

空気力学に基づくトンボのビジュアルシミュレーション

朱 朝江 村岡 一信 水野 尚
東北工業大学

概要 トンボは季節を感じさせる身近な存在の一つであり、コンピュータグラフィックスによるトンボの表現は、景観シミュレーションやバーチャルリアリティなどの季節感を向上させる要素として期待できる。本論文では、空気力学に基づくトンボの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を考慮してトンボをリアルタイムで飛翔させる。トンボの飛翔の特徴である急上昇、急停止、ホバリング、急旋回などを行うことができ、さらに、空間に制御点を配置することでトンボの飛翔経路を容易に定めることができる。
キーワード：リアルタイム、アニメーション、はばたき、昆虫、空気力学

Visual Simulation of Dragonflies Based on Aerodynamics

Chaojiang Zhu Kazunobu Muraoka Hisashi Mizuno
zhucj@smail.tohtech.ac.jp muraoka@tohtech.ac.jp hmizuno@tohtech.ac.jp
Tohoku Institute of Technology

Abstract: A dragonfly is a familiar insect by which the sense of season can be shown. The expression of a dragonfly by CG can be expected as an element improving the sense of season in landscape simulation, virtual reality, etc. This paper proposes the flight model of a dragonfly based on aerodynamics. In this model, a dragonfly can be made to fly in real time considering the force caused by the flapping of the wings, performing flight characteristics including steep rise, sudden stop, hover and rapid turn. Furthermore, the flight route of a dragonfly can be easily established depending on the control-points placed in the space.

Keywords: real-time, animation, flapping flight, insect, aerodynamics

1. はじめに

バーチャルリアリティ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)による自然物や自然現象のリアルな表現が期待されている。本論文では昆虫のトンボを取り上げ、そ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を提案する。

飛翔する昆虫のCGに関するこれまでの研究には、雨川ら[1]による魅力の場による蝶の飛翔に関する研究や、安齋ら[2]による蝶の飛翔モデルがあるが、トンボについての研究は見当たらない。

飛翔生物のCGには、はばたきによる力を考慮しないもの[1,3]と考慮したもの[2,4,5]とがある。前者は計算量は少ないが、はばたきと胴体の移動との間に因果関係がなく、はばたきの動作を注意深く設計しなければ不自然となる。後者は、計算量は増加す

るが、はばたきと胴体の移動との関係はより自然となる。

このため、本手法では後者の立場をとる。はばたきの力を考慮したB.Ramakrishnanandaら[5]の鳥のモデルでは、胴体のピッチング運動を翼の動作から求めているが、前進しか考慮されておらず、左右へ旋回することができない。一方、筆者らの一部が提案した蝶のモデル[2]や鳥のモデル[4]では左右への旋回が行え、制御点によって飛翔経路を制御することができる。本手法では、蝶のモデルで用いた手法をトンボへ拡張する。蝶のモデルでは前翅と後翅を1枚の翅で近似しているため、トンボのように前翅と後翅が独立して動作する飛翔昆虫は表現することができない。また、飛翔制御では、イチモンジセセリなど、やや飛翔速度が速い蝶では制御点を一度で通過できない場合があるという問題があった。ト

ンボは昆虫の中でも飛翔能力が高いことで知られ、高速な直線飛翔や急降下、急上昇、急停止やホバリングなど蝶より複雑な飛翔が行える。このため、本論文では、トンボの表現に向けた飛翔モデルと飛翔経路制御の拡張法について示す。なお、本手法はトンボのリアルタイムCGを目的としており、翅の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。

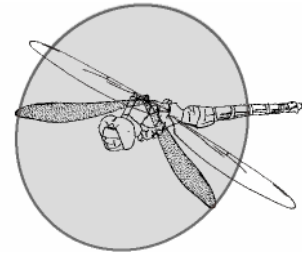


図2 ストローク面

2. 実際のトンボの特徴

ここでは、表現対象である実際のトンボについて、文献[6,7,8,9,10,11,12,13]よりまとめる。

2.1 トンボのはばたき機構

図1はトンボと蜂のはばたき機構を示したものである。多くの昆虫は(b)のように“間接筋”によるはばたき機構であり、翅はてこのように側板の支点に支えられ、根元の柄が脊板に連結されている。そのため左右前後の翅は同時にはばたく。トンボは(a)のように“直接筋”によるはばたき機構であり、翅の根元にてこの柄部分が、支点の両側でそれぞれ直接打ち上げ打ち下ろし用の筋肉に連結されている。そのため4枚の翅をそれぞれ独立してはばたかせることができ、飛翔能力は高い。

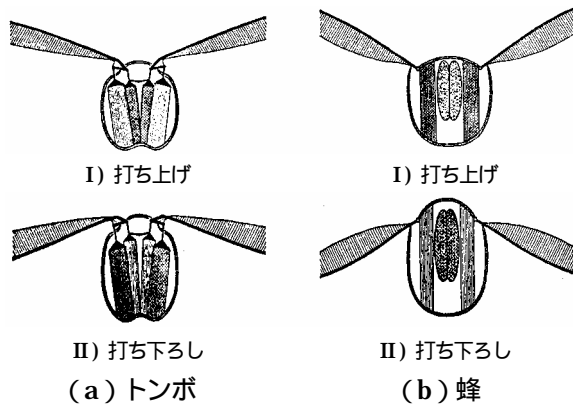


図1 昆虫のはばたき機構[8]

2.2 トンボの翅の動作と飛翔の特徴

トンボは翅を上下にはばたかせるフラッピング運動、翅の前縁を回転軸として、翅の後縁を上下させるフェザリング運動、ストローク面の角度を変化させる運動(ストローク運動と呼ぶことにする)を行っている。ストローク面とは、図2に示すように翅の先端の移動軌跡が乗る面のことである。トンボは翅の付け根の部分回転させてストローク面を傾け、推力の方向を変えることで、急停止、急旋回、ホバリングなどの複雑な飛翔を行える。

2.3 トンボの飛翔の特徴

図3に示すように、蝶などの昆虫が前後の翅を同時にはばたかせるため、胴体が上下動するのに対し、トンボは前と後の翅を互い違いに動作させるため胴体の上下動は少ない。これにより直線的で高速な飛翔が行える。また、市販のトンボに関するビデオや著者らの観察では、直線的に飛翔する距離はあまり長くない、頻りに方向を変えるようすが見られた。

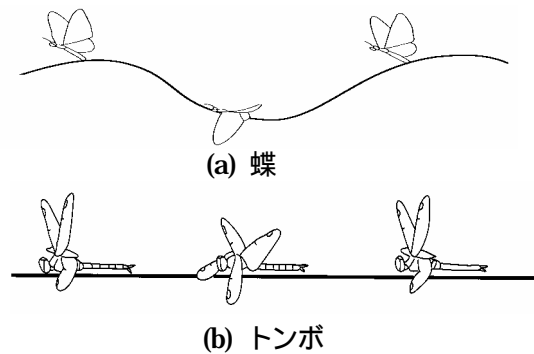


図3 蝶とトンボの飛翔の比較[6]

2.4 トンボの止まり方の特徴

トンボはいったん飛び出すとあまり止まらない「飛翔型」と、止まっている比率の高い「静止型」の二つに分けられる。トンボが止まるとき、飛翔型は枝先などを掴んでぶら下がって止まる「ぶら下がり型」が多く、静止型は地面にうつぶせに止まる「うつぶせ型」が多い(図4参照)。いずれのトンボも、夜間眠る時はぶら下がり型である。

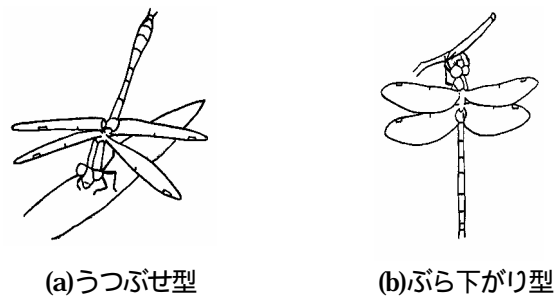


図4 トンボの止まり[6]

3. トンボの飛翔モデル

ここでは、2.で示したトンボの飛翔の特徴を表現するための飛翔モデルを示す。

3.1 基本的な飛翔モデル

ここで、文献[2]の翅のはばたきによる力を求めるモデルを簡単に示す。翅は一枚の薄い板であると仮定し、その板に当たる空気の流れをベクトル V_r で表す。翅には揚力 L と抗力 D が働き、翅に作用する力 F は次式で表される (図5 参照)。

$$F = L + D \quad (1)$$

揚力 L と抗力 D の大きさは次式で求められる[4]。

$$L = \frac{1}{2} \rho V_r^2 S C_l(\alpha) \quad (2)$$

$$D = \frac{1}{2} \rho V_r^2 S C_d(\alpha) \quad (3)$$

ここで、

- : 空気密度, S : 翅の面積
- V_r : 翅に対する空気流の相対速度 $|V_r|$
- : 空気力学的迎角
- C_l : の関数で表された揚力係数
- C_d : の関数で表された抗力係数

である。空気力学的迎角 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。

なお、本論文では C_l, C_d の関数として文献[7]を参考に、図6 に示す関数を仮定した。

翅は、翅の付け根を通り、前後方向へ延びる軸を回転軸としたフラッピング運動 (図7(a)) と、翅の

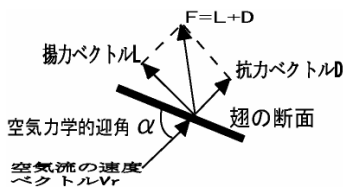


図5 翅に作用する力

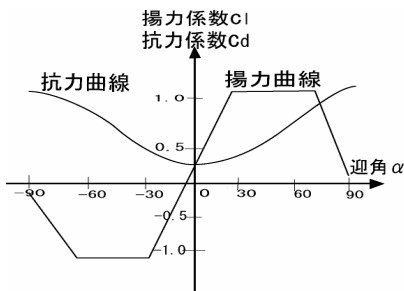


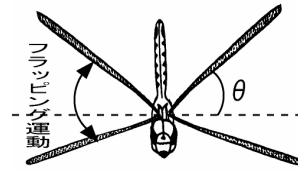
図6 揚力抗力特性関数

前縁に平行な直線を回転軸とするフェザリング運動 (図7(b)) を行う。

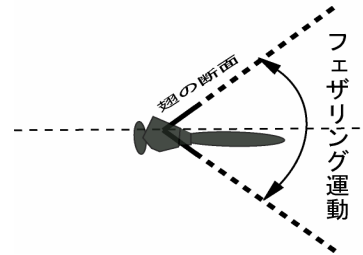
図8 に、本手法で用いたフラッピング角およびフェザリング角のはばたき1周期分のグラフを示す。これらは、文献[7]の測定データを参考にして定めた。

トンボが速度ベクトル V で飛び、翅のはばたき速度ベクトルが V_w のとき相対空気流ベクトル V_r は次式で表される (図9 参照)。

$$V_r = -(V + V_w) \quad (4)$$

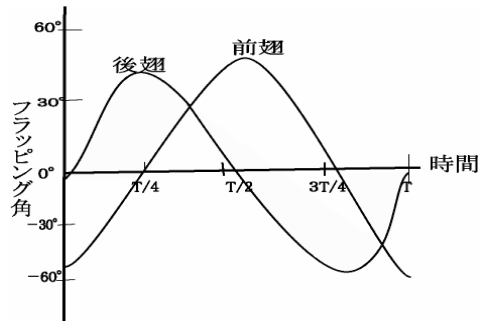


(a) フラッピング運動

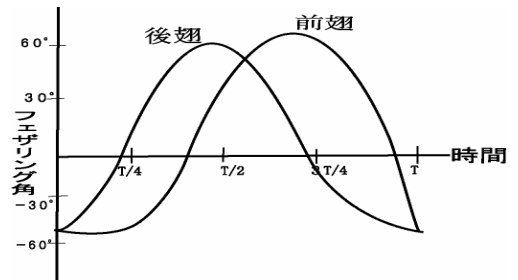


(b) フェザリング運動

図7 翅の基本的な運動



(a) フラッピング



(b) フェザリング

図8 一周期分のフラッピングとフェザリング角

翅の速度ベクトル V_w は運動の軌跡の接線方向を向くベクトルであるため、翅全体に作用する力は図 10(a) に示すように翅の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が、計算量削減の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(図 10(b) 参照)。

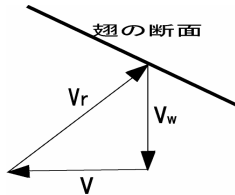
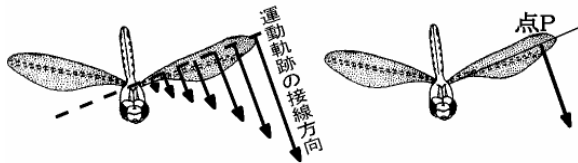


図 9 翅に対する空気流の相対速度



(a) 翅に作用する力の分布 (b) 平均と同じ力の点 P

図 10 翅に作用する力の近似

3.2 翅の動作

トンボの翅の動作は、3.1 で述べたフラッピング運動とフェザリング運動にストローク運動を加えた動作とする[7,15,16]。

翅がフラッピングするときのストローク面と体の長軸の間の角度をストローク面角度と呼ぶことにする(図 11 参照)。ストローク運動はストローク面角度を変更する動作である。

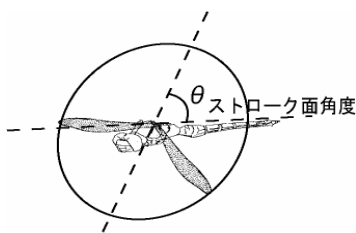


図 11 ストローク面角度の制御

3.3 前翅の後翅への影響の考慮

3.1 のモデルでは、翅と翅との相互作用などが考慮されていないため、はばたきによる力が不足する[8,15,16]。トンボでは前翅がつくる空気の流れ(誘導流)の中を後翅が通過することによる影響を考慮しなければならない(図 12 参照)。なお、後翅の誘

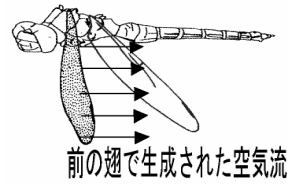


図 12 前翅の誘導流

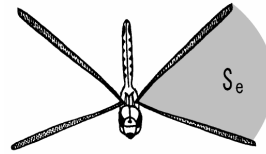


図 13 前翅のはばたきのストローク面の面積

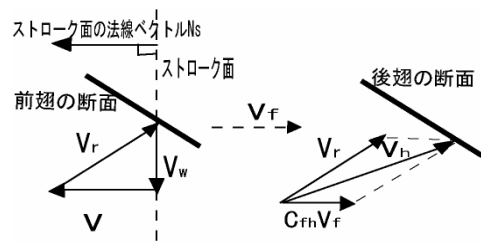


図 14 前翅の気流の影響を受ける後翅

導流の前翅への影響は小さいため[7]、本モデルでは前翅の誘導流のみを考慮する。

誘導流の計算には Azuma ら[7]が緩慢上昇するトンボの飛翔の解析に用いた運動量理論を用いる。文献[7,14]の運動量理論より、前翅がはばたくことによる誘導流の速度 V_f は式(5)で与えられる。ただし、流れの方向はストローク面に対して垂直と仮定する。

$$V_f = -\frac{V}{2} + \sqrt{\frac{T}{2\rho S_e} + \left(\frac{V}{2}\right)^2} \quad (5)$$

ここで、 S_e は前翅のはばたきのストローク面の面積(図 13 参照)、 V はトンボの速度、 T は前翅のはばたきによる推進力であり、次式で表される。

$$T = N_s \cdot F \quad (6)$$

ここで、“ \cdot ” は内積、 N_s はストローク面の法線ベクトル、 F は前翅がはばたくことにより得られる力のベクトルで式(1)で求められる。

後翅に対する相対的な空気流の速度ベクトル V_h は次式で求められるものとする。(図 14 参照)

$$V_h = V_r + C_{fh} V_f \quad (7)$$

ここで、 V_f は前翅のはばたきの誘導流の速度ベクトル、 C_{fh} は誘導流が後翅におよぼす影響の程度を示

し0~1である。

後翅の揚力と抗力は、 V_r を V_h として(2), (3)式で求められる。

4枚の翅によって得られた力は、簡単のためすべてトンボの重心に作用させるものとし、このとき、トンボの運動方程式は次式で表される。

$$F(t) = Ma(t) \quad (8)$$

$$F(t) = F_{fl}(t) + F_{fr}(t) + F_{hl}(t) + F_{hr}(t) + G \quad (9)$$

$$F_{fl}(t) = L_{fl}(t) + D_{fl}(t) \quad (10)$$

$$F_{fr}(t) = L_{fr}(t) + D_{fr}(t) \quad (11)$$

$$F_{hl}(t) = L_{hl}(t) + D_{hl}(t) \quad (12)$$

$$F_{hr}(t) = L_{hr}(t) + D_{hr}(t) \quad (13)$$

ここで、

- M : トンボの質量
- $F(t)$: 重心にかかる翅のはばたきによる力
- $F_{fl}(t)$: 左前翅に作用する力
- $F_{fr}(t)$: 右前翅に作用する力
- $F_{hl}(t)$: 左後翅に作用する力
- $F_{hr}(t)$: 右後翅に作用する力
- $L_{fl}(t)$: 左前翅に作用する揚力
- $L_{fr}(t)$: 右前翅に作用する揚力
- $L_{hl}(t)$: 左後翅に作用する揚力
- $L_{hr}(t)$: 右後翅に作用する揚力
- $D_{fl}(t)$: 左前翅に作用する抗力
- $D_{fr}(t)$: 右前翅に作用する抗力
- $D_{hl}(t)$: 左後翅に作用する抗力
- $D_{hr}(t)$: 右後翅に作用する抗力
- $a(t)$: 加速度ベクトル
- G : 重力
- t : 時刻

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(8)はオイラー法による差分方程式、

$$V(t+\Delta t) = V(t) + F(t)/M \Delta t \quad (14)$$

$$P(t+\Delta t) = P(t) + V(t) \Delta t \quad (15)$$

によりシミュレーションする。

ここで、

- $V(t)$: 速度ベクトル
- $P(t)$: 位置座標ベクトル

である。

4. トンボの飛翔制御法

蝶および鳥の飛翔制御に用いた手法[2,4]を 4.1 で説明し、次にトンボの飛翔制御のための拡張を示す。

4.1 制御点による制御法

空間に制御点を配置し、それを順に通過するように昆虫の進行方向と翅のはばたきを制御する。制御点への到達は、昆虫が制御点を中心とする一定半径 r_p の球体内に入ったときとする。

昆虫のローカル座標系と回転運動を図 15 に示す。x軸を回転軸とする回転運動をローリング、y軸を回転軸とする回転運動をヨーイング、z軸を回転軸とする回転運動をピッチングという。

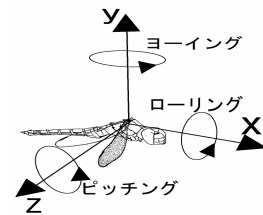
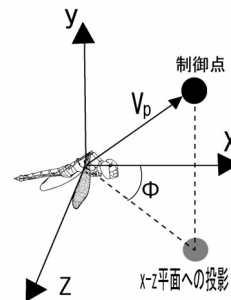
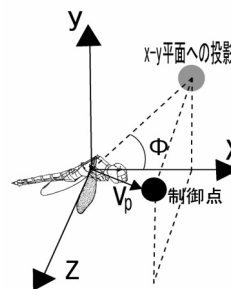


図 15 昆虫のローカル座標系と回転運動

昆虫の頭の向きを表す方向ベクトル(x軸に並行なベクトル)が制御点を向くように、昆虫の重心を中心として一定の回転速度でヨーイングとピッチングを同時に行う。ただし、トンボのピッチング角(トンボのx軸とワールド座標系の水平面とのなす角)には、頭部の上がりすぎ、下がりすぎを防ぐため制限を設けた(7.のシミュレーションでは $\pm 10^\circ$ とした)。



(a)ヨーイングの



(b)ピッチングの

図 16 回転運動の計算に用いる

ヨーイング、ピッチングの回転速度 は式(16)で定義される。

$$\omega = -\text{sgn}(\phi)R \quad (16)$$

ここで、 R は基準回転速度であり、 sgn は >0 のとき $+1$ 、 $=0$ のとき 0 、 <0 のとき -1 の値をとる関数である。また、ヨーイングのための ϕ は、トンボの x 軸とトンボから制御点へ向かうベクトル V_p を $x-z$ 平面へ投影したベクトルとのなす角、ピッチングのための θ は、トンボの x 軸と、ベクトル V_p を $x-y$ 平面へ投影したベクトルとのなす角である(図 16 参照)。

昆虫の高度が制御点より低い場合は、はばたき振動数を高くしてフラッピング角、フェザリング角を大きくし、高い場合は、はばたき振動数を低くしてフラッピング角、フェザリング角を小さくして高度を調整する。

はばたき振動数 f は次式によって調整する。

$$f(t+\Delta t) = \begin{cases} f_{\max} & f_{\max} < f(t) \\ f(t) + \text{sgn}(y_p - y_i) K_f \Delta t & f_{\min} \leq f(t) \leq f_{\max} \\ f_{\min} & f(t) < f_{\min} \end{cases} \quad (17)$$

ここで、 f_{\max} 、 f_{\min} はそれぞれ最大、最小振動数、 K_f は 1 秒間当たりの振動数変位量、 y_p 、 y_i はそれぞれ制御点と昆虫の y 座標値である。

はばたきのフラッピング角、フェザリング角の調整は、図 8 に示したフラッピング、フェザリングの角度に次式の amp を乗じることにより行う。

$$\text{amp}(t+\Delta t) = \begin{cases} 1 & 1 < \text{amp}(t) \\ \text{amp}(t) + \text{sgn}(y_p - y_i) K_a \Delta t & K_{\min} \leq \text{amp}(t) \leq 1 \\ K_{\min} & \text{amp}(t) < K_{\min} \end{cases} \quad (18)$$

ここで、 K_{\min} は下限値 ($0 < K_{\min} < 1$)、 K_a は 1 秒間当たりの変位量である。

4.2 バンクの導入

高速に飛翔するトンボでは 4.1 の制御法のみでは制御点へ接近できない場合がある。その原因の一つは左右への方向転換をヨーイングに頼ることによる横滑りである[14]。横滑りは左右へ胴体を傾けるバンクで防ぐことができる[4][14]。バンクは方向転換したい側の翅を下げるローリング運動である。なお、トンボが必要以上に傾かないようにバンク角

(トンボの z 軸とワールド座標系の水平面とのなす角)にも制限を設けた(7.のシミュレーションでは $\pm 24^\circ$ とした)。

ローリングの回転速度 ω_r を求めるための ϕ_r は、図 17 に示すように、トンボの z 軸と、ベクトル V_p を $y-z$ 平面へ投影したベクトルとのなす角である。

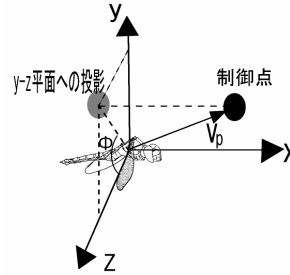


図 17 ローリングの計算に用いる

4.3 方向転換の回転速度に関する拡張

ヨーイングやピッチングの回転速度は一定であるため、制御点同士が近く、かつ、急な旋回が必要な場合、回転運動が間に合わない場合がある。

このため、本手法ではヨーイング、ピッチング、ローリングの回転速度 ω を式(19)で定義した。

$$\omega = -\text{sgn}(\phi) \left\{ R + \left| \frac{\phi}{\pi} \right|^n (R_{\max} - R) \right\} \quad (19)$$

ここで、 R_{\max} は最大回転速度、 n は調整用係数 ($n > 0$) である。方向転換の回転速度は ϕ が大きいほど速く小さいほど遅くなる。

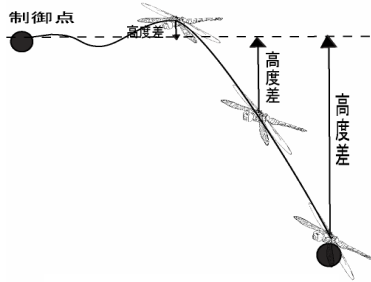
4.4 高度制御の拡張

4.1 では、はばたき振動数とフェザリング角、フラッピング角は、制御点とトンボの高度差によって調整しているため、高さの異なる制御点間の飛翔は図 18(a)のような経路を描いて飛ぶことになる。トンボは直線的に飛翔する性質があるため、2つの制御点を端点とする線分を考え、この線分とトンボとの高度を比較して高度調整することにした(図 18(b)参照)。

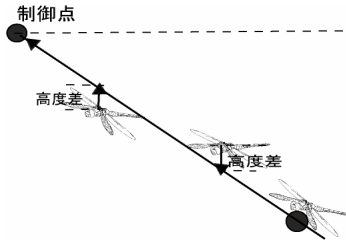
このため、式(17)、(18)の制御点の高度 y_p の代わりに次式の y_p' を用いる。

$$y_p' = y_p - (y_p - y_0) \frac{d_i}{d_p} \quad (20)$$

ここで、 y_0 は 1 つ前の制御点の高度、 d_p は、制御点から 1 つ前の制御点までの水平距離、 d_i は制御点からトンボまでの水平距離である(図 19 参照)。



(a) 従来の高度制御



(b) 直線飛行ための高度制御

図 18 高度制御法

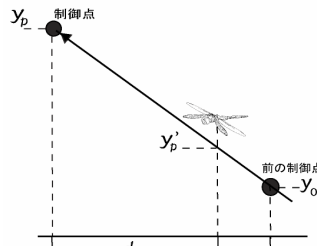


図 19 y_p' の計算法

4.5 ホバリングの拡張

4.1 では、はばたきながら空中の一点に静止するホバリングは考慮されていない。本手法ではホバリング専用の制御点(ホバリング制御点)を導入し、この制御点に接近したとき一定の時間ホバリングさせている。この制御ではホバリング制御点を中心とする一定半径 $r_h (> r_p)$ の球体内部にトンボが入ったとき、ストローク面を大きく傾けることで減速と空中静止を行う。ストローク面角度 θ は次式で計算する。

$$\theta(t+\Delta t) = \begin{cases} \theta_{\max} & \theta_{\max} < \theta(t) \\ \theta(t) + \text{sgn}(L(t+\Delta t) - L(t))K_s\Delta t & \theta_{\min} \leq \theta(t) \leq \theta_{\max} \\ \theta_{\min} & \theta(t) < \theta_{\min} \end{cases} \quad (21)$$

ここで、 L はトンボから制御点までの距離、 θ_{\min} 、 θ_{\max} はそれぞれストローク面角度の最小値と最大値、 K_s はストローク面角度の回転速度である。高度を維持するための、はばたき振動数とフラッ

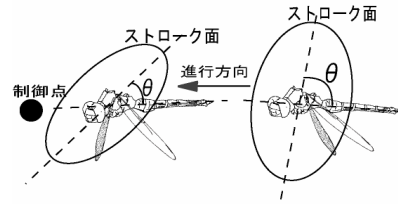


図 20 ホバリング制御

ピング角、フェザリング角の制御は式(17),(18)によって行う。

5. トンボの行動の表現

ここでは、巡航飛行と止まり方の表現法について示す。

5.1 巡航飛行

トンボは、摂餌やなわばり維持のための飛行を行う。これを巡航飛行と呼ぶことにする。巡航飛行ではトンボは頻繁に方向を変えているが、直線的な飛行は天敵に進路を予測されやすく、捕食される可能性が高くなるためではないかと思われる。また、トンボの視覚範囲に新たな目標を発見したとき、進行方向を変えるためとも考えられる。

4.で示した制御点による制御法では、制御点どうしが遠く離れていてもトンボはその間を直線的に飛行し、実際の飛行形態とは異なる。本手法では、より自然なトンボの飛行を実現するため、トンボが直線的に飛行する距離を数十センチ～数メートル程度に制限する。制御点間がこの距離より離れている場合は、図 21 に示すように副制御点を生成し、直線的に飛行する距離を抑える。

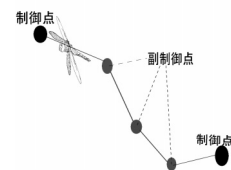


図 21 副制御点の生成

副制御点の生成は図 22 に示すように、まず、最初に出発点の制御点から目標点の制御点へ向かうベクトルを求め、そのベクトルを中心軸として高さ h 、頂角 2θ の円錐体の底面内に副制御点を1つ(副制御点1)発生させる。次に、副制御点1から目標点の制御点へ向かうベクトルを求め、同様の方法で副制御点2を求める。この操作を、最後に求めた副制御点と、目標点の制御点との距離が h 以下になるまで繰り返す。なお、 h および θ は式(22),(23)で求める。

$$h = (h_{\max} - h_{\min})rnd + h_{\min} \quad (22)$$

$$= (\max - \min)rnd + \min \quad (23)$$

ここで、 h_{\max} 、 h_{\min} および \max 、 \min はそれぞれ、 h の最大最小値、の最大最小値であり、 rnd は0~1の一様乱数である。

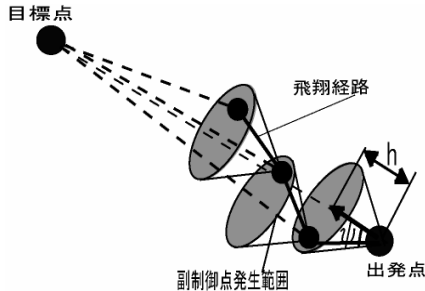


図22 副制御点の生成法

5.2 止まり方の表現

トンボの止まり方には「うつぶせ型」と「ぶら下がり型」の2つがある。うつぶせ型では、とまり先の上で減速してから降下して着地し、ぶら下がり型では、とまり先へ横から接近し、減速してから止まる。

4.の制御点による制御法では、真っ直ぐ制御点に到達するため、止まる場所の上や横から接近させることができない場合がある。このため、うつぶせ型では、図23(a)のように、止まり制御点の上に副制御点を1つ発生させ、止まり点の上の副制御点を通過してから止まり点に達するようにしている。止まり点では、ホバリングと同様のストローク面の制御(ただし、式(21)の L はトンボから制御点までの水平距離とする)を行いトンボの高度が止まり点の高度まで降下したとき停止させている。また、「ぶら下がり型」では、図23(b)のように、止まり制御点の手前に副制御点を1つ発生させ、この制御点を經由して、止まり点へ向かわせている。止まり点ではホバリングと同様の制御を行うが、式(21)の \min をホバリング時より大きく設定することで(空中静止することなく)ゆっくり止まり点へ接近させている。

6. 複数のトンボの飛翔

トンボごとに制御点列を与えることで、複数のトンボを同時に飛翔させることができる。このとき、トンボ同士が衝突しないようにBoid[3]で用いられたような衝突回避運動を行う。

図24では、注目するトンボが中心に位置しているものとしている。注目するトンボの半径 r の領域内

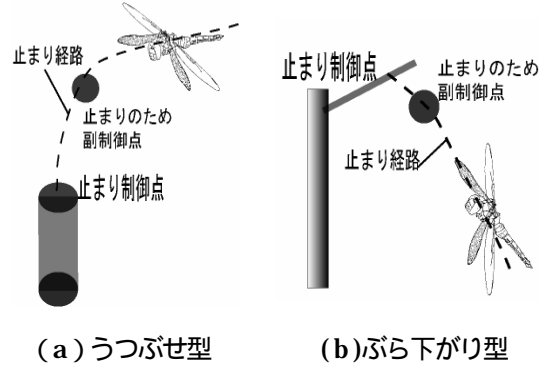


図23 止まり制御法

に他のトンボが入ってきたとき、中心のトンボから領域内のすべてのトンボへの相対ベクトル Q を求め、式(24)より衝突回避ベクトル V_{ca} を求める。

$$V_{ca} = - Q_i(1 - |Q_i|/r) \quad (24)$$

4.で述べたトンボから制御点へ向かうベクトルを V_p とすると、衝突回避を考慮した方向ベクトル V_p' を式(25)で求める。

$$V_p' = V_p + V_{ca} \quad (25)$$

V_p' を V_p の代わりに用いることによりトンボに回避行動を行わせる。なお、この制御によりトンボが制御点に到達できなくなる状況も考えられる。このため、制御点に到達するための試行回数を制限することにした。すなわち、指定された試行回数を超えた場合は、その制御点を飛ばして次の制御点へ向かわせている。

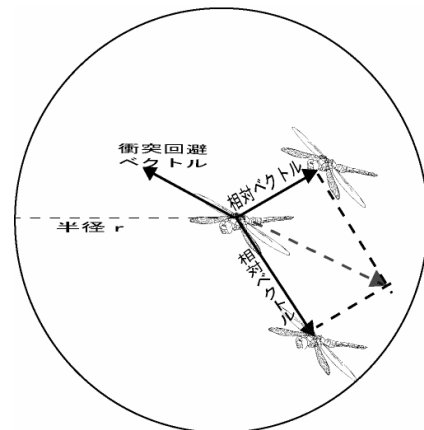


図24 衝突回避ベクトル

7. トンボの飛翔シミュレーション結果

SGI OCTANE2 (R12000 1.4GHz, RAM512MB)

を使用し、計算刻み幅を 1/12000 秒としてはばたきの力を計算した。表示には OpenGL を使用し、トンボ 1 匹の場合は毎秒約 70 フレームで表示することができた。なお、トンボの形状はミヤマアカネ（赤トンボの一種）を参考に定義した。

図 25 に制御点による飛翔経路の制御例を示す。図中の破線はトンボの飛翔経路を表し、球は制御点を表している。制御点間をまっすぐ飛翔していることがわかる。

図 26 は巡航飛翔の例である。図 25 とは異なり、制御点間をジグザグに進んでいることがわかる。

図 27 に止まりの例を示す。(a)はうつぶせ型、(b)はぶら下がり型の例である。うつぶせ型では上から、ぶら下がり型では横から接近しているようすがわかる。

図 28 に複数のトンボのシミュレーション例を示す。6 匹のトンボが衝突を回避しながら同時に飛翔している。図 29 に、背景に風景写真を貼り付けた動画の抜粋を示す。なお、止まりのシミュレーションと複数のトンボの飛翔の動画、およびホバリングのスローモーションを MPEG ファイルとして添付した。

8. むすび

空気力学に基づくトンボの飛翔モデルを提案した。本モデルでは翅のはばたきによる力を計算し、リアルタイムでトンボの飛翔を表現することができる。トンボの飛翔の特徴である急上昇、急停止、ホバリング、急旋回などの飛翔形態の表現が可能であり、トンボの飛翔経路を容易に設定することができる。

今後の課題としては、求愛行動やなわばり維持行動の表現、補食行動の表現法などの開発が挙げられる。また、仮想網によるトンボ捕獲のシミュレーション法の開発なども興味深い。

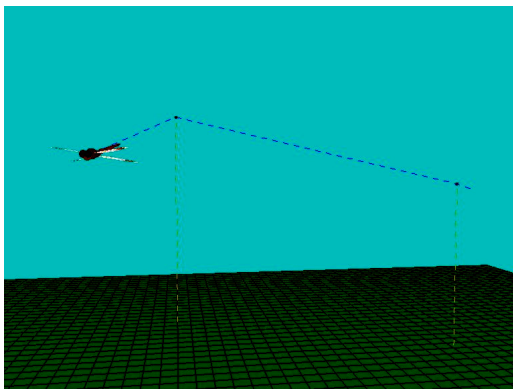


図 25 制御点による飛翔経路

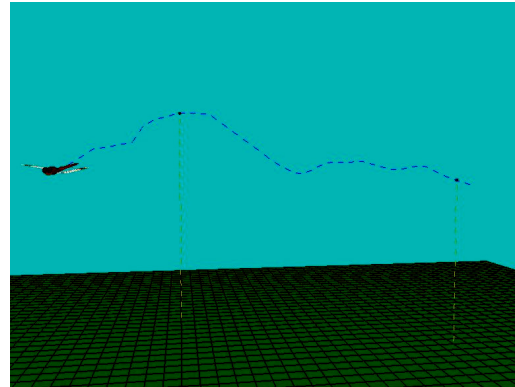
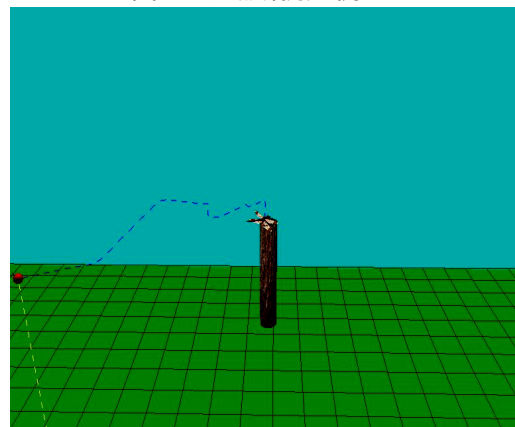
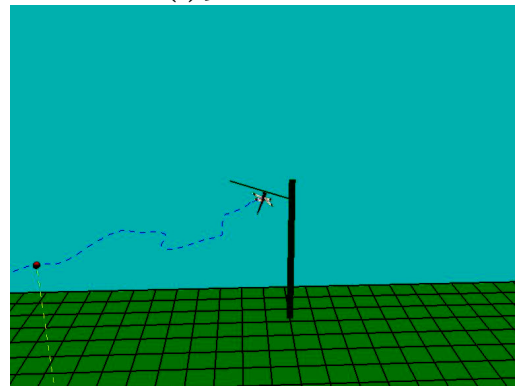


図 26 巡航飛翔の例



(a)うつぶせ型



(b)ぶら下がり型

図 27 止まりのシミュレーション

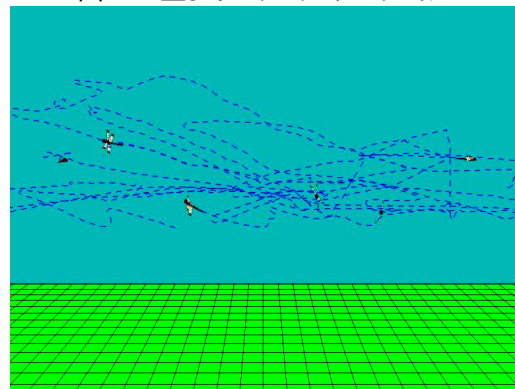


図 28 複数のトンボの飛翔シミュレーション



図 29 複数のトンボの飛翔の動画像の抜粋

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齋藤伸自名誉教授、ならびに岩手大学工学部千葉則茂教授に感謝いたします。また、本研究を開始するにあたり、ご助言いただきました有限会社ピー・ソフトハウスの安齋祐一氏に感謝いたします。

参考文献

- [1] 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).
- [2] 安齋祐一, 村岡一信, 千葉則茂, 齋藤伸自: 翅のはばたきによる力を考慮した蝶の飛翔モデル, 情報処理学会論文誌, Vol.41 No 3, pp. 658-667 (2000).
- [3] C.W.Reynolds:Flocks,Herds,and Schools:A Distributed Behavioral Model, SIGGRAPH,Vo21,Number4, pp. 25-34 (1987).
- [4] 曹 燦, 藤本忠博, 村岡一信, 千葉則茂: 鳥の飛翔のビジュアルシミュレーション, 第 17 回 NICOGRAPH 論文集, pp. 93-98 (2001).
- [5] B.Ramakrishnananda and K.C.Wong: Animating bird flight using aerodynamics, The Visual Computer,Vo15,Number10, pp. 494-508 (1999).
- [6] 井上清, 谷幸三: トンボのすべて, トンボ出版 (1999).
- [7] A.Azuma: FLIGHT MECHANICS OF A DRAGONFLY, J.exp.Biol.116, pp.79-107 (1985).
- [8] アンドレイ K.プロドスキー: 昆虫飛翔のメカニズムと進化, 築地書館 (1997).
- [9] 東 昭: 生物・その素晴らしい動き, 共立出版 (1986).
- [10] R.マクニール・アレクサンダー: 生物と運動 バイオメカニクスの探求, 日経サイエンス社 (1992).
- [11] 新井 裕: トンボの不思議, どうぶつ社 (2000).
- [12] 東 昭: 生物の動きの事典, 朝倉書店 (1997).
- [13] 学研の図鑑 昆虫 (1997).
- [14] 東 昭: 機械工学選書 航空工学 (I) - 航空流体力学, 裳華房 (1998).
- [15] M.Dickinson: 昆虫飛翔の空気力学, 日経サイエンス, pp. 46-54 (2001. 9).
- [16] 劉 浩, 河内啓二: 昆虫ホバリングに関する数値解析, 日本機械学会第74期全国大会講演論文集(I), pp. 231-232 (1996).