

羽ばたく蝶の実験とパネル法モデルに基づく制御の検討

京都大学大学院 工学研究科 泉田 啓, 李 承珪, 山本 啓貴, 横山 直人

Discussions on Control of Flapping Butterflies by Experiments and Panel Method Model

Kei Senda, Seunggyu Lee, Hiroki Yamamoto, and Naoto Yokoyama

Graduateschool of Engineering, Kyoto University

1 緒 言

蝶の羽ばたき飛翔は、神経系-身体-環境の動的相互作用によって成立する運動形態である。蝶は神経系から出力される概ね周期的な制御指令に従って翅を運動させ、周囲に周期的な渦列流場という環境を生成し、渦列流場は誘導流を介して蝶の身体運動に影響を及ぼしている。このような相互作用による運動形態の実現方法（運動知能）を解明するための一つのアプローチは、蝶のダイナミクスを数値シミュレーション可能にし、神経系のモデルを組み込んで、蝶のふるまいを再現することである。

そのような数値シミュレーションのために、数百万回といった数値シミュレーションが求められることもあり^[1]、計算コストが小さく精度の良いモデルが必要である。この目的で、本研究ではパネル法^[2]により空気力学を計算するモデルを用いる。蝶の飛翔においては、その羽ばたきによって翅の後方に渦が放出され、その渦は蝶の羽ばたき飛翔に対して重要な役割を担っていると考えられる。また、蝶の飛翔を精度良く再現するためには空気力も一致しなければならない。そこで本研究では、まず実験観測と数値シミュレーションの比較を行い、パネル法モデルの有効性を示す。

次に、制御について考えると、蝶の飛翔は一見不安定そうであるが、実際は安定化されており環境の変動に対してもロバストに安定な飛翔を実現している。先行研究^[3, 4]により、羽ばたきで作られる渦により受動的な安定化効果がもたらされることが示されたが、それだけでは飛翔は安定化されない。そこで、先に求めたパネル法モデルを用いて、生体の蝶のもつ能動的な制御の解明を目的とする。その解析手法は以下の通りである。まず、蝶の制御方法を理解するため、実験により生体の蝶の運動を観測する。次に、蝶の羽ばたき飛翔の数値シミュレータに対し、フィードバック制御器を設計し、実装する。はじめにレギュレータを構成し、高さが一定な定常飛翔を実現する。その後、初期摂動に対する応答を調べて生体の蝶の応答と比較することで、生体の蝶と数値シミュレータの制御の類似点と相違点について考察する。また、サーボ系を構成し、目標値を与えて、蝶のマヌーバを数値シミュレータで実現する。

2 実 験

実験装置の概略図を図1に示す。高速度カメラ3台による三次元計測で蝶の運動計測を行い、同時に天秤（力トルク・センサ）により蝶に働く空気力相当の力・トルクを計測する、運動と力の同時計測システムを構築した。風洞は、実験条件に合わせて0~2.0 [m/s]の間で流速が調節できる。天秤先端に蝶の背面を固定し、蝶の迎角を設定する。運動力計測実験では、風洞内で蝶を固定し、羽ばたき運動と力計測を行なう。蝶の運動は、ビデオ画像における身体の特徴点の位置から算出される。流場可視化実験では、スモークワイヤを風洞内に配置し、流れ場の可視化を行なう。

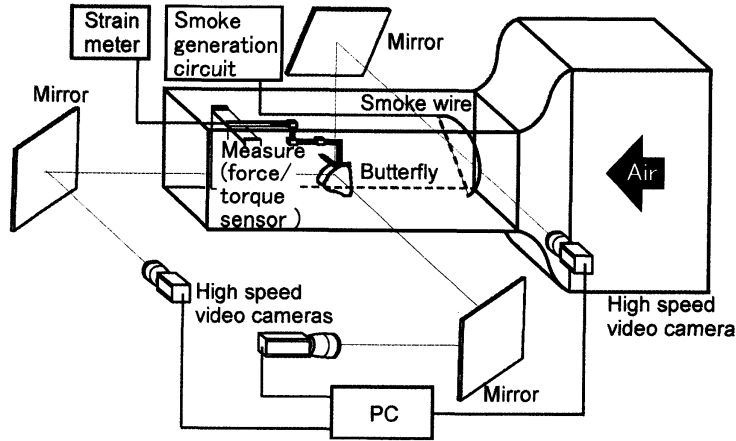


図 1: 実験装置

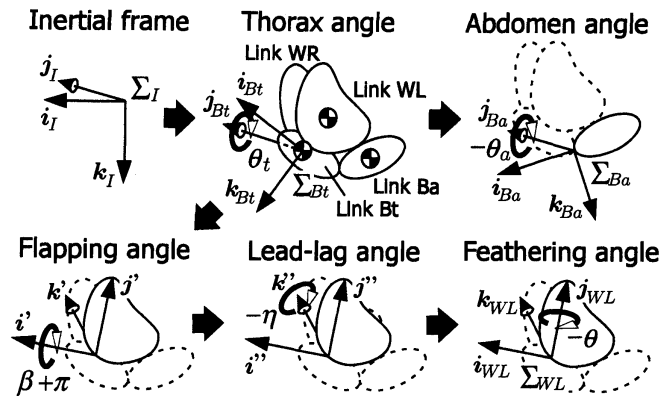


図 2: 蝶の運動を表すパラメータの定義

また蝶を固定した場合だけでなく、風洞内で蝶を自由飛翔させた場合の運動計測や流場可視化も行う。

3 パネル法による数値流体計算

3.1 パネル法による数値計算の方法

蝶は、図 2 に示すように、左右の翅と頭胸部および腹部の 4 つのリンクから成る剛体多体系としてモデル化する。胸部を Bt 、腹部を Ba 、左翅を WL 、右翅を WR とする。前後の翅は合わせて 1 枚としてモデル化する。蝶は左右対称に運動するものとし、横方向の運動は考慮しない。運動を表す一般化座標として、蝶の胸部状態を $[x, z, \theta_t]$ 、腹部角と翅の関節角をそれぞれ $[\theta_a, \beta, \eta, \theta]$ と表す。蝶の身体の動力学をラグランジュ方程式、翅に作用する空気力を以下のパネル法でモデル化し、数値シミュレータを構築する。

流場は、文献^[2]を参考にポテンシャル流理論に基づく渦法的一种であるパネル法を用いてモデル化する。パネル法においては、対象流れを非粘性非圧縮性渦なし流れであると仮定し、速度ポテンシャル $\Phi(x, y, z)$ を定義する。生体の蝶からの計測に基づき翅の形状関数を決定し、コード方向とスパン方向の分割線を用いて翅をパネルに分割する。分割した各翅パネルに特異要素として

渦輪要素を配置し、これを束縛渦パネルとする。また、時間の経過に伴い束縛渦パネルの最後縁から後流を模擬した自由渦パネルが放出される。この自由渦パネルの位置は1次オイラー積分によって計算される。渦要素のごく近傍では非常に大きな速度が誘起されるので、有限半径の渦核相当の領域を考え、大きな誘起速度は緩和計算される。各束縛渦パネルの評価点上では、翅を貫通する方向の流れは零になるという境界条件が満たされる必要がある。この境界条件を満たすように束縛渦の強さ Γ_k を決定する。自由渦では、放出直前の束縛時の渦の強さが保存される。

流れ場の様子は、一様流、物体(翅)、後流を表す速度ポテンシャルの重ね合せによって表され、局所的な流速は次のように与えられる。

$$\mathbf{v}_l = \mathbf{U} + \mathbf{u}_r + \mathbf{u}_m + \mathbf{w}_r + \mathbf{w}_m \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{U}$ は一様流速、 $\mathbf{u}_r$ は参照翅(右翅)に配置された束縛渦による誘起速度、 $\mathbf{u}_m$ は鏡像翅(左翅)に配置された束縛渦による誘起速度、 $\mathbf{w}_r$ は参照翅から放出された自由渦による誘起速度、 $\mathbf{w}_m$ は鏡像翅から放出された自由渦による誘起速度である。観測領域に設定された格子点における局所流速を計算することで流場を得る。また、圧力差によって翅パネル k に作用する空気力 $\mathbf{F}_k$ は次のように与えられる。

$$\mathbf{F}_k = \rho \mathbf{v}_{inf,k} \times \boldsymbol{\gamma}_k + \rho \frac{\partial}{\partial t} (-\Gamma_k) S_k \mathbf{n}_k \quad (2)$$

ここで、空気密度 ρ 、空気の流入速度 $\mathbf{v}_{inf,k}$ 、翅パネル面積 S_k 、束縛渦パネルの循環 Γ_k 、法線方向単位ベクトル $\mathbf{n}_k$ である。翅全体に作用する空気力 $\mathbf{F}$ は次式のように、圧力差によって翅パネル k に作用する空気力 $\mathbf{F}_k$ と翅パネルの加速度運動中に受ける空気による付加質量の慣性力 $\mathbf{F}_{add,k}$ によって表わされる。

$$\mathbf{F} = \sum_{k=1}^K (\mathbf{F}_k + \mathbf{F}_{add,k}) \quad (3)$$

3.2 パネル法による数値流体計算の補正と評価

パネル法モデルでは、非粘性流体として近似された条件下で、渦度を束縛渦パネルおよび自由渦パネル上の特異要素に配置することによって流場を表している。これは、現実的には流場中に空間的に分布する渦度を有限個の特異要素に集約して表現した近似モデルである。そのため、流場を観測する際には、ある種の空間平均をとることにより集中している渦を分布させ、元の流場を復元することに相当する流場の修正処理を行う。その手順^[5]は以下の通りである。

1. 高次精度ラプラス再配置法により微分量の連続性を保証して修正する。
2. 流体力学的に満たされるべき連続の式が正しく成立するよう速度を修正する。

上記の処理はどちらも任意の回数反復可能であり、その回数が修正の程度を決める。修正により流れに関する量が大きく変化しないよう反復計算回数を決定した。 x, y, z 方向の流速の観測領域全体での平均値、渦度の x, y, z 方向成分の同平均を1はばたき間計算した。補正の前後で、これらの値が殆ど保存されていることが確認できた。

以下では、流に関する緒量を2次元または3次元的なグラフィクスで表示する。具体的には、速度ベクトル場表示、圧力係数や渦度や Q -criterion^[6] の等値面表示、蝶の翅前方からシート状の煙を流した場合に対応するグラフィクス表示などである。圧力係数については値の低い場所に、 Q -criterion については値が正となる場所に渦が存在すると考えられる。

3.3 パネル法による数値流体計算の結果と考察

胸部を固定して蝶に羽ばたき飛翔をさせた際の実験観測結果と、それに対応するパネル法モデルによる誘起速度ベクトル場の数値計算結果を比較する。実験は計測誤差が含まれるため、ラプラス再配置法 30 回、連続の式による速度修正 20 回の処理を施している。数値計算では、各 8 回と 20 回である。そのため、数値計算に比べ誘起速度が観測領域全体に分散している。それでも、吹き降ろしや吹き上げの生じている場所は両者で概ね一致した。

また、実験観測結果とパネル法モデルによる Q -criterion 等値面を計算した。実験とパネル法モデルの両方で、羽ばたき運動により生じる強い渦の振る舞いが概ね一致している。ゆえに、蝶の周囲に生じる流場が、実験とパネル法モデルでかなり類似した構造を持っていると考えることができる。

次に図 3 に、シート状煙に対する実験観測結果、パネル法モデルによる数値計算結果を示す。両者を比較すると、煙が蝶後方で一度正中矢状面に近づきながら上方向に流れ、その後、翼端方向に膨らみながら下方向に流れるといったパターンが非常に似ていることが分かる。

蝶の羽ばたき飛翔運動、および、揚力、抗力、ピッチングモーメント相当について、実験計測、先行研究における粘性流体モデル [7]、パネル法モデルの結果を比較する。いずれのデータも、概ね一致した。また、粘性流体モデルとパネル法モデルの実験結果に対する不一致の程度は大差ない。従って、パネル法モデルの妥当性が示された。さらに、パネル法モデルは非粘性流体の近似を用いているので粘性流体を用いたモデルよりも桁違いに少ない時間で計算可能であった。

結果的に、本研究のパネル法モデルは、計算コストが小さく、流場や流体力を比較的精度良く計算できる簡潔なモデルといえる。

4 蝶の制御

4.1 フィードバック制御

数値シミュレータを羽ばたき周期 T で離散化し、線形化し、定常飛翔を実現する周期解に対する摂動方程式を式 (4) で表す。

$$\delta \mathbf{x}(t_{k+1}) = \mathbf{A} \delta \mathbf{x}(t_k) + \mathbf{B} \delta \mathbf{u}(t_k) \quad (4)$$

ここで、 $t_{k+1} = t_k + T$ は離散化された時刻、 $\mathbf{x} = [x, z, \theta_t, \dot{x}, \dot{z}, \dot{\theta}_t]^T$ は制御量、 $\mathbf{u}$ は操作量を表す。最適レギュレータ理論に基づき、次の状態フィードバック制御系を設計する。

$$\delta \mathbf{u}(t_k) = -\mathbf{K} \delta \mathbf{x}(t_k) \quad (5)$$

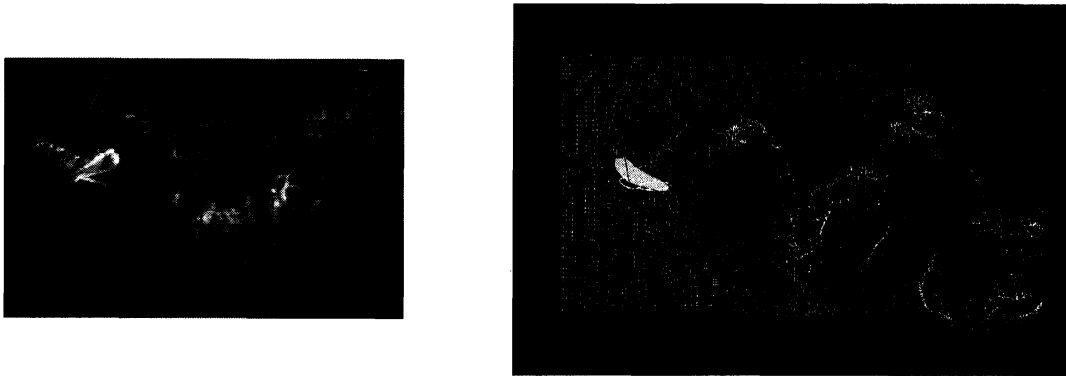


図 3: 1/4 周期におけるシート状煙によって可視化された実験観測流場（左）と数値計算流場（右）

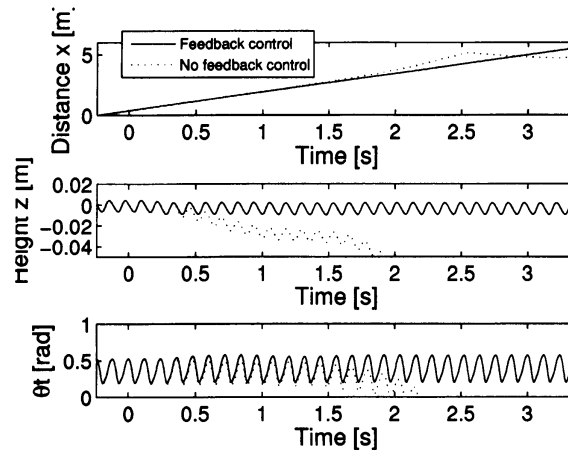


図 4: 制御の有無による胸部運動の比較

この制御系はレギュレータであるが、次のサーボ系として用いる場合もある。

$$\delta u(t_k) = -K(\delta x(t_k) - \delta x_d(t_k)) \quad (6)$$

ここで、 K はフィードバックゲイン、 $\delta x_d(t_k)$ は $\delta x(t_k)$ の目標値である。

ノミナルプラントに対して制御器を併合した自律系の極を求めると

$$0.891, 0.597, 0.520, -0.0559, -2.60 \times 10^{-5}, 1.27 \times 10^{-4}, \quad (7)$$

となる。この制御器を実プラントと考えられる元のシミュレータに併合し、応答から同じ値を求めると、

$$0.957, 0.934, 0.915, 0.881, 0.797, 0.751, \quad (8)$$

となる。これらの値の大きさは各固有モードに対する摂動の拡大率を与える。全ての値が1より小さいので全ての固有モードの摂動は減衰する。しかし、線形化されたプラントに対して制御器を設計し、元の非線形のモデルに実装しているため、式(7)に比べ式(8)の性能は劣化している。

4.2 数値シミュレーション結果と実験結果の比較

定常飛翔の実現 図4に制御を行わない場合と式(5)のレギュレータで制御する場合に実現される自由飛翔の軌道を示す。制御を行わない点線は徐々に落下するが、制御を実装した実線は定常な周期的飛翔を実現している。制御時でもわずかな定常偏差が残る、高度 z の偏差は -2.29×10^{-3} [m] である。

摂動軌道の比較 定常飛翔する生体の蝶はわずかに異なるが概ね同じ周期的な運動を繰り返す。そこで、同一個体について同じ実験条件の実験データから最も平均的な軌道を選び、標準軌道と呼ぶ。また、打ち下ろし開始時の状態はわずかに異なるが、その後に標準軌道に近づく傾向がある軌道を摂動軌道をみなす。また、数値シミュレータでは定常飛翔状態を標準軌道とし、実験の摂動軌道の初期摂動を与えた軌道を摂動軌道とみなす。

シミュレータについて、打ち下ろし開始時の $t = 0$ [s] に摂動を与えたときの摂動の収束の様子を観測した。摂動は収束し、安定な制御が実現された。

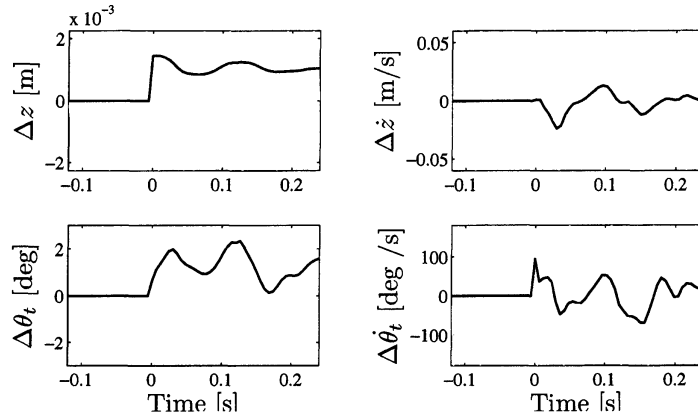


図 5: 数値シミュレータの 3 周期間の胸部状態量の摂動に対する応答

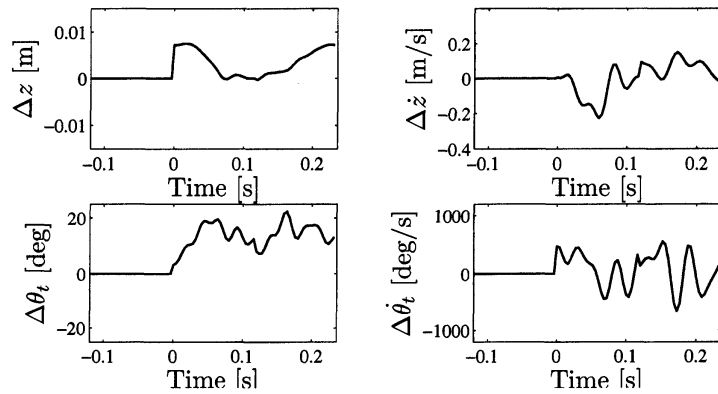


図 6: 生体の 3 周期間の胸部状態量の摂動に対する応答

図 5 は摂動印加前後の計 3 周期間を示したものである。生体の蝶について、同様の図を作成し、図 6 に示す。この場合、 $\dot{z}$ と $\dot{\theta}_t$ にやや大きい負と正の初期摂動が与えられている。どちらも胸部角の増加と下降速度を抑えようとしており、生体とシミュレータを制御量の過渡応答が似た 2 つの制御系とみなす。

ステップ目標偏差制御による応答 式 (6) のサーボ系をもちいて定常飛行状態から時刻 $t = 0$ において z の目標値をステップ状に $z_d(t_k) = 0.01$ [m], -0.01 [m] とした場合の応答を図 7, 図 8 に示す。点線が定常飛行の場合、実線がステップ状の目標値の場合である。

図 7 に示すように、3 周期目までは上昇運動して、3 周期目から概ね同じ高さに飛んでいる、18 周期以降では概ね定常になっている。高度 z に対する偏差は目標値に対して -2.34×10^{-3} [m] である。下降の場合も図 8 に示すように、3 周期目までは下降運動して、3 周期目から概ね同じ高さになる、18 周期以降では胸部角定常飛行なる。高度 z に対する偏差は目標値に対して -2.28×10^{-3} [m] である。

ランプ目標偏差制御による応答 式 (6) のサーボ系を用いて、定常飛行状態から時刻 $t = 0$ において z の目標値をランプ状に $z_d(t_k) = 0.014t_k$ [m], $-0.014t_k$ [m] とした場合の応答を図 9, 図 10 に示す。これは上昇速度の目標値が $\dot{z}_d = \pm 0.117$ [m/s] である。点線が定常飛行の場合、実線がラ

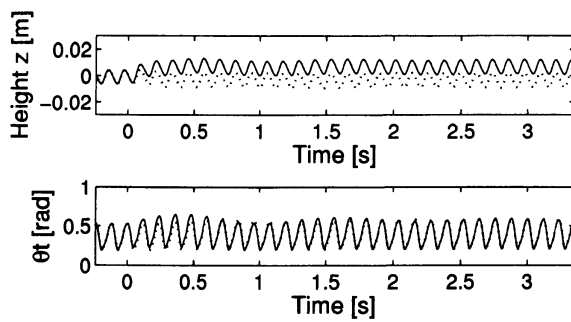


図 7: ステップ状目標値による上昇飛行

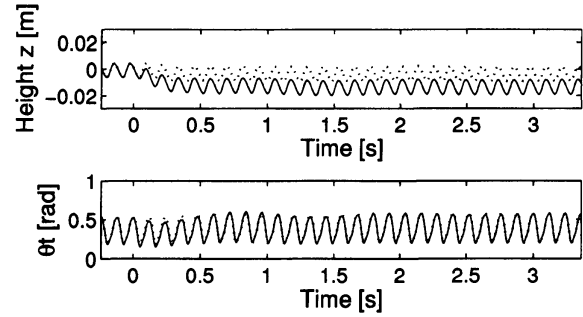


図 8: ステップ状目標値による下降飛行

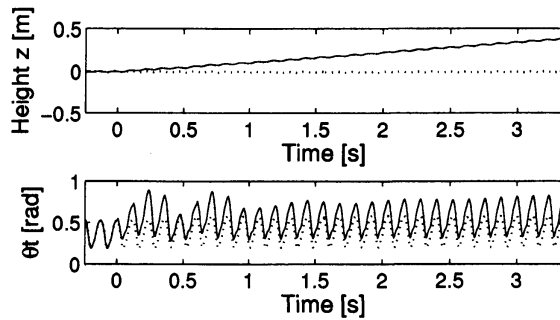


図 9: ランプ状目標値による上昇飛行

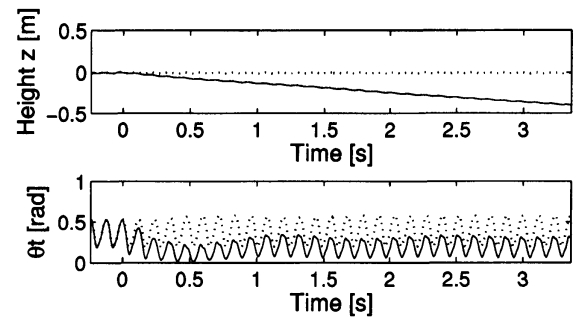


図 10: ランプ状目標値による下降飛行

ランプ状の目標値の場合である。どちらの場合も概ね 13 周期目から安定な定常上昇あるいは定常下降飛行をした。時刻 $t = 3$ [s] における目標高度 z_d に対する偏差は上昇時で -0.008 [m], 下降時で -0.004 [m] である

5 結 論

本研究のパネル法モデルについては、計算コストが小さく、流場や流体力を比較的精度良く計算できる簡潔なモデルであることが確認できた。

制御については、生体とシミュレータで制御系を比較して以下の結果を得た。どちらの制御系も安定であり同じ摂動に対して制御量の過渡応答は似ていた。操作量の応答には違いが観られた。数値シミュレータでサーボ系を構成して、ステップやランプ状の目標値に対して蝶のマニューバを実現した。今後、制御系の応答を生体の蝶に近づけることにより、生体の制御系の理解が深まると期待できる。

参考文献

- [1] K. Senda et al. Modeling and emergence of flapping flight of butterfly based on experimental measurements. *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 60, pp. 670–678, 2012.
- [2] J. Katz and A. Plotkin. *Low-Speed Aerodynamics*. Cambridge University Press, Cambridge, 2nd edition, 2001.
- [3] K. Senda, M. Sawamoto, M. Kitamura, and T. Tanaka. Stabilization of flapping-of-wing flight of butterfly, considering wakes. In N. Kato and S. Kamimura, editors, *Bio-mechanisms*

- of Swimming and Flying*, pp. 193–204. Springer, Tokyo, 2007.
- [4] K. Senda, T. Obara, M. Kitamura, and T. Nishikata. On flight mechanics of flapping butterfly. In *Workshop on Future Trends of Mobiligence: in IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 17–22, Kobe, Japan, may 2009.
 - [5] 可視化情報学会編. PIV ハンドブック. 森北出版, 2002.
 - [6] M. Lesieur, O. Metais, and P. Comte. 乱流のシミュレーション LES による数値計算と可視化. 森北出版, 2010.
 - [7] N. Yokoyama, K. Senda, M. Iima, and N. Hirai. Aerodynamic forces and vortical structures in flapping butterfly’s forward flight. *Physics of Fluids*, Vol. 25, No. 2, p. 021902, 2013.