

〔論文〕

## 腕時計型センサを用いた投球フォーム評価システムの試作

玉城 悠平<sup>\*1</sup> 千田 陽介<sup>\*2</sup>

## Prototype of a Throwing Form Evaluation System using Wireless Inertial Sensor

Yuhei TAMASHIRO<sup>\*1</sup> and Yosuke SENTA<sup>\*2</sup>

## Abstract

This study details the development of a system to evaluate the accuracy of bowling techniques. Achieving consistency in bowling is crucial; however, placement of external sensors in public alleys poses practical difficulties. To address this issue, the study introduces a wristwatch-type sensor attached to the dominant arm, designed to measure roll consistency. The paper describes the sensor's design, method for detecting the ball release moment, and technique for assessing consistency using standard deviation. The data acquired from five bowlers facilitated the successful creation of a prototype system.

**Key Words** : throwing form, sensor terminal, acceleration, angular velocity, measurement

## 1. はじめに

スポーツにおける技術向上にはフォーム改善が重要であり、そのための方法として動画やセンサ計測が使用される。特定の動作の繰り返しを行うスポーツ（例：ゴルフ、野球）では、これらの手法によりフォームチェックが行われ、技術の向上が図られている。本研究では、手軽さと詳細なデータ計測を両立するため、慣性センサ（加速度・角速度計）を使用しフォームチェックを行った。多数のセンサを身体のような箇所に取り付けることで詳細な動作計測は可能<sup>(1)</sup>だが、センサ装着の手間や投球動作への影響、高度なデータ処理技術が必要など問題も多い。そこで筆者らは、利き腕に付けた腕時計型センサのみを使用する手法を提案し、ボウリングのフォームチェックでその適応可能性を試みている<sup>(2,3)</sup>。

ボウリングは再現性の高い投球フォームが求められ<sup>(4,5)</sup>、その良し悪しは直接スコアに影響する。また、同じ動作を繰り返す特性上、慣性センサを用いてフォーム（再現性）の良し悪しを自動で判定することが比較的容易と考えられる。またボウリング場は公共的な施設である。そのような場でカメラといった外部計測機を設置する準備や許可などの制約を避けられるのも慣性センサの利点である。センサの装着箇所については、ボウリングプレイ時の運動特性や専門家の意見を基に投げ手（利き腕）の手首を選択した。使用者の投球動作をリアルタイムに把握し診断、理想的なフォームへの改善に繋げる提言を提示するシステムを構築することを最終目的にしている。

## 2. センサ端末

本研究では慣性センサを用いた動作計測のためのセンサ端末が必要となる。ここでは自作のセンサ端末で計測を行ったが、加速度や角速度が取得であれば市販のスマートウォッチでも構わない。市販のスマートウォッチは Bluetooth を介してスマートフォンへデータを送っている。そのデータを自作アプリケーションでフックできれば本研究のセンサ端末に利用できる。千田は Android スマートフォンの HCI スヌープ機能を用いて Bluetooth の通信プロトコルを解析しセンサ端末に使用できないか試みたが失敗した<sup>(6)</sup>。Wear OS を備えたスマートウォッチなら適切にアプリ開発をすれば加速度や角速度が得られるかもしれない。しかしこういったスマートウォッチは価格が高く、また多機能で重量もあり装着時に違和感が出るため、運動時の動作計測には不向きである。

そこで検出レンジやサンプリングタイム、フィルタ処理などが容易にできることから、自作のセンサ端末を用いて研究を進めた。端末に搭載した基板のブロック構成を図 1 に、外見を図 2 に示す。これは千田が以前開発したもの<sup>(7)</sup>を基本設計とし、

<sup>\*1</sup> 電子情報システム工学専攻 <sup>\*2</sup> 情報ネットワーク工学科  
令和 05 年 10 月 12 日受理

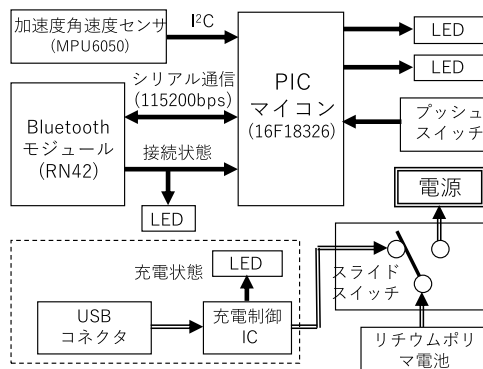


図 1 端末のブロック図



図 2 端末外観

CPU を変更して処理能力や半田付けのしやすさを上げたものである<sup>(8)</sup>。図のように加速度・角速度センサ，Bluetooth 通信モジュール，リチウムポリマ充電回路，PIC マイコンを搭載した構成となっている。

PIC マイコンに 16F18326，センサモジュールは 6 軸センサの MPU6050 を使用しており I<sup>2</sup>C で通信する。PIC マイコンは初期設定で加速度・角速度センサそれぞれの計測範囲（フルスケールレンジ）を指定した後，適時センサ値を読み取る。センサ値は 16bit で得られるため，十進法で  $-32768 \sim 32767$  の範囲となる。例えば計測範囲を  $\pm 8G$  にした状態の加速度センサで 3000 という値が読み取れたら， $3000/32767 \times 8 = 0.7324G = 7.18m/s^2$  と換算できる。

この基板に合わせた腕時計型ケースを作成する必要がある。3DCAD ソフトで基板に合わせた設計を行い 3D プリンタで図 4 のようなケースを作成した。ケースは投球への影響を減らすため可能な限り小さく作った。また取り付けネジ（インサナット）の位置も重要である。ケースと基板はマイコンのプログラム書き換えや基板・ケースを修正する際など基板とケースを取り外しできるよう接着でなくネジで固定している。しかしボウリングは一瞬非常に激しい腕の動作を行う。固定位置とセンサが離れていると基板が板バネのように振動し，データにノイズが乗る可能性がある。センサモジュールに近い位置でケースと基板を固定するよう設計した。図 3 に 3D プリンタで出力した後インサナットを熱圧入したケースの外観を示す。スイッチや充電コネクタが操作できるよう要所に穴を設けている。



図 3 3D プリンタによる出力

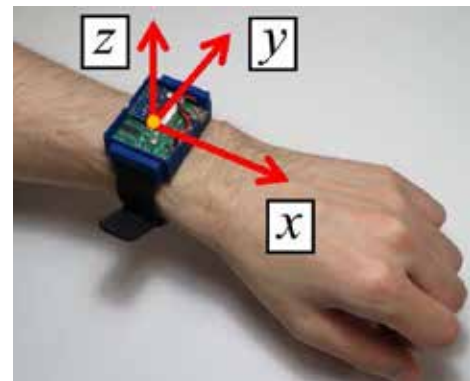


図 4 センサ端末とその座標系

センサ端末にベルトを付け腕時計のように装着した様子を図 4 に示す（内部状態が分かるように撮影したため蓋は外している）。センサは図中に示したような右手直交座標系である。このセンサ端末を腕に装着するにあたって，右投げ左投げ共に  $x$  軸の正方向を腕先に向けて装着する。これにより装着する腕が逆の場合の計測値は，加速度に関しては  $x, z$  が同方向， $y$  が逆方向となる。角速度に関しては  $y$  が同方向， $x, z$  は逆方向となる。

加速度・角速度センサは起動時に計測範囲を指定する必要があるが，まずはアクティブオリエンテーリング<sup>(7)</sup>で用いた設定値（ $\pm 4G$ ， $\pm 500deg/s$ ， $25Hz$ ）のままでボウリング投球動作を計測してみた。その結果を図 5 に示す。図のようにサチレー

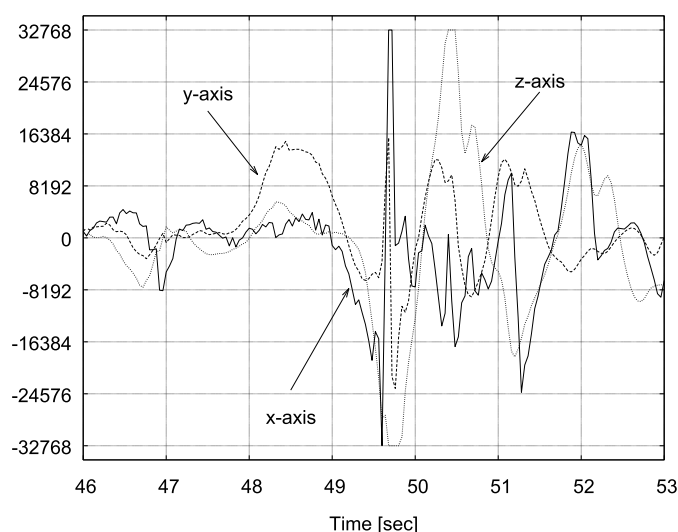


図 5 ボウリング投球動作時のジャイロセンサ出力値 (サチレーション発生)

ションが発生し投球動作全体を観察することができない．計測範囲は MPU-6050 のレジスタ (GYRO\_CONFIG: 0x1B, ACCEL\_CONFIG: 0x1C: 3,4 bit) の設定で変更することができる．ボウリングは激しい動作のため当センサが計測できる最大である  $\pm 16G$ ,  $\pm 2000\text{deg/s}$  に変更した．分解能はそれぞれ  $0.00479\text{m/s}^2$ ,  $0.061\text{deg/s}$  となる．一方サンプリングタイムは PIC マイコンのプログラムで変更することができるが、今回は 40msec (25Hz) のままとした．

### 3. 投球データの取得

センサ端末には Bluetooth 通信モジュールを付けたため、PC やスマートフォンにセンサの生データを送信できる．センサは加速度・角速度とも  $x$ ,  $y$ ,  $z$  の 3 軸があるので全部で 6 つの情報がある．第一筆者が投球した際のセンサデータを図 6 に示す．同時に撮った動画とデータを照らし合わせた結果、図中の時刻 A で腕を上げはじめ、B でリリースし、C でフォロースルー（リリース後の腕の振り）していることが分かった．

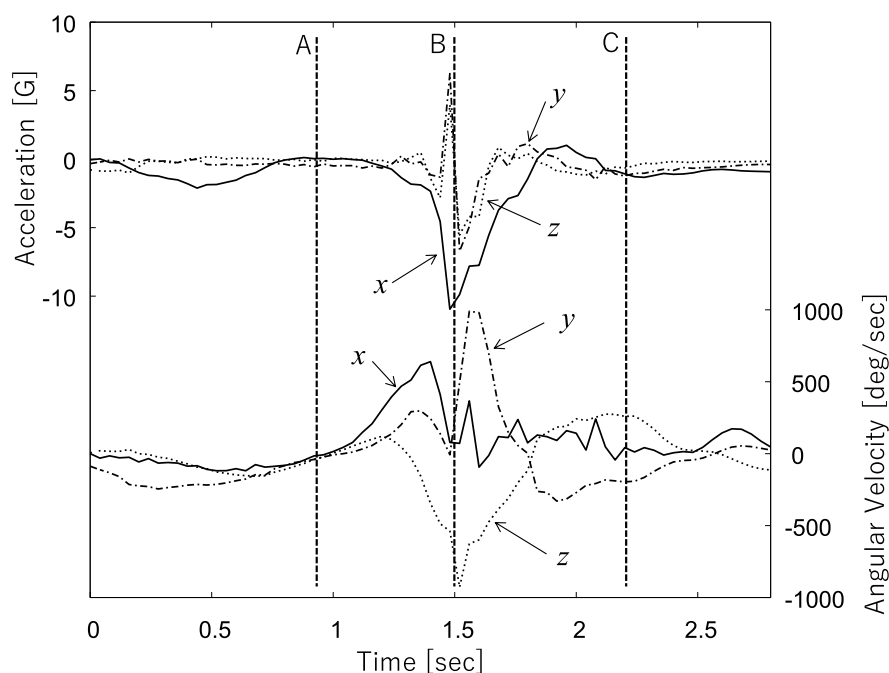
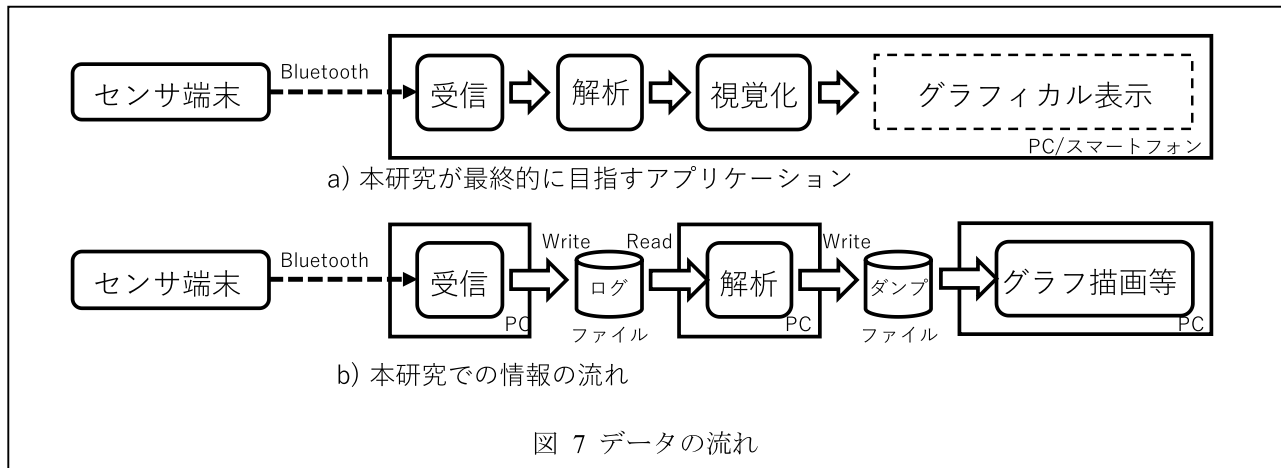


図 6 投球時の加速度、角速度データ (筆者)



この研究の最終目標は、このようなデータからリアルタイムに投球動作を評価するシステムを作ることである。その構成は図 7 (a) のようになるであろう。しかし始めから (a) 構成で解析アルゴリズムの開発を行うと、開発時に検証で得られるセンサ情報が毎回異なりアルゴリズム開発を円滑に進めることができない。そこで、同図 (b) のように取れたセンサ情報をログファイル化し、アルゴリズムの検討は同一もしくは別 PC 上でファイルを読み込んで行うように

した。これにより同一動作をターゲットに様々なアルゴリズムを比較して開発が出来る。

投球動作を判定評価するにあたって著者の投球データのみだと著者に特化した、汎用的ではないものが作られる虞がある。そこで筆者の他 4 名のボウラ（アマチュア競技ボウラ及びプロボウラ）に協力を頂き彼/彼女らのデータを取った。筆者を含めた 5 名の諸言を表 1 に示す。なおボウリングの投球スタイルには親指を入れずに投げるサムレスや両手投げなどいくつかの投法がある。まずはスタンダードなサムイン片手投げ選手を選択した。

表 1 実験協力者

ID	性別	投げ手	ライセンス (アベレージ)	投球数
A	男性	左	アマチュア(209.2)	73
B	男性	右	アマチュア(214.0)	10
C	男性	左	プロ(232.2)	12
D	男性	右	アマチュア(217.3)	20
E	女性	右	アマチュア(196.2)	5

※ 全員スタンダードな投法（サムイン、片手投げ）

## 4. 投球判定

### 4.1 動作判定

加速度・角速度センサの情報から今の投球もしくはゲーム全体を通した投球を評価するには、取得したセンサデータの中から投球した瞬間を自動判別し、判定に用いるためその前後数秒のデータを切り出す必要がある。図 8 はゲームプレイ中のセンサデータそのものを重ねて表示してみたものである。加速度、角速度それぞれ  $x$ ,  $y$ ,  $z$  三軸があるので全部で 6 個のデータがある。それらを重ねて表示しているため、この図のみでは具体的にどのセンサがどうとは読み取れないが、大きな動きが 10 回発生していることから 10 回の投球を行っているのだらうと推定はできる。実

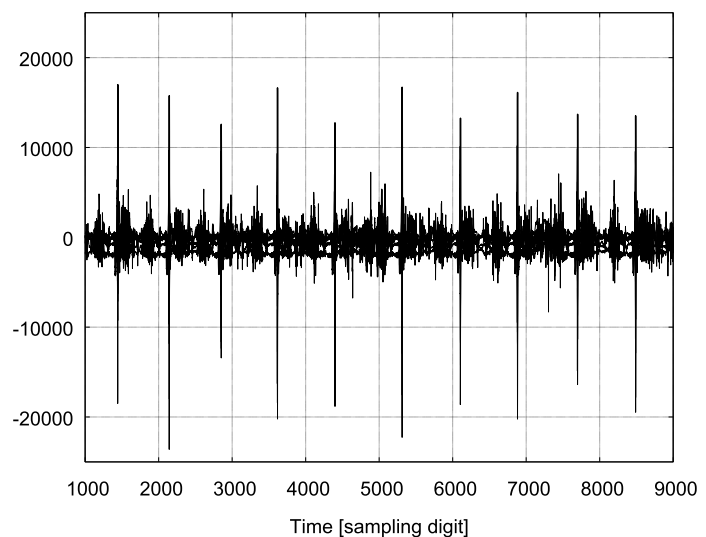


図 8: 10 投プレイ中のセンサデータの動き

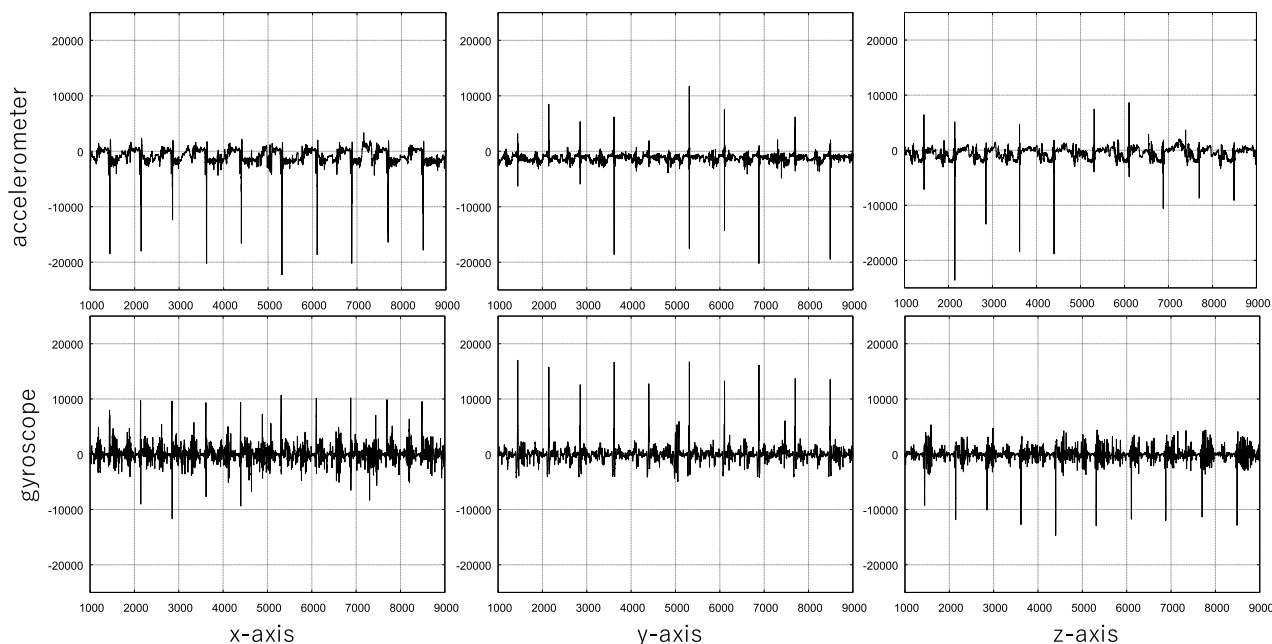


図 9 図 8 に示したデータにおける要素毎のデータ

際動画で確認するとその推定は正しく 10 回投球を行っていた。

図 8 のデータを各軸個別に表示してみた結果を図 9 に示す．加速度に関しては， $x$  軸データは比較的再現性が認められるのに対し  $y$ ,  $z$  軸はばらつきがある．一方角速度に関してはどの軸も再現性が観測される．特に  $y$  軸の動きが大きい．図 4 で示した通り当センサは  $x$  軸を腕の先に取り付けている．また手の平を前にして投球することより  $y$  軸は常に動体の右方向を指す．このため右投げ左投げに関わらずスイング時は  $x$  加速度は負， $y$  加速度は正の値を取るはずである．図 10 のように  $x$  加速度が一定値  $S_{ax}$  以下の下向きピークと  $y$  角速度が一定値  $S_{gy}$  以上の上向きピークとを一定間隔  $S_t$  以内で発生した時に投球と判定できるはずである．

当装置は最終的に小さな組込み機器単体で実現されるかもしれない．そのような組込み機器はコスト面もしくは消費電力の観点から計算機資源が十分でないマイコンを使うかもしれない．その可能性を考慮し，計算機資源をあまり必要としない図 11 のようなフローで実装した．これは携帯電話等で実績のある実装法<sup>9)</sup>で，整数型のみを使うこと，定数以外の除算や回数不定なループを使わないことなどの制限を設けることが特徴となっている．サンプリング間隔 (40msec) 毎にセンサ値を取得し 202 で移動平均を用いたフィルタ処理を行う．801 の処理と合わせ  $A_{x0}$ ,  $A_{x1}$ ,  $A_{x2}$  にはそれぞれ現在，1 サンプル前，2 サンプ

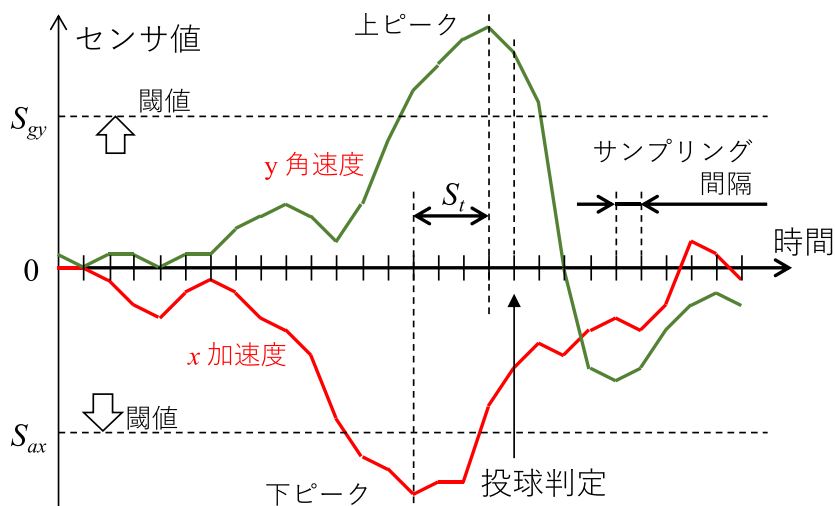


図 10 投球タイミング検出



ル前の  $x$  軸の加速度が入っている．下向きのピークということはこのうち  $A_{x1}$  が 1 番小さいことを意味している．301 で閾値  $S_{ax}$  ( $-8000$ ) より小さいことを確認した後 302 で下向きのピークかを判定している．303 で確認している  $T_2$  は同様に 401～404 で  $y$  軸回り角速度が  $S_{gy}$  ( $5800$ ) 以上であり，かつ上向きのピークが発生してから経過時間を示している．303, 403 により加速度のピーク角速度のピークどちらが先に起こっても，その間が  $St$  ( $10$  サンプル) 以内だと投球判定 (501) と判断できる．

ここで  $-8000$ ,  $5800$ ,  $10$  という値はボウラ A, B, C のベ 95 投分のデータを用いてアドホックに決定した．実際の物理量に換算するとそれぞれ  $-4.9G$ ,  $354\text{deg/s}$ ,  $400\text{msec}$  となる．

#### 4.2 誤検出

さらにボウラ D, E のデータが取得できたので前節のアルゴリズムを適応してみたところ誤検出や未検出がいくつか見られた．

ボウラ D はセンサの取り付けに緩みがあったか，当人のクセか定かでないが投球前後に非常に大きなブレがあるデータであった．そのため一投の動作に対し複数回の投球を行ったと判定してしまっていた．ボウリングというゲームの性質上，短い間隔で連投することは無いはずである．そこで一度投球判定を行うとその後 50 カウント (2 秒間) は無条件に投球判定を行わないようにした．

またボウラ E のセンサデータは図 11 の投球判定アルゴリズムでは投球が一度も判定されなかった．ボウラ E は女性のためか波形が全体的に小さい．しかし彼女に合わせ閾値やフィルタ定数を調整すると，ボウラ A～D の投球判定に対し誤検出が多くなってしまう．ボウラ E のセンサの動きを観察すると  $y$  角速度が小さく  $z$  角速度が大きく表れていた．動画で確認し

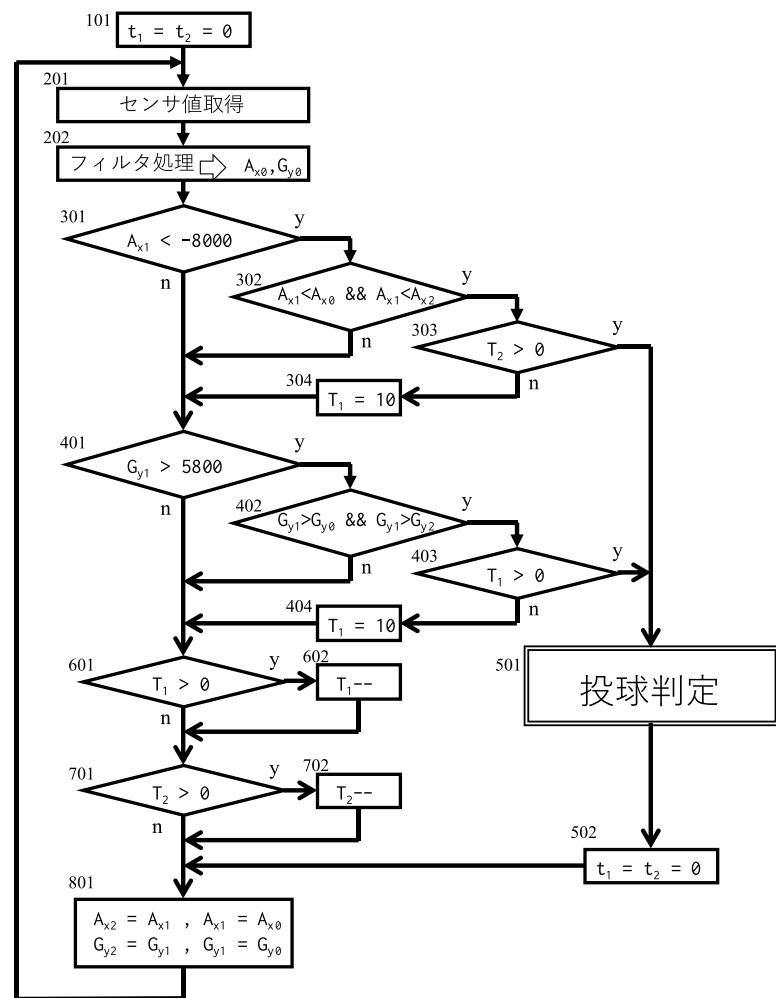


図 11 投球判定のフローチャート



図 12 投球時の手の向きの違い

てみるとボウラ A～D は図 12 (A) のように手の平を前に向けた状態でスイングしていたのに対しボウラ E は手の平を内に向けた状態でスイングしていた。それぞれの投法で図中赤丸のようにセンサの向きが異なる。そのため (A) では手のスイングによって生じる角速度は  $y$  軸に大きく表れるのに対し (B) では  $z$  軸に現れる。アプリケーションとして考えた場合投球前に (A) のタイプか (B) のタイプか問い合わせることは望ましくなく、(A)(B) どちらでも反応すべきである。

そのため  $y$  軸もしくは  $z$  軸でなく、 $x$  軸に垂直な角速度と考えるようにした。 $x$  軸に垂直な角速度の絶対値は  $(G_y^2 + G_z^2)^{1/2}$  であ

る ( $G_y$ ,  $G_z$  はそれぞれ  $y$ ,  $z$  軸回りの角速度センサの値)。この値は図 11 の 401 のようにある閾値を超えたかどうかを知るだけである。平方根は単調増加のためわざわざ  $1/2$  乗してから大小比較する必要はない。条件をこのように変更した後、再度ボウラ A～D で調整したところ  $G_y^2 + G_z^2$  に対し 110000000 という閾値で上手く検出できることが分かった。 $z$  軸は右投げ左投げで正負の向きが異なるが二乗和は必ず正の値を持つため気にしなくてもよい。

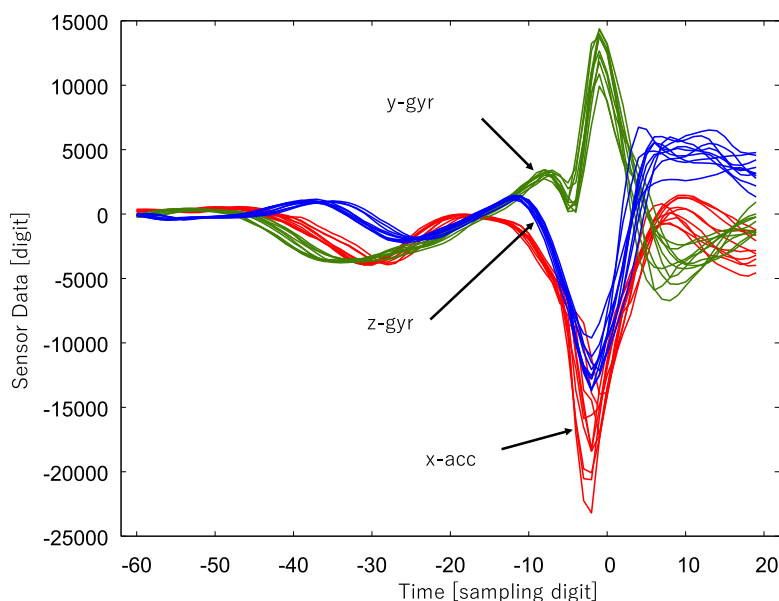


図 13 連続 10 投のセンサデータを重ね合わせたもの

## 5. 投球評価

### 5.1 投球抽出

1 節で述べたようにボウリングで投球の良し悪しを評価する軸の一つに「再現性」がある。それを確認するためセンサから得られたデータを投球毎に重ね合わせてみた。図 13 はボウラ A の 10 投分のデータ (フィルタ透過後) を重ね合わせてみたグラフである。なお投球の瞬間を時刻 0 とし、その前後  $-40 \sim 19$  サンプル ( $-2400\text{msec} \sim 760\text{msec}$ ) を重ね合わせている。前節で示した手法により投球の瞬間を算出することができるため、図 13 のようなグラフを自動で作ることが出来る。図のように加速度・角速度を重ね合わせたデータはデジタル信号伝送分野の評価でよく使われるアイパターンのように綺麗に重なって見えている。

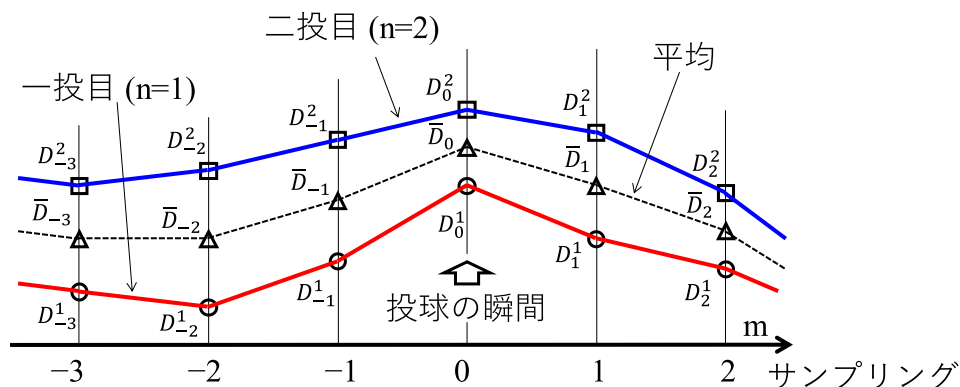


図 14 繰り返しデータの当処理

このセンサ信号の形状は、ボウラはもちろん同じボウラでも日によっても異なる。しかし同じゲームなどごく短い時間間隔では図 13 のように綺麗に重なっていることが分かった。重なりは完全ではない。あくまで主観ではあるが調子が良い日のデータは比較的よく重なるが、調子が悪い時は投球毎のぶれが大きい。特にぶれやすい点として、スイング時の加速度とフォロースルーでの加速度および角速度であった。これより投球時のセンサデータのバラツキを投球の評価に用いることができないかと考えた。

## 5. 2 投球評価

図 13 のようなグラフは、見慣れるとその時の調子を推測することはできる。しかしそれには慣れが必要で、グラフを提示するだけでは万人が使えるアプリケーションとならないと考える。図 13 のデータから再現性を評価する適当なスカラ値を幾つか得たい。幾つかのスカラ値からレーダチャートを提示したり、適切な助言を行ったりできれば望ましい。そのような評価軸の一つに全投球の類似度が使えないかと考えた。類似度はシンプルに各時刻の標準偏差を試してみた。

図 14 はその概念を示したものである。ここでは単純化のために  $N=2$  投しかないが、一投目のデータを  $D_{-60}^0, D_{-59}^0, \dots, D_{19}^0$ , 二投目のデータを  $D_{-60}^1, D_{-59}^1, \dots, D_{19}^1$ , と  $n$  投目のサンプリング時刻  $m$  のデータを  $D_m^n$  と表現する。ここで  $m=0$  は投球した瞬間である。時刻  $m$  毎の標準偏差  $\sigma_m$  は次のように求めることができる。

$$\bar{D}_m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N D_m^i$$

$$\sigma_m = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (D_m^i - \bar{D}_m)^2}$$

図 15 にボウラ B (アマチュア) C (プロ) の標準偏差の時系列データを示す。標準偏差は軸毎に得られるため全部で 6 つのデータが得られるので上段に加速度 3 軸、下段に角速度 3 軸を示した。また左側がボウラ B、右側がボウラ C のデータである。図のようにボウラ C の方が全体的に標準偏差は小さく再現性があるということが見て取れる。

図 15 で見て分かるように標準偏差は一つの評価軸になり得る。しか得られるデータは時間軸方向に 80 個、それが  $x, y, z$  の 3 軸あるので 240 次元もありそのままでは使えない。単純にこの 240 個の標準偏差の平均をもって再現性がある/ないとしてもよいが、おそらく  $x, y, z$  の加速度・角速度のうち評価に重要な軸と軽視してもよい軸があるだろう。時間軸に関しても投球した直前直後 (例えば  $m=-10 \sim +10$ ) は重要だが、それより前 ( $m=-60 \sim 50$ ) や後 ( $m=15 \sim 20$ ) はあまり重要ではないかもしれない。すなわち重みづけ平均等の処理が必要だと考えている。しかし重みづけ平均に用いる 240 個のパラメータ (重みづけ) に関する知見が無い。表 1 に示した 5 人だけではデータが足りない。そこで本稿では実装は行わず可能性を示唆するに留める。また機械学習を使う方法もありえるだろう。適切な 240 次元のデータを幾つも用意し機械学習をかければ未知の 240 次元のデータに対してもその良し悪しを提示することが出来るかもしれない。ただしこれも十分な性能の判別機を得るためには大量の教師データが必要だと考えている。

## 6. おわりに

ボウリングをターゲットとした投球フォームチェックシステムの試作を行った。腕時計型センサ端末を用いることで簡易的かつ公共的な場所でのフォームチェックを行うことが可能となる。プロ・アマチュア計 5 人の協力者の下のべ 120 投球のデータを取得した。評価を行うためにはまず一連のセンサデータの中から投球した瞬間を取得しなければならない。 $x$  軸加速度と  $x$  軸に垂直な方向の角速度を用いることで取得に成功した。切り出したデータは標準偏差を用いた評価を行った。万人向けのアプリケーションにするためにはここから単純化した何かに変えないといけない。その分析を行うにはデータサンプル数が不足している。また両手投げ等、標準的で無い投法の対応も未着手であり今後の課題である。

最後に本研究を遂行するにあたり、快くデータ計測実験の許可を頂きましたユーズボウル久留米およびサンプルデータの取得に協力してくださいました 4 名のボウラに感謝いたします。



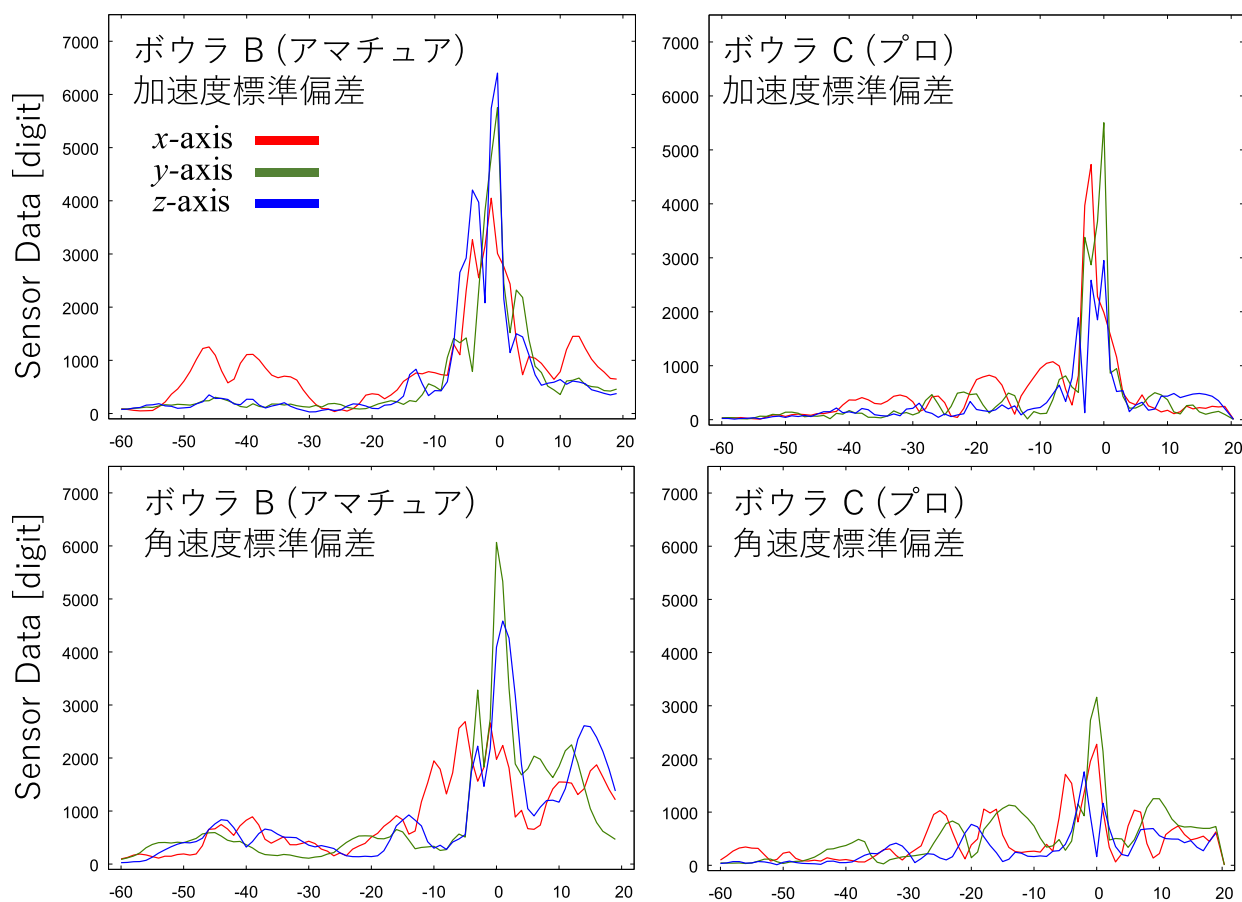


図 15 二人のボウラーによる投球時の各軸センサのバラツキの比較

### 参考文献

- (1) 近藤, 土岐, 廣瀬, “実滑走におけるスキーマーの 3 次元姿勢計測とターンの運動解析に関する研究”, スキー研究 第 10 巻第 1 号, (2013)
- (2) 玉城, 千田, “腕時計型加速度センサを用いた投球フォーム推定”, SICE 九州支部講演会, 201A3 (2022)
- (3) 玉城, “加速度角速度を用いたスポーツフォームチェック”, 久留米工業大学電子情報工学専攻修士論文 (2023)
- (4) りっくの初心者のためのボウリング講座, “再現性”を高める練習 2017/1/25, <https://rick-bowling.blog.jp/archives/50510299.html>
- (5) 再現性を上げる方法【ボウリングレッスン】, <https://www.youtube.com/watch?v=oQaoFJ6cGyQ>
- (6) 千田, “RaspberryPI を用いた IoT センシングネットワークの試作”, SICE 九州支部講演会, 103B3, (2017)
- (7) 千田, 青木, “人計測を目的とした安価な無線式センシングデバイスの開発”, 第三回 ADADA Japan, C2-2 (2017)
- (8) 千田, “機械学習向け小型で汎用なセンサ基板の作製”, 令和 3 年度 AI 応用研究所報告書 (2021)
- (9) 千田, 伊東, “ロボット技術のセンシングデバイスへの展開”, 日本ロボット学会誌, 35-2, 2017