

## 運動関数を用いた昆虫3次元形状モデルによる運動シミュレーション

山口裕子<sup>1</sup> 南郷脩史<sup>2</sup> 横田秀夫<sup>3</sup> 中村佐紀子<sup>3</sup> 牧野内昭武<sup>3</sup>

樋口俊郎<sup>4</sup> 藤井哲也<sup>5</sup> 宮森恒<sup>5</sup> 中山治人<sup>5</sup>

<sup>1</sup>通信・放送機構 <sup>2</sup>ラトックシステムエンジニアリング(株) <sup>3</sup>理化学研究所

<sup>4</sup>東京大学大学院 工学研究科 <sup>5</sup>通信総合研究所 けいはんな情報通信融合研究センター

昆虫などの生体を微細な断層像から再構築して高精細な3次元形状モデルを作成し、モデルに自然な運動シミュレーションをさせるシステムを開発した。本システムは昆虫の3次元形状を運動パーツに分解し、再度パーツから全体形状を再構成する。パーツ間の相対的な運動関係を時間の関数(運動関数)で定義して、シミュレーションを実現させる。実例としてクワガタをモデルとし、下方向からクワガタの運動を撮影し、実写画像から、3次元運動情報を取り出しクワガタの自然な運動シミュレーションを実現した。

### Insect 3D Model Motion Simulation by Kinematics Function

Yuko Yamaguchi<sup>1</sup> Nobuhito Nango<sup>2</sup> Hideo Yokota<sup>3</sup> Sakiko Nakamura<sup>3</sup> Akitake Makinouchi<sup>3</sup>

Toshiro Higuchi<sup>4</sup> Tetsuya Fujii<sup>5</sup> Hisashi Miyamori<sup>5</sup> Haruto Nakayama<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Telecommunications Advancement Organization of Japan <sup>2</sup>Ratoc System Engineering Co., Ltd

<sup>3</sup>The Institute of Physical and Chemical Research <sup>4</sup>Graduate School of Engineering, The University of Tokyo

<sup>5</sup>Communications Research Laboratory, Keihanna Human Info-Communication Research Center

We have developed a system that makes a realistic insect 3D model to simulate realistic motion on a PC. The realistic 3D model is reconstructed from actual thin cross cut sections of the insect. The model is divided into parts, such as legs, body and so on, to define kinematics functions of time which express kinematics relationship between the parts. The parts are integrated to simulate real motion. We captured a moving beetle on videotape from the downside to obtain the 3D motion data and implemented realistic simulation by the beetle model.

#### 1 はじめに

昆虫などの生物の運動する映像を高精細に撮影し、それをコンピュータ上でシミュレーションするシステムの試作研究を行っている。生体を薄く切断した連続断層像から超高精細な3次元形状を作成<sup>1),2)</sup>し、この形状を運動用モデルとして再構築<sup>3)</sup>し、運動シミュレーションをさせる。

本報告では、2次元の実写映像から運動を取り出して3次元の運動関数とし、昆虫(クワガタ)の3次

元モデルに運動シミュレーションを行わせる手法について報告する。

#### 2 従来研究と課題

生物形状をコンピュータ内に再構築すること<sup>4),5)</sup>から一歩進んで生物の動いている姿を特徴づける運動をコンピュータで再現する試みはこれまでも行われている<sup>6),7),8),9)</sup>。

これらはいずれも自然な運動を再現することに

重点を置き、形状は簡易的なものである。本システムは超高精細な生物形状を構築し用いる。

生物の3次元の実写運動を取り出すのに、人や大型動物の運動の採取には関節部にマーカを付けて動きを撮影するモーションキャプチャを用いることができるが、昆虫にはマーカをつけたり、目印に色付けをして形状を得ることは難しい。

本システムでは、クワガタの1方向からの撮影画像のみを用い、マーカなしに関節部のテクスチャを動画像上で追跡し、形状データを用いて3次元座標を求める方法を開発し、3次元運動シミュレーションを実現した。

### 3 断層像からの3次元形状モデル形成

断層像の作成には、東京大学樋口教授のグループにより開発された3次元内部構造顕微鏡<sup>2)</sup>を用いた。試料を凍結包埋し、試料ホルダーに固定する。回転ナイフで観察断面を削り出し、カメラで撮影。画像はレーザーディスクに記録する。試料をZステージで順次一定量送り出し、薄切と断面撮影を繰り返す。

試料には体長約42mmのヒメオオクワガタを用い、30 $\mu$ m間隔で1400枚の断層像を作成した。撮影は640 X 480画素 NTSC規格 RGBカラーカメラで行った。

分解能は1画素98 $\mu$ mである。図1に断層像の1枚を示す。胴体、内臓、足関節が写っている。断層像を4枚おきに使用して、3次元形状を構築した。図2は3次元再構築ソフト TRI<sup>4), 5)</sup>による3次元画像表示で、原画像は100 $\mu$ mの解像度をもっているためクワガタの足の関節形状まで明瞭に構築できている。

## 4 3次元シミュレーション方法

### 4.1 概要

生物体の運動は部分的に見ると、数式で記述可能な単純な運動(例えば腕を振る)の他に非連続的な能動的な運動(例えばえさを取るための一連の動き)がある。前者は臓器の生理運動や、生体部位の局所的な運動、後者は部位運動が統合され継続するシステ

マティックな運動とみなすことができる。そこで、本システムは生物体の運動を表現するために、形状を運動する部品(パーツ)に分解し、部品を組み立てて全体形状へ統合し、部品や部品間の相対的な運動を法則的に定義可能とし、全体形状に対し能動的運動を定義し、両者の合成として実際の生物運動をシミュレーションさせる。



図1 クワガタ断層像



図2 クワガタ3次元再構築画像表示

### 4.2 形状モデル

#### 4.2.1 概要

形状を構成する要素は形の変形を伴わないソリッドパーツと、変形するスケルトンパーツで表現する。ソリッドパーツは超高精細形状モデルをそのまま用いる。スケルトンパーツは骨格線とその周りの輪郭を表わす楕円で形状を近似する。

生体の3次元形状構造は、パーツ形状とパーツを組み立てるパーツ接続角などで表現される。パーツを合成したものをフレームと呼ぶ。フレームを合成したのもフレームと呼ぶ(図3)。

合成された全体形状を共通座標系で表現するために共通座標系のZ軸である体軸を定義する。

形状要素に伸縮変形可能なスケルトンパーツを持つことは、本システムの特徴である。スケルトンパ

ーツを用いて生理運動する人体臓器の表現も可能である。

#### 4.2.2 オオクワガタの形状モデル

オオクワガタの断層画像から超高精細3次元形状モデルを再構築し、次に移動運動の面から昆虫解剖学に基づき運動要素であるパーツに分解した。

例では、頭部  $S_2$ 、角  $S_3$ 、 $S_4$ 、腹部  $S_1$  をソリッドパーツとして切り出した。脚はスケルトンパーツ基節  $P_1$ 、腿節  $P_2$ 、転節  $P_3$ 、脛節  $P_4$ 、ふ節  $P_5$  で構成した。左脚を実データから定義し、右脚は左脚のミラー対象をとり流用した。左右の前脚  $F_1$ 、 $F_2$ 、中脚  $F_3$ 、 $F_4$ 、後脚  $F_5$ 、 $F_6$  はスケルトンパーツ  $P_1 \sim P_5$  から構成されたフレームである。

$S_2$  に付属するパーツやフレームを合成してフレーム  $F_{S2}$  を構成、 $S_1$  に付属するパーツ、フレームを合成してフレーム  $F_{S1}$  を構成、 $F_{S1}$  と  $F_{S2}$  を合成しオオクワガタの運動定義可能な形状モデルを得る(図3)。

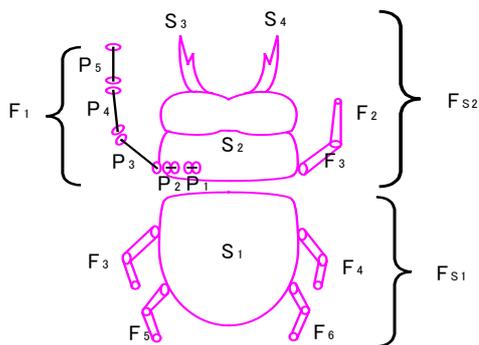


図3 オオクワガタ形状モデル

### 4.3 運動モデル

#### 4.3.1 概要

定義された形状に対する運動を次の運動要素で記述する。

- ・体軸の重心位置の軌跡、体軸の回転
- ・パーツ間の接続点(関節)の接続角
- ・スケルトンパーツのスケルトン長、断面径

これらの運動要素に対し、位相を横軸として運動関数を定義する。

運動シミュレーション時に形状モデルと運動関数

から次の方法により実空間、実時間における運動形状を生成する。

- ・運動関数に周期  $T$  を与えることで運動関数の横軸を時間に変換する。
- ・スケルトン長、断面径の変動幅と伸縮率、スケールを与え実空間上の形状を生成する。
- ・形状記述で与えた形状が運動関数のどの時点のものであるかを形状定義位相で設定する。
- ・運動する形状要素毎に運動開始時刻における運動関数上の位置を初期位相として与える。

全ての形状要素のスケール、互いの相対位置は以上の定義によって一意に決定され、運動開始時刻における形状が決まり、運動経過時間  $t$  によって形状要素運動の同期がとられ、全体形状の運動が行われる。

#### 4.3.2 システマティックな運動の記述

直進や回転などの運動断片を運動シーンとして定義する。運動シーンを定義するための形状要素の運動関数は実写映像を用い実測して作成する。複数のシーンをつなぎ合わせてシステマティックな運動を構成する。独立に得られた運動シーンと運動シーンをつないだだけでは連続的な形状運動とならない。そこでシーンのつなぎ目で体軸の運動が連続的になるように運動関数の補正をシミュレーション時に自動的に行い、スムーズな運動シーンの移行を実現している。

#### 4.3.3 運動関数の測定

生体観察において撮影が簡単である1方向からの運動画像を用い、観察点の3次元運動をトレースする方法を開発した。

観察対象物が剛体の場合、観察点間の実寸長  $l_0$  が既知であれば、投影面上の2点間距離  $l$  から投影座標系における  $z$ (奥行き)方向の距離  $h$  を求めることができる(図4)。

$$h = l_0 \sin(\cos^{-1} \frac{l}{l_0}) \quad (1)$$

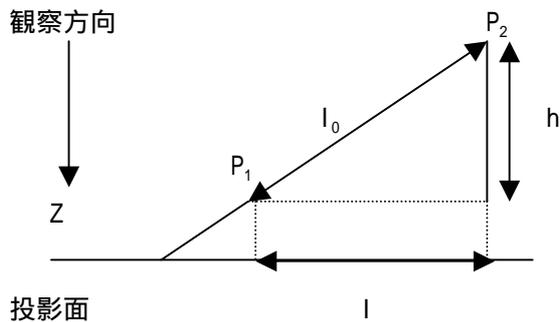


図4 測定原理

従って、全体形状の体軸を定義する点や運動関数を作成する関節点について撮影画像(投影面)上で(x,y)座標が求まると、形状データから得られる各点間の実寸長を用い、投影座標系におけるz座標を求めることができる。

関節の運動関数はその回りの形状要素の  $P_2, P_1,$

$P_2, P_3$ の時刻毎の座標値を関節角度に変換し、求めることができる(図5)。

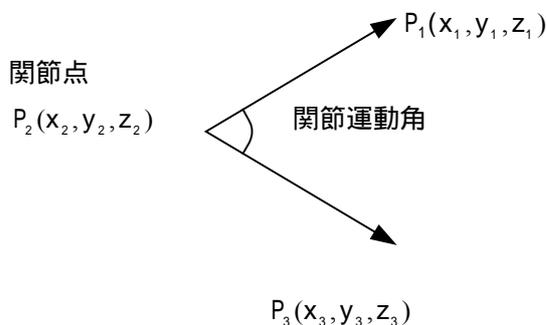


図5 関節運動

## 5 2次元画像を用いた3次元運動測定

クワガタの運動を精度よく観察するために、脚の運動全体が観察可能なようにクワガタをガラス板上において、下から運動撮影を行った。同時に側面方向からも撮影し、両画像からクワガタの脚関節の運動を求め比較した。比較は下から見た投影座標系のz座標で行う。

下からの撮影画像(図6)をプリントアウトして、ノギス(分解能0.05ミリ)で左前脚脛節の長さを測り実長10mmを用いてz座標に変換した(図8(a))。

側面方向からの画像(図7)も同様にしてプリントアウトしてノギスで脛節関節間の高さzを直接測定しグラフにした(図8(b))。

側面画像には下から撮影した投影座標系のzが直接写っており、測定精度が高い。この画像で求めた  $z_1$  をz座標測定の基準としてよい。平面画像から計算した  $z_0$  の含む誤差Eを次の式により求めた。

$$E = (z_0 - \bar{z}_0) - (z_1 - \bar{z}_1)$$

Eの標準偏差 (E)は

$$(E) = 0.4 \text{ mm}$$

であった。従って実長に対する本方式の計測誤差の割合は4%である。

腿節についても同様に長さと高さを求めたところ、同様の結果が得られた。

これより、1方向投影画像から観察点のテクスチャを追跡し、形状モデルの実寸長を用いて3次元座標値を求める方法は、運動関数を求めるのに十分な精度が得られることがわかった。本方法をテクスチャ追跡法と呼ぶ。

## 6 テクスチャ追跡法による運動関数の測定

クワガタを下から撮影した動画画像を用い、クワガタ全体形状の基準となる体軸を表現する点および関節運動を表現する点の3次元座標を撮影投影時の座標系で求め、関節の運動関数を求めた。

### 6.1 2次元座標上のテクスチャ追跡

テクスチャ追跡法は実写画像上の測定点の2次元運動を正確に求めることにより3次元座標変換が保証される。測定点の2次元運動の追跡は次の方法により行った。スタートの動画画像上で運動を表現する点にマークを打ち、マーク点の運動による位置変化を追跡した(図6)。

直前の画像フレームのマーク位置を基に次の画像上のマーク位置を2次元画像処理SSDA法(Sequential Similarity Detection Algorithm: 残差逐次検定法)により求めた。

すなわち、直前フレーム上のマーク点  $(x_0, y_0)$  の

回りの窓領域画像と次のフレーム上の $(x_0, y_0)$ の近傍点の周りの窓領域画像の階調差が最小となる位置 $(x_1, y_1)$ を次フレーム上のマーク点とする。

同様にして各時刻のフレーム画像上のマーク点位置 $(x_i, y_i)$ を求める。クワガタ形状データを用い $(x_i, y_i)$ から、投影座標系の $z_i$ を求めた。これを用い、関節の角度の運動関数を求めた。

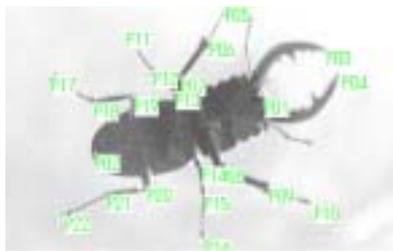


図6 クワガタ 下からの撮影画像



図7 クワガタ 側面からの撮影画像

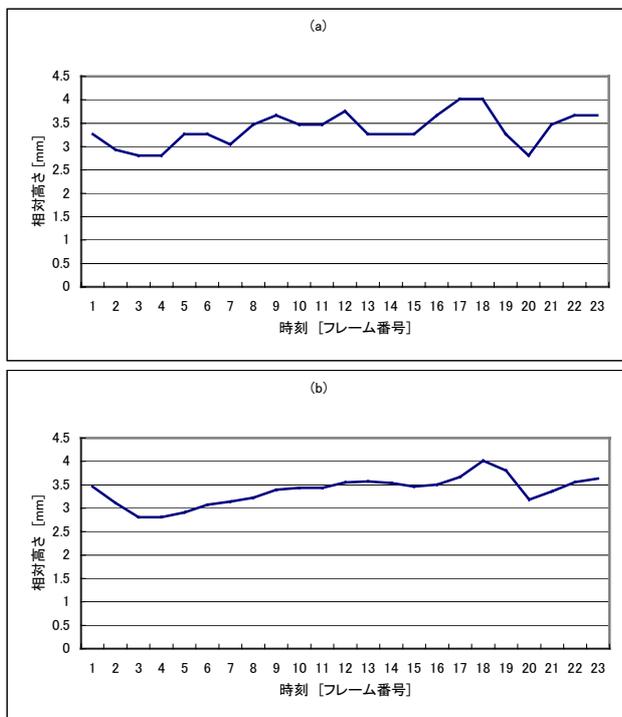


図8 脛節の高さ



図9 運動シミュレーション側面観察

## 7 運動シミュレーション例

モデルの運動シミュレーションには生体4次元シミュレーションシステム GAN<sup>6)</sup>を用いる。クワガタ断層像から再構築した3次元形状を変換し、GAN用の形状表現にする。断層像から再構築した胴体の3次元形状は300万面素あったが、このままでは運動シミュレーション時に高速な描画が実現できないので、形状を損なわない方法で4000面素にまで削減した。脚は、スケルトンで表現している。

図9は運動を側面から観察した画像である。テクスチャ追跡法により得られた脚のz方向の動きは実運動を反映している。

図10はクワガタモデルが前進しているシーンから3枚の画像を取り出して、クワガタを横にずらし並べて合成した画像である。左中脚が画像1から画像2で前に進み、画像2から画像3で後に蹴って体を前進させている。右前脚、右後足は画像2、画像3間で前に送られ、前進動作している。残りの3本の脚は、主に体を支えていることがわかる。以上の一連の動きを左右互い違いに繰り返すように運動ファイルに運動関数を記述して、クワガタの前進運動を実現することができる。

図11は前進運動シーン(1, 2)、(6, 7)と回転運動シーン(3~5)、(8, 9)をつなぎ合わせて合成された運動関数による運動である。前進 回転 前進 回転のシーン間で連続的に体軸が運動している様子がわかる。

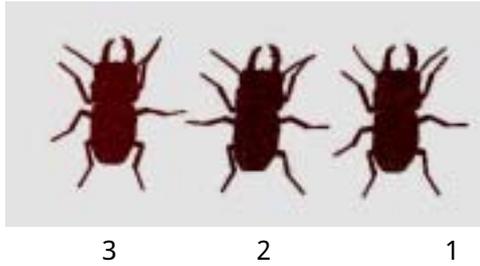


図 1 0 直進運動

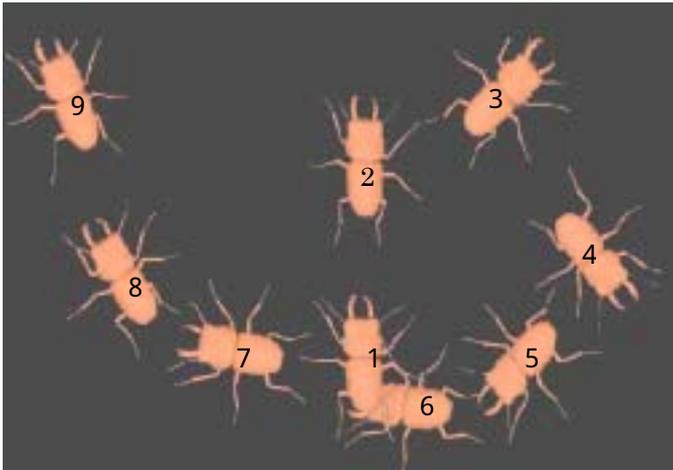


図 1 1 直進運動と回転運動の合成

## 8 おわりに

本手法により、超高精細 3 次元形状モデルを作成し、運動撮影画像から、3 次元運動情報を取り出して、高精細 3 次元形状をもったクワガタなどの昆虫モデルによる自然な運動シミュレーションが可能であることを示した。

本手法では単純な運動シーンを合成し、複雑な運動を手軽に構成できる。また臓器の自律運動を伴いながら、運動する生体を表現することができ、生体の生きている姿をコンピュータ上で表現可能である。

本システムは初期形状，運動モデルを作成し、撮影像と一致するシミュレーション映像とになるように形状定義，運動定義を修正していく方法により、漸次的に観察している実体の正確なモデルを作成することができる。この方法を用いると、肉眼スケールのみならずミクロ，マクロな生体の 3 次元実形状モデルを作成し運動させることも可能である。

本システムは形状定義、運動定義、初期値定義は言語形式になっており、入力に慣れを必要とする。本システムの広い表現能力を引き出すために形や動きをイメージしながら入力編集が可能なエディタが必要である。今後の課題としたい。

## 参考文献

- 1) 山口裕子、南郷脩史、横田秀夫、中村佐紀子、牧野内昭武、樋口俊郎、藤井哲也、宮森恒、飯作俊一：超高精細 3 次元画像モデル形成における 3 次元形状のスムージングによる入力データノイズの除去、情報処理学会第 60 回全国大会講演論文集 2、pp. 201-202 (2000)
- 2) 樋口俊郎、横田秀夫：3 次元内部顕微鏡を用いた生体の 3 次元ディジタイザ、理研シンポジウム 生体力学シミュレーション研究、pp.1-9 (1999)
- 3) 山口裕子、南郷脩史、横田秀夫、中村佐紀子、牧野内昭武、樋口俊郎、藤井哲也、宮森恒、中山治人：昆虫 3 次元形状モデルによる運動シミュレーション、情報処理学会第 62 回全国大会講演論文集 4、pp. 183-184 (2001)
- 4) 南郷脩史：3 次元モデル構築システム TRI、細胞、Vol. 20, No.8, (1988)
- 5) 竹内憲司：3 次元視覚化・解析ツール TRIV、画像ラボ、1995.12
- 6) 福田俊、山田裕司、竹内憲司、南郷脩史：幾何形状アニメーションモデラーGAN(ゲイン)、PIXEL, No. 93, pp. 161-165 (1990)
- 7) 水野裕識、村岡洋一：CG による 4 脚動物の歩行動作生成する実装モデルの構築、電子情報通信学会論文誌 D-II、Vol.J77-D-II, No.6, pp.1076-1085 (1994)
- 8) H.Liu and K.Kawachi：A Numerical Study of Insect Flight, Journal of Computational Physics Vol. 146, pp. 124-156 (1998)
- 9) 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)