

# 加速度センサ内蔵ボールを用いた飛翔状態での回転特性の計測

## Measurement of Rotational Characteristics using Acceleration Sensors built in Ball

発表者： 長岡 大志 指導教員： 坪井 一洋

### 1 はじめに

多くの球技でさまざまな種類のボールが使用されている。これらのボールは一般的に空中を加減速しながら移動するため、非定常流体力を受ける[1]。この非定常流体力は、ボールの回転特性によって変化すると考えられている。したがって、飛翔中のボールの回転特性を計測することは非常に重要なことである。

従来は、モーションキャプチャシステムや高速度カメラを使用して、飛翔中のボールの回転特性を計測する研究が行われている[2]。しかし、これらの計測方法は限定された環境下で行う必要があり一般的ではない。そして、誤差を含むことが多い。そのため、飛翔中のボールの回転特性を正確に得るには、これらと異なる方法で回転特性を求める必要がある。

本研究では、理化学研究所によって開発された加速度センサ内蔵ボールを用いて飛翔状態での回転特性を計測するアルゴリズムを開発する。そして、本研究で求める回転特性と軌道データから推定した空力係数を比較検討することで、非定常流体力の解明につながると考えられる。

### 2 加速度センサ内蔵ボール

回転特性を計測するために一般的にジャイロセンサが使われるが、ジャイロセンサはその形状も消費電力も比較的大きくなる。そこで、これらがともに小さい加速度センサを4個使うことで3軸ジャイロセンサと同じ出力が得られるセンサユニットと、それを格納する野球の硬式球のレプリカケースが理化学研究所で開発された[3]。そして、このセンサユニットを野球の硬式球のレプリカケースにはめ込んだ加速度センサ内蔵ボールを使用する。ボールケースの表面には硬式球の表皮を貼り付けてあり、大きさと重さはともに硬式球と同じである(図1)。

センサユニットは低加速度センサ( $\pm 5 \text{ G} \pm 0.01 \text{ G}$ , 以下 Low G)をセンサ座標系の原点として直交する X,Y,Z 軸方向に3個の高加速度センサ( $\pm 200 \text{ G} \pm 0.15 \text{ G}$ , 以下 High X,Y,Z)が7mm 間隔で配置される(図2)。各センサで3方向の加速度を検出できる。また、 $1 \text{ G} = 9.8 \text{ m/s}^2$ の意味である。



図1 加速度センサ内蔵ボール

### 3 回転特性の推定法

#### 3.1 加速度センサが出力する加速度

飛翔中の加速度センサ座標系は非慣性系となる。そのため飛翔中の加速度センサが出力する加速度は、ボールに働く流体力による並進加速度と、加速度センサが回転することによって作用する回転加速度である。

流体力による並進加速度は、慣性系で一定の方向に作用する。しかし、センサ座標系は回転系なので、並進加速度の方向は回転と同期して変化する。これに対して、回転加速度は、センサ座標系で一定方向に作用する。そ

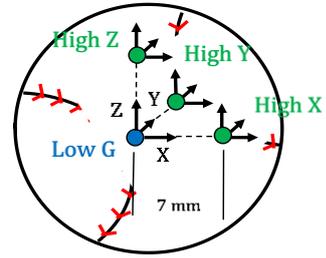


図2 加速度センサの配置図

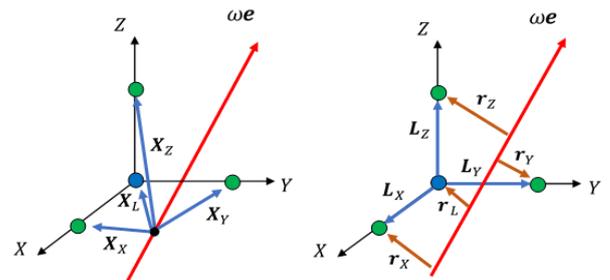


図3 回転軸とセンサ座標系

の結果、加速度センサで出力される値は、回転加速度の値を中心に振動したものとなる。したがって、加速度センサの出力を最小二乗近似した値が回転加速度となり、加速度センサの出力からその近似した値を差し引いた値が並進加速度となる。

#### 3.2 アルゴリズム

加速度センサの出力から回転特性を求めるためのアルゴリズムの概要を示す。ただし、以下では野球ボールを投球した時の回転軸は不変であることを仮定する。

センサ座標系における回転軸を図3に示す。ここで、 $\omega$  は角速度、 $e$  は回転軸の単位ベクトルである。 $L_i$  ( $i = X, Y, Z$ ) はセンサ座標系における High G の位置ベクトルで定義より  $|L_i| = L = \text{一定}$  である。 $X_j$  ( $j = L, X, Y, Z$ ) を回転中心から各センサの位置ベクトル、 $r_j$  は各加速度センサの回転半径ベクトルとする。

さて、各加速度センサの出力から最小二乗近似で求めた回転加速度成分を  $A_j$  とすると、各センサの速度と加速度ベクトルは以下ようになる。

$$\dot{X}_j = \omega e \times X_j \quad (1)$$

$$A_j = -\ddot{X}_j = -\dot{\omega} e \times X_j + \omega^2 r_j \quad (2)$$

また、各センサの回転半径ベクトルは以下のように表される。

$$r_j = X_j - (X_j \cdot e)e \quad (3)$$

これより、High X,Y,Z センサの回転半径  $r_i$  と Low G センサの回転半径  $r_L$  との差のベクトル  $R_i$  は

$$R_i = r_i - r_L = L_i - (L_i \cdot e)e \quad (4)$$

と書ける。そして、式(2)と式(4)から以下の式が導出される。

$$|A_i - A_L|^2 = (\dot{\omega}^2 + \omega^4)|R_i|^2 \quad (5)$$

High X,Y,Z センサに対する式(5)を足し合わせると

$$\omega^2 + \omega^4 = \frac{|A_x - A_L|^2 + |A_y - A_L|^2 + |A_z - A_L|^2}{2L^2} \quad (6)$$

が得られる。回転半径ベクトル  $R_i$  と遠心加速度は同じ方向であることから、遠心加速度成分は

$$R_i \cdot (A_i - A_L) = \omega^2 |R_i|^2 \quad (7)$$

となり、これより各センサ出力に対して角速度が次式から決まる。

$$\omega = \sqrt{\frac{R_i \cdot (A_i - A_L)}{|R_i|^2}} \quad (8)$$

また、センサ座標系での回転軸の方向余弦  $e = (\cos\theta_x, \cos\theta_y, \cos\theta_z)$  は式(4)よりその 2 乗が以下で与えられる。

$$-\cos^2\theta_i = 1 - \frac{|R_i|^2}{L^2} \quad (9)$$

## 5 飛翔実験

### 5.1 実験概要

実験者は 10 m 離れた捕球者に向けて、ストレートとカーブを投じる。ボールは加速度センサ内蔵ボールを使用する。この実験での加速度センサの出力を使い、本アルゴリズムを検証する。なお、ストレートの回転軸は、加速度センサの配置から High Y 軸方向と一致させる。

### 5.2 出力結果

ストレートの加速度センサの出力をまとめた結果を図 6 で示す。この図から加速度が振動していることがわかる。これは、センサ座標系でボールにかかる流体力の方向が回転と同期して変化するためである。また、4 つの加速度センサの示す値がそれぞれ異なっている。これは、各加速度センサで回転半径が異なり、回転加速度がそれぞれの加速度センサで異なるためである。カーブの加速度センサの出力も同様な出力を示した。

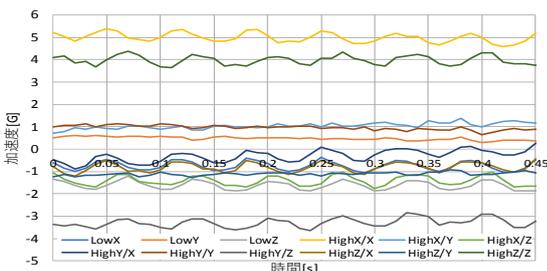


図 6 加速度センサの出力例(ストレート)

### 5.3 回転特性

飛翔実験で得た加速度の出力を最小二乗法で 2 次近似し、本アルゴリズムから回転軸と High X,Y,Z それぞれの角速度を導出する。また、加速度センサの出力の振動はボール回転数を表すため、この振動回数から角速度の平均値を求めることができる。この平均値と本アルゴリズムを使用して導出した角速度を比較することでアルゴリズムの精度を検証する。

2 種類の球種の角速度の比較を図 7 と図 8 に示す。図 9 に投球直後と飛翔中および捕球直前の方向余弦をまとめる。図 7 と図 8 より、ストレートとカーブの角速度が求められることがわかる。また、本アルゴリズムから計測した角速度は、振動回数から求めた角速度と近い

値を示し、精度が良いことがわかる。しかしながら、図 7 を見ると High Y の角速度の精度が悪い。これは式(8)より、回転半径の 2 乗が分母にあることが原因と考えられる。つまり、図 9 よりストレートの High Y の回転半径が小さいため、加速度センサの出力の誤差が角速度に大きく反映する可能性がある。それに対して、カーブの回転軸はどのセンサ座標軸とも一致せず、それぞれの High G で回転半径が小さくない。そのため、結果の精度に問題は見られない。

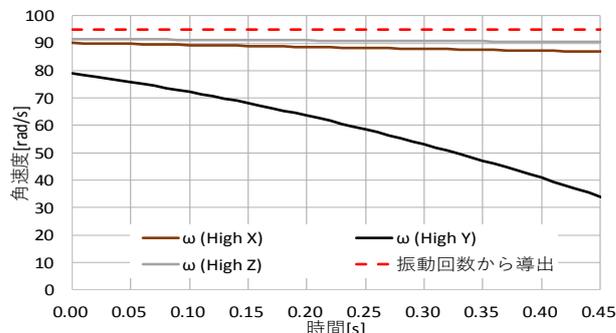


図 7 角速度の比較(ストレート)

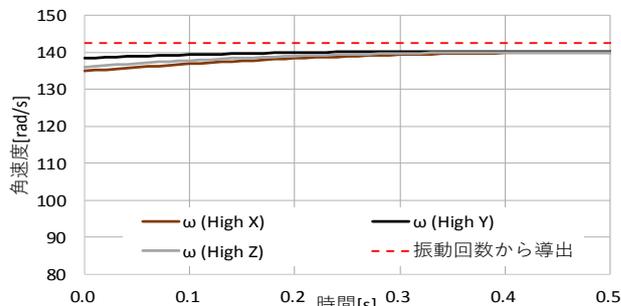


図 8 角速度の比較(カーブ)

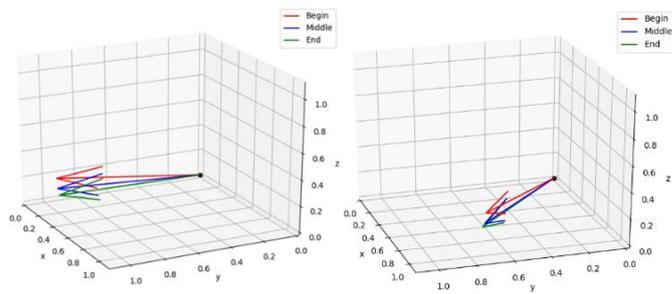


図 9 回転軸の方向余弦(左: ストレート, 右: カーブ)

## 6 まとめと今後の課題

本研究では、加速度センサ内蔵ボールを用いた飛翔状態での回転特性を計測するためのアルゴリズムを開発した。さらに、2 種類の球種で飛翔実験を行い、本アルゴリズムの有効性を検証した。

飛翔状態での加速度センサの出力の特徴から、出力を最小二乗近似した値が回転加速度になることがわかった。これにより、本アルゴリズムの開発を可能にした。また、飛翔実験の結果から 2 種類の球種での回転特性を明らかにした。

今後の課題は加速度センサの回転半径が小さいときの計測精度の改善と慣性座標系での回転軸を特定することである。

### 参考文献

- [1] K. Tsuboi and K. Yasuda: Proceeding of IACSS 2014 Darwin Conference, 2014.
- [2] David Whiteside, Aaron Chin et al.: *J. Sports Engineering and Technology*. (2012), 227(1) 49-56.
- [3] 理化学研究所: ボール内蔵型回転数回転軸センサ取扱説明書