

翅のはばたきによる力を考慮した蝶の飛翔モデル

安 斎 祐 一[†] 村 岡 一 信^{††}
千 葉 則 茂^{††} 齊 藤 伸 自^{†††}

近年、バーチャルリアリティなどの映像表現のために、動物のコンピュータグラフィックスに関する研究が行われているが、蝶などの昆虫の例は少ない。本報告では蝶の飛翔のリアルタイム表示を目的とした飛翔モデルを提案する。本モデルでは、翅のはばたきによる力によって蝶を飛翔させる。これにより蝶らしい飛翔、すなわち、ひらひら舞う様子を表現でき、モデルのパラメータ調整により実際の蝶の典型的な飛翔形態を表現することができる。

A Flight Model for Butterflies Taking into Account the Force Caused by Flapping the Wings

YUICHI ANZAI,[†] KAZUNOBU MURAOKA,^{††} NORISHIGE CHIBA^{††}
and NOBUJI SAITO^{†††}

Recently, a study of animal computer graphics is made extensively for image representation such as virtual reality; however, a study of insects such as butterfly is less. In this paper, we propose a flight model and how to control it simply for real-time butterfly flight. This technique makes butterflies fly with a flap of the wings. It can represent the typical flight of real butterflies by controlling the model's parameters.

1. ま え が き

バーチャルリアリティ (VR) や景観シミュレーションなどのリアリティ向上のため、コンピュータグラフィックス (CG) による自然物・現象のリアルな表現が期待されている。自然物としての動物の表現に関しては、これまで魚や鯨類、陸上動物など多くの研究がなされている^{1)~6)}。

本論文では昆虫の蝶を取り上げ、蝶の飛翔のリアルタイム表示を目的とした、ビジュアルシミュレーション法について報告する。蝶は比較的低速で地表付近を飛翔するため人の目にとまりやすく、季節を感じさせる身近な存在の1つである。このため、景観シミュレーションや VR における季節感の表現、リアリティ向上のための「部品」としての応用が期待できる。

蝶の CG に関するこれまでの研究は、Dai⁵⁾によ

るフラクタルを用いた蝶の翅の模様の生成法に関するものと、雨川⁶⁾による蝶の飛翔に関するものがある。雨川らによる方法は、魅力の場と呼ばれる場の中で、蝶が負の魅力を避け、正の魅力に引きつけられることで飛翔経路が定められるというものであるが、翅のはばたきによる力は考慮されておらず、蝶の飛翔の特徴であるひらひらした飛び方も実現されていない。

実際の蝶では、翅のはばたきによって発生する力で胴体が上下動し、さらに、推進力を得るため、はばたきに連動して胴体を前後に傾斜させており、これにより蝶独特のひらひらした印象を受ける飛翔となっている。

本手法では、これを自動的に得るため簡単な物理モデルによりはばたきの力を計算し、その力によって蝶を飛翔させる。なお、本手法はあくまでビジュアルシミュレーションのためのものであり、はばたきによる力を厳密に解析するためのものではないことを断っておく。

本論文では、まず、実際の蝶の飛翔形態について述べ、それを実現するための飛翔モデルについて示す。次に、飛翔モデルによって飛翔する蝶の経路を定める簡便な行動制御法を示し、さらにシミュレーション例

[†] 岩手大学大学院工学研究科
Graduate School of Engineering, Iwate University

^{††} 岩手大学工学部情報工学科
Department of Computer Science, Faculty of Engineering, Iwate University

^{†††} 東北工業大学
Tohoku Institute of Technology

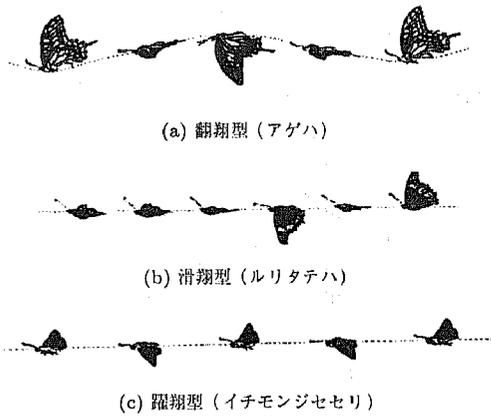
図1 飛翔形態の例⁹⁾

Fig. 1 Example of typical flight form of butterfly.

によって、これらの効果を示す。

2. 実際の蝶の飛翔形態

蝶の飛翔形態の分け方はいくつかあるが^{8)~10)}、ここでは文献9)による分類を示す。この分類法では、飛び方(軌跡)によって大きく3つの形態に分けられる(図1参照)。(a)の翻翔型は、翅の上下のはばたきにともない胴体の重心がこれと逆に上下する。進行効率は低いが、鳥など一直線に襲撃してくる捕食者に対して、捕獲を免れる効果があると考えられている。(b)の滑翔型は、ある一定速度になるまではばたき、その後、翅を開いたまま滑空する。翅の打ち下ろしは、ほぼ水平位置までであり、打ち上げ速度は打ち下ろし速度より緩慢である。(c)の躍翔型は体重の割に翅の表面積が小さく、十分な揚力が得られないため滑空できないが、はばたき力は強く、翅を規則正しくはばたかせ、軽快にまっすぐ飛翔する。低速の場合は、翅のはばたき回数を落とし、打ち上げ角度と打ち下ろし角度を増やして、跳躍するように空気を下に蹴って飛翔する。

なお、このほか、蝶に関するビデオ映像¹¹⁾や、著者らが蝶をビデオ撮影した映像の観察では、次のような特徴的な行動が見られた。

- (1) モンシロのような小型の翻翔型の蝶では、ときどき瞬間的に翅をいっぱい上げたまま急降下する。
- (2) 急に方向を変えるときは、1回の翅の打ち下ろしの間に向きを変える。

3. 蝶の飛翔モデル

本モデルでは蝶の飛翔の特徴を自動的に表現するた

め、翅のはばたきから得られる力によって飛翔を実現する。ここでは、飛翔モデル構築の基礎について述べ、飛翔形態を実現するための飛翔モデルについて述べる。

3.1 飛翔モデル構築の基礎

昆虫飛翔のメカニズムに関する文献¹²⁾によれば、昆虫の飛翔の定量的な空気力学の解析には、定常状態が連続していると仮定する準定常的研究が一般に受け入れられている。ここで、定常状態とは、昆虫の翅は一枚の薄い板で、そのまわりを空気が一定の速度で流れ、右と左の翅の間には、いかなる空気力学的な相互作用もないと仮定した状態のことである。準定常的研究では理論の値と実際の力との一致は得られておらず¹²⁾、解析できない力が存在する。この力の解析のため、はばたきにより発生する渦の存在などを考慮した非定常的研究も行われているが、これには計算量が膨大となる蝶のまわりの空気の流れの数値流体力学計算が避けられない。本モデルの目的は自然な印象を受ける蝶の飛翔のビジュアルシミュレーションにあるので、計算量が膨大となる非定常状態ではなく準定常状態を基本としてモデルを構築する。なお、準定常状態を仮定したことによる力の不足はモデルのパラメータ調整によって補うものとする。

3.2 蝶の飛翔モデルの構築

ここでは、2章で示した飛翔形態を実現するための準定常状態に基づく蝶の飛翔モデルについて示す。まず、翅の運動について述べ、その運動によって発生するはばたきの力の計算法について示す。さらに、求めた力により蝶を移動させるための蝶の運動方程式を示す。

3.2.1 蝶の運動

本モデルの蝶の運動は、文献13)を参考に、翅の付け根を通り、胴体に平行な直線を軸にした回転運動(フラッピング)と翅の前縁に平行な直線を軸とする回転運動(フェザリング)のみからなっているものとし(図2(a), (b)参照)、前進力を得るため、蝶の胴体の重心を回転軸とした縦揺れ運動(ピッチング)を行わせるものとする。なお、フラッピングの最も上に打ち上げたときの角度を上フラッピング角、最も下に打ち下ろしたときの角度を下フラッピング角と呼ぶことにする(図2(a), (b)参照)。また、ピッチングで最も胴体を起こしたときの角度を上ピッチング角、最も下げたときの角度を下ピッチング角と呼ぶことにする(図2(c)参照)。

3.2.2 はばたきによる力の計算

固定された翅をベクトル v_r で表される空気流の中に置いたとき、その翅には揚力 L と抗力 D が働き、

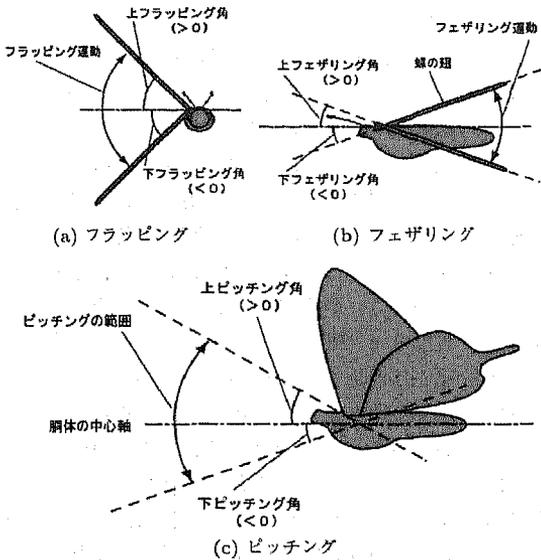


図2 蝶の翅および胴体の運動
Fig. 2 Motion of the wing and the body of a butterfly.

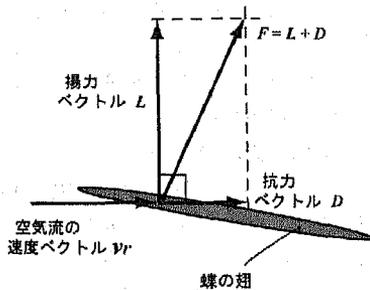


図3 翅に作用する力
Fig. 3 Forces acted on a wing.

翅に作用する力 F は次式で表される (図3 参照).

$$F = L + D \tag{1}$$

このとき、揚力と抗力の大きさ L と D は次式で求められる¹⁴⁾.

$$L = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_r^2 \cdot S \cdot C_l(\alpha) \tag{2}$$

$$D = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_r^2 \cdot S \cdot C_d(\alpha) \tag{3}$$

ここで、

- ρ : 空気密度 [g/cm³]
- S : 翅の面積 [cm²]
- v_r : 翅に対する空気流の相対速度 $|v_r|$
- α : 空気学的迎角 [deg]
- C_l : α の関数で表される揚力係数
- C_d : α の関数で表される抗力係数

である。空気学的迎角 α は、ベクトル v_r と翅のなす角であり、空気流が翅の下面から当たる状態を正值、上面から当たる場合を負値とする (図4 参照)。

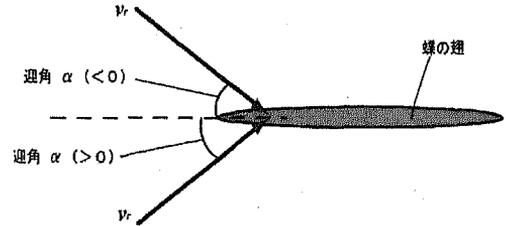


図4 空気学的迎角
Fig. 4 Angle of attack.

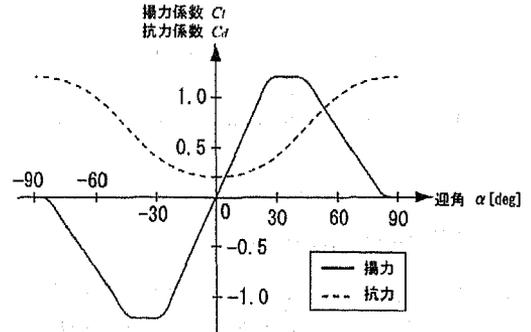


図5 揚力抗力特性関数
Fig. 5 Characteristic function of the lift and drag coefficients.

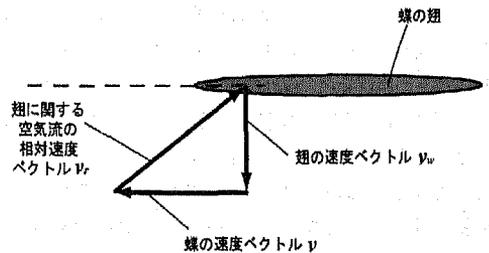


図6 翅に対する空気流の相対速度
Fig. 6 Relative velocity of air flow to a wing.

C_l , C_d の関数としては、蝶とほぼ等しいレイノルズ数 (約 10^3) を持つ昆虫の翅の空気学的特性¹²⁾を参考に、図5に示す揚力抗力特性関数を仮定した。

本モデルでは、蝶は無風状態の中を飛翔するものと仮定する。このとき、蝶が速度ベクトル v で移動していると、翅に対する空気流の相対速度ベクトル v_r は $-v$ となる。さらに、翅が速度ベクトル v_w で上下方向に平行移動したとすると、空気流の相対速度ベクトル v_r は、

$$v_r = -(v + v_w) \tag{4}$$

で表される (図6 参照)。

ここで、翅が上下の平行移動ではなく、翅の付け根を回転軸とするはばたき運動 (すなわちフラッピング)

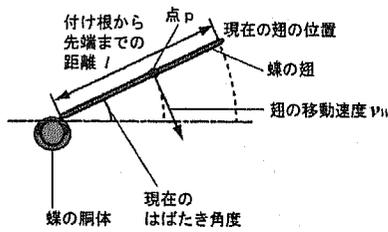


図7 翅の移動速度
Fig. 7 Movement velocity of a wing.

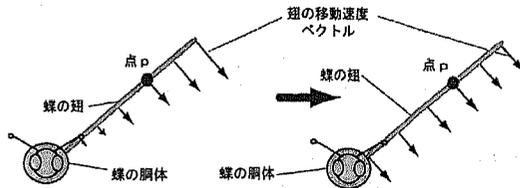


図8 点 p の移動速度
Fig. 8 Movement velocity of the position p on a wing.

をすると、その速度ベクトルは図7に示すように運動の軌跡の接線方向を向くベクトルとなり、その大きさ、すなわち速度は付け根から先端に向かうほど大となる。

このため、翅全体に作用する力は、付け根から先端までの各位置における力の積分として求めなければならない。しかしながら、本モデルでは、リアルタイム表示の観点から計算量を削減するため、翅の全体に作用する力の平均と同等の力が作用するような点 p が翅の付け根から翅の先端の間にあると仮定し、その速度ベクトルをはばたきの力の計算に用いるものとする(図8参照)。

点 p のはばたき運動における速度ベクトルの大きさ $|v_w|$ は次式で表される。

$$|v_w| = l \cdot k_p \cdot \omega \tag{5}$$

ここで、

l : 翅の幅 [cm]

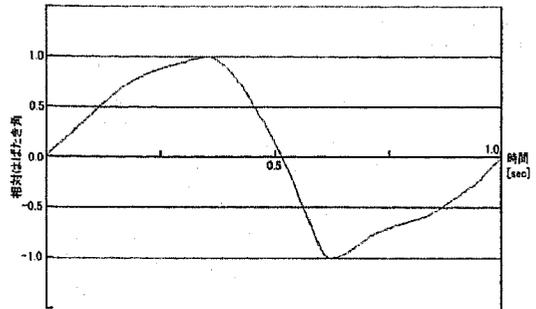
ω : はばたきの回転速度 [rad/s]

k_p : 翅の付け根から点 p までの相対的な長さ

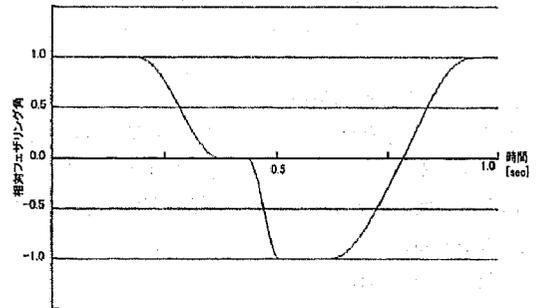
$$k_p = l_p / l$$

l_p : 翅の付け根から点 p までの長さ [cm]

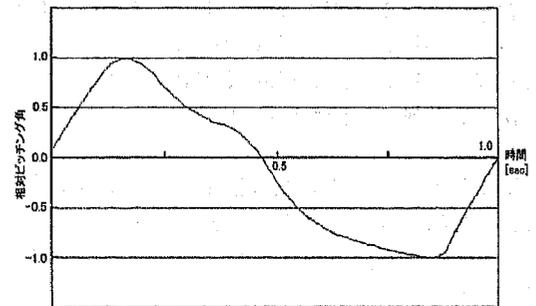
である。ただし、はばたきの回転速度 ω は、図9に示すはばたき角度関数から求めるものとする。ここで、図9(a)のフラッピングと(c)のピッチングは文献15)による実際の蝶の測定データを基に作成したものであり、(b)のフェザリングは、はばたきの力が大きくなるように飛翔シミュレーションを繰り返し、実験的に求めたものである。なお、この図の縦軸は上フラッピ



(a) フラッピング¹⁵⁾



(b) フェザリング



(c) ピッチング¹⁵⁾

図9 翅のはばたき角度関数
Fig. 9 Flapping angle function.

ング角と下フラッピング角で正規化した翅のフラッピング角を表し、横軸ははばたきの1周期を1Hzに正規化した時間を表している。

個々の蝶の翅の形状の違いによって発生する力の相違は、 k_p によって表現するものとし、これを翅形状係数と呼ぶことにする。なお、本モデルでは、これを準定常状態を仮定したことによる力の不足を補う目的にも用い、実験的に定めるものとする。すなわち、実際の蝶のデータ(体重、翅面積、はばたき振動数など)を与え、飛翔シミュレーションを行い、飛翔を維持できる k_p を試行錯誤によって求めるものとする。

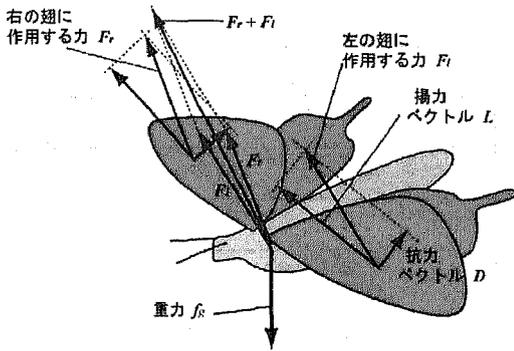


図10 蝶に作用する力
Fig. 10 Forces acted on a butterfly.

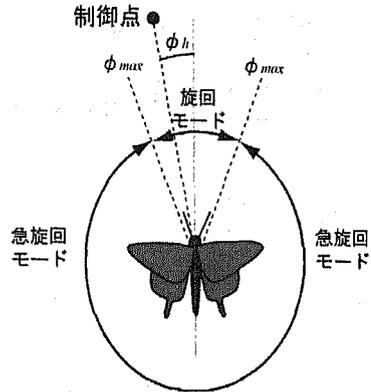


図11 旋回運動の行動パターン
Fig. 11 Patterns of turning motion.

3.2.3 蝶の運動方程式

上述のはばたきによる力を適用して飛翔のシミュレーションを行うためには、3次元空間の位置座標を求めなければならない。ここで、蝶の運動方程式は次式で表される。

$$f(t) = M \cdot a(t) \tag{6}$$

ここで、

M : 蝶の質量

$f(t)$: 時刻 t における蝶に作用する力のベクトル

$a(t)$: 時刻 t における蝶の加速度ベクトル

$v(t)$: 時刻 t における蝶の移動速度ベクトル

$p(t)$: 時刻 t における蝶の位置座標ベクトル

である。

蝶に作用する力 $f(t)$ は、図10に示すようにすべて蝶の重心にかかるものとし、次式で表す。

$$f(t) = F_r(t) + F_l(t) + f_g \tag{7}$$

ここで、

$F_r(t)$: 時刻 t における右翅に作用する揚力と抗力の合力ベクトル

$F_l(t)$: 時刻 t における左翅に作用する揚力と抗力の合力ベクトル

f_g : 重力

である。

なお、本モデルでは胴体にかかる空気抵抗や浮力は、翅による力に比べて十分に小さいと考え考慮しないものとした。式(6)はオイラー法による差分方程式、

$$v(t + \Delta t) = v(t) + f(t) / M \cdot \Delta t \tag{8}$$

$$p(t + \Delta t) = p(t) + v(t) \cdot \Delta t \tag{9}$$

によりシミュレーションする。

4. 蝶の行動制御モデル

ここでは、3章で示したモデルによって飛翔する蝶を、実際の蝶のように自由に行動させるための簡便な

行動制御法について示す。

4.1 飛翔経路の制御法

3次元空間を自由に飛翔させるためには、蝶の飛翔方向の制御が必要となる。本手法では、飛翔経路上に目標点(制御点と呼ぶことにする)を任意に配置し、これらを順に通るように、側面方向の“旋回運動”と上下方向の“高度調整”によって方向制御を行う。なお、制御点はある半径を持つ球体とし、その内部に蝶が入ったとき制御点に達したものと見なす。

旋回運動は、蝶の頭の向きを表す方向ベクトルの水平成分と、蝶から制御点へのベクトル(相対位置ベクトル)の水平成分のなす角 ϕ_h によって“旋回”と“急旋回”の2つのモードに分ける。ここで、 ϕ_h が調整限界角度 ϕ_{max} より小さければ旋回モードとし、大きければ急旋回モードとする(図11参照)。

旋回モードでは、旋回回転速度を設定し、この速度で制御点の方向に頭部を向けるようにするが、急旋回モードでは2章の(2)で述べたように、1回の翅の打ち下ろしの間に制御点の方向に頭部を向ける。

高度調整では、はばたきのフラッピング角と振動数を制御し、さらに頭部を、制御点が蝶の高度より上であれば上げ、下であれば下げる。このときの角度をオフセット角と呼ぶことにする。なお、ピッチングの動作はこのオフセット角を基準として行われる(図12参照)。

高度調整は、図13に示すように、蝶の位置から制御点を見たときの角度 ψ_u によって、“巡航”、“上昇”、“降下”、“急降下”の4モードに分けて行う。ここで、 ψ_{up} , ψ_{down} , ψ_{drop} はそれぞれモードの切り替え角度であり、 ψ_u が $+90 \text{ deg}$ と ψ_{up} の間であれば上昇モード、 ψ_{up} と ψ_{down} の間であれば巡航モード、 ψ_{down} と ψ_{drop} の間であれば降下モード、 ψ_{drop} と -90 deg の

間であれば急降下モードである。

各モードでは次のような調整を行う。なお、フラッピングの振幅を最大（最大フラッピング角）にしたときの上フラッピング角を up_{max} deg, 下フラッピング角を $down_{max}$ deg とし、フラッピングの振幅を最小（最小フラッピング角）にしたときの、上フラッピング角を up_{min} deg, 下フラッピング角を $down_{min}$ deg とする。また、はばたきの最高振動数を $freq_{max}$ Hz, 最小振動数を $freq_{min}$ Hz とする。

巡航モード：はばたきの振幅、すなわち上フラッピング角 up deg と下フラッピング角 $down$ deg は次式で与える。

$$up, down = up_{min}, down_{min} + (up_{max}, down_{max} - up_{min}, down_{min}) \cdot \frac{(\psi_v - \psi_{down})}{(\psi_{up} - \psi_{down})} \quad (10)$$

はばたき振動数 $freq$ Hz は次式で与える。

$$freq = freq_{min} + (freq_{max} - freq_{min}) \cdot \frac{(\psi_v - \psi_{down})}{(\psi_{up} - \psi_{down})} \quad (11)$$

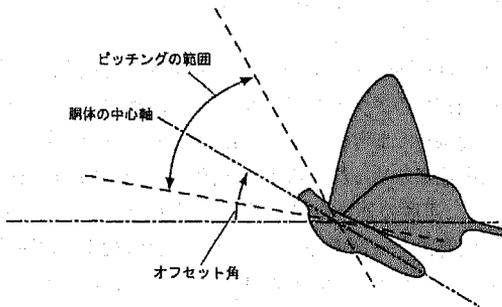


図 12 オフセット角
Fig. 12 Offset angle.

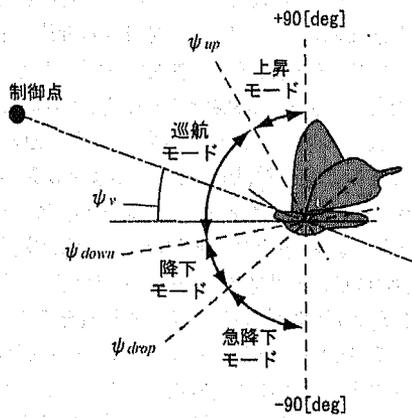


図 13 高度調整モード
Fig. 13 Modes of altitude control.

また、オフセット角 ψ_{offset} deg は次式で与える。

$$\psi_{offset} = k_{offset} \cdot \psi_v \quad (12)$$

ここで、

k_{offset} : オフセット角調整係数 (0~1)

であり、制御点に向かって頭部を上げ下げする程度を表す。

上昇モード：最大フラッピングと最高振動数ではばたき。オフセット角は次式で与えられる。

$$\psi_{offset} = k_{offset} \cdot \psi_{up} \quad (13)$$

降下モード：最小フラッピングと最低振動数ではばたき。オフセット角は次式で与えられる。

$$\psi_{offset} = k_{offset} \cdot \psi_{down} \quad (14)$$

急降下モード：翅を up_{max} まで打ち上げて静止状態（はばたき振動数 0）にし、オフセット角は降下モードと等しくする。なお、このモードは、2 章の (1) で述べた翻翔型で比較的小型の蝶が瞬間的に急降下する行動の表現のために設けたものである。

この他、滑翔型の飛翔形態の表現のため、滑翔型の蝶の場合は巡航モードにおいて進行速度が決められた上限速度（目標上限速度）を超えた場合、翅を水平に固定し、滑空状態に入るようにした。滑空状態のとき、決められた下限速度（目標下限速度）より遅くなるか、降下モードに移行した場合に、はばたきを再開するようにしている。

5. シミュレーション結果

蝶のシミュレーションは SGI OCTANE R10000 (175 MHz RAM384 MB) を使用し、 Δt を 1/12000 sec として蝶の位置座標や翅、胴体の角度を計算した。これらから実時間表示のためフレームを間引きし、ポリゴンで生成した蝶を OpenGL で表示してアニメーションを作成した。

蝶の動作として本モデルではフラッピング、フェザリング、ピッチングを仮定している。これらの効果を見るために、フェザリングがない場合とある場合、ピッチングがない場合とある場合について実験した結果を表 1 に示す。なお、蝶のパラメータは表 2 のアゲハ

表 1 蝶の動作比較

Table 1 Effects of feathering and pitching motion.

フェザリング [deg]	ピッチング [deg]	速度 [cm/s]		
		1 秒後	10 秒後	60 秒後
なし	なし	0	0	0
なし	+10, -10	10	10	15
+20, -20	なし	10	360	360
+20, -20	+10, -10	10	360	400

表2 飛行シミュレーションのパラメータ
Table 2 Parameters for flight simulation.

	アゲハ	モンシロ	ルリタテハ	イチモンジセセリ
飛行の型	翻翔型	翻翔型	滑翔型	躍翔型
体重 [g]	0.319	0.024	0.187	0.031
翅の面積 (片面) [cm ²]	13.75	8.25	6.5	1.5
翅の幅 [cm ²]	5.5	2.8	3.0	2.0
翅形状係数	0.58	0.54	1.07	0.69
ピッチング角 [deg]	+30, -20	+30, -20	+10, -10	+40, -20
オフセット角調整係数	1.0	0.5	1.0	0.7
旋回回転速度 [rps]	166	83	166	249
ϕ_{\max} [deg]	30	30	10	10
最大フラッピング角 [deg]	+90, -75	+90, -80	+90, -45	+80, -45
最小フラッピング角 [deg]	+5, -5	+50, -40	+45, -10	+60, -20
フェザリング角 [deg]	+20, -5	+30, -20	+30, -30	+20, -20
翅の最大, 最小振動数 [Hz]	15, 7	22, 15	25, 20	35, 31
目標上限, 下限速度 [cm/s]	-	-	350, 200	-
制御点の半径 [cm]	1.0	1.0	5.0	5.0
ψ_{up} [deg]	+60	+60	+45	+45
ψ_{down} [deg]	-80	-25	0	-22.5
ψ_{drop} [deg]	-	-60	-	-

と同じ値を用いた。

これより、フェザリングなしでは前進できないことが分かる。フェザリングさせた状態でピッチングがある場合とない場合では、ピッチングさせない場合が60秒後に秒速360 cmであるのに対して、ピッチングさせた場合は秒速400 cmに達する。蝶の飛行ではピッチングは前進速度を上げる効果があるようである。また、飛行のアニメーションを観察すると、ピッチングがない場合よりあった場合の方がひらひらとした飛び方となり、より蝶らしく感じられる。なお、実際のアゲハの平均的な飛行速度は秒速300~400 cm程度である。

次に、飛行形態の異なる数種類の蝶について表2のパラメータで飛行シミュレーションを行いアニメーション表示させた。蝶1匹のみではあるが約28フレーム毎秒のフレームレートでリアルタイム表示させることができた。この蝶のアニメーション結果より、約1~2秒間隔で蝶を表示し、移動軌跡を波線で示したものを図14に示す。

翻翔型のアゲハは、胴体の重心が翅の移動方向と逆に上下する様子が表現されている。また、同じ翻翔型のモンシロはアゲハより体重が軽いため、より大きい上下動を示しているが、このことは著者らが実際の蝶をビデオ撮影して観察した結果と一致する。また、モンシロでは制御点AとBの間で、翅を上げて急降下する様子も表現されている。滑翔型のルリタテハは、はばたきと滑空を交互に繰り返す様子が表現されている。躍翔型のイチモンジセセリは、重心をほとんど上下させずまっすぐ飛行するなど、図2に示した実際の

蝶の飛行形態の特徴を表している。

図15に制御点を8個配置して蝶の行動制御シミュレーションを行った例を示す。飛行形態の例を示した図14は、図15の一部を視点を変えて拡大表示したものであり、蝶の飛行形態を保ったまま行動制御が可能であることが分かる。

蝶の行動制御シミュレーションの結果、速度の比較的遅い翻翔型のアゲハやモンシロでは、制御点をほぼ正確に通過しており、制御点の配置により思いどおりの経路を飛行させられることを確認した(図15(a), (b)参照)。速度の速いルリタテハとイチモンジセセリでは、制御点を一度で通過できない場合が起こり、同じ制御点に対して数回やり直す行動が見られたため、アゲハなどに比べて制御点を大きくしている(図15(c), (d)参照)。また、慣性の影響で経路が大きく外側に膨らんでしまう例も見られた。このため、意図したとおり蝶を飛行させるためには、制御点の近傍で飛行速度を低下させる速度制御や、慣性の影響を考慮した制御点の配置法の検討が必要であると考えられる。

なお、表2のパラメータのうち、体重、翅の面積、翅の幅は実際に蝶を採取し実測した値である。また、最大フラッピング角、最小フラッピング角、ピッチング角、フェザリング角翅の振動数については、文献(12), (13)を参考にし、一部は市販の蝶のビデオ¹¹⁾と著者らが撮影したビデオ映像から目測により値を定めた。その他のパラメータは飛行シミュレーションを行い微調整を繰り返すことにより定めた。

パラメータの微調整は飛行維持のためには主に翅形状係数とオフセット角調整係数を変更し、それでも不

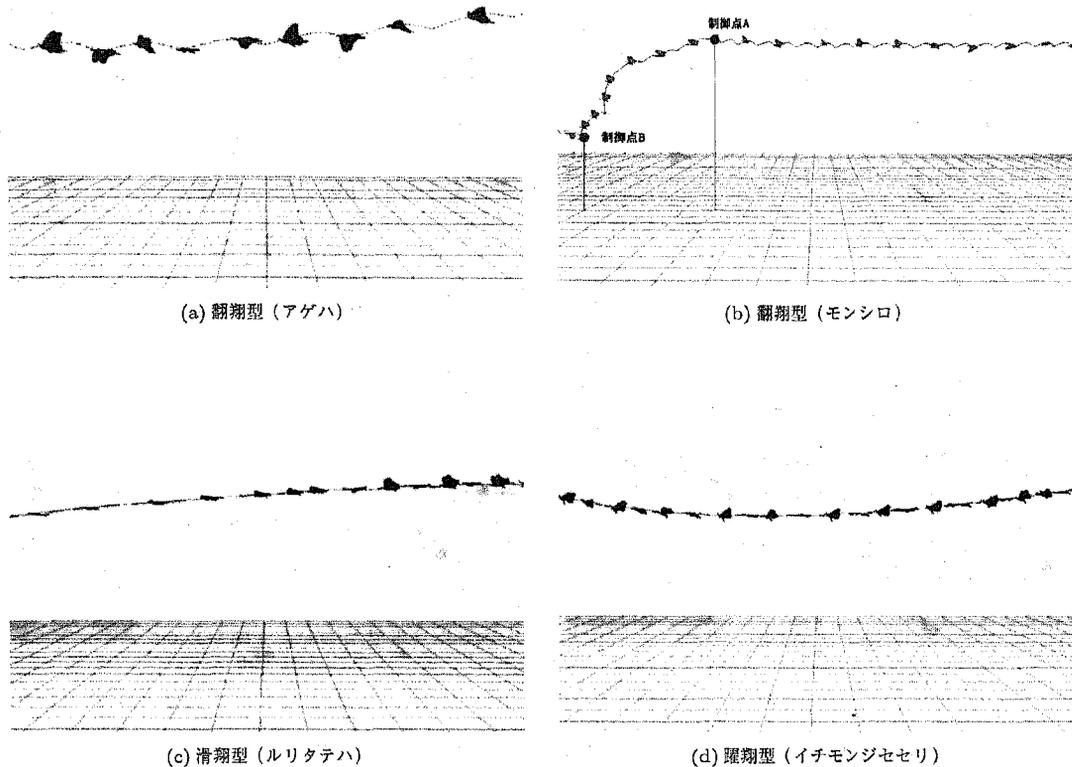


図 14 飛翔のシミュレーション
Fig. 14 Simulation of flight.

十分な場合ははばたき振動数やフラッピング角などのパラメータを小幅に変更した。翅形状係数は小か飛翔を維持できるぎりぎりの値では墜落してしまうか上昇できなくなる。反対に大では翅のはばたきによる上下動が激しくなって不自然に感じられるようになり、滑翔型の蝶では滑空の際に上昇する現象が現れてくる。オフセット角調整係数は、ピッチングのオフセット角を調整する係数であり、この値が大では翅はばたきによる力は上後方を向き、小では前方を向くようになる。オフセット角調整係数が最適な値より大では後進してしまい、小では上向き力が弱くなって上昇できなくなる。行動制御では主に旋回回転速度や ϕ_{max} 、 ψ の角度を調整した。旋回回転速度は遅くすると制御点を通過できなくなり、速くすると機敏すぎて蝶らしく感じられなくなる。また ϕ_{max} が小ではつねに急旋回モードとなり、大では目標点を通過できず制御点のまわりを旋回するようになる。 ψ は巡航モードの範囲を広くすると目標点の近くで急に上昇や下降するように

なり、逆に狭くすると上昇モードと下降モードを繰り返すため高度が安定しなくなる。

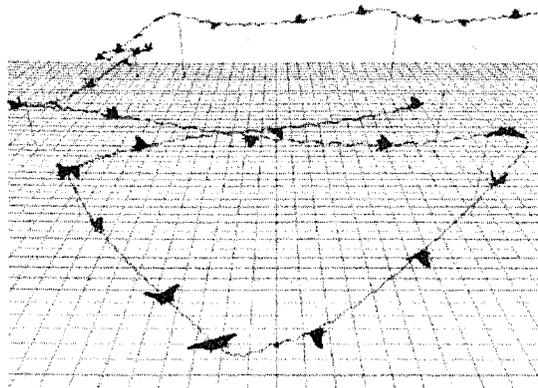
これらのパラメータの調整はかなり微妙で、蝶の種類によっては十数回から数十回ものシミュレーションを必要とした。このため、パラメータの自動設定法の検討も必要である。

6. むすび

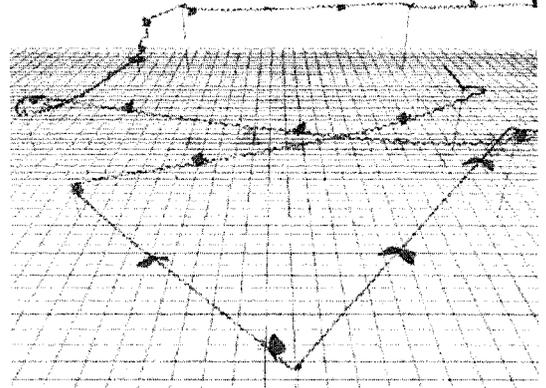
本報告では、はばたきによって得られる力によって飛翔する蝶のモデルと、蝶を行動させるための簡便な行動制御法を提案し、シミュレーション例により、その効果を示した。

提案手法により、蝶の典型的な飛翔形態を表現することができ、与えられた制御点を通過するように、その飛翔を制御することができる。また、蝶 1 匹のみではあるがリアルタイム表示が可能である。

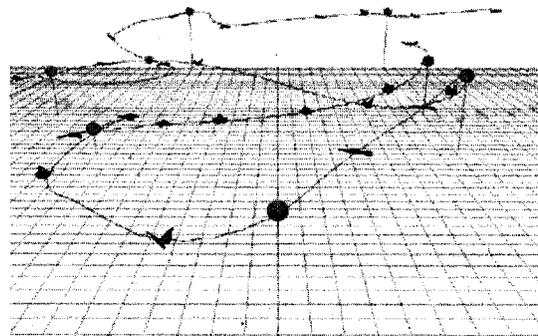
今後の課題としては、試行錯誤により行っているパラメータ調整の自動化があげられる。また、速度の速



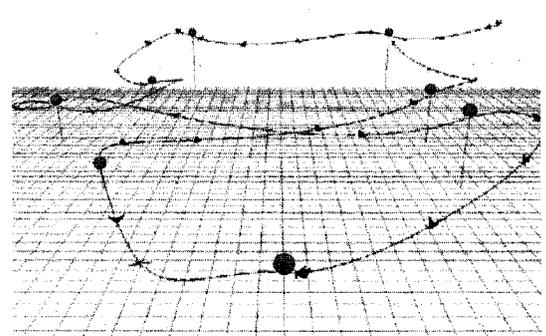
(a) 翻翔型 (アゲハ)



(b) 翻翔型 (モンシロ)



(c) 滑翔型 (ルリタテハ)



(d) 躍翔型 (イチモンジセリ)

図 15 行動制御シミュレーション

Fig. 15 Simulation of behavior control.

い蝶では慣性の影響で飛翔経路が外側に膨らむ場合があるので、制御点近傍での速度制御や、慣性の影響を考慮した制御点の配置法、さらに、吸蜜のための花への接触や障害物の回避、仲間どうしの乱舞などのための制御点の配置法の検討が必要である。

謝辞 熱心にご討論していただき、貴重なご意見をいただきました東北工業大学通信工学科播摩敏雄主任技師に感謝します。

参考文献

- 1) Tu, X. and Terzopoulos, D.: Artificial Fishes: Physics, Locomotion, Perception, Behavior, *SIGGRAPH '94, COMPUTER GRAPHICS Proc. Annual Conferences Series*, pp.43-50 (1994).
- 2) 河村貴弘, 土肥 浩, 石塚 満: NURBS, 逆運動学, 協調的運動モデルによる自然観の高い魚の実時間 CG 動画生成, *テレビジョン学会誌*, Vol.49, No.10, pp.1296-1304 (1995).
- 3) 真鍋高英, 播摩敏雄, 安斎祐一, 齊藤伸自, 千葉則茂: 振動翼理論に基づく仮想錦鯉の運動シミュレーション, *映像情報メディア学会論文誌*, Vol.52, No.9, pp.1374-1378 (1998).
- 4) Grzeszczuk, R., Terzopoulos, D. and Hinton, G.: NeuroAnimator: Fast Neural Network Emulation and Control of Physics-Based Models, *SIGGRAPH '98*, pp.9-20 (1998).
- 5) Dai, W.-K., Chang, R.-C. and Shih, Z.-C.: Fractal pattern for a butterfly wing, *The Visual Computer*, No.11, pp.177-187 (1995).
- 6) 雨川浩之, 武内良三: コンピュータアニメーションにおける行動制御の一手法, 第 4 回 NICOGRAPH 論文集, pp.98-103 (1988).
- 7) 群をなして飛ぶ蝶をパソコンで制作する, *日経 CG*, No.12 (1996).
- 8) 深井武司: 飛翔性の表示について, *昆虫世界*, Vol.12, No.127 (1998).
- 9) 五十嵐邁: 蝶の飛翔に関する考察 (浮力と前進力は如何にして生ずるか), *新昆虫*, Vol.10, No.4, 北隆館 (1957).

- 10) 日高敏隆, 藤井 恒, 海野和男, 今森光彦: フィールド図鑑 チョウ, 東海大学出版会 (1984).
- 11) 栗林 慧: 講談社ビデオ 昆虫大図鑑 全5巻, 講談社 (1997).
- 12) アンドレイ.K. プロドスキイ: 昆虫飛翔のメカニズムと進化, 築地書館 (1997).
- 13) 東 昭: 生物・その素晴らしい動き, 共立出版 (1986).
- 14) 東 昭: 機械工学選書 航空工学 (I)—航空流体力学, 裳華房 (1989).
- 15) 亀谷 敬, 金田智之, 下山 勲, 三浦宏文: 蝶を規範とした飛行ロボットの研究, 第13回日本ロボット学会学術講演会, 5A2-4-3 (1995).

(平成 11 年 9 月 13 日受付)

(平成 11 年 11 月 4 日採録)



安斎 祐一 (正会員)

平成 7 年東北工業大学大学院工学研究科通信工学専攻修士課程修了。平成 11 年岩手大学大学院工学研究科研究生。コンピュータグラフィックスに関する研究に従事。



村岡 一信 (正会員)

昭和 51 年東北工業大学電子工学科卒業。同年同大学研究生。昭和 52 年仙台電子専門学校教諭。平成元年岩手県立大学盛岡短期大学部助教授。平成 11 年岩手大学工学部助教授。コンピュータグラフィックスに関する研究に従事



千葉 則茂 (正会員)

昭和 59 年東北大学大学院博士課程修了。同年同大学助手。昭和 61 年仙台電波高等専門学校助教授。昭和 62 年岩手大学工学部助教授。平成 3 年同教授。工学博士。アルゴリズム, コンピュータグラフィックスの研究に従事。



齊藤 伸自 (正会員)

昭和 26 年東北大学工学部電気工学科卒業。昭和 43 年同大学工学部教授。平成 4 年東北工業大学通信工学科教授。工学博士。主としてコンピュータグラフィックスに関する研究に従事。