

小型はばたきロボットの実現を目指して

Toward the Realization of Small Sized Flapping Robot

菊池 耕生*

*千葉工業大学工学部

Koki Kikuchi

*Chiba Institute of Technology

E-mail: kouki.kikuchi@it-chiba.ac.jp

1 はじめに

倒壊現場など極限環境における観測システムとして、地形の影響を受けない飛行型ロボットが挙げられる^{[1]-[2]}。飛行機や飛行船、ヘリコプタ等飛行様式は数多く存在するが、飛び立ち時の数 G を超える加速性やほぼ直角に方向転換する旋回性等に着目すると生物が利用しているはばたき機構には多くの利点がある。中でも、隘路なども自在に通過するような場面を思い出せば、昆虫の飛翔は非常に魅力的である。昆虫は、はばたきによって翅境界で生成された剥離渦との相互作用を利用して大きな揚力を得ていると考えられており、Particle Image Velocimetry: PIV 等による実際の昆虫の飛翔解析^{[3]-[8]}から、大型の実機によるレイノルズ数を合わせた流体解析^[9]、数値解析^{[10]-[13]}に至るまで現在数多くの研究が行われている。しかしながら、飛翔する昆虫の翅周りの渦現象の解析は、実機、数値計算共に難しい。実機においては、近年 Dynamic PIV が開発され、非定常流れが観察できるようになってきてはいるが、周波数の高いはばたきの三次元的な渦現象を、二次元のレーザ光を平行移動させることにより捕らえるには限界がある。また、数値計算においては、流れ場から受ける流体力で翅が弾性変形し、その弾性変形によって流れ場が変化するという連成問題は非常に複雑であり、いまだ確立された手法が存在しないというのが実情である。

ところで、実機の製作という観点から制御系に着目すると、昆虫のニューロンは高々 10^5 程度のオーダーであり複雑な制御は望めないはずであるが、システム全体としての運動能力は極めて高い。これは自身の構造系のダイナミクス、つまり「形態」を最大限に利用した結果であると考えられ、この構造系のダイナミクスを利用することによって制御系が単純化されることを示している。「飛翔昆虫は翅を振動させると浮き上がる構造特性を有しているのであり、複雑な制御を行っているのではない」というのが我々の研究における設計概念であり、制御系と構造系をバランスする設計原理の本質を示すものであると考えている^{[14],[15]}。また、これは、ペイロード等の問題により高性能の CPU やセンサを利用しにくい小型飛行ロボット等の分野において非常に重要な概念と言える。

このような視点を踏まえ、我々は構造特性を最大限利用し極めて単純な制御で飛翔する数センチオーダーのはばたき型ロボットの開発を目指してきた。ここでは、以下の項目に従い得

られた知見のいくつかを紹介したい。

- (1) 実機自由度・メカニズム決定の為の高速度カメラによる蝶の翅、及び腹部の運動解析
- (2) 実機翅設計の為の、ボディーの運動、及び翅の弾性変形と流れ場を考慮した数値計算による飛び立ちにおける運動解析
- (3) (1)(2)の特性を反映した実機の製作

尚、トンボや蠅、蚊等はばたきを利用している昆虫は数多く存在し、それらをモデルとして実機を製作しようという先駆的な研究^{[16]-[18]}がいくつか行われているが、ここでは、(a) 現存のアクチュエータの性能を考慮して、はばたき周波数が 10Hz 程度と低く、(b) 制御の単純化を目指し、前後の翅が同位相で自由度が少ない、蝶をモデルとして採用した。

2 高速度カメラによる蝶の翅、及び腹部の運動解析

蝶のはばたきには、はばたき周波数が低い分はばたき角度が大きい、迎角の制御に腹振りを利用するといった特徴がある。これらのメカニズムを明らかにし、実機に反映させる為、高速度カメラにより xyz 方向から撮影できるボックス内で蝶を飛翔させ、翅と腹の運動を解析した。

2.1 Free flight 時の蝶の運動

Free flight 時の典型的なアゲハチョウの運動を動画として Fig. 1 左に示す。ここで、実線は胸部の軌跡である。これより、蝶は階段状に飛翔していることがわかる。蝶は、トンボ等と違い、後ろの翅を自由に動かすことが出来ない。このため、この自由度の減少を、腹を振ってモーメントを発生させ、迎角を変える事で補っている。はばたきのストロークにおいて、ダウンストロークでは、腹をもち上げ迎角を小さくして上昇し、アップストロークでは、腹を下げ迎角を大きくして前進する。これが、蝶がひらひら飛んでいるように見える理由である。Fig. 1 右に、ダウンストローク開始時における腹の角度と、アップストローク開始時におけるアゲハチョウの腹の角度を示す（ただし、腹の角度を分かりやすくする為、迎角は補正してある）。この腹の振幅は、小さい蝶ほど大きいようであるが、位相等は概ね同じである。

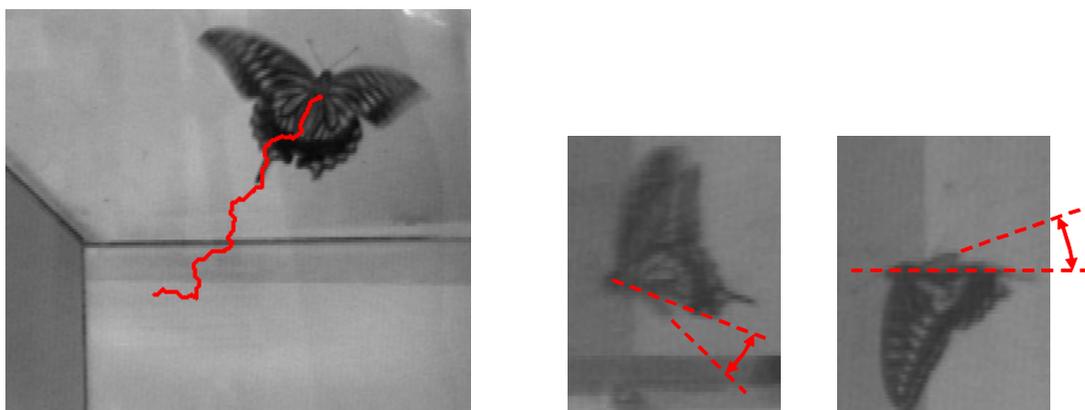


Fig. 1 Trajectory in free-flying butterfly, left, and abdomen angles during upstroke and down stroke
(動画 [trajectory.mpg](#))

次に、旋回動作の例を動画として Fig. 2 に示す。ほぼ 1/4 ストロークで 90° 向きを変えて

いることが分かる。50msec の動画であるので、300rpm ということになる。尚、蠅は 90° 向きを変えるのに 50msec 程度かかり、その間 10 ストローク行うようである^[6]。



Fig. 2 An example of turn in free-flying butterfly (動画 [turn.mpg](#))

2.2 飛び立ち時の第一ストロークにおける蝶の飛翔

蝶は飛び立ち時、左右の翅を付けるようにしてはばたきを開始し、このときの翅間の圧力低下が大きな揚力を作り出す一因である (clap-and-flip mechanism^[19]) と考えられているが、アゲハチョウを飛翔させた我々の実験では、翅を小刻みに動かしながらの飛び立ちが多く、はばたき開始角度は 65° 程度であった。蝶の飛翔面を x-z (前進-上昇) 平面とした代表的な胸部加速度を Fig. 3 左に示す。ここで、実線はダウンストローク、破線はアップストロークを表している。また、胸部 z 軸変位と胸部加速度の変化を Fig. 3 右に示す。ここで、A, B は、それぞれ、ダウンストローク時、アップストローク時の胸部最大加速度を表し、Fig. 3 左の A, B に一致する。これより、蝶のはばたきには、上下ストロークに加速度が極大になる瞬間がそれぞれ存在し、ダウンストローク時は z 方向に、アップストローク時には x 方向に加速することがわかる。また、ダウンストローク開始から 1/4 stroke 程度で最大上昇加速度約 3.7G を得ている。我々の実験では、これは 9.7G が最大であった。次に、代表的な、はばたき角度、腹角度、迎角の関係を Fig. 4 に示す。これより、はばたき角度と腹角度は周波数が等しく逆位相で、腹の振りにより迎角を制御していることが分かる。上下ストロークにおける z 方向と x 方向の加速度の切り替えは、この腹振りによるものである。

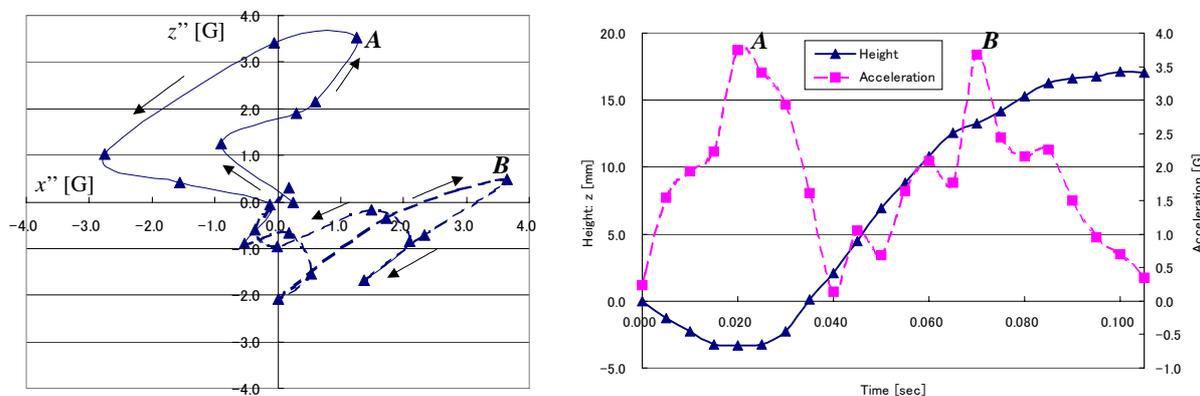


Fig. 3 Acceleration trajectory, left, and height and acceleration of thorax during a stroke

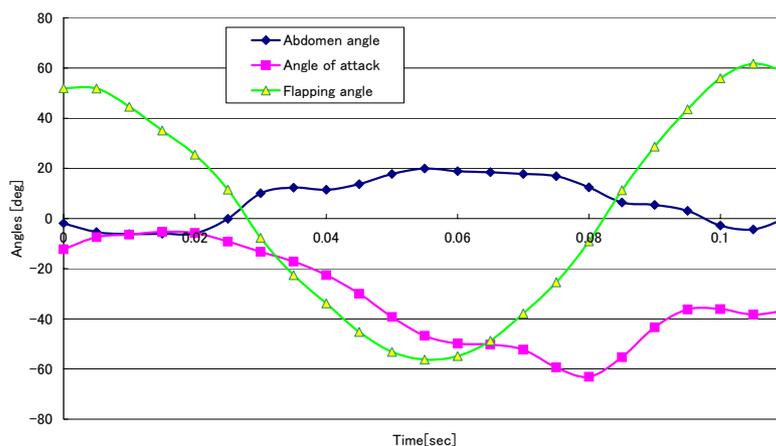


Fig. 4 Relationship among flapping angle, abdomen angle and angle of attack during a stroke

3 ボディーの運動, 及び翅の弾性変形と流れ場を考慮した数値計算による飛び立ち時における運動解析

3.1 蝶のモデル化

昆虫が利用しているはばたきでは、翅が小さく速度が遅いためレイノルズ数が小さい。このため、翅の断面構造は流線型とはならず、膜翼であり、種に依存してそれぞれ独自の構造を創りあげている。例えば、トンボの翅はアスペクト比が高く、剛性を維持するためにギザギザになっているが、蝶の翅のアスペクト比は低い。また、これらの翅には局所的に翅剛性を変化させる翅脈が走っており、これらがはばたき時に理想的なたわみやねじれを創り出すことによって大きな揚力を生み出す剥離渦が形成されると考えられる。翅脈の例を**Fig. 5**に示す。昆虫が翅をひとつの支点回りの運動のみしか制御できないことを考えると、この翅の弾性変形に依存するところは大きい。蝶においては、この翅脈は種固有のものであり、このデザインは進化によって最適化されてきたと考えられる。このような視点から、ここでは、翅を離散化してバネマス系でモデル化し、バネ定数 (EI を曲げ剛性とする) と質点間の距離を l として $K=EI/l$ で表せる。) を変化させることによってこの翅脈による構造特性を表現する。蝶のモデルの概略を**Fig. 6**に示す。尚、流体計算の高速化のためここでは左右対称としている。翅は、後翅が前翅と同位相で動くことに着目して 2 枚が結合した凸型四角形の 1 枚として i 方向に N_x-1 分割、 j 方向に N_y-1 分割して格子状に離散化し、その近傍の翅面積に比例させて質量を集中させた。質点間は質量のないリンクで結合し、リンク間は回転バネとダンパで結合する。ただし、計算を単純化するために開ループリンクとし、 $i=0$ 以外の y 方向の結合は並進バネとダンパとした。ボディーは、高速度カメラによる解析によって示された腹部の機能性を考慮して頭部・胸部・腹部の重心を 3 質点とし、それぞれをバネとダンパで結合した。ボディーと翅は、胸部と前縁端部をバネとダンパで結合した。また、アクチュエータとして、翅のフラッピング用 (**Fig. 6 A₁**) に 1 自由度、迎角の制御用 (**Fig. 6 A₂**) に 1 自由度、計 2 自由度を設置した。



Fig. 5 Wing veins of black swallowtail

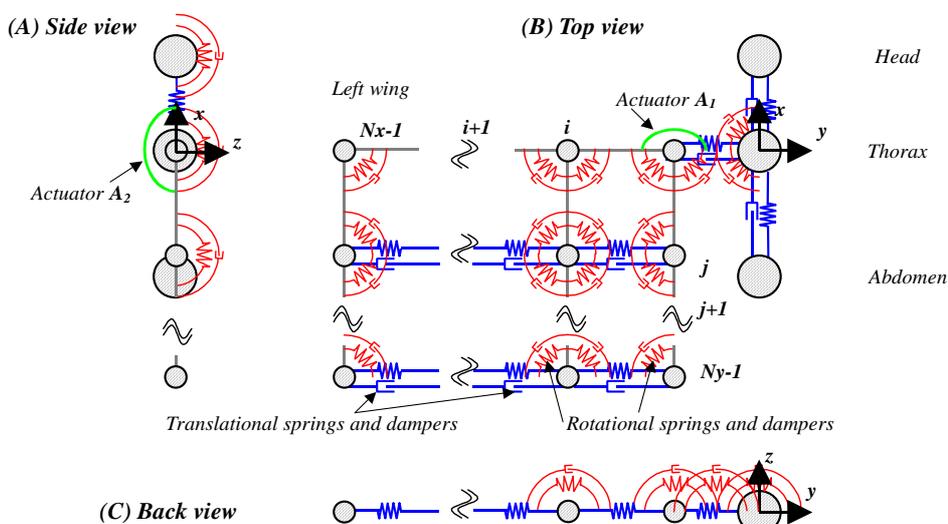


Fig. 6 Flapping robot model using spring-mass system with damper.

3.2 はばたきロボットの運動・構造計算と流れ場の計算

ロボットの運動・翅の構造・翅周り流れ場の連成問題の解法として、まず、流れ場を固定してボディーの運動及び翅の弾性変形を計算 (Step 1) し、次に、翅や地形等の境界条件を固定して流れ場を計算 (Step 2) し、順次時間ステップを進めていくという手法を試みる。Step 1 では、アクチュエータからの回転トルクと流体の圧力を外力として運動方程式を解き、各質点の dt 秒後の状態を決定する。Step 2 では、step 1 で計算された翅の質点速度を境界条件として、3次元、非圧縮、粘性、非定常を仮定した Navier-Stokes と連続の式から流れ場を計算する。ここで流れ場の計算には、翅の形状の時間的な変形を考慮して、非構造格子の生成に有利な有限要素法：FEM を採用した。尚、ボディーの形状は流体計算においては無視される。以下、Step 2 において計算された圧力が Step 1 における質点の外力として渡され、弱連成問題として計算が進められる。詳細は、文献[10]を参照されたい。

3.3 数値シミュレーション

基礎実験として、対気速度 0m/sec からの飛び立ちにおけるはばたきロボットの運動解析

を以下のパラメータにより行った．ここでは，アゲハチョウをモデルにし，前翅長：55mm，翼弦：45mm，頭部胸部間距離：9mm，胸部腹部間距離：19mm，総質量：400mg（頭部：60mg，胸部：140mg，腹部：150mg，翅：50mg），翅厚は均一に 0.4mm とした．バネ定数とダンパ定数は翅脈の効果解析する第一段階として **Fig. 6** の前縁 $i=0$ とボディー近傍 $j=0$ のリンクに結合するものを 10 倍とした．翅の分割数は， $N_x=10, N_y=16$ ，また，駆動力として，はばたきに $1.5gf/mm$ (**Fig. 6A₁**)，腹部は制御しないものとし $0.0gf/mm$ (**Fig. 6A₂**) を与えた．尚，FEM におけるノード数は約 24 万点である．以上のパラメータを用い，初期迎角 0° ，初期腹部角度 0° ，初期はばたき角 0° として，飛び立ち時におけるシミュレーションを行った．

得られた結果を **Fig. 7** に示す．胸部を原点として進行方向に垂直な ($x=10.0[mm]$) 平面の等圧力線図を 4.0 msec 毎のストロボ映像として表示している．前縁翅先で生成された剥離渦が成長し，翅上面全体に広がっていくことがわかる．自由飛翔時には，この剥離渦は時間と共に後縁の方に進んでいくが，ここでは，対気速度 0 m/sec の飛び立ちであるため，翅上面に留まっている．この負圧の渦は翅を持ち上げる力となっている．また，本シミュレーションでは，腹部の制御を行わなかった．このため，はばたき角と腹角度は同位相となっており，迎角の制御は出来ていない．腹部モーメントによる迎角の制御は今後の課題である．

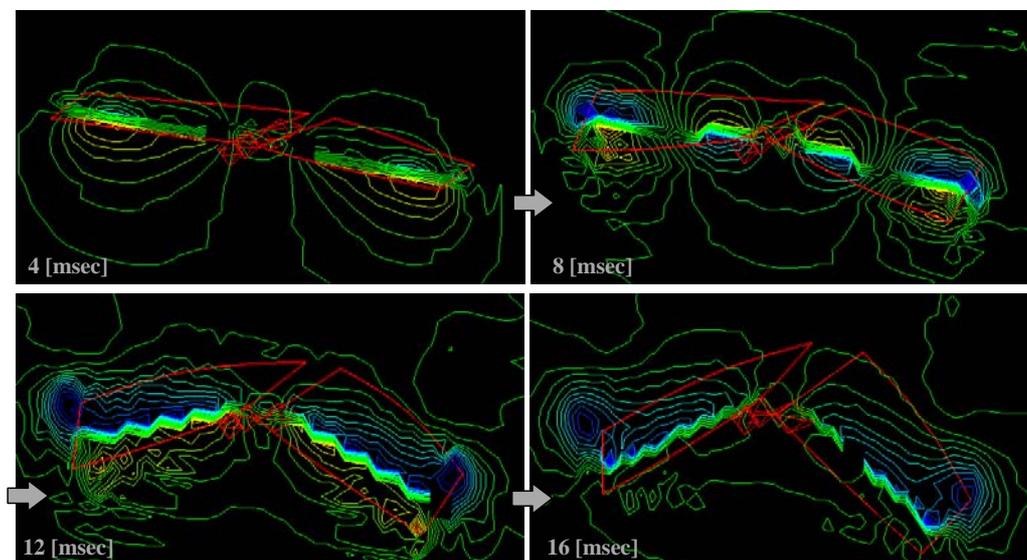


Fig. 7 Stroboscopic pictures of pressure contour maps on $x = 10.0 [mm]$ plane

次に，ダウンストローク 6.0msec 後の $x=10.0[mm]$ 平面と $y=25.0[mm]$ 平面の流速分布を **Fig. 8** に示す．先端の流速が最も大きく，前縁，前縁先端，後縁において翅上面中心に向かう渦が生成されていることが示されている．また，まくれ現象の一例として，16.0msec における圧力分布図を **Fig. 9** に示す．前縁では，上面が正圧，下面が負圧，後縁では，これが逆になっており，これが蝶などアスペクト比の低いはばたき翼に特徴的なまくれを創りだしている．

本計算手法は、主に、(a)構造・運動計算、流体計算における：(b1)計算空間のメッシュ生成、(b2)行列生成、(b3)逆行列計算のフェーズから成り立っているが、計算コストの最も高いのは(b1)である。特に、格子が歪みやすい翅のまくれ現象や大きなはばたき角のときに計算コストが上がる。本基礎実験においては、はばたき角 60° まで要素の最大ひずみ角が 30° 以下と良好で、 80° 程度まで安定したメッシュ生成が可能であることが確認できた。はばたき角 90° 近傍では、左右の翅がほぼ重なるため、歪みの小さいメッシュを生成することが難しい。蝶においては、飛び立ち時に左右の翅を密着させた状態から開くときに大きな揚力を得ており、この状態におけるメッシュ制御が重要となるが、これらに関しては今後の課題としたい。

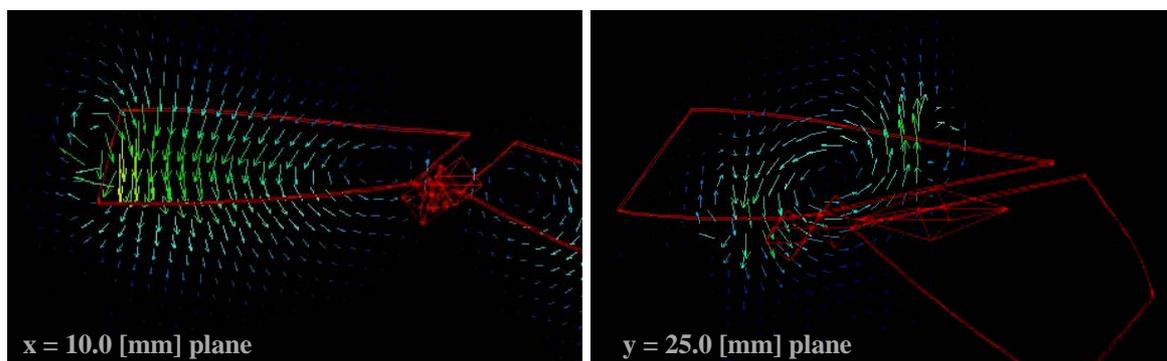


Fig. 8 Velocity distributions at 6.0 [msec]: Left, on $x=10$ [mm] plane and right, $y = 25$ [mm] plane.

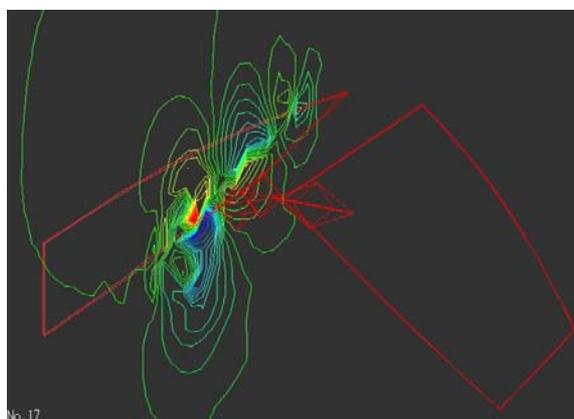


Fig. 9 Pressure contour maps on $y=10$ [mm]

4 実機の製作

2,3 章の知見から、以下の設計思想で実機を製作した。

- (1) アゲハチョウをモデル化し、前翅長 55mm で前後翅を同一化した 2 枚翅
- (2) はばたき角は、 90° (upside: 60° , downside: 30°)。腹振り角は、 35° (upside: 20° , downside: 15°)。
- (3) はばたき角度と腹振り角度は逆位相で、1 自由度で実現

- (4) 総重量は実際の蝶の 2 倍程度 ($\approx 2 \times 400\text{mg}$) で、腹部重量比は全体の 35% 程度 ($\approx 150\text{mg}/400\text{mg}$)
- (5) 翅脈は、前縁と胴体近傍のみ
- (6) はばたき周波数は 10Hz 程度

製作した小型はばたきロボットのプロトタイプを **Fig. 10** に示す。総重量は 0.83g、腹部重量比は全体の 31%、動力は市販のゴムを用い腹部に搭載した。また、下部を固定した状態ではばたきの様子を高速カメラで撮影した映像を **Fig. 11** に示す。これより、実際のはばたき周波数は 8.0Hz 程度であった。まだまだ議論すべき点が多いが、今後の課題もしくは目標として、初速度を与えた飛翔における運動解析の他、対気速度 0 からの飛び立ち、ホバリングの実現を挙げておきたい。



Fig. 10 Prototype for small sized flapping robot



Fig. 11 Flapping motion with high speed camera (動画 [flapping.mpg](#))

5 おわりに

構造系のダイナミクスを最大限に利用し、制御を単純化した蝶型はばたきロボットの開発を目指して行ってきた、(1)高速度カメラによる蝶の翅とボディーの運動解析、(2)ボディーの運動、及び翅の弾性変形と流れ場を考慮した数値計算による運動解析、(3)1gのはばたきロボットの製作、について述べた。観測システムとしての利用を考えると、センサが必要となるが、ペイロード等の問題からカメラのような高度なものは不可能で、赤外線センサーのみ等という制約になるかと思う。しかしながら、これらを大量に倒壊現場等の隙間から投入し、送られてきた情報を統合すれば、価値あるデータが拾い出せるかもしれない（もちろん、ロボット本体は数分後現場にバタバタと落ちることになるが）。赤外線センサとトランスミッタで現在 0.2g 程度であるので、昆虫が自重の 3 倍程度でも飛べることを考えると、蝶ロボットが観測システムとして利用される日も遠い未来ではないのかもしれない。

以上、本稿がはばたき型ロボットの研究・開発を目指す多くの人々の一助となれば幸いである。

参考文献

- [1] 中村心哉, 片岡頭二, 菅野道夫, "アクティブビジョンと GPS を用いた無人ヘリコプタの自動着陸に関する研究", 日本ロボット学会誌, Vol.18, No.2, (2000), 252-260.
- [2] 小林宏, 菊池耕生他, "昆虫の視覚による帰巢行動を参考にした飛行ロボットのナビゲーション", 日本機械学会論文集 C 編, Vol.68, No.668, (2002), 1104-1112.
- [3] S. SUDO, K. TSUYUKI et al, A Study on the Wing Structure and Flapping Behavior of a Dragonfly, JSME International Journal, C, Vol. 42, No. 3 (1999), 721-729.
- [4] 須藤誠一, 露木浩二, "飛行昆虫のバイオメカニクスと流れ", ながれ 21, (2002), 142-152.
- [5] 甲斐誠, 大場謙吉, "蚊の羽ばたき飛行に関する実験的研究", 日本機械学会論文集 B 編, Vol.67, No.654, (2001), 451-458.
- [6] S. N. Fry, R. Sayaman and M. H. Dickenson, "The Aerodynamics of Free-Flight Maneuvers in *Drosophila*", SCIENCE, Vol.300, (2003), 495-498.
- [7] R. B. Srygley and A. L. R. Thomas, "Unconventional Lift-generating mechanisms in free-flying butterflies", Nature, Vol.420, (2002), 660-664.
- [8] S. Sunada, K. Wachi, I. Watanabe and A. Azuma, "Performance of a butterfly in take-off flight", J. exp. Biol., 183, (1993), 249-277.
- [9] M. H. Dickinson, F. Lehmann and S. P. Sane, "Wing Rotation and the Aerodynamic Basis of Insect Flight", Science, Vol. 284, (1999), 1954-1960.
- [10] 菊池耕生, "小型はばたきロボットに関する研究-翅の弾性変形と流れ場を考慮した 3 次元運動解析シミュレータの開発-", JSME ロボメカ 03 講演論文集, (2003)
- [11] 菊池耕生, 宇田川貴正, "小型はばたきロボットに関する研究: 翅の弾性変形と流れ場を考慮した 3 次元運動解析", JSME ロボメカ 04 講演論文集, (2004).
- [12] 田中太, 黒田成昭, "流体力により弾性変形する物体のまわりの流れ場の計算法について", 日本機械学会 B 編, Vol.66, No.648, (2000), 1967-1974.

- [13] H. Liu and K. Kawauchi, "Leading-edge vortices of flapping and rotary insect wing at low Reynolds number; Flapping, Fixed and Rotary Wing Vehicles at Low Reynolds Number", AIAA, Progress in Astronautics and Aeronautics, Vol.195, (2001), 88-96.
- [14] K. KIKUCHI and F. HARA, "A Study on Evolutionary Design in Balancing Morphology and Intelligence of Robotic System", Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.12, No.2, (2000), 180-189.
- [15] 菊池耕生, 新堀勇, 小林宏他, "形態と知能の進化を考慮したロボットシステムに関する研究 (視覚センサの位置関係と決定木による知能の連繋から発現する機能の特性)", 日本機械学会論文集 C 編, Vol.67, No.662, (2001), 3197-3203.
- [16] <http://www.dickinson.caltech.edu/index.html>
- [17] I. Simoyama, Y. Kubo, T. Kaneda and H. Miura, "Simple Microflight Mechanism on Silicon Wafer", IEEE MEMS'94, (1994), 148-152.
- [18] 橋本, 石本, "昆虫の飛翔筋をモデルとしたバイオニック・デザイン (第 1 報, 翅の振動メカニズム)", 機論 C, Vol.63, No.607, (1997), 723-731.
- [19] T. Weis-Fogh, "Quick estimation of flight fitness in hovering animals, including novel mechanics for lift production", J.Exp.Biol. vol.59, (1973), 169-230.