

空気力学に基づくトンボのCGシミュレーション

朱 朝江 村岡 一信 水野 尚

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。

CG Simulation of Dragonflies Based on Aerodynamics

Chaojiang Zhu, Kazunobu Muraoka and Hisashi Mizuno

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

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。

昆虫のCGに関するこれまでの研究には、雨川ら[10]による蝶の翅の飛翔に関する研究や、安齋ら[3]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[10,11]と考慮したもの[3,15,16]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[16]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[3]や鳥のモデル[15]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制御法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。

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[1, 2, 4, 5, 6, 9, 12, 14]よりまとめる。

2. 1 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1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。

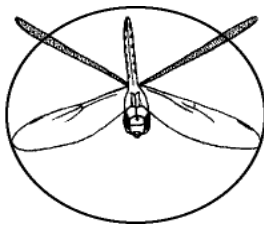


図1 ストローク面

2. 2 トンボの飛翔の特徴

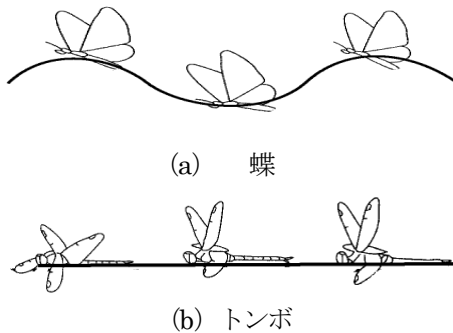


図2 蝶とトンボの飛翔の比較

図2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に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。

2. 3 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。

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[3]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3参照）

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

揚力 L と抗力 D の大きさは次式で求められる[8].

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

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

ここで、

ρ : 空気密度, S : 翅の面積

V_r : 翅に対する空気流の相対速度 $|V_r|$

α : 空気力学的迎角

C_l : α の関数で表された揚力係数

C_d : α 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。

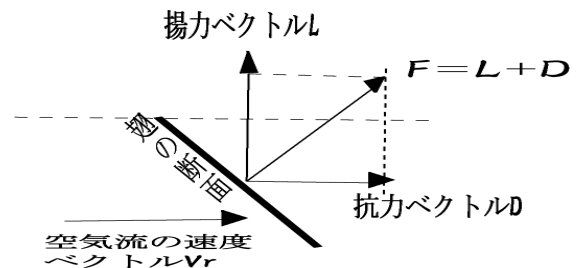


図3 翅に作用する力

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4(a)）と、翅の前縁に平行な直線を回転軸とするフェザリング運動（図4(b)）を行う。

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5参照）。

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

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6(a)に示すように翅の付け根から先端までの各位置

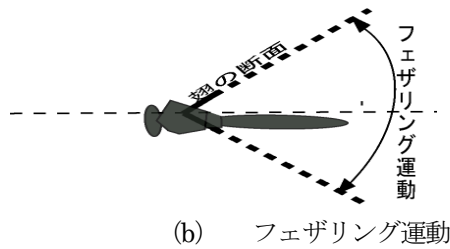
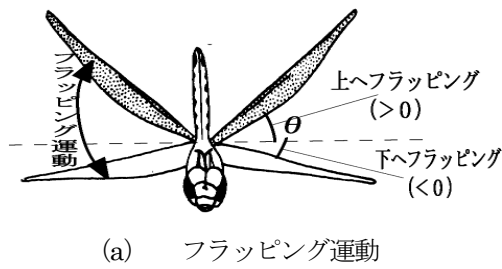


図4 翅の基本的な運動

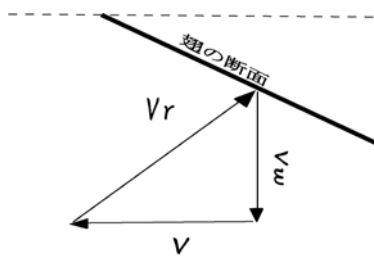
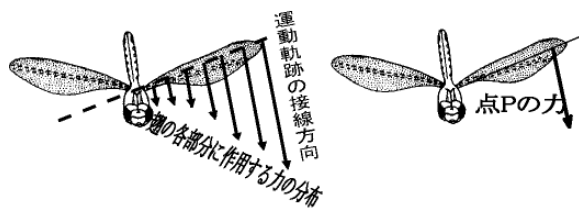


図5 翅に対する空気流の相対速度

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6(b)参照)。



(a)翅に作用する力の分布 (b)平均と同じ力の点P
図6 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[2,7,13]。

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とする(図7参照)。ストローク運動は図7に示すようにストローク面角度を変更する動作である。

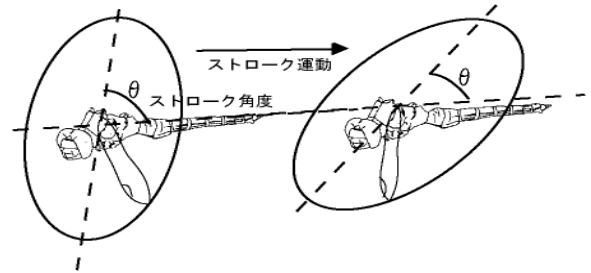


図7 ストローク面角度の制御

3. 3 前翅の後翅への影響の考慮

3. 1のモデルでは、はばたきによる渦の影響や翅と翅との相互作用が考慮されていないため、はばたきによる力が不足する[4,7,13]。トンボでは前翅が作る空気の流れ(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。本モデルではAzumaら[2]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[2,8]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(5)式で与えられる。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。

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

ここで、 S_e は前翅のはばたきの、ストローク面の面積、 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。

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

ここで、 Ns 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(1)式で求められる。

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。

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

ここで、 V_r は前翅のはばたきの誘導流の速度ベクトル、 C_{jh} 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する。

4. トンボの飛翔制御法

ここでは、まず、蝶の飛翔制御に用いた手法[3]を

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トンボの運動を制御する。制御点への到達は、昆虫が制御点を中心とする一定半径の球体内に入ったときとする。トンボのローカル座標系と回転運動を図8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。

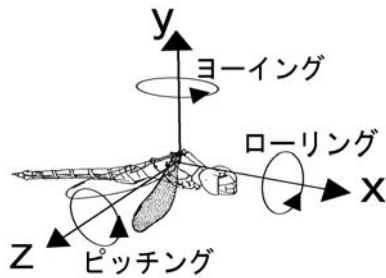


図8 トンボのローカル座標系と回転運動

トンボの頭の向きを表す方向ベクトル（X軸に並行なベクトル）と、トンボから制御点へ向かうベクトルのなす角度が0度になるように、トンボ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。

トンボの高度が制御点より高い場合は、フラッピング角とフェザリング角を小さくし、はばたき振動数を下げ、反対に、制御点の方が高い位置にある場合は、フラッピング角とフェザリング角を大きくし、はばたき振動数を高くして高度調整を行う。

4. 2 バンクの拡張

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[8]。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[8][15]。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。

4. 3 方向転換に関する拡張

ヨーイングと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。

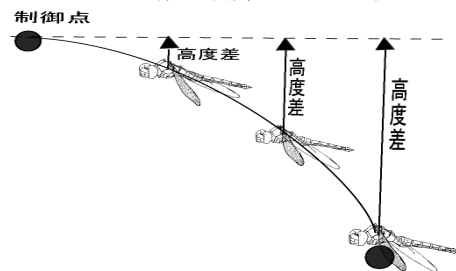
このため、本手法では、ヨーイング、ピッチング、ローリングの回転速度 ω を式(8)で定義した。

$$\omega = R(1 + K |\theta / \pi|^n) \quad (8)$$

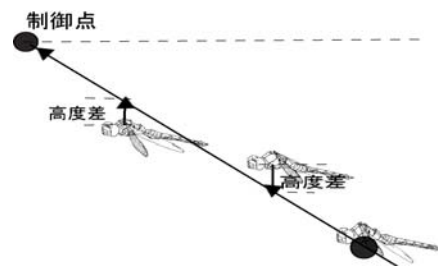
ここで、ヨーイングとピッチングの θ はトンボのX軸と、トンボから制御点へ向かうベクトルとのなす角。ローリングの θ はトンボのZ軸と、トンボから制御点へ向かうベクトルとのなす角。 R は最大回転角度。 K, n は調整用係数（ $K \geq 0, n \geq 1$ ）である。方向転換の回転速度は θ が大きいのほど速く小さいほど遅くなる。

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、制御点とトンボの相対的な高さによって調整した。この制御では、高さの異なる制御点間の飛翔は図9(a)のような曲線を描いて飛ぶ。トンボは蝶とは異なり一直線に飛翔する性質があるため、トンボが2つの制御点の間を飛ぶ時、両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、フラッピング、フェザリング角およびはばたき振動数を制御している（図9(b)参照）。



(a) 従来の高度制御



(b) 直線飛行のための高度制御

図9 高度制御法

4. 5 ホバリングの拡張

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の球体内部にトンボが入ったとき、ストローク面の角度とはばたき振動数を調整して、定められた一定時間が経過するまで高度と位置を維持させている。

5. トンボの行動の表現

ここでは、巡航飛翔、止まり方、飛び立ちの表現法について示す。

5. 1 巡航飛翔

トンボは、摂餌やなわばり維持のための飛翔を行う。これを巡航飛翔と呼ぶことにする。このとき、トンボは頻繁に方向を変えているが、直線的な飛翔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（複眼が良く見える範囲は数～十数メートル）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翔し、実際の飛翔形態とは異なる。本手法では、より自然なトンボの飛翔を実現するため、トンボが直線的に飛翔する距離を数メートル～十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10に示すように副制御点をランダムに生成させ、直線的に飛翔する距離を抑える。

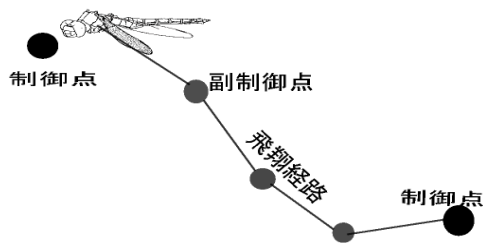


図10 副制御点の生成

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、上空で一度ホバリングしてから着地し、ぶら下がり型では、とまり先の下で速度を減少してから上昇して止まる。

このため、うつぶせ型では、図11(a)のように、止まり制御点の上にホバリング用の副制御点を1つ発生させ、止まり点の上空でホバリングさせた後、静止させる。また、「ぶら下がり型」では、図11(b)のように、止まり制御点の下に副制御点を1つ発生させ、この制御点を経由して、止まり点へ向かわせている。

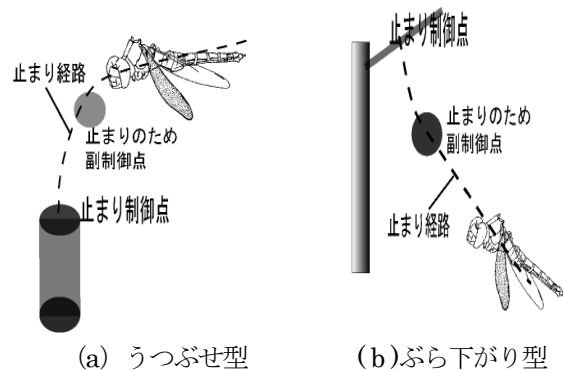


図11 止まり制御法

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[11]と同様の衝突回避運動を行う。

7. トンボの飛翔シミュレーション結果

SGI OCTANE2 R12000 (1400MHz RAM512)を使用し、計算刻み幅を 1/12000sec としてはばたきの力を計算した。表示には OpenGL を使用し、毎秒約 70 フレームで表示することができた。

図12に制御点による制御法の例を示す。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、一度で制御点を通過していることがわかる。

図13は巡航飛翔の例である。図12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14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。

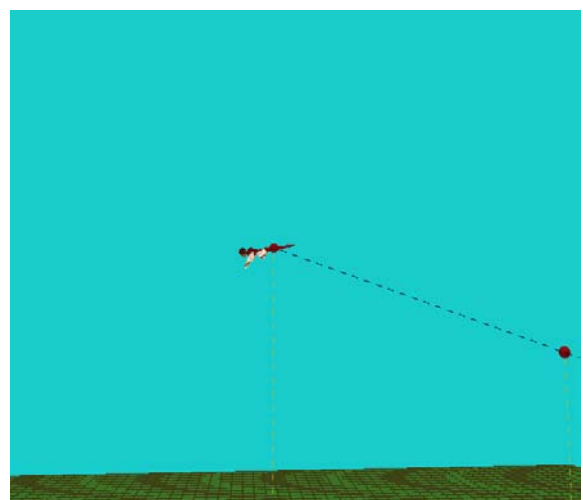


図12 制御点による制御法シミュレーション

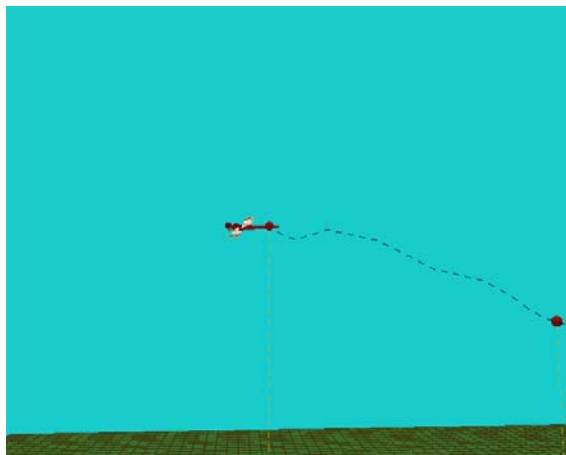
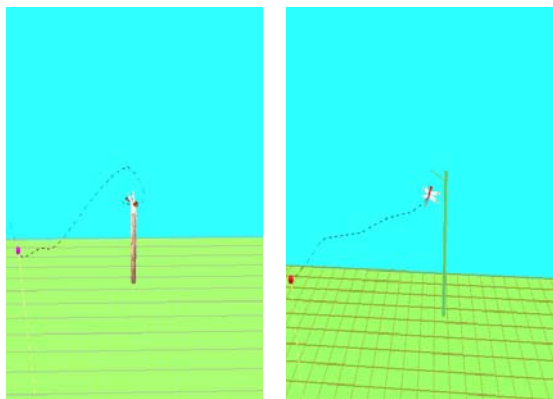


図 1.3 巡航飛行のシミュレーション



(a)うつぶせ型 (b)ぶら下がり型
図 1.4 止まりのシミュレーション

図 1.5 に群れのシミュレーション例を示す. 4 匹のトンボが衝突を回避しながら同時に飛行するようすが示されている.

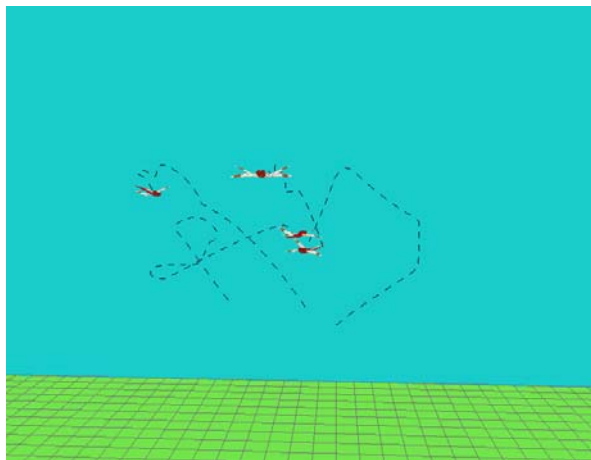


図 1.5 群の飛行シミュレーション

7. むすび

空気力学に基づくトンボの飛行モデルを提案した. 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行を表現することができる. トンボの飛行の特徴である急上昇, 急停止, ホバリング, 急旋回などの飛行形態の表現が可能であり, トンボの飛行経路を容易に指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, 他の昆虫の捕食行動などの表現法の開発が挙げられる.

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斎藤伸自名誉教授, 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.

参 考 文 献

- [1] 井上 清・谷 幸三: トンボのすべて, トンボ出版 (1999)
- [2] Akira Azuma : FLIGHT MECHANICS OF A DRAGONFLY, J.exp.Biol.116,79-107(1985)
- [3] 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行モデル, 情報処理学会論文誌, Vol.41 No 3(2000)
- [4] アンドレイ K.プロドスキー: 昆虫飛行のメカニズムと進化, 築地書館(1997)
- [5] 東 昭: 生物・その素晴らしい動き, 共立出版(1986)
- [6] 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)
- [7] Michael Dickinson : Solving the Mystery of Insect Flight, SCIENTIFIC AMERICAN (June 2001)
- [8] 東 昭: 機械工学選書 航空工学 (I) 一航空流体力学, 裳華房 (1989)
- [9] 新井 裕: トンボの不思議, どうぶつ社 (2000)
- [10] 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(1988).
- [11] C.W.Reynolds: Flocks,Herds,and Schools:A Distributed Behavioral Model, SIGGRAPH,Vo21,Number 4,July,1987.
- [12] 東 昭: 生物の動きの事典, 朝倉書店(1997).
- [13] 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), 1996-9.
- [14] 学研の図鑑 昆虫 (1997)
- [15] 曹 燦・藤本 忠博・村岡 一信・千葉 則茂: 鳥の飛行のビジュアルシミュレーション, 第17回 NICOGRAPH 論文集 (2001)
- [16] B.Ramakrishnananda and K.C.Wong: Animating bird flight using aerodynamics, The Visual Computer,No10,1999.