弾性体リンクによるリード・ラグ機構を有する
蝶型はばたきロボットの開発*藤川 太郎^{*1}, 佐藤 芳憲^{*2}, 眞方 勇介^{*2}
山下 達彦^{*2}, 菊池 耕生^{*3}Development of a Butterfly-Style Flapping Robot
with Lead-Lag Mechanism Using Flexible LinksTaro FUJIKAWA^{*4}, Yoshinori SATO, Yusuke MAKATA,
Tatsuhiko YAMASHITA and Koki KIKUCHI^{*4} Department of Engineering, Chiba Institute of Technology,
2-17-1 Tsudanuma, Narashino-shi, Chiba, 275-0016 Japan

In this paper, we propose a small and simple slider-crank mechanism using flexible links that realizes both a wide flapping angle and lead-lag motion toward the development of a small flapping robot modeled on insects. Butterfly-style flight is attractive because of its low flapping frequency and fewer DOFs, unlike flies and dragonflies. However, since a butterfly flaps the wings over 150 deg and claps both left and right wings, a conventional slider-crank mechanism cannot generate sufficient torque for flapping at the top dead point that the driver and follower are parallel. Furthermore, an additional actuator for lead-lag motion makes the mechanism heavy and complex. To overcome these problems, we developed a new slider-crank mechanism that can flap the wings widely by bending of the flexible links and that realizes the lead-lag motion by twisting them. The flight performance of the butterfly robot with this mechanism was comparable to that of a butterfly, unless a butterfly kicks ground at takeoff.

Key Words: Lead-Lag, Flapping, Slider-crank Mechanism, Flexible Link, Butterfly Robot

1. 緒 言

近年、極限環境における観測システムとして、Micro Air Vehicles (MAVs) 等の小型飛行ロボットの開発が進められている⁽¹⁾⁽²⁾。中でも、狭隘空間における移動性や数Gを超える加速性を有する昆虫のはばたきは非常に魅力的であり、その飛翔メカニズムの解明を目的とした研究が行われている⁽³⁾⁻⁽⁹⁾。これらを基に、数十mg・数十mm オーダのハエやハチをモデルとした実機開発が行われているが⁽¹⁰⁾⁻⁽¹⁶⁾、その多くは未だ飛翔に至っていないのが現状である。その理由として、ペイロードの問題から昆虫サイズのボディにバッテリーやアクチュエータを搭載することが非常に難しいこと、このサイズでは粘性項が支配的になりつつあり、リンク数の増加が摩擦等によるエネルギー伝達効率の低下を招くことなどが挙げられる。このような問題点を踏ま

え、著者らは、ハエなどと比較して 10Hz 程度と低いのはばたき周波数で質量約 500mg、翼幅 100mm 程度の蝶をモデルとしたのはばたきロボットの開発を行ってきた⁽¹⁷⁾。アクチュエータとしてゴムを採用し、捻ることによって生じる回転エネルギーを利用することでバッテリーや減速機等を必要とせず、のはばたき機構に弾性体リンクを用いることによって少ないリンク数で蝶と同等である 150° 程度の大きなフラッピング角を実現した。ここで、蝶のはばたきメカニズムにおける他の飛翔昆虫と大きく異なる特徴として、翅の打ち下ろし時に体を起こしながら上昇し、翅の打ち上げ時に体を戻しながら前進するという階段状の飛翔を行っていることが挙げられる。つまり、蝶は体全体のピッチ角を変化させることでフェザリング（空力中心周りの翅の捻り）と同等の運動を行い、飛翔時の姿勢制御を行っているものと考えられる。このとき、フラッピング（翅を体軸周りに上下させる）と共にリード・ラグ（翅を体軸と平行に前後させる）を行っていることが確認されているが⁽¹⁸⁾、飛翔時におけるこれらの運動と姿勢制御メカニズムに関しては未だ明らかにされていない部分が多い。さらに、実機製作を考えた場合、既存のはばた

* 原稿受付 2010 年 2 月 25 日。

^{*1} 正員, 千葉工業大学工学研究科(〒275-0016 習志野市津田沼 2-17-1)。^{*2} 千葉工業大学工学部。^{*3} 正員, 千葉工業大学工学部。

E-mail: fujikawa.gf0@gs.it-chiba.ac.jp

き機構でフラッピング運動の他にフェザリングやリード・ラグ運動を行うためには、リンク数の増加や各運動のためのアクチュエータの追加など、機構の複雑化や大型化を伴う。

以上の視点から、本論文では、はばたきロボットによる飛翔実験によってリード・ラグ運動とその飛翔制御メカニズムを明らかにするため、リンクの撓みと捻れのみを利用することでフラッピングとリード・ラグの3次元的な運動を可能とする小型且つ単純な機構を提案する。そして、本機構を実装した蝶型はばたきロボットを開発して飛翔運動解析を行うことにより、その有効性を実証する。

以下、本論文の構成は次の通りである。2章では、はばたきロボットの設計パラメータを設定するため、蝶の飛翔運動解析を行う。次に3章では、2章での解析結果を基に、これまでに著者らが開発した弾性体リンクによるはばたき機構を応用したリード・ラグ機構を設計し、本機構を実装したはばたきロボットを開発する。4章では、その飛翔運動解析を行う。最後に、5章で結言と今後の課題を述べる。

2. 蝶の飛翔運動解析

ナミアゲハ (*Papilio xuthus*) をモデルとし、飛び立ち時の様子を3次元高速度カメラシステム (640×480 pixels, 200fps) を用いて、x, y, z方向から撮影した。図1はx方向から撮影した蝶の典型的な1はばたきの1/8周期毎の連続写真である。得られた画像より、図2に定義するパラメータに従って、フラッピング角、ボディピッチ角、及び、リード・ラグ角を測定し、飛翔時間 t [msec] をはばたき1周期の時間 T [msec] で正規化した。図3, 4は、それぞれフラッピング運動の2倍周期のリード・ラグ運動、及び、同周期のリード・ラグ運動を行っていた飛翔に関する解析結果の典型例である。また、そのときの胸部軌跡と加速度の変化の様子をそれぞれ図5, 6に示す。図3, 4より、2倍周期の飛翔においては、翅打ち下ろし、及び、打ち上げ時のフラッピング速度が最大となるフラッピング角 10° (フラッピング角の中間値) 近傍で、同周期の飛翔においては翅打ち下ろし終了間際に前進翼角が最大となるリード・ラグ運動を行っていることが確認できる。このとき、翅の揚力中心は前方へ移動することで重心位置から最も離れ、且つ、翅面積が最大となっていることを示す。ボディピッチ角の推移に着目すると、両飛翔においてその値は翅打ち下ろし時に前進翼角が最大となった後に増加し始め、翅打ち上げ時に最大となっていることがわかる。リード・ラグ運動の影響を

考慮すると、揚力中心が重心位置と最も近接した状態から翅打ち下ろしと共に前方へ移動することにより、揚力によるボディの回転トルクも徐々に大きくなり、ボディピッチ角速度も徐々に増すことに起因すると推測される。このことから、蝶はリード・ラグ運動を行うことで揚力中心と重心位置との距離を変化させ、ボディピッチ角を制御することで、翅打ち下ろし時に体を起こしながらz方向へ加速し(図5, 6のa)、翅打ち上げ時にx方向へ加速する(図5, 6のb)階段状の飛翔を行っていると考えられる。

Fig. 1 Stroboscopic photographs of a butterfly taken during takeoff

Fig. 2 Definition of parameters for butterfly-style flight

Fig. 3 Relationship among flapping, lead-lag, and body pitch angles of a butterfly (twofold cycle case)

Fig. 4 Relationship among flapping, lead-lag, and body pitch angles of a butterfly (same cycle case)

Fig. 5 Trajectories of center of thorax for butterflies during takeoff

Fig. 6 Acceleration of center of thorax for butterflies during takeoff

3. フラッピング及びリード・ラグ機構を有する蝶型はばたきロボットの開発

蝶はフラッピング運動の2倍周期、または同周期でリード・ラグ運動を行っていることが2章の解析結果より確認され、これに伴い、揚力中心の位置を変化させていることが示唆された。本論文では、蝶と同様にこれらの運動を行う新たな機構設計の第一段階として、翅打ち上げ時により前方へ飛翔している解析結果を得た2倍周期のリード・ラグ機構を提案し、この機構を実装した蝶型はばたきロボットを開発する。

既存のはばたき機構を用いてフラッピング運動と同時にリード・ラグ運動を再現しようとする場合、リンク数の増加やアクチュエータの追加等により、その機構は複雑化、且つ、大型化を伴っていた。1章で述べたように、昆虫のスケールでは粘性項が支配的になりつつあるため、リンク数の少ない単純な機構が求められる。そこで、本研究では、著者らがこれまでに開発した弾性体リンクを用いた往復揺動機構を応用し、リンクの撓みと捻れを利用することにより、フラッピング運動とリード・ラグ運動を行う往復揺動機構を提案する。本機構を実装した蝶型はばたきロボットのCADモデルの俯瞰図、及び、フラッピング上死点と下死点の状態図をそれぞれ図7、8に示す。尚、機構を明確にするため、両図において左翅は省略してある。製作するロボットの翅は、蝶と同様にフラッピング、及び、リード・ラグ運動を行う前翅左右2枚とフラッピング運動のみを行う後翅左右2枚の計4枚とし、後翅はX軸回転が可能な翅基部に取り付ける。前翅は翅基部に取り付けられたZ軸回転が可能なユニバーサル・ジョイントに接合され、このジョイントは弾性体リンクによって下部ボディと連結される。この際、リンクを撓

みによる復元力が生じない自然状態（文献 17 参照）において取り付け角 α で取り付けることにより、リンクには捻れが生じず、この取り付け角 α が前翅の最大前進翼角度となる。動力には出力質量比に優れたゴムの弾性エネルギーを利用し、捻りによる回転運動をスライダとクランクを通すことにより、上部ボディの上下往復運動に換える。この運動によるリンクの撓みでユニバーサル・ジョイントの軸線 X 周りに前翅と後翅がフラッピング運動を行い、このとき生じるリンクの捻れによって同ジョイントの軸線 Z 周りに前翅がリード・ラグ運動を行うことが可能となる。ここで、提案する機構によるリード・ラグ運動のメカニズムの詳細について、図 9 から図 13 を用いて説明する。図 9 は、フラッピング上死点（図 8(a)）からの翅打ち下ろし開始時、図 10 は、弾性体リンクに撓みによる復元力が生じていないはばたき中立点（ここでは $\theta = 0^\circ$ に設定）、図 11 は翅打ち下ろし終了時でのフラッピング下死点（図 8(b)）における翅基部の拡大図である。また、図 12, 13 は、フラッピング下死点からの翅打ち上げ開始時、及び、翅打ち上げ終了時のフラッピング上死点における翅基部の拡大図である。弾性体リンクは、はばたき中立点から上死点に移行することにより撓みと共にラグ方向に捻れが生じる。フラッピング運動はこの状態から開始されるため、翅打ち下ろし行程においてラグ方向に回転していた前翅を戻そうとするモーメント M によって軸線 Z 周りのリード方向への回転トルク τ_{lead} が生じる（図 9）。そして、前翅はリード運動をしながら図 10 に示すはばたき中立点へと達し、捻れが生じない状態になる。このとき、前進翼角度は最大となるため（ $\eta = \alpha$ ）揚力中心と重心位置との距離は最大となり、且つ、翅面積も最大となる。はばたき中立点を越えた弾性体リンクは再びラグ方向への捻れを生じ、その捻れを元に戻そうとするモーメントによる回転トルク τ_{lag} によりラグ運動をしつつ、フラッピング下死点に至る（図 11）。次に翅打ち上げ行程において、打ち下ろし行程と同様に捻れを戻そうとするモーメントによって生じた回転トルク τ_{lead} によりリード運動を行い（図 12）、翅打ち下ろし時同様にはばたき中立点において前進翼角が最大となるため、揚力中心と重心位置間の距離、及び、翅面積は最大となる（図 10）。そして、その後生じたラグ方向への捻れを元に戻そうとするモーメントにより発生した回転トルク τ_{lag} により、前翅はラグ運動を行ってフラッピング上死点に至る（図 13）。この動作を繰り返すことにより、スライダの上下往復運動の 1 自由度のみでフラッピング運動と共に 2 倍周期でのリード・ラグ運動が可能となる。

尚、この機構における弾性体リンクの撓みと捻れのタイミングを調整することにより、フラッピング運動と同周期でのリード・ラグ運動も可能であると考えられる。

Fig. 7 Overview of CAD model

Fig. 8 Flapping motion of CAD model

Fig. 9 Lead-lag motion at the top dead point during down stroke

Fig. 10 Lead-lag motion at neutral position

Fig. 11 Lead-lag motion at the bottom dead point during down stroke

Fig. 12 Lead-lag motion at the bottom dead point during upstroke

Fig. 13 Lead-lag motion at the top dead point during upstroke

4. 蝶型はばたきロボットの飛翔運動解析

本章では、リード・ラグ機構の有無による蝶型はばたきロボットの飛翔運動解析を行い、蝶の解析結果と併せて比較することで提案する機構の有効性を示す。

4・1 パラメータ設定 使用するロボットは3章で設計したモデルであり、リード・ラグ機構を有する Type A と前進翼角度を固定した Type B の2種類を用いる。前翅長は53mm、後翅の翼弦長は40mmであり、はばたき時の後縁部の捲れを防ぐために後翅には梁を入れてある。翅とボディを構成する主な材質には比剛性に優れた竹ひごを使用し、翅膜にはポリエチレン性の薄膜を用いている。全体の質量はアクチュエータとするゴムを含めて約500mgとなり、モデルとしたナミアゲハと同サイズ同質量である。Type A のフラッピング角とリード・ラグ角は2章での蝶の解析結果を基に、翅打ち下ろし角 80° 、打ち上げ角 -60° 、最大リード角 15° 、最大ラグ角を -5° と設定した。比較に用いる Type B のフラッピング角は Type A と同等であり、前進翼角は Type A の中間値である 10° とした。尚、本実験において比較する蝶の解析結果は2倍周期でリード・ラグ運動を行うケースであるため、図3より初期ボディピッチ角を 0° と設定し、実験を行った。

4・2 はばたきロボットの飛翔運動解析 2章での蝶の運動解析と同様に3次元高速度カメラシステムを用いて Type A と Type B の飛び立ちからの飛翔の様子を撮影し、画像処理による解析を行った。フラッピング角、ボディピッチ角、及び、リード・ラグ角の関係について、Type A と Type B の解析結果をそれぞれ図14、15に示す。図16、17は Type A と Type B の飛び立ちからの1はばたきにおける飛翔軌跡、及び、加速度の推移を比較したものであり、図18は Type A の飛翔の様子を撮影した1/8周期毎の連続写真である。また、Type A と Type B の10回の試行結果における翅打ち下ろし時のピッチ角と飛翔高さ、及び、前進移動距離の平均値と偏差を表1に示す。図14より、本機構を実装した Type A は、蝶と同様にフラッピング運動の2倍周期でリード・ラグ運動を実現していることが確認できる。ボディピッチ角の推移に着目すると、その極大値は、Type B では翅打ち下ろし直後の平均約 38° であるのに対し、Type A は蝶と同様に翅打ち上げ時に約 65° を示していることがわかる。リード・ラグ運動により、Type A は翅打ち下ろし終了時の揚力中心が Type B よりも重心位置に近い、ため、翅打ち上げによる負の方向の回転トルクもより小さな値から極大を迎える。よって、翅打ち下ろしによる正方向の回転

トルクは Type B に比べて徐々に減少するため、その値は Type B よりも増加したと思われる。次に、図 16, 17, 及び、表 1 より、Type B が翅打ち下ろし終了時にほぼ最大飛翔高さまで上昇したのち下方へ飛翔しているのに対し (図 16, 17 の a_B , b_B)、Type A は翅打ち下ろしで上方へ加速し (図 16, 17 の a_A)、自重を支えるだけの揚力を維持しつつ前方へ加速していることが確認できる (図 16, 17 の b_A)。これは、翅打ち下ろし終了時のピッチ角がより大きい Type A では翅打ち上げ時に翅が受ける反力の z 方向成分が Type B よりも小さいため、下方への加速度が小さくなったことによると考えられる。しかし、翅打ち下ろし時の飛翔高さに着目すると、Type A, B 共に蝶の 1/4 程度であることが図 5 と図 16 の比較から確認できる。蝶は脚で地面を蹴るようにして飛び立ちを開始しており、本解析では約 5G の初期加速度が観測された (図 6)。しかし、本実験におけるはばたきロボットの飛び立ちは、開放機により初期加速度がほぼ 0G の状態から開始される (図 17)。つまり、蝶は床反力により z 方向への加速度を発生させて飛翔することで図 5 に示される飛翔高さを得ているものと考えられ、今後は、はばたきロボットの飛翔運動解析においてもこの初期加速度を考慮に入れた実験を行うことが必要である。

以上の結果から、提案するリード・ラグ機構をはばたきロボットに実装することにより、飛翔時における翅の揚力中心を前後に移動させることでボディの回転トルクが制御可能であることが示された。これにより、初期ボディピッチ角 0° からの飛び立ちにおいて、蝶と同様に翅打ち下ろしで上昇し、打ち上げで落下せずに前方へ飛翔することが可能となった。今後は、本機構を実装したロボットにより、リード・ラグ運動と飛翔時の姿勢制御メカニズムの関連性について明らかにしていくことが課題となる。

Fig. 14 Relationship among flapping, lead-lag, and body pitch angles of Type A

Fig. 15 Relationship among flapping, lead-lag, and body pitch angles of Type B

Fig. 16 Trajectory of center of thorax for Types A and B during takeoff

Fig. 17 Acceleration of center of thorax for Types A and B during takeoff

Fig. 18 Stroboscopic photographs of Type A taken during takeoff

Table 1 Results of takeoff for Types A and B

Index	Type A		Type B	
	Ave.	Std.dev	Ave.	Std.dev
Maximum of pitch angle [deg]	64.7	2.9	37.7	2.4
Flight height for down stroke [mm]	8.4	0.8	10.2	0.9
Maximum height [mm]	12.1	2.1	11.7	0.8
Distance for flight [mm]	26.5	3.7	17.2	4.5

5. 結 言

本論文では、蝶型はばたきロボットの開発を目指し、フラッピング運動と共にリード・ラグ運動を再現可能な機構を提案した。また、本機構を実装したロボットの飛翔実験を行うことにより、その有効性を示した。得られた結果は以下の通りである。

- (1) 弾性体リンクの撓みと捻れを利用することにより、スライダ・クランク機構における上下往復運動の1自由度のみで 150° 以上のストロークをもつフラッピング、及び、リード・ラグを伴った3次元的な運動を行うことが可能になった。
- (2) 前翅のリード・ラグ運動によりボディピッチ角を制御し、蝶とほぼ同様の 0° から 65° の周期運動を実現した。

- (3) 蝶とほぼ同等の最大ボディピッチ角を実現することにより、翅打ち上げ時においても自重を支えるだけの揚力が維持され、且つ、より前方へ飛翔することが可能になった。

今後の課題は、フラッピング運動と同周期でリード・ラグ運動を行う新たな機構の開発、リード・ラグ運動による姿勢制御メカニズムの解明、脚の蹴り動作による初期加速度を考慮に入れた飛翔実験などが挙げられる。

謝 辞

本研究の一部は日本学術支援会 (JSPS) の2005年若手研究 (A), 17686022の補助金によって行われたものであり、ここに記して謝意を表する。

文 献

- (1) E. W. Green and P. Y. Oh, Autonomous Hovering of a Fixed-Wing Micro Air Vehicle, *Proceedings of 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, (2006), pp. 2164-2169.
- (2) Hazawa, K., Nonami, K., et al., Autonomous Flight Control of Hobby-Class Small Unmanned Helicopter -Trajectory Following Control by Using Preview Control Considering Heading Direction-, *Proceedings of 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robotics and Systems: IROS2004*, (2004), CD-ROM.
- (3) T. Weis-Fogh, Quick Estimates of Flight Fitness in Hovering Animals, Including Novel Mechanisms for Lift Production, *J. Exp. Biol.*, Vol. 59, (1973), pp. 169-230.
- (4) M. H. Dickinson, F. Lehmann, and S. P. Sane, Wing Rotation and the Aerodynamic Basis of Insect Flight, *Science*, Vol. 284, (1999), pp. 1954-1960.
- (5) S. P. Sane and M. H. Dickinson, The Control of Flight Force by a Flapping Wing: Lift and Drag Production, *J. Exp. Biol.*, Vol. 204, (2001), pp. 2607-2626.
- (6) F. Lehmann, Aerial Locomotion in Flies and Robots: Kinematic Control and Aerodynamics of Oscillating Wings, *Arthropod Structure and Development*, Vol. 33, (2004), pp. 331-345.
- (7) S. A. Combes and T. L. Daniel, Flexural Stiffness in Insect Wings I. Scanning and the influence of wing venation, *J. Exp. Biol.*, Vol. 206, (2003), pp. 2979-2987.
- (8) Sunada, S., Kawachi, K., et al., Performance of a Butterfly in Take-off Flight, *J. Exp. Biol.*, Vol. 183, (1993), pp. 249-277.
- (9) Sudo, S. and Tsuyuki, K., The Wing Apparatus and Flapping Behavior of Hymenoptera, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 44, No. 4, 2001, pp. 1103-1101.
- (10) X. Deng, L. Schenato, W. Chung Wu, and S. S. Sastry, Flapping Flight for Biomimetic Robotic Insects: Part I - System Modeling, *IEEE Trans. Rob.*, Vol. 22, No. 4, (2006), pp. 776-788.
- (11) X. Deng, L. Schenato, W. Chung, and S. S. Sastry, Flapping Flight for Biomimetic Robotic Insects: Part II - Flight Control Design, *IEEE Trans. Rob.*, Vol. 22, No. 4, 2006, pp. 789-803.

- (12) R. S. Fearing, K. H. Chiang, M. H. Dickinson, D. L. Pick, M. Sitti and J. Yan, Wing Transmission for a Micromechanical Flying Insect, *proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, (2000), pp. 1509-1516.
- (13) R. J. Wood, The First Takeoff of a Biologically Inspired At-Scale Robotic Insect, *IEEE Trans. Rob.*, Vol. 24, No. 2, (2008), pp. 341-347.
- (14) R. J. Wood, Design, fabrication, and analysis of a 3 DOF, 3cm flapping-wing MAV, *proceedings of IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, (2007), pp. 1576-1581.
- (15) M. Sitti *et al.*, Development of PZT and PZN-PT Based Unimorph Actuators for Micromechanical Flapping Mechanisms, *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, (2001), pp. 3839-3846.
- (16) M. Sitti, PZT Actuated Four-Bar Mechanism with Two Flexible Links for Micromechanical Flying Insect Thorax, *proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, (2001), pp. 3893-3900.
- (17) Fujikawa, T., Kikuchi, K., *et al.*, Development of a Butterfly-style Flapping Robot with Slider-crank Mechanism using Flexible Links, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 76, No. 761, 2010, pp. 151-157.
- (18) Senda, K., *et al.*, Study on Flapping-of-Wings Flight of Butterfly with Numerical and Experimental Analysis, *AIAA*, Vol. 1, (2006), pp. 452-467.