Advance Publication by J-STAGE

日本機械学会論文集

Transactions of the JSME (in Japanese)

DOI:10.1299/transjsme.21-00050

Received date : 1 February, 2021

Accepted date : 10 June, 2021

J-STAGE Advance Publication date : 18 June, 2021

硬式野球ボール型加速度センサにおける回転軸変化の シミュレーションによる再現

桒山 莉央^{*1}, 長岡 大志^{*2}, 坪井 一洋^{*3}, 野田 茂穂^{*4}, 姫野 龍太郎^{*5}

Reappearance of change in time of rotation axis with simulation in baseball-type acceleration sensor

Rio HIYAMA^{*1}, Hiroyuki NAGAOKA^{*2}, Kazuhiro TSUBOI^{*3},
Shigeho NODA^{*4} and Ryutaro HIMENO^{*5}

^{*1, *2, *3} Graduate School of Sci. and Eng., Ibaraki University

4-12-1 Nakanarusawa-cho, Hitachi-shi, Ibaraki 316-8511, Japan

^{*4, *5} RIKEN, Wako Campus

2-1 Hirosawa, Wako-shi, Saitama 351-0198, Japan

Abstract

We develop an output simulator for a baseball-type acceleration sensor in which one three-axis sensor for low acceleration and three sensors for high acceleration are installed. The acceleration vector at any position inside this ball-type sensor in rotational motion is formulated on the basis of the assumption that all the sensors are in rigid configuration. Since this simulator can estimate kinematically the acceleration under the change in time of rotation axis on the sensor coordinate system, we investigate the behavior of the rotation axis suggested in the previous flight experiment. In order to confirm the accuracy of the sensor outputs, preliminary experiment is performed, in which acceleration outputs are measured by rolling the ball-type sensor along a slope. The comparison of obtained acceleration outputs with theoretical values shows sufficient agreement. At the same time, the moment of inertia of the ball-type sensor is measured. Sensor outputs are simulated under two different conditions, in one of which the rotation axis is changing in time and the axis is fixed in the other. As the result, the acceleration output in the former condition varies linearly while the output keeps almost constant in the latter. The measured outputs of the flight experiment successfully reappear in the results under the former condition. The error between the simulated and measured outputs is calculated to 18 trial data of straight and curve balls, and the errors in the former condition become smaller than those in the latter. The present result therefore concludes that the rotation axis of the ball-type sensor in flight changes with time.

Keywords : Baseball-type acceleration sensor, Output simulation, Rotational acceleration, Rotation axis, Change in time, Flight experiment, Sports engineering

1. 緒 言

飛翔時の物体に働く流体力の解明は流体力学における古くからの研究課題であり、そのような状況を想定した研究対象のひとつとしてスポーツの球技で使用されるボールの流体力が挙げられる(Claret, 2015). 通常、ボールに働く流体力とその周りに生じる流れ場との関連は風洞実験により測定される(Alam et al., 2012). しかし、風洞実験では一様流中に物体を固定して測定するため、実際の飛翔状態とは気流の条件が異なる可能性がある. このような背景から飛翔するボールをビデオ・カメラ等で撮影し、その位置情報からボールに働く流体力を測定する飛翔実験による研究も進められている(Mizota et al., 2013, Cross and Lindsey, 2014). そして、この方向からの研究によ

No.21-00050 [DOI: 10.1299/transjsme.21-00050]

^{*1} 学生員, 茨城大学大学院 理工学研究科 (〒316-8511 茨城県日立市中成沢町 4-12-1)

^{*2} 茨城大学大学院 理工学研究科 (現 日立 GE ニュークリア・エナジー (株))

^{*3} 正員, 茨城大学大学院 理工学研究科

^{*4} 正員, 理化学研究所 (〒351-0198 埼玉県和光市広沢 2-1)

^{*5} 正員, フェロー, 理化学研究所

E-mail of corresponding author: kazuhiro.tsuboi.508@vc.ibaraki.ac.jp

り飛翔状態のボールには風洞実験で計測される流体力とは異なる流体力が働く可能性のあることが指摘されている(Miyazaki et al., 2017).

飛翔時のボールに特徴的な条件としてボールの回転運動がある. たとえば, 回転するボールにはマグヌス力による揚力が発生するが, この力は回転軸の方向との相関が強いことが明らかにされている(溝田他, 2007). このようにボールに働く流体力は一般にボールの回転特性の影響を強く受けるが, 物体の回転運動とそれによって生じる流体力の関連についてはいまだ不明な点も多い. その理由のひとつとして, 飛翔状態でのボールの回転特性を十分な精度で測定する方法が確立されていないことがあげられる.

飛翔中のボールの回転特性を直接計測するために, モーション・キャプチャー・システム(Whiteside et al., 2012)や高速度カメラによる測定(Ijiri et al., 2017)などが使われる. しかし, これらの方法では限定された環境下で計測を行う必要があり, その際の測定誤差の制御も容易ではない. 一方, 加速度センサやジャイロセンサなど数種類のセンサを内蔵したボール型センサによる計測も行われている. 例えば, 投球時のボールの回転特性計測を主な目的とした硬式野球ボール型センサの利用が報告(柴田他, 2017)されているが, このセンサで飛翔中のボールの回転特性は計測されていない. また, 軟式球にセンサを埋め込むことで飛翔時のボールの回転数変化を計測した報告(関口他, 2013)もあるが回転軸については言及されていない.

著者らは, 複数個の加速度センサを配置したセンサユニットを硬式野球用ボールのレプリカケースに内蔵したボール型センサを用いて飛翔状態での回転特性の直接計測を試みた(長岡他, 2019). この硬式野球ボール型加速度センサは実際の試合での使用は想定しておらず, 例えば投手の投球練習時にデータを収集することで投手の技術力向上に役立てることを念頭に開発されたものであるが, 複数の加速度センサを用いることでジャイロセンサと同等の計測が可能であり飛翔状態での回転特性の直接計測に利用できる.

このボール型センサによる飛翔時の回転特性の計測アルゴリズムを開発し, 飛翔中のボール型センサの回転特性を調べたところ, 回転数が徐々に減少することや回転軸の向きがゆっくりと変化するという知見が得られた. 回転数については, 飛翔実験で実施したストレート球(投球直後の回転数 10~15 rps)で 0.07~0.10 rps, カーブ球(投球直後の回転数 19~21 rps)では 0.13~0.16 rps 程度の回転数の減少が飛翔時に生じたが, これはボール型センサに働く空力トルクによる影響として説明が可能であることを示した. 一方, ボール型センサの回転軸の向きが飛翔中に 10° 程度変化するという結果に関しては, 同様なボール型センサによる飛翔実験からもその可能性を示した報告(小柳, 仰木, 2008)があるが, その詳細はよくわかっていない. これは, スカラー量である回転数の変化率が空力トルクの大きさだけで決まるのに対して, 回転軸はベクトル量となるためその変化率を求めるには空力トルクに関するより詳細なデータが必要となるためである.

本研究では, 先行研究で示唆されたボール型センサで生じる飛翔中の回転軸の時間変化についてシミュレーションに基づいて検証する. その際, ボール型センサの出力からボールケースに働く流体力やそれによる空力トルクを得ることができないため, ボール型センサの重心まわりの回転の運動方程式を用いて角運動量(角速度と回転軸)を求めることはできない. そこで, ボールケース内のセンサユニットを剛体と考え, その運動を定式化することで各センサに生じる加速度を運動学的に予測することでボール型センサの出力を再現することを試みる. また, 飛翔実験に先立って予備実験としてボール型センサを斜面上で転がす斜面実験を行い, センサの出力精度を確認するとともにボール型センサの慣性モーメントも測定した.

2. 硬式野球ボール型加速度センサ

一般に物体の回転計測にはジャイロセンサが使用される. しかし, 硬式野球ボールの回転数は直球で 40 rps (14400 deg/s) 程度あり, 安価なジャイロセンサではこのような高回転を計測することは難しい(関口他, 2013). そこで, 3 軸方向の加速度を $\pm 5\text{ G}$ ($1\text{ G} = 9.8\text{ m/s}^2$) まで計測できる低加速度用センサ 1 個(アナログ・デバイsez社製 ADXL325. 以下, Low G)と $\pm 200\text{ G}$ まで計測できる 3 個の高加速度用センサ(同社製 ADXL377. 以下, High G)を組み合わせることで 3 軸ジャイロセンサと同様の出力が得られるセンサユニットが開発された(野田, 姫野, 2016).

このセンサユニットの大きさは $33 \times 33 \times 33\text{ mm}^3$, 重さは 38 g であり, 図 1 に示すように Low G をセンサ座標系の原点として直交する 3 軸方向に各 High G が 7 mm 間隔で配置される. 以下ではセンサ座標系の X 軸方向にあ

る High G センサを High X と呼び、このセンサの X, Y, Z 軸方向の加速度をそれぞれ High X/X, High X/Y および High X/Z と記す。他の高加速度用センサ High Y と High Z についても同様の表記を用いるとともに Low G センサについても各軸方向の出力を Low X, Low Y ならびに Low Z と表す。なお、各センサおよびセンサユニットの仕様その他詳細については著者らによる先行論文(長岡他, 2019)を参照されたい。

このセンサユニットを硬式野球用ボールのレプリカケースにはめ込んだボール型加速度センサを本研究では使用する。図 2 に示すように、このレプリカケースは中空の構造になっており、ボールケースの表面には硬式球の表皮が貼り付けてある。そして、ボール型センサの円周と重さはそれぞれ 23.0 cm と 161 g に作られている。なお、ボールケースとセンサユニットは Low G がボールの幾何学中心となるように設計されているが、飛翔時に Low G が厳密に回転軸上に位置するわけではないため Low G の出力にも回転加速度成分が含まれる。この成分に対する対応については 3 章ならびに 5 章で説明する。

Fig.1 Configuration of sensors in sensor unit. One Low G sensor is located at the origin in the sensor coordinate system and three High G sensors on each coordinate axis.

Fig. 2 Sensor unit and its ball case.

3. 斜面実験

3・1 実験の概要

野球ボール型加速度センサの出力確認のために運動状態が既知である斜面実験を予備実験として行った。図 3 に示すように、今回の実験では斜度 15° の斜面を初速度なしでゆっくりとボール型センサを転がり落とす。そして、センサ座標系の各軸方向を回転軸として斜面を転がるボールの加速度を計測する。同時に市販のデジタルカメラを使って 240 fps でボールの運動を撮影し、得られた動画像から画像解析ソフトウェア「PV STUDIO 2D」を用いてボールの中心位置の座標を数値化することでボールの移動距離を求めた。なお、実験の際にはボール表面のシームによって生じるバウンドをなくすためにボールを円筒にはめ込み、その円筒周りにゴムを巻くことで斜面との滑りを抑えた。

斜面を転がり始めるボール型センサの中心位置を座標原点とし、斜面に沿って下向きを正の向きとする座標系をとる。ボール型センサと斜面に滑りがないとき、その中心の速度 v と加速度 a は次式で与えられる。

$$v = r\omega = \frac{Mr^2}{Mr^2 + I} gt \sin \alpha \quad (1)$$

$$a = \frac{Mr^2}{Mr^2 + I} g \sin \alpha \quad (2)$$

ここで、 M と r はボール型センサと円筒をあわせた全体の質量と半径、 I はその慣性モーメント、 α は斜面の斜度、 ω は回転角速度、 g は重力加速度である。

式 (1) より斜面を転がるボール型センサの速度は時間の 1 次関数となるので、その位置（移動距離）は時間の 2 次関数である。ボールケース中心の移動距離の時間変化とそれを最小自乗近似によって求めた時間の 2 次関数を図 4 に示す。移動距離は時間の 2 次関数となり滑りなしの転がり運動を確認できる。この移動距離の数値微分および移動距離の近似 2 次関数から求めたボール型センサの中心速度の時間変化を図 5 に示す。数値微分によって求めた速度と 2 次関数から求めた速度は十分に一致している。なお、数値微分による速度には図のようなノイズが含まれるため、以下では移動距離の 2 次関数近似から速度と加速度を求める。

Fig. 3 Overview of the preliminary experiment. The ball-type sensor is embedded into a rubber ring to prevent slipping motion (right figure) and it is rolling down on a slope (left figure).

Fig. 4 The traveling distance of the ball-type sensor.

Fig. 5 The speed of the center of the ball-type sensor.

3・2 出力精度の確認

ボールを転がす際にセンサ座標系の X 軸を回転軸とした場合、High Y と High Z に働く遠心方向の加速度は High Y/Y と High Z/Z で検出される。このとき、センサ座標系の原点にある Low G が回転軸上に厳密に位置するわけではないため Low G にも回転による加速度が生じる。そこで、次式によって遠心加速度成分 A を求める(長岡他, 2019)。

$$A = A_{i/i} - A_i \quad (3)$$

ここで、 $A_{i/i}$ ($i = Y, Z$) は High Y/Y または High Z/Z、 A_i は Low Y または Low Z からの出力である。

一方、動画像から求めた速度 v を用いると式 (1) から角速度 ω が決まるので High Y と High Z に働く遠心方向の加速度 A' は次式からも決まる。

$$A' = l \omega^2 \quad (4)$$

ただし l はこの場合には High Y または High Z の High X 軸まわりの回転半径で、これは Low G から各 High G までの間隔に等しく $l = 7 \text{ mm}$ となる。

これら 2 つの方法で求めた回転軸が X 軸のときの遠心加速度を図 6 に示す。横軸が時間で縦軸が加速度である。図中の「Video」の結果は式 (4) から求めた加速度であるが、異なる方法で求めた遠心方向の加速度成分が十分に一致することが確認できる。同様の方法で回転軸を Y 軸と Z 軸にとった場合の加速度の比較結果を図 7 と図 8 に示す。図 6 の結果と同様にいずれの軸まわりでも両者は十分に近い値を示している。

Fig. 6 Centrifugal acceleration around the X axis in the ball-type sensor. The blue and orange solid lines are the results of sensor outputs in the High Y/Y–Low Y and Z/Z–Low Z, respectively. The red broken line is the result obtained by video images, and these results are in good agreement.

Fig. 7 Centrifugal acceleration around the Y axis in the ball-type sensor. The manner of the figure is similar to that in Fig. 6, and the results of the High X/X–Low X and Z/Z–Low Z are in good agreement with that of video images.

Fig. 8 Centrifugal acceleration around the Z axis in the ball-type sensor. The manner of the figure is similar to that in Fig. 6 and 7, and the results of the High X/X–Low X and Y/Y–Low Y are in good agreement with that of video images.

斜面実験から求めた加速度を用いると式 (2) からボール型センサの慣性モーメントを求めることができる。ただし、前節で説明したとおり実際の実験では円筒にボール型センサをはめ込んでいるため、円筒からの寄与を引いてボール型センサ単体の慣性モーメントを求める必要がある。式 (2) よりボール型センサの重心まわりの慣性モーメント I_{ball} は式 (5) で与えられる。ただし、ボール型センサ単体の質量を $M_{ball}(= 0.161 \text{ kg})$ 、円筒の質量 $m(= 0.075 \text{ kg})$ 、その外径 $r_o(= 0.045 \text{ m})$ および内径 $r_i(= 0.037 \text{ m})$ として円筒内の密度は一様と仮定する。

$$I_{ball} = \frac{(M_{ball} + m)r_o^2}{a} g \sin \alpha - (M_{ball} + m)r_o^2 - \frac{1}{2} m(r_o^2 + r_i^2) \quad (5)$$

式 (5) から求めたボール型センサの各軸周りの慣性モーメントを表 1 に示す. 表に示すとおり X 軸, Y 軸および Z 軸周りの実験を各 2 回行い, それらの平均として各軸周りの慣性モーメントを求めた. 各軸周りの慣性モーメントは X 軸, Y 軸, Z 軸周りの順で小さくなっており特別な対称性はない. なお, 一般的な硬式野球ボールの慣性モーメントとして $1.9 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ という値が報告(岡他, 2012)されているが, 今回求めた値はいずれの軸周りに対してもこの値より小さい. これらの結果は, 中空のレプリカケースの中心にセンサユニットがはめ込まれるというボール型センサの構造によるものと考えられる.

Table 1 Moment of inertia around each axis in the ball-type sensor.

	Moment of inertia [$\text{kg} \cdot \text{m}^2$]	Average [$\text{kg} \cdot \text{m}^2$]
	$\times 10^{-4}$	$\times 10^{-4}$
X-axis	1.66 1.65	1.65
Y-axis	1.49 1.42	1.46
Z-axis	1.29 1.29	1.29

4. センサ出力の定式化

野球ボール型センサの飛翔時の座標系を図 9 に示す. この図では, $x-y-z$ 軸が地面に固定した座標系 (慣性座標系) であり, $x'-y'-z'$ 軸は並進および回転運動するボール型センサの重心を原点とする座標系でこれは非慣性系になる. ボール型センサの重心の位置ベクトルを $\mathbf{x}_0$, 重心からセンサまでの位置ベクトルを $\mathbf{r}$ とすると, センサ位置 $\mathbf{P}$ に対する位置ベクトルは $\mathbf{x} = \mathbf{x}_0 + \mathbf{r}$ である. 以下では, ベクトルの成分を与える座標系を明示するためにベクトル $\mathbf{x}$ の慣性座標系での成分を $\{\mathbf{x}\}$, 重心座標系での成分を $\{\mathbf{x}\}$ と表す.

Fig. 9 Representation of position vector in two coordinate systems. The coordinate system shown in black (x, y, z) is the inertia system based on the ground and that in red (x', y', z') is moving with the ball case. The origin of the latter coordinate system is located at the center of gravity in the ball-type sensor.

このとき, ボール型センサの重心まわりの回転は次式で表すことができる.

$$[\mathbf{r}] = R(t)\{\mathbf{r}\} \quad (6)$$

ここで $R(t)$ は回転行列であり, その成分 $R_{ij}(t)$ は次式で与えられる(高橋, 1992).

$$R_{ij}(t) = \left(\delta_{ij} - e_i(t)e_j(t) \right) \cos \theta(t) + e_i(t)e_j(t) + \varepsilon_{ijk}e_k(t) \sin \theta(t) \quad (7)$$

ただし、 $e_i(t)$ は回転軸の単位ベクトル、 $\theta(t)$ は回転軸に対して右ねじの向きに測った回転角とともに時間の関数である。また、 δ_{ij} と ε_{ijk} はクロネッカーのデルタとエディントンのイプシロンであり、以下ではこれらの記号を用いる際にはテンソル記法の総和規約にしたがう。

センサの回転速度は式 (6) を時間で微分することで導出される。

$$[\dot{\mathbf{r}}] = R\{\dot{\mathbf{r}}\} + \dot{R}R^T[\mathbf{r}] = R\{\dot{\mathbf{r}}\} - \Omega(t)[\mathbf{r}] \quad (8)$$

ここで式 (8) の最右辺第 2 項に現れる $\Omega(t)$ は角速度行列であり、その成分は次式で与えられる。

$$\Omega_{ij}(t) = -(\dot{R}R^T)_{ij} = -\varepsilon_{ijk}\omega_k(t) \quad (9)$$

このとき回転行列 R が直交行列である条件 $R^{-1} = R^T$ を用いる。

そして、式 (9) で定義される角速度ベクトル $\omega_l(t)$ の成分表示は次式となる。

$$\omega_l(t) = \omega(t)e_l(t) = e_l(t)\dot{\theta}(t) + \dot{e}_l(t) \sin \theta(t) - \{\mathbf{e}(t) \times \dot{\mathbf{e}}(t)\}_l \{1 - \cos \theta(t)\} \quad (10)$$

式 (8) をさらに時間で微分することで加速度に対して次式が得られる。

$$R\{\ddot{\mathbf{r}}\} = [\ddot{\mathbf{r}}] + 2\Omega[\dot{\mathbf{r}}] + (\dot{\Omega} + \Omega^2)[\mathbf{r}] \quad (11)$$

ここで、 $\dot{\Omega}(t)$ は角加速度行列であり $\Omega(t)$ の時間微分から求まる。すなわち

$$\dot{\Omega}_{ij}(t) = -\varepsilon_{ijk}\dot{\omega}_k(t) \quad (12)$$

より、その成分 $\dot{\omega}_l(t)$ は式 (10) から以下のように求まる。

$$\begin{aligned} \dot{\omega}_l(t) = & \dot{e}_l\dot{\theta}(1 + \cos \theta(t)) + e_l\ddot{\theta} + \ddot{e}_l \sin \theta(t) - \{\mathbf{e}(t) \times \ddot{\mathbf{e}}(t)\}_l (1 + \cos \theta(t)) \\ & - \{\mathbf{e}(t) \times \dot{\mathbf{e}}(t)\}_l \dot{\theta} \sin \theta(t) \end{aligned} \quad (13)$$

センサの位置ベクトルからセンサの加速度は $\ddot{\mathbf{x}} = \ddot{\mathbf{x}}_0 + \ddot{\mathbf{r}}$ であり、これより式 (11) は以下のように書き直すことができる。

$$[\ddot{\mathbf{r}}] + 2\Omega[\dot{\mathbf{r}}] + (\dot{\Omega} + \Omega^2)[\mathbf{r}] = R(\{\ddot{\mathbf{x}}\} - \{\ddot{\mathbf{x}}_0\}) \quad (14)$$

ボール型センサの重心に働く単位質量あたりの外力を $\mathbf{F}$ 、各センサに働く単位質量あたりの拘束力を $\mathbf{T}$ とすると、重心とセンサの慣性座標系に対する運動方程式はそれぞれ $\{\ddot{\mathbf{x}}_0\} = \{\mathbf{F}\} + \{\mathbf{g}\}$ および $\{\ddot{\mathbf{x}}\} = \{\mathbf{T}\} + \{\mathbf{g}\}$ となる。ただし、 $\mathbf{g}$ を重力加速度ベクトルである。

各センサが全体として剛体運動をする場合、それらは拘束力 $\mathbf{T}$ によってセンサ座標系での位置 $[\mathbf{r}]$ が固定され、その結果として $[\dot{\mathbf{r}}] = [\ddot{\mathbf{r}}] = \mathbf{0}$ となる。この関係と上述した 2 つの運動方程式を式 (14) に代入し、センサはその拘束力 $[\mathbf{T}] (= R\{\mathbf{T}\})$ の反力を検出することから、各センサの出力 $\mathbf{A}$ に対して次式が得られる。

$$[\mathbf{A}] = -[\mathbf{T}] = -R(t)\{\mathbf{F}\} - (\dot{\Omega}(t) + \Omega^2(t))[\mathbf{r}] \quad (15)$$

センサユニットはレプリカケースに内蔵されるため、飛行時の各センサはボールケースに働く流体力から生じる並進運動にともなう加速度とボールケースとともに回転運動することで発生する加速度という2種類の異なる加速度を合成して検出している。式(15)から明らかなように、前者が最右辺第1項でこれは回転行列によって周期的に変動する成分(交流成分)である。一方、最右辺第2項が後者であり、これはほぼ直線的に変化する直流成分として現れる。

これら2つの加速度成分の分解は次のように行うことが可能である(関口他, 2013)。各センサ出力の時系列データを最小自乗近似することで回転による直流成分を抽出し、この成分をもとの出力から除くことで各センサの並進による交流成分が求まる。さらに、High Gの最小自乗近似からLow Gの最小自乗近似を引くことでLow GまわりのHigh Gの直流成分(センサ座標系での回転による成分)を得ることができる。以下では、センサ出力の最小自乗近似として時間の2次関数を仮定する(長岡他, 2019)。

5. シミュレーションによる検証

5・1 飛行実験

飛行実験ではボール型加速度センサの投球者が10 m離れた捕球者に向けてストレートとカーブを投げ、それぞれの球種に対して9ケースの時系列データを得た。実験で用いたセンサのサンプリング周波数は主に100 Hzに設定したが、一部のデータ(後述する表2のTest04および表3のTest10)では500 Hzを使用した。飛行実験では、ストレート投球時の回転軸の方向はセンサ座標系のY軸方向と一致させるようにしているが、ボールケースに収めた状態でY軸の向きを確認できないため、ストレート回転の軸方向はボールの握り方によってY軸の正または負の方向を向いている。

先行研究で示されたアルゴリズムにより、センサの回転加速度ベクトルから飛行時の回転軸ベクトルと回転角速度が計測時刻ごとに求まる(長岡他, 2019)。これらの時系列データのうち、投球直後と捕球直前でのそれぞれの値を表2と表3に示す。ストレート球の結果が表2、カーブ球の結果が表3であり、表中の「after pitching」欄は投球直後、「before catching」欄は捕球直前での回転軸の方向余弦(X, Y, Z軸成分)と回転角速度 ω [rps]、「difference」欄にはこれらの回転軸の成す角[deg]をまとめている。

回転角速度はストレート球とカーブ球でともに減少していることがわかる。飛行実験で投球したストレート球は、投球直後の回転数が10～15 rpsで、捕球までの間に0.07～0.10 rps程度減少している。同様に、カーブ球は投球直後の回転数が19～21 rpsであるが0.13～0.16 rps程度の回転数の減少が見られる。この回転数の減少量と硬式野球ボールの飛行時に作用する一般的な空力トルクから見積もった回転数の減少量を比較したところ両者はほぼ同程度であることから、今回計測した回転数の減少は空力トルクによる影響として説明が可能である(長岡他, 2019)。

一方、表2の結果からストレート球では $4.59^\circ \sim 11.59^\circ$ の範囲、表3からはカーブ球で $8.41^\circ \sim 15.32^\circ$ の範囲で回転軸の方向が変化している。このことから、いずれの球種でも回転軸が飛行中にゆっくりと変化し、また今回のデータではストレート球よりカーブ球の方が角度の変化が大きい結果となっている。

表中のTest04とTest10の結果に基づいて投球直後と捕球直前での回転軸の方向をセンサ座標系の単位ベクトルとして図10に図示した。図中の赤色のベクトルが投球直後、緑色のベクトルが捕球直前の回転軸ベクトルである。表2と表3からわかるように、図10(a)に示したストレート球(Test04)の回転軸の成す角度は 8.45° 、同図(b)のカーブ球(Test10)では 8.41° である。

5・2 出力シミュレーション

飛行実験のセンサ出力から求めた角速度と回転軸の時系列データを用いて、4章で定式化したセンサ出力のシミュレーションを行った。加速度センサの出力から求めた角速度と回転軸ベクトルをシミュレータへの入力として用いる。ただし、今回のシミュレーションではセンサの運動として回転によって発生する加速度成分のみを考慮するため式(15)の最右辺第2項のみを用いる。シミュレーションの手順は以下である。

Table 2 Results of rotational speed and its axis vector in straight balls.

No.	after pitching				before catching				difference [deg]
	X	Y	Z	ω [rps]	X	Y	Z	ω [rps]	
Test01	0.27	-0.96	-0.13	14.68	0.17	-0.97	-0.18	14.57	6.24
Test02	0.26	-0.96	-0.09	14.57	0.15	-0.98	-0.14	14.40	7.58
Test03	0.09	-0.96	-0.27	14.86	0.18	-0.96	-0.22	14.49	5.76
Test04	-0.29	0.96	0.02	13.81	-0.16	0.98	0.09	13.84	8.45
Test05	0.13	-0.95	-0.30	14.54	0.28	-0.94	-0.21	14.14	9.56
Test06	0.24	-0.97	0.002	10.78	0.39	-0.91	0.13	10.68	11.59
Test07	-0.18	-0.96	0.22	11.47	-0.10	-0.97	0.21	11.28	4.59
Test08	0.22	-0.96	-0.19	11.09	0.35	-0.93	-0.09	11.00	9.46
Test09	0.17	-0.98	-0.09	11.67	0.31	-0.95	0.03	11.55	10.79

Table 3 Results of rotational speed and its axis vector in curve balls.

No.	after pitching				before catching				difference [deg]
	X	Y	Z	ω [rps]	X	Y	Z	ω [rps]	
Test10	0.77	0.63	-0.11	21.02	0.77	0.64	0.03	20.84	8.41
Test11	0.75	-0.66	-0.05	20.09	0.85	-0.52	0.07	19.88	12.13
Test12	0.76	0.62	-0.20	22.48	0.77	0.64	0.009	22.32	12.09
Test13	0.75	0.65	-0.14	22.03	0.75	0.66	0.01	21.67	8.45
Test14	0.75	-0.62	-0.24	20.32	0.86	-0.51	-0.08	20.18	12.48
Test15	0.77	-0.62	-0.14	20.64	0.87	-0.50	0.01	20.46	12.29
Test16	0.72	-0.68	-0.14	19.02	0.85	-0.53	0.04	18.87	15.32
Test17	0.74	-0.67	-0.03	19.52	0.85	-0.51	0.15	19.30	15.29
Test18	0.74	-0.67	-0.03	19.52	0.85	-0.51	0.15	19.24	15.29

(a) straight ball (Test04)

(b) curve ball (Test10)

Fig. 10 The difference of rotation axis between “after pitching” and “before catching” in the sensor coordinate system. The red and green vectors show the rotation axis at “after pitching” and “before catching” respectively.

手順 1：センサの計測データから角速度 $\omega(t)$ [rad/s]と回転軸ベクトルの方向余弦 $\mathbf{e}(t) = (e_x, e_y, e_z)$ を時間の2次関数として求める。さらに、 $\omega(t)$ の積分により回転角 $\theta(t)$ [rad]を時間の3次関数として求める。このとき回転軸ベクトルはセンサ座標系の成分であるため $\theta(0) = 0$ とする。

手順 2：式 (7) の右辺に $\omega(t), \theta(t)$ および $\mathbf{e}(t)$ を代入することで回転行列 $\mathbf{R}(t)$ ，さらに式 (9) と式 (10) から角速度行列 $\boldsymbol{\Omega}(t)$ ，式 (12) と式 (13) から角加速度行列 $\dot{\boldsymbol{\Omega}}(t)$ がそれぞれ得られる。

手順 3：式 (15) の最右辺第 2 項に各センサの位置座標 $[\mathbf{r}]$ および手順 2 の $\boldsymbol{\Omega}(t)$ と $\dot{\boldsymbol{\Omega}}(t)$ を代入することでセンサ出力の回転成分が求まる。

ここで手順 1 にあるセンサ出力から求めた角速度と回転軸ベクトルの例としてストレート球に対する Test04 データの結果を示す。これらの時間についての2次関数が式 (16) と式 (17) である。また、それらの時間変化を図 11 および図 12 にそれぞれ示す。これらの図ではボール投球時刻を時間の基準として初期時刻にとっているが、投球後に角速度が減少するとともに回転軸の方向余弦も変化している。

$$\omega(t) = 0.79t^2 - 2.55t + 87.98 \quad (16)$$

$$\mathbf{e}(t) = \begin{pmatrix} e_x \\ e_y \\ e_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.01 \\ -0.04 \\ 0.07 \end{pmatrix} t^2 + \begin{pmatrix} 0.25 \\ 0.07 \\ 0.10 \end{pmatrix} t + \begin{pmatrix} -0.29 \\ 0.96 \\ 0.02 \end{pmatrix} \quad (17)$$

また、比較のために回転軸を固定した条件として式 (17) の初期値を回転軸 $\bar{\mathbf{e}}$ として飛翔中にこの軸が変化しないと仮定したシミュレーションも行った。この場合の回転軸を式 (18) に示す。以下では、式 (16) の角速度と式 (17) の回転軸を用いたシミュレーション結果を「回転軸変化(variable)」，式 (16) と式 (18) を用いた場合を「回転軸固定(fixed)」と呼ぶことにする。

$$\bar{\mathbf{e}} = \begin{pmatrix} \bar{e}_x \\ \bar{e}_y \\ \bar{e}_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.29 \\ 0.96 \\ 0.02 \end{pmatrix} \quad (18)$$

Fig. 11 Temporal change of angular speed in straight ball (Test04). It is shown that the angular speed decreases with time.

Fig. 12 Temporal change of rotation axis vector in straight ball (Test04). It is found that the rotation axis vector is varying with time.

同様の手順でカーブ球に対する Test10 データから求めた角速度と回転軸および回転軸の初期値を式 (19) ～式 (21) に示す。

$$\omega(t) = 1.84t^2 - 3.10t + 132.01 \quad (19)$$

$$\mathbf{e}(t) = \begin{pmatrix} e_x \\ e_y \\ e_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.10 \\ 0.01 \\ -0.03 \end{pmatrix} t^2 + \begin{pmatrix} 0.07 \\ 0.04 \\ 0.40 \end{pmatrix} t + \begin{pmatrix} 0.77 \\ 0.60 \\ -0.20 \end{pmatrix} \quad (20)$$

$$\bar{\mathbf{e}} = \begin{pmatrix} \bar{e}_x \\ \bar{e}_y \\ \bar{e}_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.77 \\ 0.60 \\ -0.20 \end{pmatrix} \quad (21)$$

上述した手順によるシミュレーションによって飛翔実験のセンサ出力を再現した結果を図 13 に示す. 図 13 (a), (b)および(c)はそれぞれ高加速度用センサ High X, Y および Z の出力結果で, 各左図がストレート球 (Test04), 右図がカーブ球 (Test10) の結果である. 今回のシミュレーションでは手順 3 にある High G センサの重心からの位置ベクトル $[\mathbf{r}]$ としてセンサ座標系の原点となる Low G からの位置ベクトルを用いたが, 3 章の斜面実験でも述べたように Low G の位置が回転軸からずれており, この値は High G センサの重心からの位置とは異なる. そのため High G センサの出力とシミュレーション結果にレベル差が生じる. そこで, これらの図では初期時刻で両者の値を一致させ, その後の時間変化を比較している.

図 13 では実線が各 High G センサの出力, 破線と点線はそれぞれ回転軸変化(variable)ならびに回転軸固定(fixed)条件でのシミュレーション結果である. すでに述べたようにストレート球では Y 軸を回転軸としたため, 図 13(b)の左図では加速度の出力レベルは他と比べて小さくなっている. これらの結果から, 回転軸が変化する場合には, ストレート球では High Y の全成分, High X と High Z の X および Y 成分, カーブ球では各 High G センサの全成分が時間とともにほぼ一定の傾きで直線的に変化することがわかる. 一方, 回転軸を固定した条件から得られた結果では, いずれの球種においても各 High G センサの成分はほぼ一定値をとっている. そして, 2 つの球種ともに回転軸変化の条件でのシミュレーション結果が回転軸固定条件の結果より出力形状がセンサ出力に近く両者の一致がよいことがわかる.

なお, 回転軸変化の条件によるシミュレーション結果では, いずれの球種の出力においても微小な振動が見られた. この振動は図 13(a)の右図にある High X/Z (variable), 同図(b)の左図 High Y/X (variable) や High Y/Z (variable) などで顕著に見られる. これは式 (10) に示した角速度ベクトル ω_l の最右辺第 2 項および第 3 項による効果である. 実際のセンサ出力にもこの微小振動成分は含まれると予想されるが, センサ出力に対して最小自乗近似を行うため, 回転加速度成分を求める際にこの成分が平滑化されたと考えられる.

Test04 と Test10 のデータに基づいたシミュレーションからボールの回転軸が飛翔中にゆっくりと変化していることが確認された. そこで, 表 2 と表 3 に示した他の実験データに対しても回転軸変化と回転軸固定の条件下で加速度出力のシミュレーションを行い, 飛翔時のボールの回転軸変化について検証した.

各データに対するシミュレーション手順は上述のとおりであるが, ここでは回転軸に対する各条件下で再現した加速度出力と実際のセンサ出力との誤差を比較することで, いずれの条件が実際の回転軸の挙動に近い結果を再現できるかを確認した. その際, 回転加速度成分の誤差を次式で定義する.

$$\varepsilon_v = \int_{T_p}^{T_c} |a_{i/j}^v - A_{i/j}| dt, \quad \varepsilon_f = \int_{T_p}^{T_c} |a_{i/j}^f - A_{i/j}| dt \quad (22)$$

ここで, ε_v と ε_f は回転軸変化(variable)と回転軸固定(fixed)の条件での誤差, $a_{i/j}^v$ と $a_{i/j}^f$ はそれぞれ回転軸変化と回転軸固定の条件でのシミュレーション出力, $A_{i/j}$ はセンサ出力である. 添え字 i ($= X, Y, Z$) は High G センサの位置, 添え字 j ($= X, Y, Z$) は各センサの軸成分である. また, T_p と T_c はそれぞれ投球, 捕球時の時刻である.

表 2 に示したストレート球のデータに対する誤差比較が表 4, 表 3 のカーブ球に対する比較結果が表 5 である. 表中の各欄の上段が回転軸変化, 下段が回転軸固定での誤差であり, 表中に黒字で示した成分は ε_v が ε_f より小さく, 赤字の成分は逆の結果であることを示している. これらの表からほとんどの成分において回転軸変化での値が回転軸固定よりも小さいことが確認できる.

表中の赤字で示した成分は回転軸固定での誤差が回転軸変化より小さくなっている. このような一例として表 3 の Test04 における High Z/X 成分の比較を図 14 に示す. この図は図 13(c)の左図において加速度が ± 1 G の範囲を

拡大したものである。この場合のセンサ出力は回転軸固定条件でのシミュレーション結果に近いが、回転軸変化の条件との差は同図に示した High Z/Y 成分で見られる差と同程度である。High Z/Y に比べると High Z/X 成分は出力自体が小さいことから、この成分の加速度全体への寄与も小さい。しかも、High Z/X 成分では時間的な変動幅も小さいためいずれの条件のシミュレーションでもその出力形状の差も小さい。このような状況は表 4 および表 5 の他の逆転現象が生じている成分にも共通している。

(a) Components in High X sensor.

(b) Components in High Y sensor.

(c) Components in High Z sensor.

Fig. 13 Comparison of sensor outputs in rotational acceleration. (left: straight ball, right: curve ball). Figures (a), (b) and (c) correspond to the results of High X, Y and Z sensors, respectively. We find that the results with “variable” condition reproduce the sensor output better than those with “fixed” condition. This fact means that the rotation axis of the ball-type sensor in flight changes slowly with time.

Table 4 Error comparison of acceleration output for nine trials in straight ball.

	High X			High Y			High Z		
	X/X	X/Y	X/Z	Y/X	Y/Y	Y/Z	Z/X	Z/Y	Z/Z
Test01	0.003	0.013	0.013	0.056	0.015	0.018	0.004	0.026	0.002
	0.056	0.121	0.014	0.167	0.052	0.085	0.004	0.092	0.018
Test02	0.045	0.005	0.017	0.012	0.010	0.044	0.007	0.002	0.042
	0.047	0.191	0.011	0.190	0.072	0.119	0.007	0.095	0.060
Test03	0.007	0.019	0.012	0.028	0.015	0.037	0.010	0.012	0.020
	0.018	0.142	0.037	0.159	0.011	0.075	0.033	0.063	0.102
Test04	0.005	0.007	0.014	0.011	0.013	0.014	0.011	0.007	0.010
	0.089	0.147	0.147	0.153	0.064	0.106	0.002	0.089	0.017
Test05	0.050	0.006	0.035	0.014	0.033	0.039	0.021	0.020	0.057
	0.066	0.210	0.075	0.220	0.014	0.134	0.060	0.126	0.069
Test06	0.028	0.008	0.026	0.030	0.044	0.019	0.017	0.028	0.008
	0.085	0.146	0.028	0.140	0.081	0.134	0.040	0.130	0.021
Test07	0.052	0.024	0.008	0.007	0.006	0.019	0.009	0.023	0.075
	0.022	0.081	0.025	0.105	0.028	0.028	0.019	0.022	0.012
Test08	0.011	0.022	0.028	0.020	0.017	0.035	0.025	0.008	0.004
	0.078	0.172	0.033	0.178	0.036	0.146	0.023	0.127	0.038
Test09	0.004	0.003	0.010	0.016	0.026	0.022	0.010	0.015	0.015
	0.053	0.101	0.012	0.106	0.042	0.083	0.016	0.084	0.021

Table 5 Error comparison of acceleration output for nine trials in curve ball.

	High X			High Y			High Z		
	X/X	X/Y	X/Z	Y/X	Y/Y	Y/Z	Z/X	Z/Y	Z/Z
Test10	0.017	0.043	0.041	0.015	0.039	0.020	0.024	0.023	0.025
	0.090	0.072	0.466	0.071	0.060	0.389	0.484	0.410	0.156
Test11	0.026	0.018	0.033	0.009	0.030	0.058	0.011	0.061	0.005
	0.525	0.115	0.279	0.104	0.527	0.253	0.251	0.276	0.006
Test12	0.031	0.066	0.098	0.020	0.064	0.021	0.086	0.109	0.049
	0.082	0.076	0.524	0.077	0.099	0.491	0.941	0.276	0.156
Test13	0.010	0.023	0.060	0.009	0.013	0.013	0.015	0.027	0.005
	0.005	0.047	0.333	0.044	0.084	0.341	0.384	0.367	0.093
Test14	0.107	0.088	0.023	0.046	0.073	0.077	0.034	0.069	0.091
	0.694	0.043	0.337	0.034	0.474	0.423	0.295	0.435	0.280
Test15	0.101	0.018	0.039	0.018	0.085	0.104	0.010	0.088	0.071
	0.602	0.110	0.384	0.083	0.507	0.399	0.363	0.401	0.159
Test16	0.031	0.057	0.027	0.044	0.058	0.097	0.013	0.053	0.064
	0.647	0.043	0.410	0.039	0.584	0.473	0.388	0.453	0.162
Test17	0.179	0.031	0.427	0.016	0.104	0.405	0.413	0.416	0.026
	0.776	0.174	0.566	0.165	0.683	0.491	0.573	0.529	0.026
Test18	0.089	0.031	0.077	0.019	0.085	0.121	0.024	0.085	0.043
	0.735	0.180	0.606	0.150	0.768	0.504	0.544	0.496	0.016

Fig.14 Rotational acceleration of High Z/X and High Z/Y in Test04. This figure is closeup of Fig. 13 (c) in the range between ± 1 G. In this case, the difference between “variable” and “fixed” conditions is sufficient small because the output level in acceleration is low.

6. 結 言

本論文では1個の低加速度用センサと3個の高加速度用センサで構成された硬式野球ボール型センサの出力を再現できるシミュレータの開発を行った。各センサがセンサユニット内に剛体的に配置されると仮定して、センサ位置での回転による加速度を定式化した。このシミュレータでは特に回転軸が変化する効果を考慮しており、ボール型センサの出力から示唆された飛翔中に生じる回転軸の変化について運動学的な検証が可能である。

加速度センサの出力精度を確認するために斜面上でボール型センサを転がす予備実験を行った。この実験環境でのセンサ位置での回転加速度が既知であることから、センサ出力を理論値と比較した結果、これらが十分に一致することを確認した。また、ボール型センサの慣性モーメントの測定も行い、各センサ軸周りの慣性モーメントの値がすべて異なるという結果を得た。

飛翔実験で得られたセンサ出力とシミュレーションによる結果を比較することで飛翔中の回転軸の時間的変化を検証した。今回扱った球種はストレートとカーブの2種類であり、それぞれの球種に対してセンサ出力から得られた回転軸が時間的に変化する条件と回転軸をその初期値に固定して向きが変化しない条件でシミュレーションを行った。その結果、いずれの球種においても前者の条件での出力では回転軸の方向余弦がほぼ一定の傾きをもって変化するのに対して後者の条件では出力は一定値となった。そして、これらの結果をセンサ出力と比較したところ前者の条件によって実際に出力された加速度データを再現できることを示した。

さらにストレート球とカーブ球の各9ケースの出力に対して同様のシミュレーションを行い、シミュレーション結果とセンサ出力の誤差を比較したところ、出力が大きく変化の幅も大きい成分では回転軸変化の条件による結果での誤差が回転軸固定での結果より小さくなることを確認した。このことからボール型センサの回転軸が飛翔中に変化していると結論できる。

ただし、今回の結果は実際の硬式球で同様の回転軸変化が生じることを意味するわけではない。ボール型センサの内部構造は硬式球とは同一ではなく、その力学的特性が異なる。今回の結果は、ボール型センサのように内部の質量分布に偏りがある場合などには飛翔中にその回転軸が変化する可能性があるという事実を示している。

今回確認された回転数と回転軸の時間変化からボール型センサの角運動量の変化率がわかるので、重心周りの回転の運動方程式を用いることで飛翔時の空力トルクを推定することが可能になる。この点は今後の課題である。また、本論文ではボール型センサの回転加速度成分に注目したが、並進加速度成分も考慮できるように出力シミュレータを拡張することも今後の課題である。現実的な条件下でのシミュレーション結果をセンサ出力と比較することで加速度の純粋な並進成分を求めることが可能になる。そして、これによりボール型センサに働く流体力を得ることができれば回転を伴った飛翔状態での空力特性の解明につながることを期待できる。

文 献

- Alam, F., Hoa, H., Smithb, L., Subica, A., Chowdhury, H. and Kumara, A., A study of baseball and softball aerodynamics, *Procedia Engineering*, Vol. 34 (2012), pp. 86-91.
- Clanet, C., Sports ballistics, *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 47 (2015), pp. 455-478.
- Cross, R. and Lindsey, C., Measurements of drag and lift on tennis ball in flight, *Sports Engineering*, Vol. 17 (2014), pp. 89-96.
- Ijiri, T., Nakamura, A., Hirabayashi, A., Sakai, W., Miyazaki, T. and Himeno, R., Automatic spin measurements for pitched baseballs via consumer-grade high-speed cameras, *Signal Image and Video Processing*, Vol. 22, No. 2 (2017), pp. 1-8.
- 小柳玲乃, 仰木裕嗣, 内蔵型加速度センサによる飛翔球の運動学変量推定, 日本機械学会 2008 年度年次大会講演論文集 (2) (2008), pp. 149-150.
- Miyazaki, T., Sakai, W., Komatsu, T., Takahashi, N. and Himeno, R., Lift crisis of a spinning table tennis ball, *European Journal of Physics*, Vol. 38 (2017), DOI: 10.1088/1361-6404/aa51ea.
- Mizota, T., Kurogi, K., Ohya, Y., Okajima, A., Naruo, T. and Kawamura, Y., The strange flight behavior of slowly spinning soccer balls, *Scientific Reports*, Vol. 3, No. 1871 (2013), pp. 1-7.
- 溝田武人, 錦織大介, 小西和明, 硬式野球ボールの縦スライダに関する流体力測定と飛翔軌道解析, 日本機械学会論文集, Vol. 73, No. 734 (2007), pp.1987-1992.
- 長岡大志, 荻野尚哉, 坪井一洋, 野田茂穂, 姫野龍太郎, 加速度センサを用いた飛翔中の野球ボールの回転特性計測, 日本機械学会論文集, Vol. 85, No. 876 (2019), DOI: 10.1299/transjsme.18-00440.
- 野田茂穂, 姫野龍太郎, 測定装置, 測定方法, プログラム, ならびに, 情報記録媒体, 特許第 6501406 号 (2016).
- 岡竜平, 田中優太, 安田邦男, 野球ボールの空力・飛行特性に関する研究, 日本大学理工学部学術講演会論文集, K7-28(2012), pp. 857-858.
- 関口彰太, 高橋英輔, 鷹合仁司, 千田有一, 中島信行, 吉松俊一, 長瀬二郎, 加速度センサとウェーブレット変換を用いた球体の回転速度の推定と検証, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 79, No. 800 (2013), pp. 183-193.
- 柴田 翔平, 鳴尾 丈司, 加瀬 悠人 他, 硬式野球ボール型センサを用いた投球解析システムの開発, 日本機械学会 (No.17-43) シンポジウム: スポーツ工学・ヒューマンダイナミクス 2017 講演論文集 (2017).
- 高橋康, 物理数学ノート I, 講談社サイエンティフィク (1992), pp. 98-135.
- Whiteside, D., Chin, A. and Middleton, K., The validation of a three-dimensional ball rotation model, *J. Sports Engineering and Technology*, Vol. 227, No. 1 (2012), pp. 49-56.

References

- Alam, F., Hoa, H., Smithb, L., Subica, A., Chowdhury, H. and Kumara, A., A study of baseball and softball aerodynamics, *Procedia Engineering*, Vol. 34 (2012), pp. 86-91.
- Clanet, C., Sports ballistics, *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 47 (2015), pp. 455-478.
- Cross, R. and Lindsey, C., Measurements of drag and lift on tennis ball in flight, *Sports Engineering*, Vol. 17 (2014), pp. 89-96.
- Ijiri, T., Nakamura, A., Hirabayashi, A., Sakai, W., Miyazaki, T. and Himeno, R., Automatic spin measurements for pitched baseballs via consumer-grade high-speed cameras, *Signal Image and Video Processing*, Vol. 22, No. 2 (2017), pp. 1-8.
- Koyanagi, R. and Ohgi, Y., Estimation of kinematical parameters on flight ball using built-in accelerometer, *Proc. of JSME annual meeting 2008*, (2008), pp. 149-150 (in Japanese).
- Miyazaki, T., Sakai, W., Komatsu, T., Takahashi, N. and Himeno, R., Lift crisis of a spinning table tennis ball, *European Journal of Physics*, Vol. 38 (2017), pp. 1-16.
- Mizota, T., Kurogi, K., Ohya, Y., Okajima, A., Naruo, T. and Kawamura, Y., The strange flight behavior slowly spinning soccer ball, *Scientific Reports*, Vol. 3, No. 1871 (2013), pp. 1-7.
- Mizota, T., Nishikiori, D. and Konishi, K., Aerodynamics and Trajectory of Vertical Slider of Baseball Ball, *Transaction of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.73, No. 734 (2007), pp. 1987-1992 (in Japanese).
- Nagaoka, H., Ogino, N., Tsuboi, K., Noda, S. and Himeno, R., Measurement of rotational property for a baseball in flight with acceleration sensors, *Transactions of the JSME (in Japanese)*, Vol. 85, No. 876 (2019), DOI: 10.1299/transjsme.18-00440.
- Noda, S. and Himeno, R., Measurement device, Measurement method, Program, And Information storage medium, Patent number 6501406 (2016).
- Oka, R., Tanaka, Y. and Yasuda, K., Study on the aerodynamic and flight characteristics of a baseball, *Proc. of Faculty of*

- Science and Engineering Academic Lecture in Nihon University, K7-28 (2012), pp. 857-858 (in Japanese).
- Sekiguchi, S., Takahashi, E., Takaai, H., Chida, Y., Nakajima, N., Yoshimatu, S. and Nagase, J., Estimation and verification of rotational speed using an accelerometer and wavelet transform, Transaction of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol.79, No.800 (2013), pp. 183-193 (in Japanese).
- Shibata, S., Naruo, T., Kase, Y., Yamamoto, M., Mori, M., Urakawa, K., Hirose, K. and Jinji, T., Development of pitching analysis system using baseball-type sensor, Proc. of JSME symposium: Sports Engineering and Human Dynamics, (2017), B-3 (in Japanese).
- Takahashi, Y., Note on Physical Mathematics I, Kodansya Scientific (1992), pp. 98-135 (in Japanese).
- Whiteside, D., Chin, A. and Middleton, K., The validation of a three-dimensional ball rotation model, J. Sports Engineering and Technology, Vol. 227, No. 1 (2012), pp. 49-56.