能を加速度センサやジャイロセンサを使用した科学的な方法で取得し、数値化された特徴を解析、評価することを目的とする。

本報告は、加速度センサとジャイロセンサを使用して構築した実験システムについて述べる。このシステムを用いて野球の投球動作を計測し、統計的手法を利用しボールの初速向上に意味のある要因を抽出する。さらに、抽出した要因からボール初速を推定する手段として、ニューラルネットワークを使用した方法について述べる。

2. 実験

2. 1 使用するセンサ

実験で使用するセンサはマイクロストーン(株)の3軸加速度センサと3軸ジャイロセンサである。加速度センサは $\pm 100\text{m/s}^2$ 、ジャイロセンサは $\pm 4000\text{deg/s}$ の計測範囲を持つセンサである。

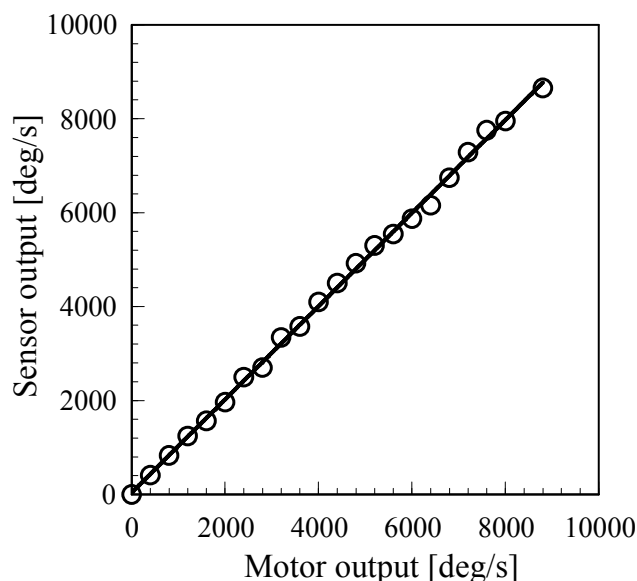


図1 ジャイロセンサの追従性

運動中の身体各部位の角速度はジャイロセンサの計測保証範囲を超えることが予想されるため、キャリブレーションを行った。モーターの軸にジャイロセンサを取り付け、モーターの回転角速度を 0deg/s から 8800deg/s まで 400deg/s ごとに上昇させ、ジャイロセンサの回転角速度と比較した。結果を図 1 に示す。モーター出力とジャイロセンサ出力は高い線形関係($R^2=0.98$)にあることを実験で検証した。よって、本研究においてジャイロセンサを使用する。

2. 2 実験システムと被験者

センサの設置および相対(センサ)座標系を図 2 に示す。本システムは、被験者の利き腕の手および前腕に①加速度センサと②ジャイロセンサを取り付け、投球中の加速度と角速度を計測する^{5)~7)}。さらに、③ピッチャーのボールリリース時刻を検出するため、導線を被験者の人差し指と中指の DIP 関節の近位に設置し、ボール表面にアルミ箔を貼り付けた。被験者がボールに触れることにより on, 指先からボールが離れることにより off となる装置である。これにより off になった時点をボールリリース時刻として検出する。

図 3 に実験システム、図 4 に本システムの信号処理の流れを示す。計測対象部位に加速度センサとジャイロセンサを設置し、投球中における各相対座標系の 3 次元加速度および角速度を計測する。AD 変換して PC に取り込み、角速度を時間積分することで角度を、時間微分することで角加速度を求める。一方、ボールの初速は、ミズノ(株)のスピードガン 2ZM-1035 で計測した。

実験の被験者は、野球経験者 3 名(Sub. A, Sub. B, Sub. E), 未経験者 2 名(Sub. C, Sub. D)の合計 5 名とした。実験は、軽くウォーミングアップを行った後で、ピッチングマウンドから距離 18.44 m に位置するキャッチャーのミットを目標に球種をストレートとして 10 回試技した。

3. 投球フォームの比較

実験結果の一例として、未経験者 Sub. C および経験者 Sub. E の 5 投目の結果を図 5 と図 6 に加速度、図 7 と図 8 に角速度、角度、角加速度を示し、ボールのリリース時刻は各グラフの 0 秒とした。各図の○印は各運動データの最大値、□印は最小値を示す。また、各被験者のボール初速の平均と標準偏差を表 1 に示す。

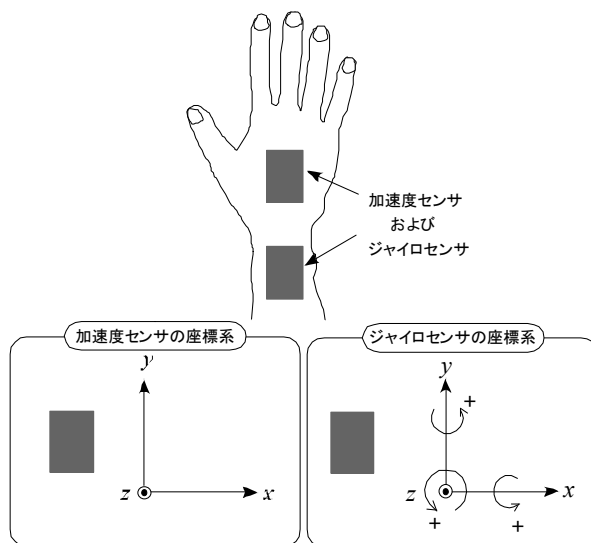


図2 センサの設置と相対座標系の定義

- ①, ② 加速度センサ, ジャイロセンサ
- ③ リリース検出装置

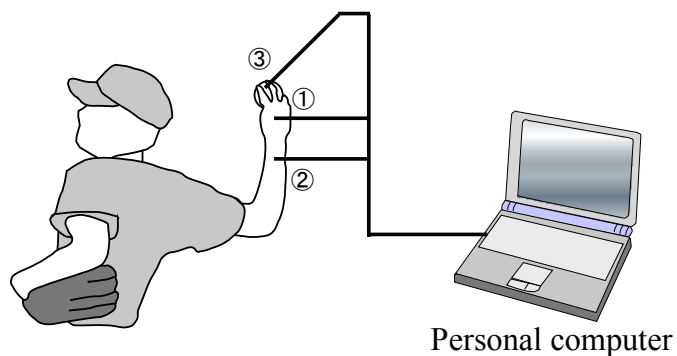


図3 実験システム

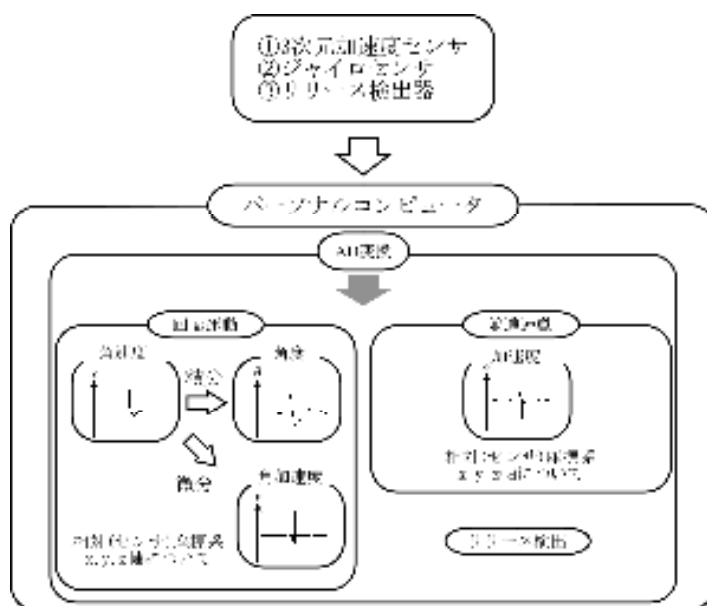


図4 信号処理の流れ

3. 1 加速度について

図5と図6より, 加速度について比較する. 未経験者に比べ経験者の手および前腕の加速度は, リリース前後の波形の傾きに大きな変化が現れている. さらに, リリースまでの最小加速度は, 前腕 y 軸方向の加速度を除いた全ての加速度で未経験者よりも経験者が大きい結果を得た. また, 最小角速度の発生時刻を比べると, 経験者の平均はほぼ 0 秒, すなわちリリース瞬間であるのに対し, 未経験者の平均はリリースよりも ± 0.02 秒程度異なっていた. これらの結果は, ボールをリリースするまで上肢の振り下ろしの速さの違いを示しており, 経験者と未経験者の技能の違いを示すパラメータになると考える.

表 1 各被験者のボール初速の平均と標準偏差

被験者	平均 [km/h]	標準偏差[km/h]
Sub. A	94	2.3
Sub. B	104	1.1
Sub. C	76	1.9
Sub. D	86	4.0
Sub. E	108	3.6

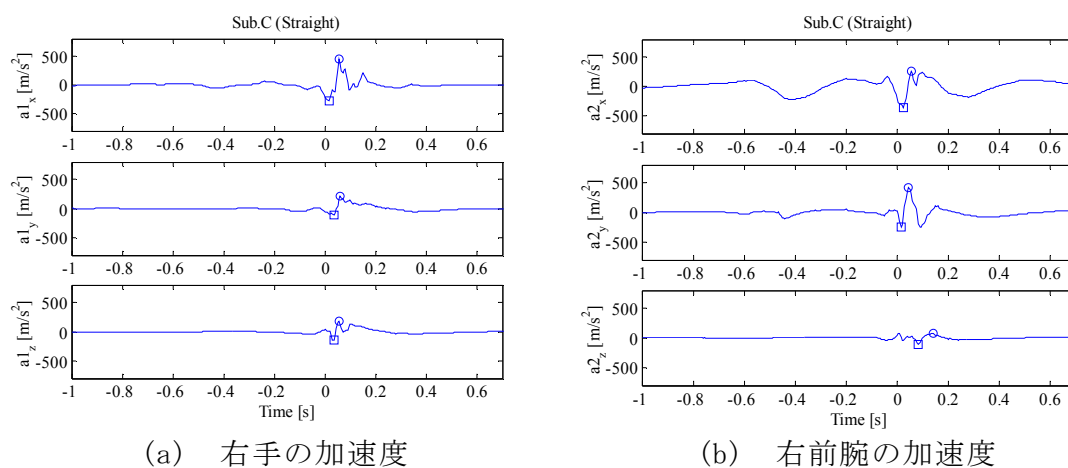


図 5 未経験者 Sub.C の加速度

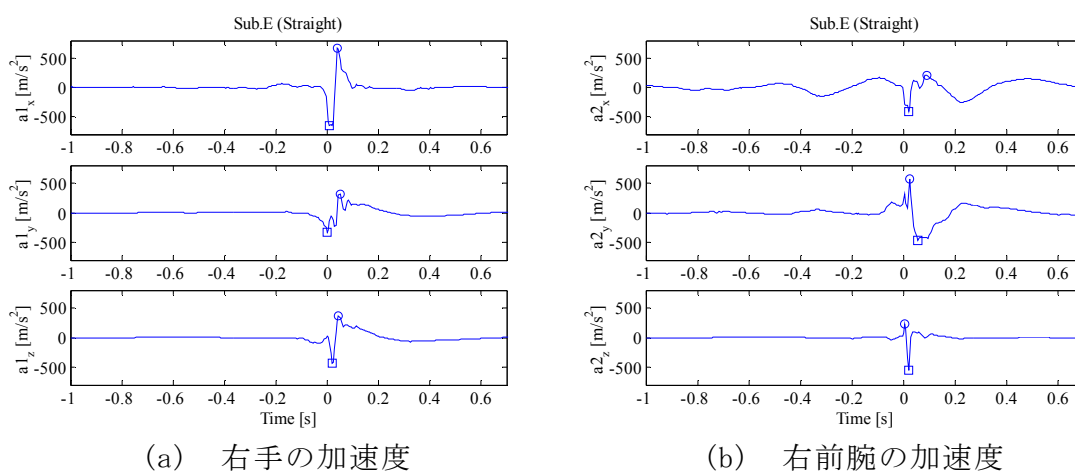
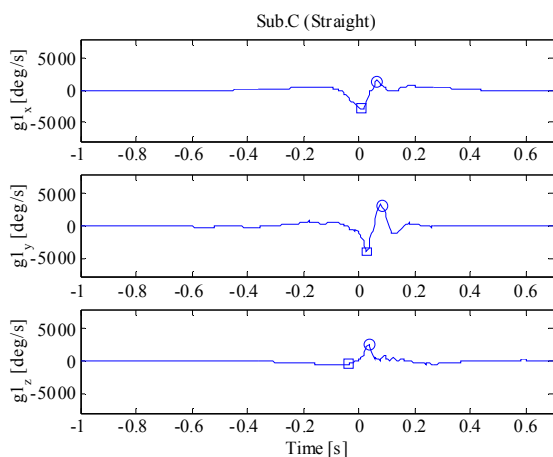
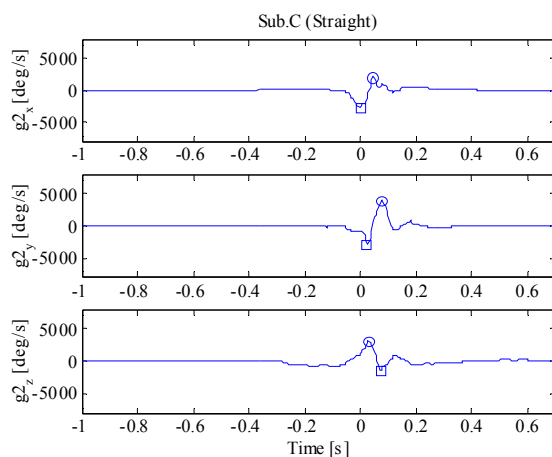


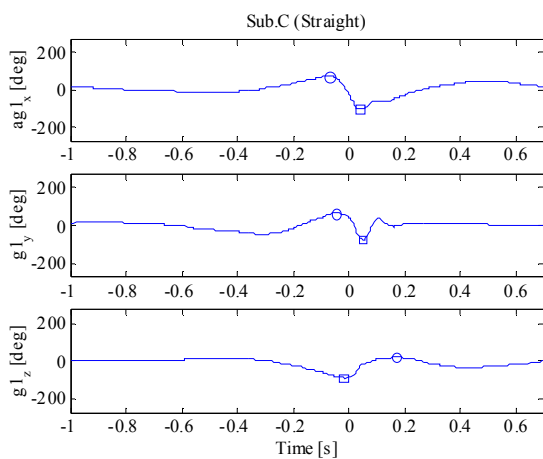
図 6 経験者 Sub.E の加速度



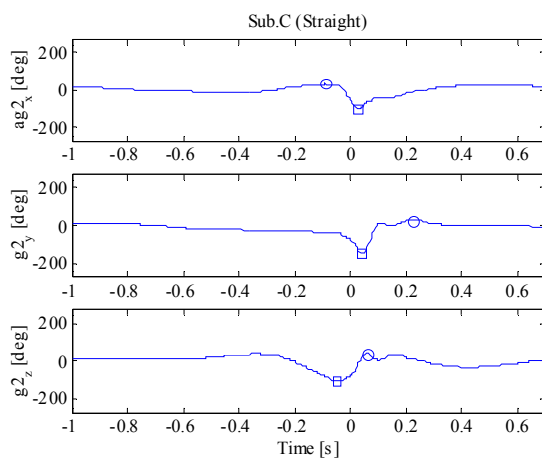
(a) 右手の角速度



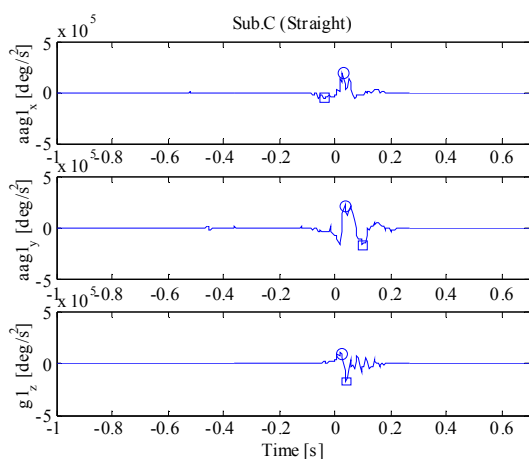
(d) 右前腕の角速度



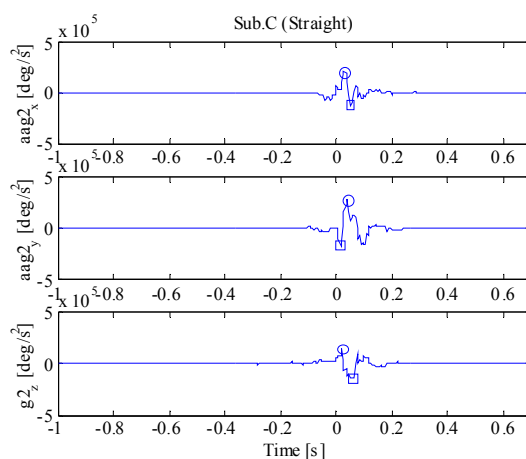
(b) 右手の角度



(e) 右前腕の角度



(c) 右手の角加速度

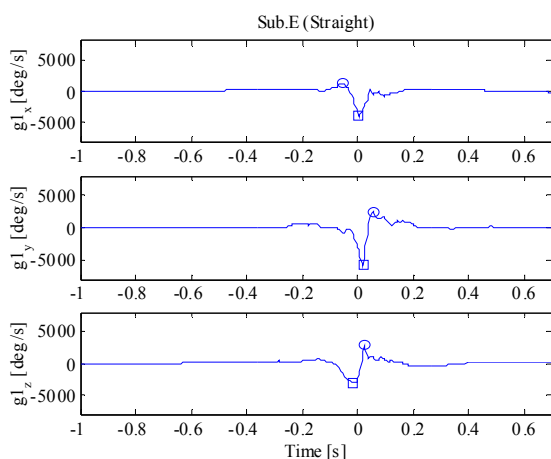


(f) 右前腕の角加速度

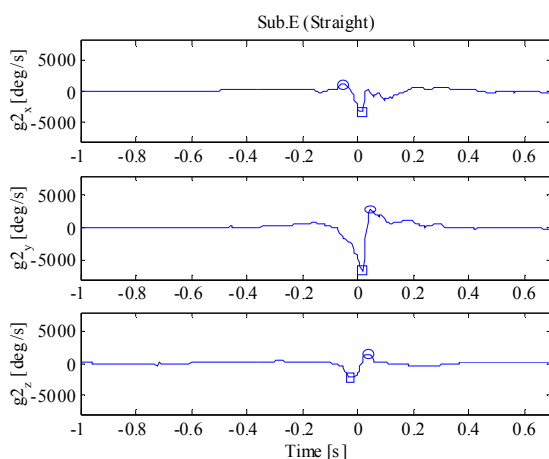
図7 未経験者 Sub.C の回転運動

(上段：角速度，中段：角度，下段：角加速度，リリース時刻：0秒，

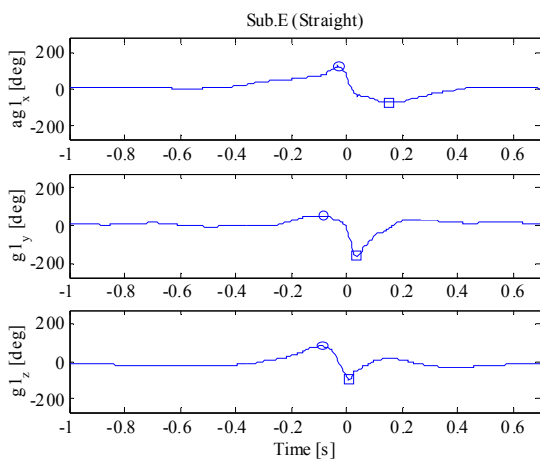
○印：最大値，□印：最小値)



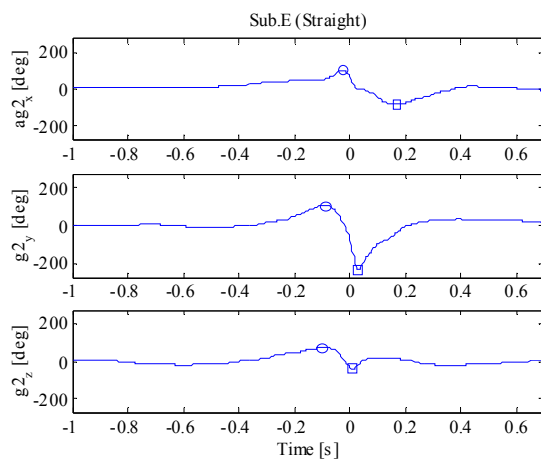
(a) 右手の角速度



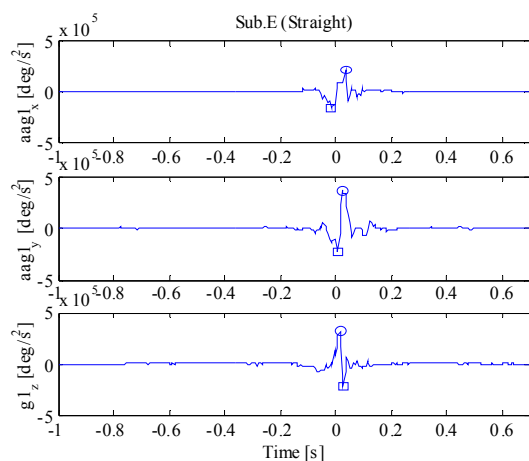
(d) 右前腕の角速度



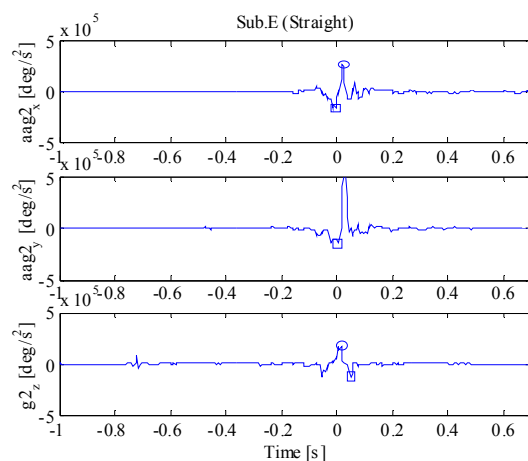
(b) 右手の角度



(e) 右前腕の角度



(c) 右手の角加速度



(f) 右前腕の角加速度

図8 経験者 Sub.E の回転運動
 (上段：角速度，中段：角度，下段：角加速度，リリース時刻：0秒，
 ○印：最大値，□印：最小値)

3. 2 回転運動の比較

図 7, 図 8 の (a) と (d) より, 相対座標系における角速度を比較する. 未経験者に比べ経験者のリリース前の最小角速度平均は, 手の y 軸周りの角速度を除いて大きな値を示した. 特に手の x 軸周りの最小角速度平均は, 経験者で 4919.7deg/s , 未経験者で 3425.4deg/s , 前腕の y 軸周りの最小角速度平均は, 経験者で 5474.1deg/s , 未経験者で 3850.3deg/s であり, それぞれ 1500deg/s ほどの違いがあった. z 軸周りの最小角速度平均は, 経験者の手および前腕で 1800deg/s 前後, 未経験者で $1100\sim 1400\text{deg/s}$ であった.

図 7, 図 8 の (b) と (e) より, 相対座標系における角度を比較する. テイクバック中の x 軸周りの最大角度平均は, 経験者の手で約 107deg , 前腕で約 101deg であったのに対し, 未経験者の手で約 75deg , 前腕で約 55deg であった. また, 前腕から見た手の角度は経験者で約 6deg , 未経験者で約 20deg であった. 一方, テイクバック中の y 軸周りの最大角度平均は, 経験者の前腕で約 80deg , 未経験者で約 49deg であった. また, テイクバックからトップ間での y 軸周りの角度は, 正方向に変化, すなわち回外が行われている. トップからリリース間では, 負方向に変化, すなわち回内が行われていることを確認できる. 手および前腕の z 軸周りの角度は, テイクバックからトップまで正方向に変化, すなわち手の尺屈に相当する運動が行われている. しかし, この間の最大角度平均を比較すると, 経験者の 70deg 前後に対し, 未経験者は 40deg 前後であった.

図 7, 図 8 の (c), (f) より, 相対座標系における角加速度を比較する. トップからリリース間での x 軸周りの最大角加速度平均は, 手, 前腕ともに経験者が大きい結果であった. この発生時刻は, 未経験者よりもリリース時刻に近い値であった. この傾向は, y 軸および z 軸周りの角速度でも表れていた.

4. ボール初速と回転・並進運動の相関

4. 1 回転・並進運動パラメータの定義

ピッチャーの手および前腕の運動はプレイヤーの身体とボールの接点近くで行われ, 身体の回転運動で蓄えられたエネルギーをボールに伝達する運動である. 最終的にボールを目標に投球するためには, 一連の投球動作における手および前腕の運動も肩や腰などの運動と同様に重要である. よって, 本研究では手および前腕の最大・最小加速度, 最大・最小角速度, 角度, 角加速度に注目した. 一方, 手および前腕の運動はリリース瞬間におけるボールの初速度および投球方向に影響を及ぼす身体の回転運動の一つであり, ボールに最も近い運動であることから, リリース瞬間の加速度, 角速度, 角度, 角加速度に着目した. 手, 前腕の最大, 最小, リリース瞬間の加速度, 角速度, 角度, 角加速度の変数を表 2 に定義する.

表 2 加速度, 角速度, 角度, 角加速度の定義

	加速度	角速度	角度	角加速度
リリース瞬間	a_{mnip}	$g\nu_{mnip}$	ga_{mnip}	gaa_{mnip}
最大値	$a_{mn\max}$	$g\nu_{mn\max}$	$ga_{mn\max}$	$gaa_{mn\max}$
最小値	$a_{mn\min}$	$g\nu_{mn\min}$	$ga_{mn\min}$	$gaa_{mn\min}$

$m = 1$: 手, 2 : 前腕, $n = x, y, z$ 軸を示す.

表3 ボール初速との相関が0.7以上のパラメータ

パラメータ	相関値	パラメータ	相関値	パラメータ	相関値
gv_{2yip}	-0.90	$ga_{2x\max}$	0.85	$gv_{1z\min}$	-0.73
ga_{2zip}	0.78	$ga_{2y\max}$	0.86	$ga_{1y\min}$	-0.75
$a_{2z\max}$	0.70	$ga_{2z\max}$	0.73	$gaa_{1x\min}$	-0.70
$ga_{1x\max}$	0.79	$a_{1x\min}$	-0.86	$gv_{2y\min}$	-0.79
$ga_{1z\max}$	0.84	$a_{1z\min}$	-0.74	$ga_{2z\min}$	0.77
$gv_{2x\max}$	-0.72	$a_{2z\min}$	-0.88		

4. 2 相関関係

被験者5名の投球時の加速度，角速度，角度，角加速度から表2のパラメータを抽出し，ボール初速との相関係数を求めた．0.7以上の相関を示したパラメータを表3に示す．これらのパラメータは，(1)リリース瞬間の前腕y軸周り角速度，(2)リリース瞬間の前腕z軸周り角度，(3)前腕z軸方向最大加速度，(4)手x軸周り最大角度，(5)手z軸周り最大角度，(6)前腕x軸周り最大角速度，(7)前腕x軸周り最大角度，(8)前腕y軸周り最大角度，(9)前腕z軸周り最大角度，(10)手x方向最小加速度，(11)手z軸方向最小加速度，(12)前腕z軸方向最小加速度，(13)手z軸周り最小角速度，(14)手y軸周り最小角度，(15)手x軸周り最小角加速度，(16)前腕y軸周り最小角速度，(17)前腕z軸周り最小角度の17個であった．さらに，ボール初速と表3のパラメータとの散布図を図9に示す．図9より，経験者と未経験者の運動パラメータの大きさがボール初速の違いに寄与していることが推測される．

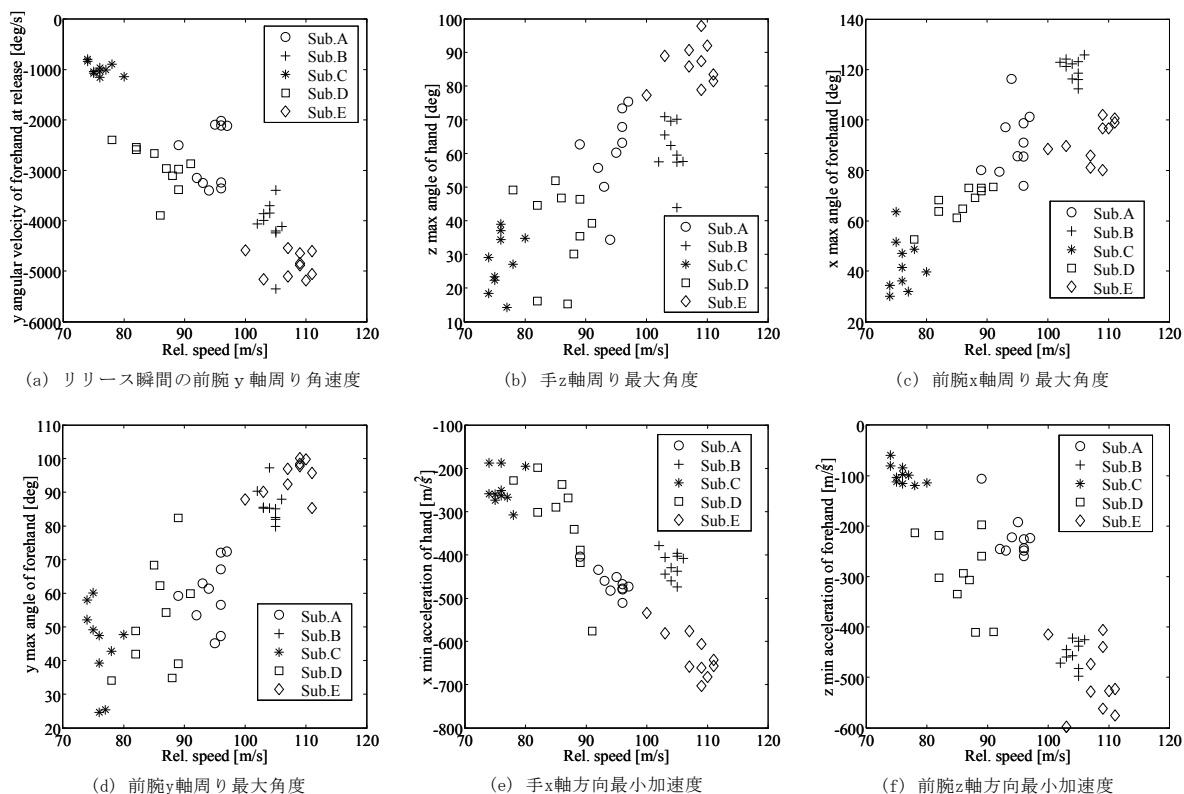


図9 ボール初速と相関係数が0.8以上の並進・回転運動パラメータの散布図

これらの結果より、未経験者が経験者のようなボール初速を得るためには、「テイクバックからトップ間で上肢は大きく振り、前腕の回内を行う。また、トップからリリース間では、上肢の振りを速く行う。」ことを提案したシステムによる実験で示した。

5. ボール初速の推定

本章では、被験者の運動パラメータからボール初速を推定するためにニューラルネットワークを使用した1手法を提案する^{8),9)}。表3の17変数を入力データとして図10に示すニューラルネットワークモデルを用いてボール初速の推定を行った。モデルはMatlabを利用し、入力層は表3に示す変数17、中間層は10、出力層はボール初速とした。学習用データとして被験者5名の9投分、合計45投分のデータを使用した。学習結果を図11に示す。誤差も非常に小さく、良く学習された結果を得た。次に学習されたモデルを用いて、被験者5名の学習に使用していない変数

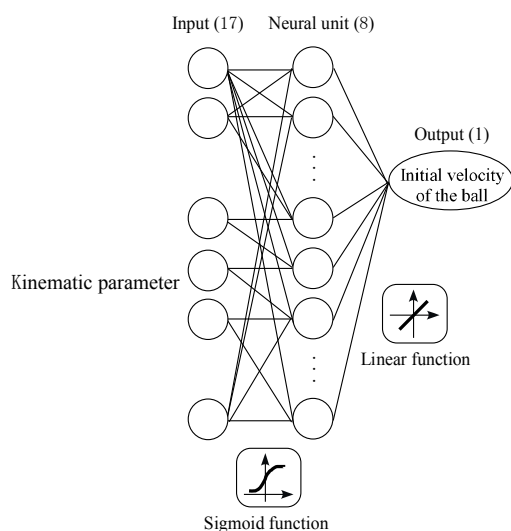


図10 ニューラルネットモデル

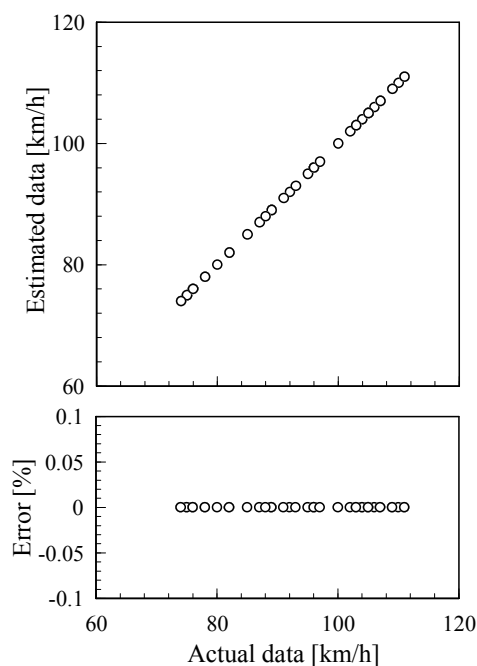


図11 ニューラルネットによる学習結果

表 4 ニューラルネットによるボール初速の推定結果

	実測値 [km/h]	推定値 [km/h]	推定誤差 [%]
Sub.A	90	94	4.8
Sub.B	104	103	0.6
Sub.C	80	77	3.9
Sub.D	83	86	-3.3
Sub.E	113	109	3.6

からボール初速を推定した結果を表 4 に示す. 実測値に対する推定値の最大誤差は, Sub. A の 4.8% と小さい結果であった. ニューラルネットワークを用いることによって, 被験者の運動パラメータからボール初速を推定する一つの有用な手段になりえることを示した.

6. おわりに

本報告では, 簡易に運動を計測するための手段として, 加速度センサやジャイロセンサをベースとした運動計測システムの構築をし, その結果から得られる運動の特徴を数量化することを目的とし, 野球の投球フォーム計測および解析を行った. 具体的な結果は次の通りである.

- (1) 加速度センサとジャイロセンサを用いた運動計測システム, 信号処理システムおよびデータ解析法を構築した.
- (2) 野球経験者と未経験者の投球中の手, 前腕の並進運動と回転運動を計測し, 比較した. さらに, ボール初速に関係のある被験者上肢の運動パラメータを 17 個抽出した. これらの結果から, 野球経験者と未経験者の上肢の使い方を定量的に評価した.
- (3) ボール初速を上肢の運動パラメータから推定するために, ニューラルネットワークを使用した方法を提案した. この方法により, ボール初速を推定した結果, 実測値に対する推定値は最大誤差 4.8% で推定できた.

今後, 次の野球の投球動作の課題に取り組み, 提案したシステムの有用性の検証を行う.

- (1) センサやケーブルによる投球動作の拘束感を低減するために, 装置の軽量化, または無線化を実施する.
- (2) より多くの投球フォームの計測および解析することによる評価方法の確立.

参考文献

- 1) 宮西智久, 野球の投球動作のバイオメカニクス—どうしたらより速いボールを投げられるようになるのか, バイオメカニクス研究, Vol. 7, No. 4 (2003), pp. 360~367
- 2) Glenn S. Fleisig, Randy Phillips, Andrew Shatley, Jeremy Loftice, Shouchen Dun, Shawn Drake, James W. Farris, James R., Andrews, Kinematics and kinetics of youth baseball pitching with standard and lightweight balls, Sports Engineering (2006) 9, pp. 155-163
- 3) 永見智行, 樋口貴俊, 諸星潤, 矢内利政, 野球投手の手指の動作—ボール回転—軌道の解析, 彼末一之, 日本機械学会 [No. 10-53], シンポジウム: スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス 2010 講演論文集 (2010), pp. 36-39

- 4) 石田明, 宮崎信次, 林豊彦, 廣川俊二, 阿江通良, 身体運動のバイオメカニクス, 初版(2002), pp. 157-162, コロナ社
- 5) スポーツフォームの運動解析と計測ーゴルフドライバースイングフォームの計測ー, 計測自動制御学会論文, Vol. 38, No. 11 (2002), pp. 922-930.
- 6) ゴルフクラブスイング時の身体回転運動の計測とスキル評価, 日本機械学会論文集 C 編 , Vol. 72, No. 715 (2006), pp. 850-856.
- 7) クラブヘッドおよびボール運動に影響するゴルファーのコック・ロール運動, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 72, No. 722 (2006), pp. 3372-3377.
- 8) 穂苅真樹, 吉田亮, 渡辺嘉二郎, インパクト直後の打球方向とゴルフドライバースイングフォーム, スポーツ産業学研究, Vol. 14, No. 1 (2004), pp. 37-46.
- 9) ニューラルネットワークによるゴルフクラブヘッド・ボール運動の推定, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 73, No. 736 (2007), pp. 3265-3271.