

2006年度 卒業論文

3DCGにおける鳥のはばたきモーションの
自動生成プログラム

指導教員：渡辺 大地講師

メディア学部 ゲームサイエンス
学籍番号 M0103305
土永 まり子

2006年度 卒業論文概要

論文題目

3DCGにおける鳥のはばたきモーションの
自動生成プログラム

メディア学部

学籍番号：M0103305

氏名

土永 まり子

指導
教員

渡辺 大地講師

キーワード

3DCG、モーション、鳥類、
はばたき、自動生成

近年 3DCG アニメーションの発展が目覚しく、映画や TV コマーシャルに限らずゲームなどの幅広い分野で親しまれている。それらの背景にもやはり 3DCG アニメーションが使われることが多く、本論文では背景のアクセントとして使われることが多い鳥のモーション付けに着目した。キーフレームアニメーションやモーションキャプチャーを利用したモーション作成が主流となっている中、鳥のはばたきなどは時間的、作業量的な問題で高低差を意識した飛行は実装されていない場合が多い。鳥のはばたきモーションの生成は手間がかかり、細かな修正等はモーションデザイナーに対し負担になってしまう。本研究では鳥の飛行を分類し、各パターンごとに翼の角度や向きを分析して数値をパラメータ化し、実際の鳥がどのようにはばたくのかを解析する。それらの数値を元に、ベジェ曲線を入力したルートに応じたはばたきの自動生成を目的としたツールを C++ で開発し、実際に手付けで生成したモーションと自動生成で作成したモーションのクオリティ、作業量で比較し実用性を検証する。

目次

第1章	はじめに	1
1.1	研究の背景と目的	1
1.2	本論文の構成	2
第2章	鳥の生態学的な飛行パターンの分析	3
2.1	翼の種類	3
2.1.1	キツツキ、ハトの仲間	4
2.1.2	カモメ、アホウドリの仲間	4
2.1.3	ハゲタカ、ワシの仲間	5
2.2	飛行形態	5
2.2.1	平行移動、上昇	5
2.2.2	下降	6
2.2.3	旋回	6
第3章	既存のはばたきモーション生成手法	7
3.1	既存のモーション生成手法	7
3.1.1	キーフレームアニメーション	7
3.1.2	モーションキャプチャ	8
3.1.3	数値シミュレーション	8
3.2	既存生成手法の問題点	8
第4章	自動生成手法	10
4.1	タスクレベルとダイレクトレベルでの分類	10
4.2	使用した鳥モデル	11
4.3	各はばたきの実装手法	12
4.3.1	関節の制御	12
4.3.2	平行移動	12
4.3.3	上昇	13
4.3.4	下降	13
4.4	飛行ルートの設定とはばたきの対応	14
4.4.1	高低差によるはばたきの対応	14
4.4.2	左右旋回時の鳥モデルの体勢の対応	15

4.5	はばたき間の補間手法	15
第5章	結果と考察	17
5.1	自動生成したはばたきモーション	17
5.2	自動生成と既存手法の比較	20
5.3	現状での問題点	20
第6章	まとめ	21
	謝辞	22
	参考文献	23

第 1 章

はじめに

1.1 研究の背景と目的

近年 3DCG は映像作品の中で極めて重要な位置にある。実物を撮影することが困難な場合や、3DCG を利用したほうが金銭面で効率が良い場合もありその用途は多岐にわたっている。ゲームにおいても高性能なハードが普及し、3DCG の需要と発展 [1] はめざましいものとなっている。以前は処理能力の関係上、あまり追求できなかった微細でリアリスティックなモデリングはもちろんのこと、細かいモーションも再現できるようになってきた。モーションキャプチャーを利用した、一般的にも良く見られる人間モデルの歩行モーションなどは実物と区別がつかないものもある。それらのモーション作成は、キーフレームアニメーション [2][3] やモーションキャプチャーの利用が主流となっている。

反面、鳥類の飛行 [4][5][6][7][8] のように普段目にすることがあっても正しく記憶されないもの、またモーションキャプチャーに応用しにくいモーションの制作は、モーションデザイナーが手動で細かい動きをキーフレームアニメーションを用い作成している。これには手間がかかり、デザイナーの習熟度により完成度が影響を受けるので、ゲームでの背景等に用いられる簡単な飛行モーションの作成には効率的に問題がある。また、高低差を意識した飛行の再現はあまり行われていない。

これらの問題を解決するには、モーション生成の簡略化とクオリティの維持が重要となってくる。そこで、本研究では飛行モーション生成のためのアルゴリズム

ムを明確化し、飛行モーションをいくつかの種類、状況からパターンによって分類 [9][10] する。飛行パターンごとに実際の鳥の翼が開く角度や向きを分析し、各動作を再現するための適切な関数を設計する。実際には飛行ルートをベジェ曲線を用いて設定し、経路に応じた飛行パターンをプログラム側で自動選択し中間モーションを補完して生成されるようにする。これらの機能を FK[11] を利用して実装する。

しかし鳥などの自律的に行動する生物は、動作の選択に柔軟性があり、それらのすべてを制御することは難しい。本研究では、人が来たら驚いて逃げるなどの思考や動機 [12] は考慮せず、単純な飛行などの直接的な行動で入力し、翼のボーンの角度や 1 秒にどれだけの距離を飛ぶかの具体的なモーション設定を自動生成する。これを元に従来のモーション生成手法と比較し、自動生成の有用性を検証する。

1.2 本論文の構成

2 章では現在どのような手法で人や鳥のモーション生成が行われているかの調査結果を述べる。3 章では実際の鳥のはばたきを種類ごとに分類し、その特徴を説明する。4 章ではどのような手法で自動生成をおこなうかを説明する。5 章では、実際に生成された鳥のはばたきアニメーションと既存の手法でモーション付けした鳥のはばたきアニメーションを比較し、作業時間やクオリティを比較検証した考察を述べる。最後に 6 章で、本研究の成果と今後の課題を述べる。

第 2 章

鳥の生態学的な飛行パターンへの分析

鳥のモーション生成を研究するに当たり、まず実際の鳥のはばたきはどのようなものかの調査結果を述べる。

2.1 翼の種類

以下に示す図 2.1 は鳥の翼の種類をあらわしたもので、環境や生態によって大きく分けて 3 つに分類される。アスペクト比の違いや羽の生え方が大きな要因 [4] [9] となっている。

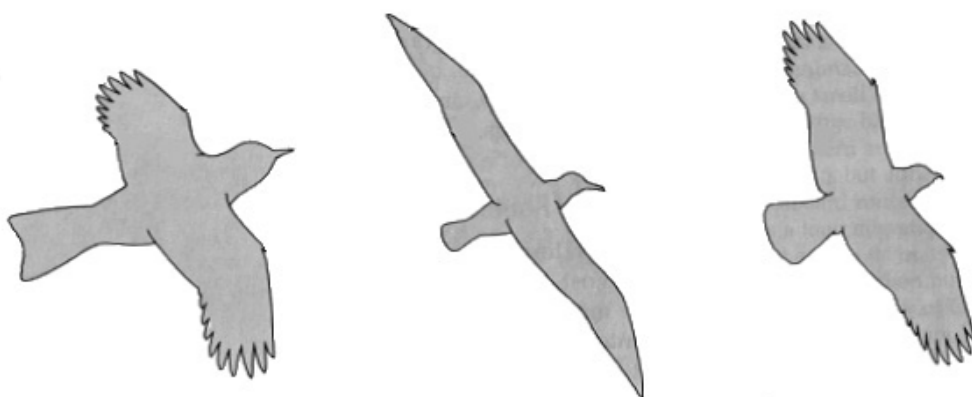


図 2.1: 鳥の翼の種類

以下に3つの分類の特徴を述べる。

2.1.1 キツツキ、ハトの仲間

背の低い樹木が茂った生息地に棲む鳥によく見られる。障害物が多いので複雑な飛行に対応し、飛行速度はそれほど速くない。羽の長さは普通である。図2.2はスズメの翼の形状である。



図 2.2: スズメの翼

2.1.2 カモメ、アホウドリの仲間

海鳥に多く見られる翼の形状である。長時間の飛行に適し、風の強い場所でも安定した飛行ができる。図2.3はアホウドリの翼の形状である。



図 2.3: アホウドリの翼

2.1.3 ハゲタカ、ワシの仲間

滑空に適している。重いものを運べる。初列風切羽が発達しているので、はばたかずに上昇気流を利用して飛ぶのに適している。図 2.4 はノスリの翼の形状である。



図 2.4: ノスリの翼

2.2 飛行形態

鳥の飛行形態は、状況に応じて三つに分類 [10] される。以下にその三種類の詳細を述べる。

2.2.1 平行移動、上昇

一般的とされる飛行形態である。キーフレームアニメーションで単純な鳥のはばたきモーションを作成する場合、この形態を最もよく採用する。翼が上下しても身体は安定していて、上昇する力は一定で多くの鳥は通常この形態で飛行している。上昇の際はこの腕に当たる部分のふり幅が大きくなるが、全体として特徴に差はない。

2.2.2 下降

空中で急に下降する時などに見られる飛行形態である。翼自体はあまり動かず、風切羽の部分がそよぐような形で飛行を助ける。

2.2.3 旋回

方向転換時に見られる飛行形態である。進行方向へ胴体部が傾き翼部分はあまり動かない。

第 3 章

既存のはばたきモーション生成手法

3.1 既存のモーション生成手法

一般的に、モーション制作にはキーフレームアニメーションやモーションキャプチャ、数値シミュレーションという手法を用いる。

3.1.1 キーフレームアニメーション

キーフレームアニメーションとは、任意の時間軸をあらわすフレームに、オブジェクトの位置や形状などの状態をキーとして登録し、中間のモーションをコンピュータに計算させて作るアニメーションのことをいう。キーを設定すると、ファンクションカーブというオブジェクトの状態変化を表す線をフレーム内に生成する。この線も手動で調節することが可能だが、微妙な曲線などにより生成されるモーションを扱うのは慣れないと難しい。キー自体の設定は手動で行うため、同じ仕様書からでも違ったモーションができてしまうケースもある。

鳥の飛行モーションを作成する際は、翼を持ち上げた状態と翼を下げた状態にキーを設定し、中間モーションを調整する [2]。何を参考資料とするかで作成されるモーションが違ってくる。

3.1.2 モーションキャプチャ

自然なモーション付けをするために、人物や物体の動きを実際にデジタル的に記録する技術をモーションキャプチャという。人間の動作に主に良く使われているが、たとえばダチョウにモーションキャプチャを用い、鳥型の恐竜の動きを再現する例などがある。光学式、機械式、磁気式があり、最近はマーカレスモーションキャプチャ[13]が開発されているが、いずれの手法も鳥類の飛行への適応例は少ない。

3.1.3 数値シミュレーション

揚力や空気抵抗などを考慮に入れた数値シミュレーション [14] も多く研究がなされている。鳥や昆虫の飛行メカニズムに関しては、生物学的、また物理学的な見地から多くの研究がなされてきたが、鳥の飛行性能とそのメカニズムの全容はいまだ一部しか明らかになっていない。鳥のはばたきによる飛翔は様々な要因から成り立っているが、それらすべてを計算しモーションとして生成するには細かな動作の入出力が複雑で、ゲームの背景として用いるにはやや作業に手間がかかる。

3.2 既存生成手法の問題点

キーフレームアニメーションは、細かい部分の調整が可能で時間をかけて完成を迫るには適した手法である。しかし、例えば「60 フレームでループする鳥のはばたきモーションを作成する」という想定をおいた時、製作過程では翼の上下運動の際の角度や細かい足の位置、形状などのモーションのつけ方、ひと羽ばたきの間隔の時間などデザイナーの感性に左右される部分も大きい。同じ鳥が極端に違う動作をするわけにはいかないため、必然的に同一モデルのモーション付けは同じデザイナーが担当することが多くなる。人の歩行モデルのようにわかりやすい見本や決まった作成パターンが存在しないので流れ作業的に効率よく制作することも困難になる。このように、普段目にしているも細かな動きを正しく把

握しきれないモデルのモーション作成は難しく、ゲームの背景などで特に重要性が高くない場合そこに時間を割くのは効率が悪い。

モーションキャプチャはリアルな動きを再現するには良い手法だが、鳥のように動きを制御しづらくマーカーを設置できないものに対しては使用できない。人間が模倣した動作を再構成する研究 [15] もなされているが、鳥のはばたきを人間が演じることには限界があるとされている。

シミュレーションとしてリアリティを追求したモーション生成を行おうとした場合、入力の際に鳥の種類や環境、その場における風の強さなど多くの細かな情報が必要となってくる。また、それらの情報を元に生成されたモーションは他の状況に対応できず細かい修正に更に手間がかかってしまう。高性能なハードが普及しているため情報量の多さは気にしなくても良くなってきているが、ループ処理される背景の鳥モーションに多くの時間を割くことはできない。

これらの問題から、単純に1パターンの翼の上下ではばたきモーションを作成した場合、モデル全体の移動と飛行時にどの方向へ飛ぼうとするかの高低差や向きによるはばたきの違いや傾きが再現されない問題がある。細かい修正や全体の制作時間の手間の削減に関しても、この作業の簡略化は有効である。

第 4 章

自動生成手法

前章で述べた問題点の解決策として、入力に必要な情報と操作を簡略化し、作業時間の短縮とモーション品質の向上を実現する。映像コンテンツ内の背景としての利用目的で、鳥のはばたきモーションを飛行ルートを指定することにより自動的に生成できるようにする。

以下、4.1 節では実装に際しどのような入力条件を設定したかを述べる。4.2 節では使用した鳥モデルについて説明する。4.3 節では各はばたきをどのような手法で実装したかを述べる。4.4 節から 4.5 節にかけて、飛行ルートの設定と各はばたきをどのように対応させたかを述べる。

4.1 タスクレベルとダイレクトレベルでの分類

鳥のはばたきモーションを生成するにあたり、どのような考えに基づき入出力を設定するかを述べる。Blumberg ら [12] は、自発的に行動する動物の動作命令を以下の 3 つに分類した。本論文ではタスクレベルとダイレクトレベルの概念を利用してモーションの自動生成を行う。

1. モチベーションレベル
2. タスクレベル

3. ダイレクトレベル

モチベーションレベルは知能的な挙動レベルとして考えられる。そのため、実際にモーションを作成する際は動きそのものを考えるので、モチベーションレベルは関係ない。例えば「飛ぶ」モーションを作成する際、そのモデルがどういう理由付けで飛ぶに至ったかは問題ではなく、ボーンの数や角度やフレーム数が必要となってくる。

今回の研究では、モーションの自動生成を目的としている。そのため、モチベーションレベルの動作命令を排除し、タスクレベルからダイレクトレベルへの入力を念頭に置きシステムを構築する。

4.2 使用した鳥モデル

モーション生成の際、以下の図 4.1 にある 3 種類の鳥モデルを使用した。第 2 章で述べた、アスペクト比の異なる代表的な鳥を 3DCG で簡略モデルにしたものである。この鳥モデルは Head、Body、Tail、LeftArm1、LeftArm2、RightArm1、RightArm2 の 7 つのパーツで構成されている。このモデルのパーツには Body を親とした親子関係を持たせ、Body の位置が移動すればモデル全体が移動するようになっている。

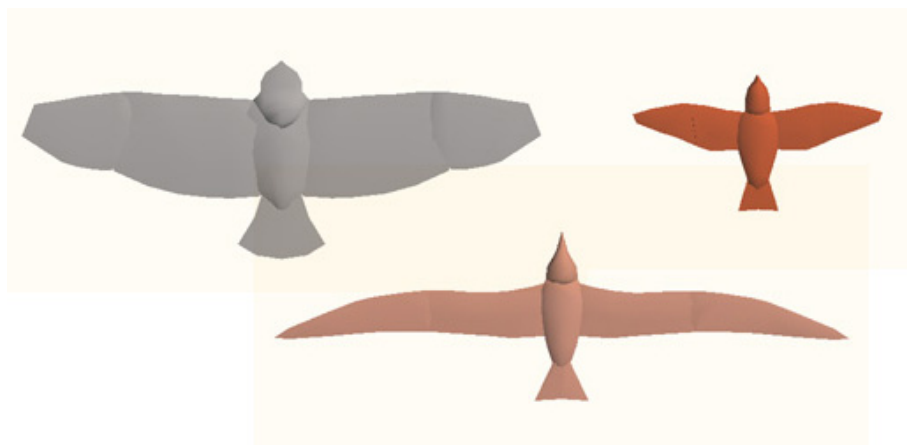


図 4.1: 使用したモデル

4.3 各はばたきの実装手法

はばたきモーション生成の際、モデルの回転や移動はすべて関節で制御している。アスペクト比が異なる3種類の鳥モデルに対応させた関節情報をあらかじめ用意し、この関節情報に指示を与えることによりはばたきモーションを生成する。はばたきの種類は第2章で述べた3種類とし、それぞれのモーションに特徴を持たせた。モーションの特徴 [16] を最低限の設定で出すため、動かす関節は arm1、arm2 に限定しそれぞれのモーションに差を出した。以下の図 4.2 は、arm1、arm2 の部位を示したものである。鳥のはばたきは繰り返しの運動なので、翼の上下運動の1周期を 2π と設定する。

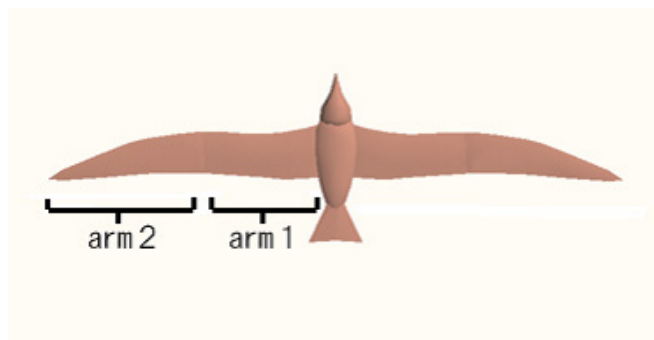


図 4.2: 関節情報

4.3.1 関節の制御

関節の制御にはオイラー角を利用した。オイラー角は、3D空間において3つの角度を回転させることによりオブジェクトの姿勢を指定できる。ヘッド角、ピッチ角、バンク角があり、これらの要素で回転を制御している。

4.3.2 平行移動

平行移動時におけるはばたきは、 t を時間とした場合に arm1 のピッチ角に以下の式 (4.1) を与え、arm2 のピッチ角に以下の式 (4.2) を与える。

$$\theta = \begin{cases} 0 & \text{if } 0 \leq t < \frac{\pi}{2} \\ -\frac{2}{3}t + \frac{\pi}{3} & \text{if } \frac{\pi}{2} \leq t < \pi \\ -\frac{\pi}{3} & \text{if } \pi \leq t < \frac{3}{2}\pi \\ -\frac{2}{3}t - \frac{4}{3}\pi & \text{if } \frac{3}{2}\pi \leq t < 2\pi \end{cases} \quad (4.1)$$

$$\theta = \begin{cases} -\frac{\pi}{3} \sin t & \text{if } 0 \leq t < \pi \\ -\frac{3}{18}\pi \sin t & \text{if } \pi \leq t < 2\pi \end{cases} \quad (4.2)$$

4.3.3 上昇

上昇時のはばたきに関しては、平行移動時のはばたきとほぼかわらないが arm2 の部分のふり幅に差が出る。arm1 のピッチ角には平行移動モーションのときに使用した式 (4.2) を与え、arm2 のピッチ角に以下の式 (4.3) を与える。

$$\theta = \begin{cases} -\frac{4}{9}\pi \sin t & \text{if } 0 \leq t < \pi \\ -\frac{5}{18}\pi \sin t & \text{if } \pi \leq t < 2\pi \end{cases} \quad (4.3)$$

4.3.4 下降

下降時のはばたきモーションでは、arm1 のヘッド角に以下の式 (4.4) を与え、arm2 のヘッド角に以下の式 (4.5) を与える。

$$\theta = \frac{\pi}{180} \sin t \quad (4.4)$$

$$\theta = \begin{cases} -\frac{\pi}{36} \sin t & \text{if } 0 \leq t < \pi \\ -\frac{\pi}{90} \sin t & \text{if } \pi \leq t < 2\pi \end{cases} \quad (4.5)$$

4.4 飛行ルートの設定とはばたきの対応

本研究では鳥の飛行ルートをベジエ曲線 [17] で入力した。ベジエ曲線の式を一回微分することにより速度、もう一回微分することにより加速度が算出できる。加速度を算出することにより、鳥モデルの進行方向を判別することができる。本研究では制御点を四つ設け、これらの位置情報に変更を加えることにより鳥の進行ルートを設定している。B を制御点とした場合、3 次のベジエ曲線は以下の式 (4.6) により決定する。

$$P(t) = (1-t)^3 B_0 + 3t(1-t)^2 B_1 + 3t^2(1-t) B_2 + t^3 B_3 \quad (4.6)$$

鳥モデルをベジエ曲線上にそって移動するように設定し、そのベジエ曲線の加速度から進行方向の判別を行う。速度は以下の式 (4.7)、加速度は以下の式 (4.8) からそれぞれ求める。

$$P(t) = (1-t)^2(B_1 - B_0) + 2t(1-t)(B_2 - B_1) + t^2(B_3 - B_2) \quad (4.7)$$

$$A(t) = (1-t)(B_2 - 2B_1 + B_0) + t(B_3 - 2B_2 + B_1) \quad (4.8)$$

4.4.1 高低差によるはばたきの対応

ベジエ曲線上の速度ベクトルの x 成分と z 成分から角度を求め、モデルの進行方向が右向きか左向きかにより鳥モデルの傾きを決定する。また、速度ベクトルの y 成分と z 成分から求めた角度から、進行方向が上下どちらの方向を向いているかにより各はばたきモーションをそれぞれ対応した。加速度が $a_y > 0.05$ の場合は上昇、 $0.05 < a_y < -0.05$ の場合は平行移動、 $a_y < -0.05$ の場合は下降モーションとなる。

4.4.2 左右旋回時の鳥モデルの体勢の対応

進行方向が直進ではない場合において、加速度に応じて鳥モデルの傾きを変化させた。 r_1 を速度ベクトル、 r_2 を加速度ベクトルとし、速度ベクトルから加速度ベクトルの角度を内積を用いて求めた。ここで求めた $\cos \theta$ をラジアン値に変換するため \arccos [18] を用いた。

鳥モデルの Body バンク角に以下の式 (4.9) を与える。

$$\theta = \arccos(\mathbf{r}_2 \cdot \mathbf{r}_1) - \frac{\pi}{2} \quad (4.9)$$

また、このままでは左右の判定ができないためベクトルの外積 [19] を利用して左右の判別をした。 z 軸における速度と加速度の外積が 0 より大きい場合、 θ の符号を反転する。

図 4.3 は描画されたベジェ曲線と、その線上を移動する鳥モデルである。

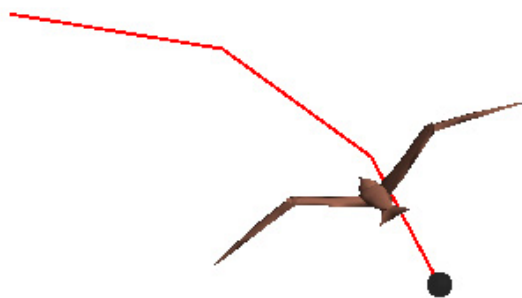


図 4.3: ベジェ曲線上を移動する鳥モデル

4.5 はばたき間の補間手法

本研究でははばたき間のモーション補間手法としてクォータニオン [19][20] によるブレンド処理を用いた。

クォータニオンは3次元グラフィクスにおいて、回転を表現するのによく用いられる。オイラー角と相互変換が可能で、これを使うことにより2つの姿勢から線形補間した姿勢を求めることができる。クォータニオンには単純線形補間と球面線形補間の2種類があるが、今回は単純線形補間を採用した。異なるモーション間をスムーズに繋ぐため、前モーションのオイラー角をA、後モーションのオイラー角をBとし、それぞれをクォータニオンに変換したものを Q_a 、 Q_b とする。線形補間によるクォータニオンの関数は以下の式(4.10)である。

$$Q(t) = \frac{(1-t)Q_a + tQ_b}{|(1-t)Q_a + tQ_b|} \quad (4.10)$$

クォータニオンを用い、線形補間がなされはばたき間の移行がスムーズに生成されるようになった。ここでブレンド率をalphaとし、alpha値をそれぞれのモーション間でスムーズにブレンドされるよう設定した。

また、モーションから不自然な挙動を取り除くため各モーションへ移行する際に個別にブレンド率を設定した。平行移動モーションへ移行する際は+0.016、上昇モーションへ移行する際は+0.036、下降モーションへ移行する際は+0.032とした。alpha値が1.0を越え、完全に次のモーションに移行した場合はalpha値を0.0にリセットし、ブレンド処理を終える。

第 5 章

結果と考察

自動生成された鳥のはばたきをに対し、動作の自然さと作業効率の検証を行う。

5.1 自動生成したはばたきモーション

本研究で実際に自動生成したはばたきモーションがどのようなものを以下に示す。

以下の図 5.1 は、平行移動モーションである。

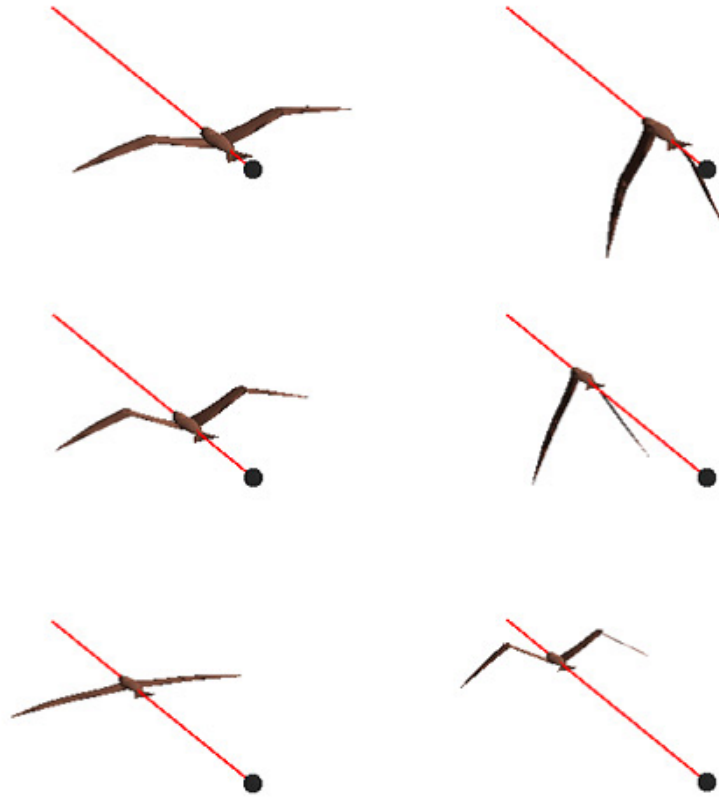


図 5.1: 平行移動モーショ

以下の図 5.2 は、右方向へ上昇し、下降するモーショ

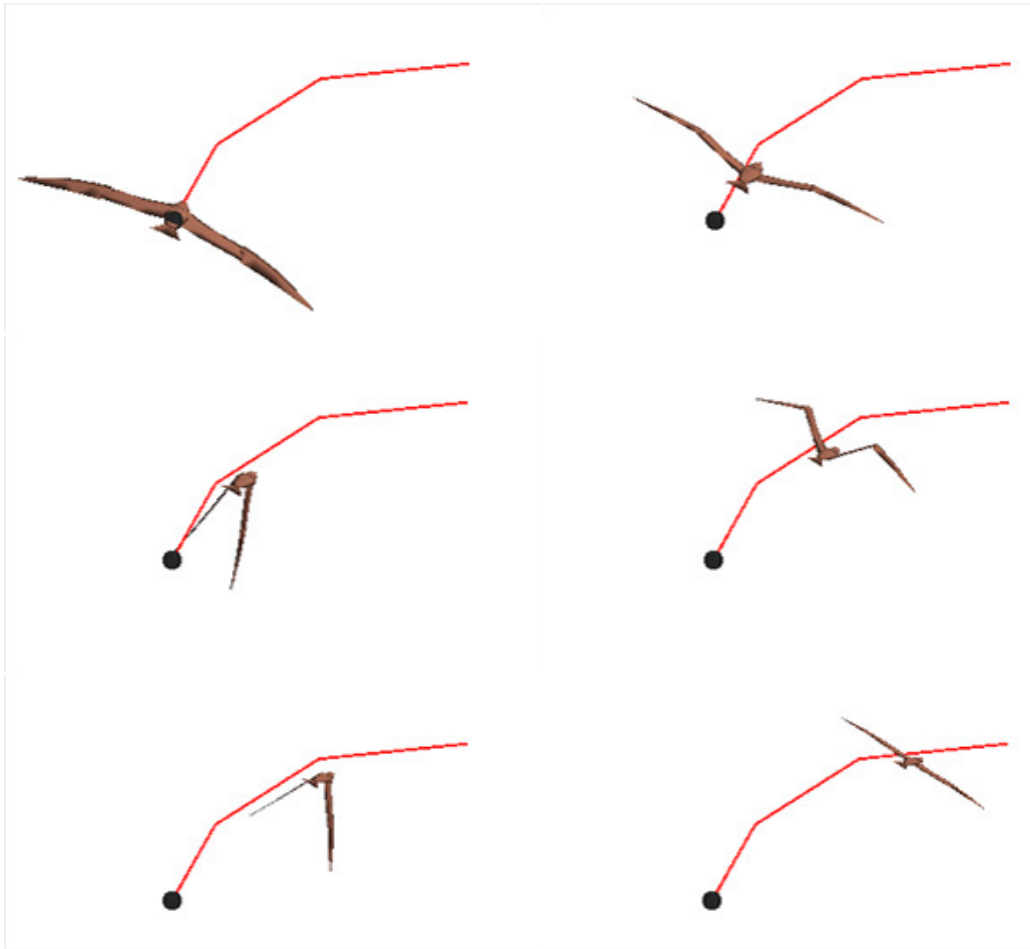


図 5.2: 右方向へ上昇し、下降するモーション

以下の図 5.3 は、左方向へ上昇し、下降するモーションである。



図 5.3: 左方向へ上昇し、下降するモーション

5.2 自動生成と既存手法の比較

生成の手間は既存手法のキーフレームアニメーションよりもかなり楽なものとなっている。飛行ルートはベジェ曲線を制御する4点の座標を設定することで行えるため、特別な作業は必要ない。デザイナーによってモーションのクオリティに差が出ることがないため、安定したモーションが作成できる。パラメータを変換すれば、速度やはばたきの強さも楽に変更できるので状況に応じて対応することができる。高低差や左右への進行方向にあわせたはばたきモーションの生成が、複雑な手順を踏むことなく行える点で既存手法より扱いやすくなったといえる。

5.3 現状での問題点

現状では、はばたきの面でしか実装できていず、その実装も細部まではなされていない。アスペクト比を考慮に入れていないので極端な造形の鳥には生成されたモーションが不自然になる場合がある。また、ハチドリのような特殊なはばたき形態や、離陸、着陸などの動作は実装されていない。自由な曲線を設定できるという点でベジェ曲線を採用したが、制御点の配置をある程度等間隔にしないと、はばたきの速度が安定しない。

第 6 章

まとめ

鳥の飛行モーション生成という点において、問題点となっていた高低差によるはばたきの違いや、左右方向転換時における鳥の体の角度を出すことができ、モーション生成の際の作業時間を短縮することができた。まだ改善点は多く、モーションの不自然な点や、鳥ごとのはばたき違いを正確に再現できていない部分があるのでその点を改善していかなければならない。

本論文では翼の関節部のみを動かし、尾や頭部の細かな動きは再現していない。ルートに関しても、ベジェ曲線をユーザー側が任意に設定できるため実物の鳥ならば本来飛行しえないルートの設定が可能となってしまう。鳥モデルの翼のアスペクト比から、その鳥の飛行特性を抽出し飛行モーションに関連付けすることができればより自然な飛行の再現が可能となる。

また、本研究では鳥の飛行モーションにのみ焦点を当てたが、実際には離陸、着地など飛行以外のモーションも必要となる場合が多い。これらのモーションもタスクレベルからダイレクトレベルへの入力で生成できるようになれば、より自然な鳥のはばたきモーション生成が可能となるだろう。

謝辞

本論文を締めくくるにあたり、ご指導頂きました本校メディア学部の渡辺大地講師に心より深く感謝いたします。また、本研究を進めるにあたり、相談に乗っていただいた研究室のメンバーに深く感謝いたします。最後に、私を支えてくれた家族と、全ての友人に感謝いたします。

参考文献

- [1] 東京工科大学編, デジタルアニメマニュアル 2004-2005, 東京工科大学クリエイティブラボ, 2005.
- [2] 尾沢直志, アニメ作画の仕組み キャラに命を吹き込もう!, ワークスコーポレーション, 2004.
- [3] CGWORLDvol.32, ワークスコーポレーション, 2001.
- [4] 飛ぶ ユーザーマニュアル,
<<http://rikanet2.jst.go.jp/contents/cp0020a/start.html>>.
- [5] 財団法人日本野鳥の会,
<<http://www.wbsj.org/>>.
- [6] 山岸哲木, 鳥類生態学入門 観察と研究のしかた, 築地書館, 1997.
- [7] Richard Dryden, Adaptive aerofoils,
<<http://www.nurseminerva.co.uk/adapt/bird.htm>>.
- [8] A・H・Cruickshank, 鳥についての 300 の質問, 講談社, 1982.
- [9] Alexandre Hirzel, Seagull simulator,
<<http://www2.unil.ch/biomapper/opengl/BirdFlight.html>>.

- [10] BIRD FLIGHT,
<<http://www.ornithopter.org/birdflight/>>.
- [11] 渡辺大地, FK Tool Kit System,
<<http://www.media.teu.ac.jp/~earth/FK/>>.
- [12] Bruce M. Blumberg and Tinsley A. Galyean MIT Media Lab, Multi-Level Direction of Autonomous Creatures for Real-Time Virtual Environments, SIGGRAPH1995,1995.
- [13] 岡田隆, マーカレスモーションキャプチャによる仮想ファッションショー, 電子情報通信学会技術研究報告, PRMU2004-215, 2005.
- [14] 磯貝紘二, 鳥や昆虫の羽ばたきによる飛翔の数値シミュレーション, 日本流体力学会数値流体力学部門 Web 会誌 第 12 巻 第 3 号, 2005.
- [15] 木島竜吾, 小鹿丈夫, 動作の再構成に関する研究, 日本バーチャルリアリティ学会大会論文集 Vol.1, 1996.
- [16] Chaojiang ZHU, Real-time Animation of Bird Flight Based on Aerodynamics, 芸術科学学会論文誌 第 5 巻 第 1 号,2005.
- [17] 鳥谷浩志 千代倉弘明, 3次元 CAD の基礎と応用, 共立出版株式会社, 1991.
- [18] DannyKodicek, ゲームプログラミングのための数学と物理, 株式会社ボーンデジタル,2006.
- [19] EricLengyel, ゲームプログラミングのための 3D グラフィクス数学, 株式会社ボーンデジタル, 2002.
- [20] 金谷 一朗, 3D-CG プログラマーのためのクォータニオン入門, 工学社,2004.