

3次元軌道データを用いたボールの空力係数推定

Estimation of Aerodynamic Coefficients for Ball with Three-dimensional Trajectory Data

発表者: 設楽竜司 指導教員: 坪井一洋

1 はじめに

スポーツ中継の技術が飛躍的に向上している近年では、様々な映像技術が中継に用いられている。メジャーリーグではPITCHf/x®というシステムが導入された。このシステムは投手が投げるボールの位置をカメラで追跡するシステムである。これによって投球位置や軌道、スピード、変化、球種などを計測することが可能となった。しかし、このような技術は高感度のハイスピードカメラやレーザーカメラを使用しており、非常にコストがかかるため一般での使用が難しい。

しかし、先行研究によって安価な民生用のデジタルカメラでも2台使用し平行ステレオ法を用いることで撮影された野球ボールの3次元軌道データを計測することができると確認された [1]。

本研究では、ステレオ法を用いて解析された3次元軌道データを基に空力係数推定を行うことで、飛翔中の野球ボールの3方向の空力係数(抵抗, 揚力, 横力)を求めることを目的とする。

2 3次元画像計測法

2.1 平行ステレオ法の原理

平行ステレオ法とは3次元計測に用いられる代表的な手法であり、対象物を2台のカメラで異なる方向から同時に撮影することで3次元の位置情報を得る手法である。

2台のカメラで撮影すると2枚の画像上では対象物の位置が異なる。このような対象物の画像上のずれを視差と呼び、この視差を利用し3次元座標を算出する。図1に示すように対象物の座標をそれぞれ $p_1(u_1, v_1)$, $p_2(u_2, v_2)$ とすると視差は $d = u_1 - u_2$ と表せる。図2は平行ステレオ法をX-Z平面から見た図である。ここで u_1, v_1, u_2, v_2 はピクセル数で表した画像上の座標である。また、 f は焦点距離、 l は基線長(カメラ間の距離)である。

図3より三角形1と2は相似である。よって $d : f = l : z$ となる。これより z は

$$z = \frac{f \cdot l}{d} \quad (1)$$

と求まる。また、三角形3と4は相似であるから、 $u_1 : f = x : z$ となる。よって x は

$$x = \frac{u_1}{d} \cdot l \quad (2)$$

と求まる。同様に y についても

$$y = \frac{v_1}{d} \cdot l \quad (3)$$

と求めることができる[2]。

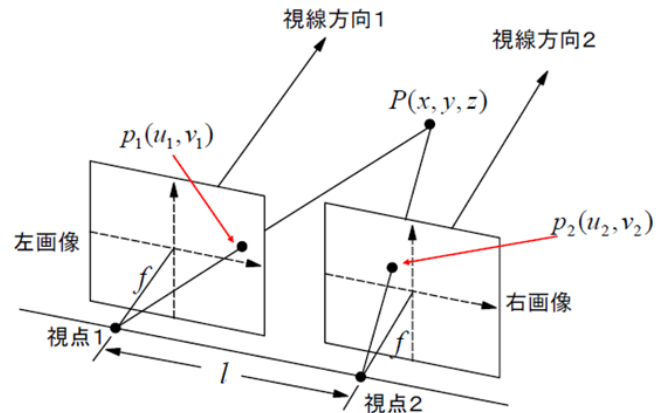


図1 平行ステレオ法の略図[2]

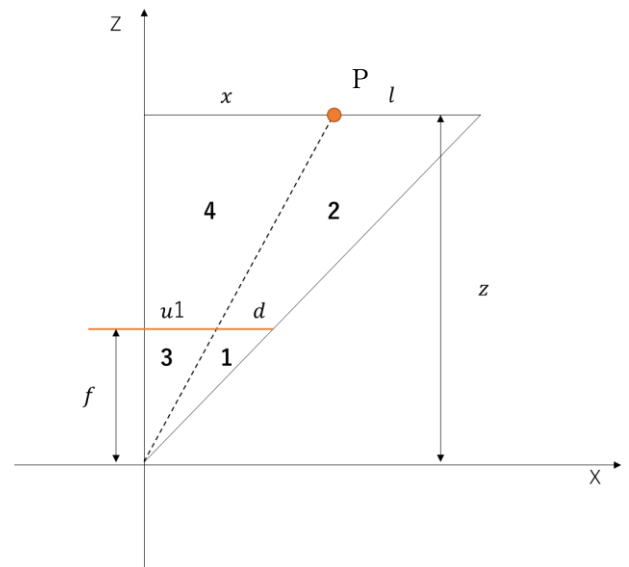


図2 平行ステレオ法(X-Z平面)

3 空力係数の推定法

3.1 運動方程式と空力係数の推定

投射体の投射位置を座標原点とし、鉛直上向きを z 軸とする。そして、投射体の初速度と z 軸が作る平面に垂直な方向を y 軸とし、 y 軸と z 軸に垂直な方向を x 軸と定義する。飛翔する投射体には重力 \mathbf{g} 、空気抵抗 \mathbf{D} および回転によって発生するマグヌス力 \mathbf{N} が働く。そして、マグヌス力 \mathbf{N} は、揚力 \mathbf{L} と横力 \mathbf{S} に分解できるので運動方程式は以下ようになる。

$$\begin{aligned} \ddot{\mathbf{x}} &= \dot{\mathbf{v}} = \mathbf{D} + \mathbf{N} - \mathbf{g} \\ &= \mathbf{D} + \mathbf{L} + \mathbf{S} - \mathbf{g} = -D\mathbf{e}_t + L\mathbf{e}_L + S\mathbf{e}_S - g\mathbf{e}_z \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、 $\mathbf{x} = (x, y, z)^t$ を投射体の位置ベクトル、 $\mathbf{v} = (u, v, w)^t$ を速度ベクトル、 g を重力加速度、 \mathbf{e}_z を z 軸方向の単位ベクトル、 \mathbf{e}_t を投射体の速度の単位ベクトル、 \mathbf{e}_L を揚力方向の単位ベクトルとし \mathbf{e}_S を横力方向の単位ベクトルとする。ここでは、式を簡単にするため単位質量あたりの力を考える。

投射体に働く力の大きさは一般に速度の2乗に比例にするので D , L および S は次式となる.

$$\begin{cases} D = \frac{1}{2m} \rho S_B C_D q^2 \\ L = \frac{1}{2m} \rho S_B C_L q^2 \\ S = \frac{1}{2m} \rho S_B C_S q^2 \end{cases} \quad (5)$$

このとき, $q (= |\mathbf{v}|)$ を速度ベクトルの大きさ, m を質量, ρ を空気密度, S_B を断面積, C_D を抵抗係数, C_L を揚力係数とし C_S を横力係数とする. ここで示している C_D , C_L および C_S は空力係数と呼ばれ, それぞれの力の大きさを表す無次元係数である. そして, この空力係数は運動方程式と空間曲線論を用いることによって, 以下の式のように求めることができる [3].

$$\begin{cases} C_D = -\frac{2m}{q^3 \rho S_B} (q\dot{q} + gw) \\ C_L = \frac{2m}{q^3 \rho S_B \sqrt{q^2 - w^2}} [q(q\dot{w} - \dot{q}w) + g(q^2 - w^2)] \\ C_S = \frac{2m}{q^2 \rho S_B \sqrt{q^2 - w^2}} (\dot{u}v - u\dot{v}) \end{cases} \quad (6)$$

4 3次元軌道データからの推定

平行ステレオ法を用いて計測されたボール軌道の平面図を図3に示す. 1塁側から見た軌道である. この軌道を基に推定を行う. 今回はストレート(オーバースロー), ストレート(サイドスロー), カーブ, スライダー, ナックルの5球種について空力係数を推定する [1]. 図5から図7に推定法によって求められた C_D , C_L および C_S の結果を示す. ここで, 横軸は時間, 縦軸はそれぞれの係数値である. 補間間隔 $n=49$ で推定した.

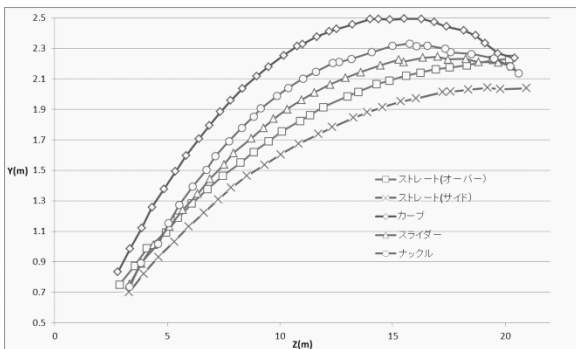


図3 1塁側から見た軌道

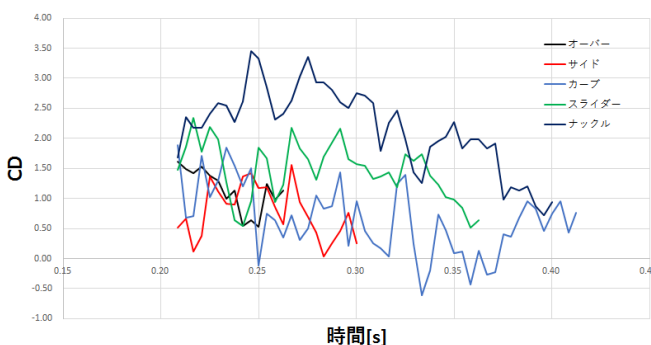


図4 抵抗係数の推定結果

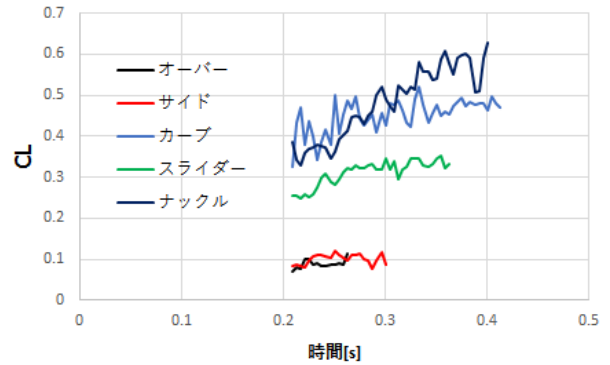


図5 揚力係数の推定結果

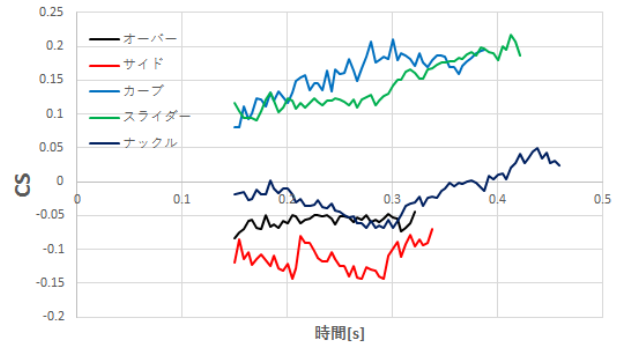


図6 横力係数の推定結果

図4ではどの軌道データにおいても抵抗係数の変動に規則性がなく, 振動幅が大きい. また, 抵抗係数の推定値がかなり大きい. 図5では, グラフが全体に右上がりとなっており, ボールが減速するにつれて揚力係数が大きくなる傾向がある. 図6では, ストレートでは横力係数が負の値となり, さらにその値の変動は少なくほぼ一定であった. カーブとスライダーは正の値で右上がりのグラフになっている. 変化球であるためストレートよりも大きな値となっている. ナックルでは推定値の符号に逆転がみられる.

5 まとめ

本研究ではボールの3次元軌道データからボールに働く3方向の空力係数 (C_D , C_L および C_S) を推定した. 平行ステレオ法を用いて解析された3次元軌道データを基に, 運動方程式と空間曲線論を用いた空力係数推定法を用いて推定した.

実際に測定された野球ボールの軌道データから推定を行った. その結果, 抵抗係数の推定値がかなり大きくなってしまったが揚力係数と横力係数は推定することができた. 補間間隔が小さい場合に推定値にばらつきがみられたが大ききすることで抑えられた.

参考文献

- [1] 野村昌稔: 民生用デジタルカメラによるボールの3次元軌道計測, 茨城大学工学部知能システム工学科卒業論文 (2014)
- [2] 長橋宏: 知的画像処理, <http://www.ocw.titech.ac.jp/index.php?module=General&action=Download&file=20092228824024-62-0-38.pdf&type=cal&JWC=20092228824024>
- [3] 杉山剛史: ボール軌道の局所的特徴量を用いた空力係数の推定, 茨城大学大学院理工学研究科知能システム専攻修士論文 (2014)