慣性センサを使用したフライングディスクの運動力学推定 Estimation of the flying disc dynamics using the inertia sensor

○正 小柳 玲乃 (慶應義塾大院) 正 仰木 裕嗣 (慶應義塾大)
Reno Koyanagi and Yuji Ohgi

*Graduate School of Media and Governance, Keio Univ., Endo 5322, Fujisawa, Kanagawa, 252-8520, JAPAN

The purpose of this research is to estimate the angular velocity and direction of the rotational axis of the flying disc by inertia sensors. A subject performed throwing by using the flying disc attached the accelerometer. The closed up release and catching point images were acquired using the high speed cameras. The angular velocity was estimated from the centrifugal and angular acceleration. And rotational axis was estimated using gyroscope and accelerometer. Estimated angular velocity and rotational axis were compared to the calculated angular velocity by the cameras.

Key Words: Flying disc, Frisbee, Inertia sensor, Angular velocity, Rotational axis

1. はじめに

野球やサッカー、槍投げ、円盤投げなど物体が飛翔運動を行う競技において、飛翔中の投射体の姿勢や速度などの変量を計測することは流体力学的見地による現象の解明のみならず、競技者のスキルを計測するという点においても非常に重要である。現行では飛翔体の力学量を求める際に主に映像解析、及び風洞実験装置を使用する計測手法が採用されている。しかしこれらの計測手法は実投射された対象を連続して計測するという点に関していくつかの問題が存在する。風洞実験装置は実投射された飛翔体の計測は不可能であり、実投射された飛翔体の力学量を求めるには推定が必要となる。実投射された飛翔体を計測する際に用いられる手法として映像解析手法が挙げられるが、広範囲を移動する対象や高速で移動する対象の観察は位置情報を取得する機器の機構上この計測法では非常に困難である。対して本研究で提案する慣性センサを飛翔体に装着及び内蔵させ、センサの値から物理量を推定する手法は観察対象となる物体を計測時に実際に飛翔させることが可能である。また映像解析手法を使用した際の計測範囲が制限される問題を考慮せずに飛翔体を観察することが可能である。

フライングディスクもまたスポーツにおける飛翔体の一つであり、ディスクの角速度、回転軸や空気力がディスクの飛翔という物理現象を捉える際に非常に重要なパラメータである。

今までの研究では3軸加速度計を使用し、ディスクの裏に固定することによって角速度や回転軸の方向を推定した。しかし、フライングディスクや円盤投げなどで観察される飛翔中に回転軸が変化する現象は3軸加速度計では観察が不可能であった。そこで3軸加速度計の他に2軸ジャイロ스코プを使用して角速度、回転軸の方向を推定した。

2. 計測器具、実験

慣性センサをディスクの裏面に固定し、投射実験を行った。3軸加速度計の時間分解能は1000Hz、計測レンジは±12Gで制作し、2軸ジャイロ스코プの時間分解能は1000Hz、計測レンジは±200deg/sに設定し、計測を行った。ジャイロスコプの軸は加速度計のx軸及びy軸に平行となるように設定した。

このようにして製作したフライングディスクを被験者に投げてもらい、そのリリース付近及びディスクの飛翔期終端部をそれぞれ高速カメラ2台ずつ、合計4台使用し飛翔期のディスクを撮影した。高速カメラのサンプリングレートはそれぞれ1000Hzで撮影した。さらに高速カメラから角速度及び回転軸の方向を計測するため絶対座標系を定義した。鉛直方向をZ軸、ディスクの進行方向をX軸、右手座標系に従いX、Z軸双方に垂直な軸をY軸とした。

また加速度計の各3軸にそれぞれが平行であり、ディスクの中心を原点としたセンサ座標系を Fig. 1 のように設定した。加速度及びジャイロスコプから回転軸の方向を推定する際、計測値はセンサ座標系で出力される。そのため比較を行う際にセンサ座標系を高速カメラから取得したデータを使用して絶対座標系に座標変換し各値を比較した。実験の概要は Fig. 2 のとおりである。

Fig. 1: Schematic illustration of the flying disc

Fig. 2: Schematic illustration of the experiment

3. 実験結果、推定方法

Figure 3 は実験により取得した飛翔期のフライングディスクの加速度データを示したものである。飛翔中の加速度データは周期性を持ったデータとして示された。また、角速度のデータも周期性を持ったデータとして示された(Fig. 4)。

Fig. 3: Acceleration data during the flight

Fig. 3: Angular velocity data during the flight

運動する物体に固定された加速度計からは加速度は並進加速度、重力加速度、遠心加速度、接線加速度成分の4つの成分が出力され、Fig. 3の加速度データにもそれぞれが何らかの形で出力されている。太田らは並進加速度計を使用して運動体の角速度を推定する際以上のように加速度成分を区分することで行った³⁾。絶対座標系 ΣXYZ の原点をOとおき、運動体に固定された運動座標系 Σxyz の原点をoとする。物体が運動を行った際任意の点pに生じる加速度 $\mathbf{A}$ は式(1)のように示すことが可能である。

$$\mathbf{A} = \ddot{\mathbf{R}} + \boldsymbol{\omega} \times (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}) + \dot{\boldsymbol{\omega}} \times \mathbf{r} - \mathbf{g} \quad (1)$$

ここで $\mathbf{R}$ は絶対座標系からみたoの位置ベクトル、 $\mathbf{g}$ は重力加速度、 $\mathbf{r}$ は運動座標系からみた点pの位置ベクトル、 $\boldsymbol{\omega}$ は運動座標系からみた角速度ベクトルである。

Koyanagi et al. は検証実験によりセンサを内蔵させた球の飛行中のデータにそれぞれの成分がどのように出力されているかを示した²⁾。データ上に各加速度成分が表出する際には遠心加速度が波形のDC成分、重力加速度及び並進加速度については波形の振幅として出力されていることが明らかとなった。この知見より、フライングディスクの運動学変量を推定する際の波形の処理を行った。

3-1. 角速度推定

回転軸の方向を推定するため、z軸の角速度を加速度計の値を使用して推定した。推定には小柳らの知見を利用した¹⁾。デ. 飛行中のフライングディスクに固定した加速度計から推定した角速度 ω_z は以下の式(2)とおりである。

$$\omega_z(t) = \frac{a'_x(t)}{r_x} \tanh(\sqrt{a'_x(t)r_x} \omega_z(0) - \frac{\sqrt{a'_x(t)r_x}}{r_y} t) \quad (2)$$

ここで r_x はセンサ座標系におけるディスクの中心とセンサの中心とのX座標軸上の距離、 a'_x は加速度データから重力加速度及び並進加速度を除去したものである。

3-2. 回転軸推定

推定したセンサ座標系のz軸方向の角速度及びジャイロスコープにより計測したx、y軸の角速度より、回転軸を推定した。回転軸は角速度ベクトルの方向と一致しているため、それぞれの軸の角速度を単位ベクトル化し、ローカル座標系での方向を推定した。

さらに絶対座標系からみた回転軸を求めるため、飛行期が終了する直前の画像より、高速度カメラから求めた絶対座標系からみたセンサ座標系の方向を求めた。その座標から回転行列を作り、センサ座標系での回転軸を絶対座標系へと座標変換を行った。さらに求めた角速度を数値積分することによって角度を算出し、0.001秒間に各軸がどの程度動いているのかを求め回転行列に値を入力し、絶対座標系をセンサ座標系の関係を求め、その値を使用して飛行期全体の絶対座標系からみた回転軸の方向を求めた。推定の際、ジャイロスコープの出力値が振りきれられている箇所はベジェ曲線の手法を使用して振りきれられている箇所のデータを補間した。

4. 結果

4-1. 角速度

加速度計から推定したz軸方向の角速度は以下のとおり

である(Fig. 4)。

Fig. 4: Angular velocity of the z axis

また、高速度カメラで計測した値と加速度計を使用して推定した値とを比較した。その際の高速度カメラの測定値とセンサの推定値ではその差異がリリース時で約0.13(rad/s)、飛行期終了直前で約0.27(rad/s)であった。

4-2. 回転軸

Figure 5は高速度カメラで算出した回転軸の飛行期終盤の値と同時刻のセンサから推定した回転軸を比較したものである。飛行期終盤の高速度カメラの測定値とセンサの推定値との差異は約4deg程度であった。図中の点線はカメラの計測値、実線がセンサの推定値となっている。

Fig. 5: Comparison of the end phase rotational axis

またFig. 6では、センサから推定した飛行期全体の軸の方向を示している。飛行期の前半に行くほど誤差が大きくなり、軸が大きく変化してしまっている。

Fig. 6: Whole phase rotational axis

5. おわりに

角速度の推定法については、ある程度の精度を持って推定が可能であると考えられる。また回転軸の推定では特に飛行期前半の値が大きくずれてしまっていた。この誤差はジャイロスコープの値がリリース時に大きく増減している点や、回転行列に推定した角度を前の値から推定し入力するため、誤差が蓄積してしまっているものと考えられる。今後この誤差を修正するため、カルマンフィルタを使用した回転軸の推定を考えている。さらにセンサ座標系と絶対座標系の関係が明らかとなれば、空気力の推定も容易に推定することが可能となる。

参考文献

- (1) 小柳玲乃、仰木裕嗣、加速度計を利用したフライングディスクの運動学変量推定、ジョイント・シンポジウム2009講演論文集、09-45(2009)、pp.401-404.
- (2) Koyanagi, R., and Ohgi, Y., Measurement of the forces on ball in flight using built-in accelerometer. Proceedings of International Sports Engineering Association, 7-2(2008), pp. 1-8.
- (3) 太田憲、小林一敏、加速度計を用いたスポーツにおける角速度・角加速度計測、計測自動制御、30-12(1994)、pp.1442-1448.