

3次元軌道データを用いたゴルフボールの空力評価

Estimation of Aerodynamics for Golf Balls using 3D Trajectory Data

学籍番号：19T1117X 氏名：村上 航輝 指導教員：坪井 一洋

1. はじめに

飛翔体は空気中を移動する際、周りの気流から流体力を受けるが、その測定には主に風洞実験を用いる[1]。しかし、風洞実験とは異なる方法として、飛翔体の位置データを用いて空力係数を推定する研究がおこなわれている[2]。

本研究では、飛翔体の3次元軌道データから軌道の幾何学量を用いて飛翔体の空力係数および回転軸を推定を試みる。

2. 空力特性の推定方法

飛翔体には、空気抵抗 \mathbf{D} と、それに直交するMagnus力 \mathbf{N} が働く。ゆえに飛翔体の運動方程式は次のように書ける。

$$m\ddot{\mathbf{x}} = m\dot{\mathbf{v}} = \mathbf{D} + \mathbf{N} - mg\mathbf{e}_z = \mathbf{D} + \mathbf{L} + \mathbf{S} - mg\mathbf{e}_z \quad (1)$$

ここで、 \mathbf{x} および \mathbf{v} はそれぞれ飛翔体の位置ベクトルと速度ベクトル、 m は飛翔体の質量、 g を重力加速度、 \mathbf{e}_z を鉛直(z 軸)方向の単位ベクトル、揚力を \mathbf{L} 、横力を \mathbf{S} とする。流体力の働く方向に応じた比例係数として、それぞれ抵抗係数 C_D 、揚力係数 C_L および横力係数 C_S が次式で定義される。

$$|\mathbf{D}| = \frac{1}{2} \rho A C_D q^2, \quad |\mathbf{L}| = \frac{1}{2} \rho A C_L q^2, \quad |\mathbf{S}| = \frac{1}{2} \rho A C_S q^2 \quad (2)$$

ただし、 ρ は空気密度、 A は飛翔体の断面積、速度ベクトルの大きさは $q = |\mathbf{v}|$ である。

次に回転軸ベクトルを $\boldsymbol{\omega}$ とすると、ボールに働くMagnus力は次のように表される。

$$\mathbf{N} = K\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{v} \quad (3)$$

ここで K は空気密度や断面積などをまとめた係数である。式(3)より $K\boldsymbol{\omega}$ は次式で求められる[2]。

$$K\boldsymbol{\omega} = \frac{\mathbf{v} \times \mathbf{N}}{q^2} \quad (4)$$

3. 推定結果

ゴルフボールの3次元軌道データから空力係数の推定を行う。このとき、軌道上の $2n+1$ 個の速度データに最小二乗法を用いて補間を行う。スライス軌道の速度データから推定された空力係数と回転軸の時間変化をFig.1とFig.2に示す。

Fig.1の結果を見ると、すべての推定値が時間変化していて、補間間隔による推定値のばらつきがなかった。 C_D の推定値は細かく変動しながら増加している。 C_L はボールの加速によって減少し、減速すると増加している。また、 C_S の絶対値が軌道後半に大きくなっており、回転軸が傾いていることがわかる。

Fig.2は回転軸の方向余弦である。 y 成分と z 成分が、軌道後半に増加していることから、回転軸が傾いていることがわかる。これは、この軌道データが側方へのズレが大きいスライス軌道であることに対応している。他の軌道データの結果は発表時に紹介する。

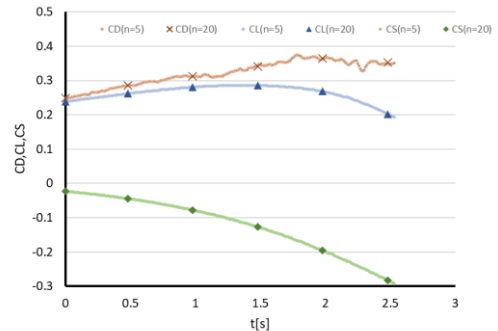


Fig. 1 Estimated results of C_D , C_L and C_S

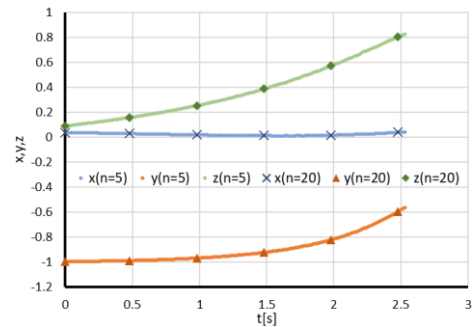


Fig. 2 Estimated results of rotation axis

4. まとめ

本研究では飛翔体の軌道形状に基づき、速度データから軌道の空力係数と回転軸の推定を試みた。空力係数と回転軸ともに、補間間隔による推定結果のばらつきがほとんどなく、推定値が軌道に沿って時間的に変化していた。また、側方へのズレが大きい軌道ほど、回転軸の傾きが大きいことがわかった。これらの結果から、本研究で提案した推定法を用いることで、飛翔中のボールの非定常性を評価できる可能性を示した。

参考文献

- [1] Cohen, C., Darbois-Textier, B., Dupeux, G., Brunel, E. and Clanet, C.: The aerodynamic wall, Proc. R. Soc. A: Vol. 470, (2014)
- [2] 森村和馬, 坪井一洋: 飛翔軌道の幾何学量に基づくボールの非定常空力特性の推定, 日本機械学会シンポジウム: スポーツ工学・ヒューマンダイナミクス(2021)