

2007年度 卒業論文

3DCGにおける  
ゾウの鼻の動きに関する研究

指導教員：渡辺 大地講師

メディア学部 ゲームサイエンスプロジェクト  
学籍番号 M0104402  
水野 照章

2007年度 卒業論文概要

論文題目

3DCGにおける  
ゾウの鼻の動きに関する研究

メディア学部

学籍番号：M0104402

氏名

水野 照章

指導  
教員

渡辺 大地講師

キーワード

3DCG、モーション、ゾウ、動物、  
アニメーション、インバースキネマティクス

近年3DCGを用いたゲーム、アニメーションの発展は目覚しく、ハードウェアの進化に伴い、よりリアルなモーションやモデリングを表現することが可能となった。人間同様、動物の動きも研究されしばし3DCGの中に登場する。本論文では中でもゾウが食事をする際の動きに注目した。ゾウの鼻の動きに関する研究は少なく3Dのゾウのモデルに鼻の動きをつけるという作業は、実際のゾウの観察に多くの時間を割かれる。また関節がなく、そのほとんどが筋肉でできているゾウの鼻はとても複雑な動きをし、このような器官の動きの特徴を把握しアニメーションにするという作業はモーションデザイナーの知識・経験に基づく熟練度に依存し、制作時間やコストが大きくかかる。本研究ではゾウの鼻にボーンを入れオイラー角で制御することにより鼻を動かす。これにインバース・キネマティクスの発見的な方法 (heuristic method) を用いることで任意の位置にある食べ物の位置まで自動で鼻を動かすことができる。適宜キーフレームで鼻の形状を制御するが全てボーンを角度を数値で制御したものである。中間の形状はクォータニオンで補間する。食べ物の種類や位置により変わる、一連の食べる動きをリアルタイムで行うコンテンツをC++で開発し実写映像のゾウの鼻の動きとクオリティの比較をし有効性を検証する。

# 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	3
第2章	ゾウの生態学的な食べる動きの分析	4
2.1	ゾウの種類とゾウの鼻	4
2.2	食べ物による鼻の使い方の違い	4
第3章	本研究の鼻の動きの生成手法	9
3.1	使用したゾウの3Dモデル	9
3.2	食べる動きの実装手法	11
3.2.1	インバースキネマティクス	11
3.2.2	鼻の移動	13
3.2.3	横からつかむ動きの対応	16
3.2.4	中間形状の補間	18
3.2.5	速度の設定	18
第4章	結果と考察	19
第5章	まとめ	23
	謝辞	24
	参考文献	25

# 目 次

2.1	2種の指状突起	5
2.2	バナナを鼻の先端の内側に乗せる	5
2.3	バナナを口の下まで引き寄せる	6
2.4	バナナの位置を整えしっかりとつかみ直す	6
2.5	バナナを口に押し込む	7
2.6	りんごを左から巻きつける	7
2.7	りんごを持ち上げる	8
2.8	りんごを口に入れる	8
3.1	鼻の3Dモデル	10
3.2	使用したモデル	10
3.3	発見的解法	12
3.4	アーム $i$ が誤差最小に達した場合	13
3.5	ゾウの配置と向き	15
3.6	ヘッド角とピッチ角の増減と鼻の動きの関係	16
3.7	ボーンごとに異なる位置に向かわせる	17
4.1	最初の位置	20
4.2	IKで移動	20
4.3	手前に寄せる	20
4.4	口に入れる途中	20
4.5	口に入れる	20
4.6	おろす途中	20
4.7	元の位置	20
4.8	最初の位置	21
4.9	IKで移動	21
4.10	持ち上げる	21
4.11	手前に寄せる	21
4.12	口に入れる	21
4.13	下に下ろす	21
4.14	横からつかむ動き	22

# 第 1 章

## はじめに

### 1.1 研究の背景と目的

近年のコンピュータグラフィックス技術の発展により、3DCG を用いたアニメーションやゲームの制作はより活発なものになってきている [1]。またハードウェアの進歩によってキャラクターのより複雑なモーションや、ディテールにこだわったモデリングをすることが可能になった。それに伴いゲームだけでなく映画、テレビなど多くの映像作品で本物と見間違えるようなリアルな 3DCG の動物が見られるようになった。馬や猫のような 4 足歩行の動物の動きの研究は大きく進歩した。特に歩行に関してはヒト [2][3][4] はもとより多くの動物のそれに関するアルゴリズムが明確になっている。

例えば Born Digital 社の CAT(Character Animation Technologies)[5] というものがある。CAT はボーン主動でキャラクターにアニメーションをつけるための 3dMax のプラグインである。CAT に含まれるプリセットモーションを適用することであらゆる関節動物の歩行、走行、ジャンプなどの動きを簡単かつリアルに付けることが可能である。またボーンの数や構造、プリセットモーションを編集することで人間はもちろんムカデのような多足動物の歩行のモーションも表現できる。本研究が対象とするゾウ [6] であってもこのような技術を用いることで歩行のモーションを付けることが可能である。

しかしそのゾウの鼻の動き方に関する研究は少なく 3D のゾウのモデルに鼻の動きをつける際、モーションデザイナーは逐一実際のゾウの映像を見て観察し CG のモデルにモーションをつけるという作業をしなければならない。また関節がなく、そのほとんどが筋肉でできているゾウの鼻はとても複雑な動きをし、どの方向にも伸ばしたり曲げたりできる。このような器官の動きの特徴を把握しアニメーションにするという作業はモーションデザイナーの知識・経験に基づく熟練度に依存し、制作時間やコストが大きくかかる。

ゾウの鼻を動かす手法として考えられるものにキーフレームアニメーションとモーションキャプチャがある。キーフレームアニメーション [7][8] とは、フレームごとに位置や形状が変化するオブジェクトの情報を任意のキーとなるフレームにだけ登録しアニメーションを表現する手法である。中間の位置や形状はコンピュータが計算し、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あらわす線をフレーム内に生成する。ファンクションカーブを編集することで、キーフレーム間の動きが変化し、オブジェクトの加速や減速を表現できる。この方法では前述したように、モーションデザイナーの経験にコンテンツのクオリティが依存することに加え、任意の位置に鼻を移動させる動きを自動で生成するということが不可能である。

モーションキャプチャ[9] とは人体や動物にセンサーを設置し、動きを数値化しコンピュータに取り込む技術である。リアルタイムで画面上の CG キャラクターを動かしたり、人体の動作や表情をアニメーションの素材として活用したり、運動生理学などの研究の場で、人体の動作の解析に利用されるなど、さまざまな現場で応用されている。しかし動物相手に製作者の求める動きをさせるのはそれだけで、骨の折れる作業である。また実際には、動物が求める動きをしたとしても、必ずしも正確にそのデータが測定されているわけではない。そのためデータを補正するという作業もしなければならない。

本研究ではゾウの鼻の動きを自動で制御する手法を提案する。水を飲んだり、背中を掻いたり、人や仲間のゾウとスキンシップしたりと、さまざまな動作がある

中で、本研究では特に食事をする際の動きに注目した。食べるものの種類や大きさの違いを考慮した、鼻の動きを分析し、食べ物をつかみ、口に運ぶ、という一連の動きを自動化する手法を提案する。それによってモーションデザイナーの作業を軽減する。本手法ではゾウの鼻にボーンを入れ、オイラー角で制御する。実際にゾウの鼻に骨格はないが、ボーンアニメーションの手法を用いて、関節1つ1つを前後左右に回転させることで鼻を動かす。任意の位置にある食べ物の位置まで鼻を移動させるための手法としてインバース・キネマティクスを用いる。インバース・キネマティクスには大きく3つの代表的なアプローチがある。代数的に解く方法、反復によって解く方法、発見的に解く方法である。それぞれの考え方にのっとった計算方法がいくつも考案されている。本研究ではこの中でも発見的方法 (heuristic method) を用いたゾウの鼻の制御を行った。発見的方法の利点は他の2つに比べ収束するスピードが格段に早く、また関節の数に計算の複雑さが依存しないという点である。ゾウの鼻の曲線を表現するためには多くの関節を必要とする。そのような関節体をリアルタイムで制御するには最も適した方法であると言える。また食べ物をつかんだあとの口に運ぶ動きはキーフレームアニメーションで行う。中間の形状を補間するのにクォータニオンのブレンド処理を用いた。これらの機能を FK[10] を利用して実装し、自動生成されたゾウの鼻の動きを実写映像のゾウの鼻の動きと比較し本研究の有効性を検証する。

## 1.2 本論文の構成

2章ではゾウの生態学的な概要と、食べ物の違いによる鼻の動きのパターンを分析した調査結果を述べる。3章では鼻を動かす手法を述べる。4章では、実際に生成されたゾウの鼻のモーションと実写映像のゾウの鼻の動きのクオリティを比較検証した考察を述べる。最後に5章で、本研究の成果と今後の課題を述べる。

## 第 2 章

# ゾウの生態学的な食べる動きの分析

### 2.1 ゾウの種類とゾウの鼻

ゾウには2つの種があり、ひとつはアフリカゾウ (African Elephant)、もうひとつはアジアゾウ (Elephas Maximus) である [11]。アフリカゾウの方が体高、体重ともに大きく、耳もでかい。ゾウの最大の特徴である鼻は、鼻と上唇が伸びたものである。鼻には骨は通っておらず、鼻孔、筋肉、神経、血管などで構成される。そのためどんな形にも曲げることができる。またゾウの鼻は多少伸び縮みする。

鼻の先端に指状突起という指ような役割を果たす突起がある。これによりゾウは鼻で物をつかむ際、横から巻きつけて取るだけでなく直接つまむことができる。アフリカゾウはこの指状突起が二つあるのに対しアジアゾウには一つしかない。図 2.1 にその様子を示す。アフリカゾウは二つの指状突起で直接物をつまめるがアジアゾウは鼻の下側の厚くなった先端部に押しつけるようにして物をつかむ [12]。

### 2.2 食べ物のよる鼻の使い方の違い

実際のゾウの動きを観察した結果から鼻の使い方を大きく2つに分類した。

ひとつは上からつかんで食べる動きである。木の実のような小さい物は上から指状突起でつまみそのまま一気に口に運び鼻の先端を口に押し込み食べる。ニンジンやバナナのような多少大きく細長いものは、まず指状突起を食べ物の下に食

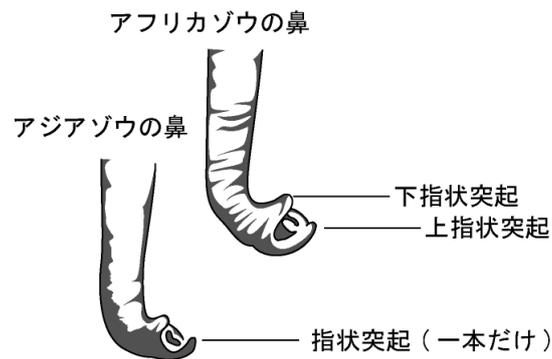


図 2.1: 2種の指状突起

い込ませ少し持ち上げ鼻の先端の内側に乗せ縦に巻きつける。図 2.2 はバナナを鼻の先端の内側に乗せた状態を示す。次に、食べ物を自分の体に引き寄せている。図 2.3 にその様子を示す。次に鼻を上に向けて、食べ物の位置を整えながら指状突起でしっかりとつかみ直している。図 2.4 にその様子を示す。最後に食べ物をつかんだ鼻の先端を口に押し込む。図 2.5 にその様子を示す。



図 2.2: バナナを鼻の先端の内側に乗せる

もうひとつは横から巻きつけて食べる動きである。りんごやキャベツのような大きいものを食べる時は指状突起を使わず鼻の先端数 10cm の内側を食べ物の横から巻きつける。ゾウの鼻は横にはほとんど曲げないため鼻をねじることによって横にむかせている。ゾウ個体の癖や、まわりにある障害物などで異なる場合もあるが、自分の体より左にある物は左から鼻を巻きつける。図 2.6 は鼻でりんごを左から巻きつけている状態を示す。上から見て時計回りに巻きつけ、鼻の付け根から見て反時計回りに鼻をねじっている。その後持ち上げ鼻を内側にまげて口に運ぶ



図 2.3: バナナを口の下まで引き寄せる



図 2.4: バナナの位置を整えしっかりとつかみ直す

途中半時計周りだったねじれを元に戻し、口に到達するころには時計回りになる。巻きつき方は食べ物自体が上下反対になっているので上から見て食べ物を時計回りに巻きつけている状態になっている。鼻の内側を使って食べ物を口の中に押し込むようにして食べる。図 2.7 はりんごを持ち上げ鼻のねじれがなくなっているときの状態を示す。図 2.8 は鼻を逆にねじりながらりんごを口に入れるときの状態を示す。なお自分の体より右にある場合はねじれと左右の巻きつきが逆になる。

今回モーシヨンの研究の対象ではないが、例外としてその他の食事をする際の鼻の動きを述べる。ひとつは草の束を食べる際の動きだ。まず上から草の束と垂直な向きに鼻を巻きつける。次に草の束を鼻で 8 の字を描くように左右に振り回し徐々に丸める。口に運ぶ際はりんごやキャベツを食べるときのように鼻の内側で押し込むようにして食べる。もうひとつは、ふすまという小麦を粉にひいたあとに残る皮や、おから、栄養剤など粉状のものを食べる際の鼻の動きである。まず粉がある位置の周辺の地面に鼻をべたっとつける。巻きつけるようにして粉をすくい上げ、ゆっくりと上に上げる。このとき巻きつけ方の左右や、ねじれは変



図 2.5: バナナを口に押し込む



図 2.6: りんごを左から巻きつける

わらない。鼻を上を上げつつ顔を上に上げ口を上に向け。鼻を口のところまで運び粉状のエサを流し込むようにして口に入れる。



図 2.7: りんごを持ち上げる



図 2.8: りんごを口に入れる

## 第 3 章

# 本研究の鼻の動きの生成手法

### 3.1 使用したゾウの 3D モデル

実装に用いたゾウの 3D モデルについて述べる。まずゾウの鼻にボーンを入れる。関節の数は 21 個とし鼻の付け根から先端にかけて等倍率で関節の幅が狭まるようにする。また本研究ではボーン肉付けを簡易的に球体で表現している。図 3.1 は本研究に使用した鼻の 3D モデルである。一般的にゾウの鼻の付け根と先端の太さの比率はおよそ 5 : 1 なので最も付け根側にある関節の位置を  $P_0$ 、先端にある関節の位置を  $P_{20}$  とし  $P_i$  を中心とする球の半径を  $w_i$  とするときそれぞれの球体の半径は式 (3.1) となる。

また関節  $P_i$  と関節  $P_{i+1}$  の幅、つまり節の長さを  $l_{i \rightarrow i+1}$  とすると、それぞれの節の長さは式 (3.2) となる。

$$w_i = w_0 \left( \frac{1}{5} \right)^{\frac{i}{20}} \quad (3.1)$$

$$l_{i \rightarrow i+1} = \frac{w_i}{2} \quad (3.2)$$

こうすることで鼻はまっすぐにしたとき円錐形となり、また先端に行くほどよく曲がるという鼻の特性も考慮できる。

またボーンには付け根から先端に向けてそれぞれ親子関係を持たせ、オイラー角で制御することで鼻の曲線を表現する。付け根の位置  $P_0$  は目の辺りに定め鼻をまっすぐにしたとき鼻の角度は地面に垂直な方向に対して  $25$  度とした。図 3.2 は本研究で使用したゾウの 3D モデルの鼻のボーンの傾きと付け根の位置を示す。



図 3.1: 鼻の 3D モデル

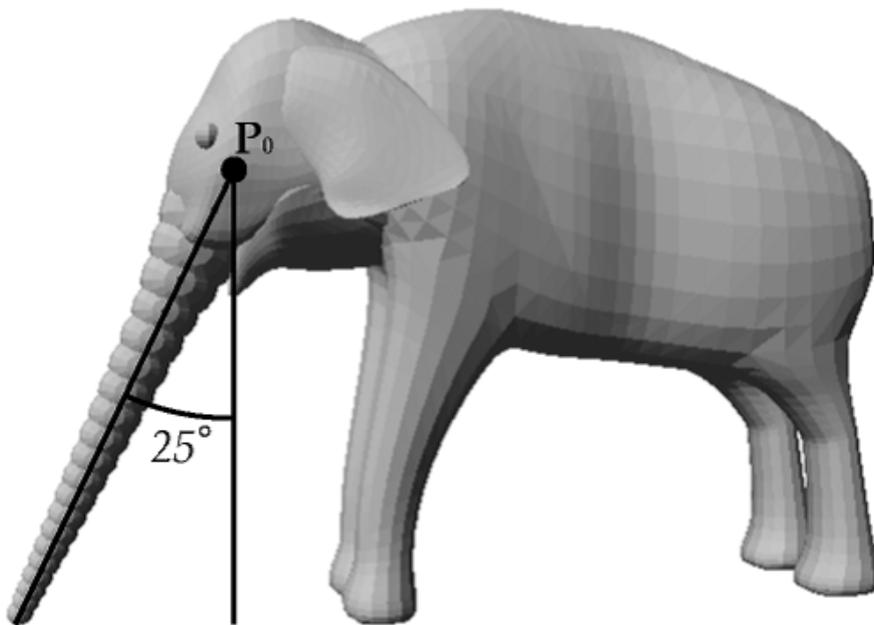


図 3.2: 使用したモデル

## 3.2 食べる動きの実装手法

### 3.2.1 インバースキネマティクス

インバースキネマティクス、逆運動学 (Inverse Kinematics)[13][14] とは人の腕や、ロボットのアームなどの関節を持つ物体の先端を任意の位置に移動させたいとき、どのくらい関節を曲げればその位置に到達するかを算出して関節物体を移動させる手法である。インバースキネマティクスには大きく3つのアルゴリズムが存在する。ひとつは代数的解法 [15][16] である。アームの関節を  $\theta$  回転させるとアームの先端の位置が  $X$  に移動するという関数  $X = f(\theta)$  があるとき、逆関数  $\theta = f^{-1}(X)$  を求め回転する角度  $\theta$  を求める方法である。もうひとつは反復による解法 (Iterative Solution) である。これはヤコビアンという行列を用いてアームの回転と先端の位置を関数で表し、その逆関数を求めることで回転する角度を算出する。

これら2つの方法は次元数やアームの数が増えると式が非常に複雑になったり、解が無限に存在してしまうということが起こる。しかしアームの回転する範囲を制限するなど、いくつか条件を設定 [17] することで、人やロボットなど広い場面で取り入れることができる。

最後が発見的方法 (Heuristic Method) である。全部で節が  $i$  個ある関節体があり、先端の節を  $L_i$ 、 $L_i$  と  $L_{i-1}$  の関節の位置を  $P_i$  とし、関節体全体の先端の位置を  $P_{end}$ 、先端を向かわせたい位置を  $P_{goal}$  とする。

ここで  $P_{end}$  と  $P_{goal}$  の誤差について考えると、誤差は式 (3.3) のようにあらわされる。

$$E = |P_{goal} - P_{end}| \quad (3.3)$$

そこでまず節  $L_i$  についてだけ誤差を最小にする。そのためには  $P_i$  を関節として節を角度  $\theta$  ぶんだけ回転してやればよい。回転軸は  $P_{end} - P_i$  と  $P_{goal} - P_i$  の外積ベクトルとする。図 3.3 は関節体の初期状態と、節  $L_i$  について、回転すべき角

度  $\theta$  を示す。 $\theta$  は 2 つのベクトル  $\mathbf{P}_{end} - \mathbf{P}_i$ 、 $\mathbf{P}_{goal} - \mathbf{P}_i$  の内積 [?] から求めることができる。

次は節  $L_{i-1}$  について見る。 $L_i$  の場合と同様に 2 つのベクトル  $\mathbf{P}_{end} - \mathbf{P}_{i-1}$ 、 $\mathbf{P}_{goal} - \mathbf{P}_{i-1}$  の外積ベクトルを回転軸とし、内積から  $\theta$  を求める。これを順に根元の節  $L_1$  まで繰り返し誤差を減らす。この誤差が 0 になればゴールに達したことになる。気に入らない結果になった場合は続けて節  $L_i$  から繰り返せばよい。図 3.4 は節  $L_i$  が誤差最小になったときの関節体の状態と、節  $L_{i-1}$  が回転すべき角度  $\theta$  を示す。

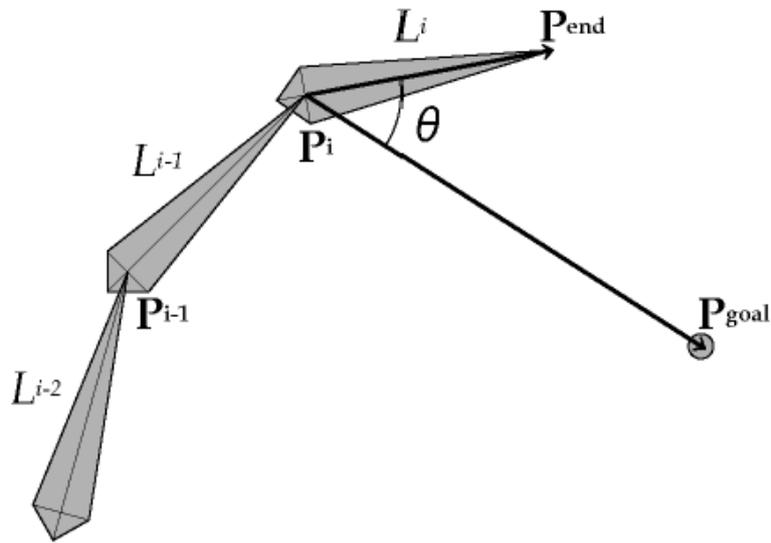


図 3.3: 発見的解法

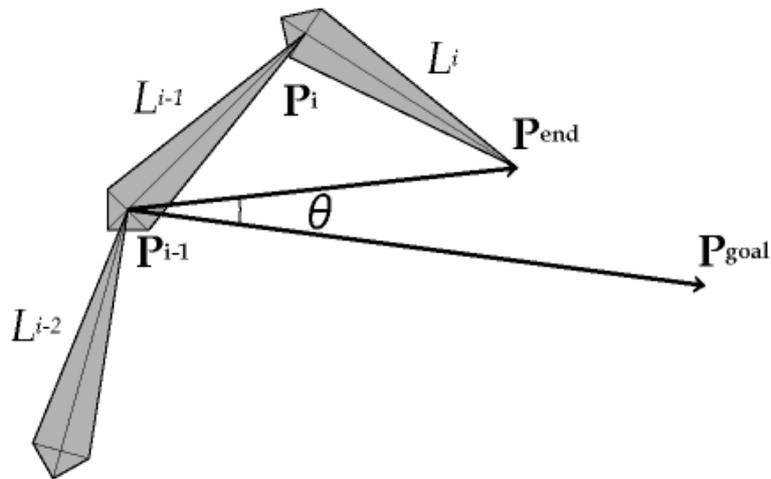


図 3.4: アーム  $i$  が誤差最小に達した場合

### 3.2.2 鼻の移動

鼻のボーンを回転させることで鼻の形状を変える。回転はオイラー角でおこなう。オイラー角にはヘッド角、ピッチ角、バンク角があり、ゾウの鼻に用いた場合はヘッド角が前後の動き、ピッチ角が左右の動き、バンク角がねじれる動きを表す。指状突起がどちらをむいているかなどの姿勢を考えれば、ヘッド角とバンク角で制御すべきだが、本手法で横の動きをバンク角で制御すると条件分岐が複雑になり目的の位置に収束させるのが困難になる。そのためヘッド角とピッチ角のみで制御する。ただし、姿勢を考慮しないただの曲線と考えればどちらも可動範囲は同じである。

本研究では任意のエサの位置まで鼻の先端を動かす方法として前途のインバースキネマティクスの発見的方法 (Heuristic Method) をベースに用いる。発見的方法ではひとつのアームを回転させる際、誤差が最小になる  $\theta$  ぶん全て回転するが、本手法では1度に回転する角度をわずかにし、鼻全体が同時に動くようにする。3.1項で述べたようにゾウのモデルは最も付け根の関節が  $P_0$ 、付け根から  $i$  番目が  $P_i$ 、

先端が  $P_{20}$  となっている。関節は先端に行くほど大きく回転するようにする。根元の動きはたとえ少しでも、全体に及ぼす影響が大きいからである。関節  $P_i$  が回転する角度を  $\theta_i$  とするとき、式 (3.4) のように先端に行くほど大きくなる  $i$  をかけることによって、先端に行くほどよく動くようにしてある。

$$\theta_i = ai \quad (3.4)$$

$a$  には回転させる角度として適宜小さな値を代入する。

この手法ではエサの位置を  $P_{food}$  とするときの3点  $P_{food}$ 、 $P_i$ 、 $P_{20}$  の角度の大きさを考慮する必要はない。全ての関節において何度もすこしずつ回転を繰り返すという前提なので、 $P_{food}$  と鼻の先端  $P_{20}$  の距離が近づいたら処理は終わりである。

それ以上に重要なのはエサと鼻の先端が離れているとき前後（ヘッド角）、左右（ピッチ角）どちらに回転したら、2点の距離が縮まるかである。以下にその条件分岐の方法を述べる。まず式 (3.5) のように外積を求める。「 $\times$ 」はベクトルの外積演算子を表す。

$$(x_i, y_i, z_i) = (\mathbf{P}_{20} - \mathbf{P}_i) \times (\mathbf{P}_{food} - \mathbf{P}_i) \quad (3.5)$$

関節  $P_i$  におけるヘッド角の回転を  $\theta_{hi}$ 、ピッチ角の回転を  $\theta_{pi}$  とすると、それぞれの回転の正負は式 (3.6)(3.7) のように判定できる。

$$\theta_{hi} = \begin{cases} ai & (z_i > 0) \\ -ai & (z_i < 0) \\ 0 & (\text{上記以外}) \end{cases} \quad (3.6)$$

$$\theta_{pi} = \begin{cases} ai & \left( (x_i > 0) \cap (y_i < 0) \right) \cup \left( (x_i < 0) \cap (y_i > 0) \right) \\ -ai & \left( (x_i > 0) \cap (y_i > 0) \right) \cup \left( (x_i < 0) \cap (y_i < 0) \right) \\ 0 & (\text{上記以外}) \end{cases} \quad (3.7)$$

なおゾウのモデルはゾウがX軸の負の方向を向き、手前がZ軸の正の方向となるように配置し、固定しているものとする。図3.5は各軸とゾウの向きを示す。またヘッド角は増加するとゾウから見て鼻は後ろに動き、減少すると前に動く。ピッチ角が増加すると鼻は左に動き、減少すると右に動く。図3.6にヘッド角、ピッチ角の増減と鼻の動きの関係を示す。

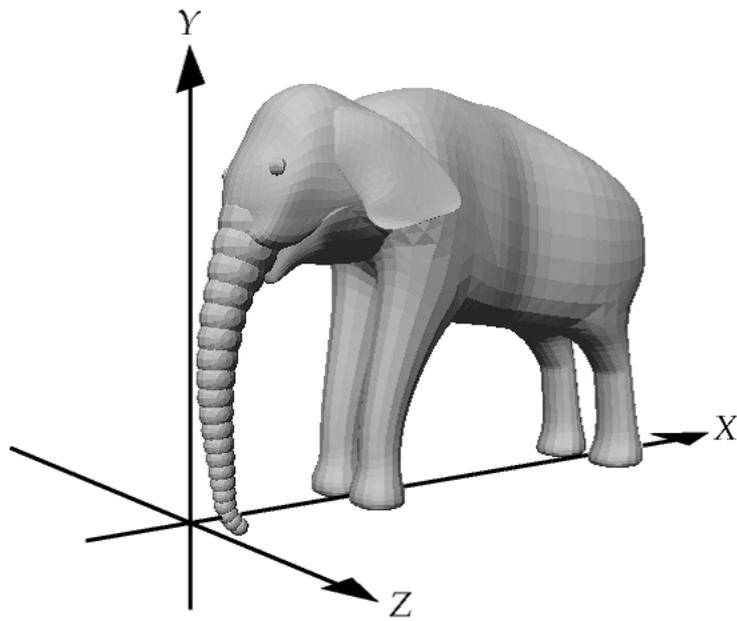


図3.5: ゾウの配置と向き

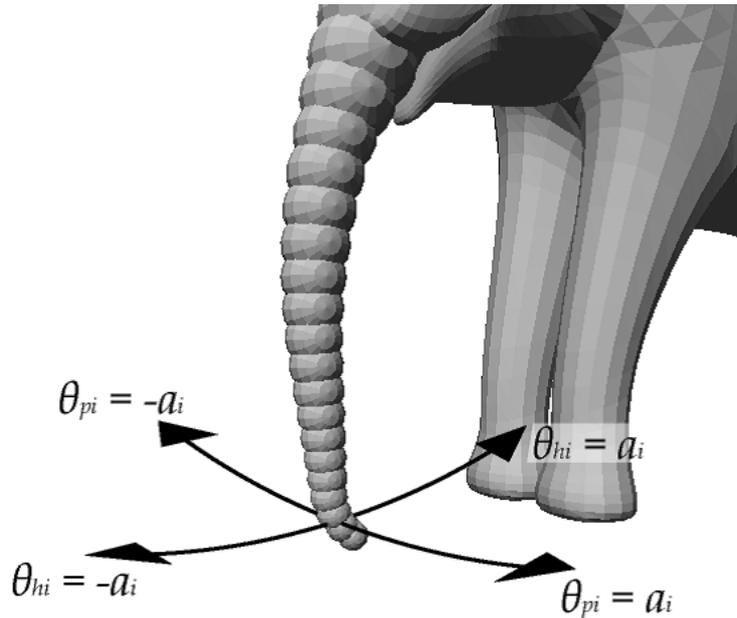


図 3.6: ヘッド角とピッチ角の増減と鼻の動きの関係

このように鼻の先端を任意のエサの位置まで移動し、2点の距離  $|P_{20} - P_{food}|$  が適当な長さまで縮まったらエサをつかんだと判断し口にはこぶ。以降の鼻の動きは後で述べるが、これによってエサを指状突起で縦につかむ動きの実装が可能となった。

### 3.2.3 横からつかむ動きの対応

次にエサを横からつかむ動きの実装について述べる。このとき指状突起は使わず、抱え込むようにしてエサをつかむ。全ての関節を同じ位置に収束させるのではなく、関節ごとに異なる位置に向かわせることによってまきつける動きを表現した。エサの位置  $P_{food}$  を取り囲むようにダミーの収束位置を3つ用意し、関節ごとに異なる位置に向かわせた。

今回は関節を  $P_0$  から  $P_{13}$ 、 $P_{14}$  から  $P_{16}$ 、 $P_{17}$  から  $P_{19}$  の3つに分け、それぞれの収束位置を  $Q_1$ 、 $Q_2$ 、 $Q_3$  とした。図3.7は3つの収束位置とそれぞれに対応する関節を示したものである。エサの半径が  $r$ 、 $P_{food}$  の座標  $(x, y, z)$  が  $(x_{food}, y_{food}, z_{food})$  の

とき、3つのダミーの位置はそれぞれ  $Q_1(x_{food}-2r, y_{food}, z_{food}+2.5r)$ 、 $Q_2(x_{food}, y_{food}, z_{food}-2.1r)$ 、 $Q_3(x_{food}+1.8r, y_{food}, z_{food}-0.5r)$  とした。

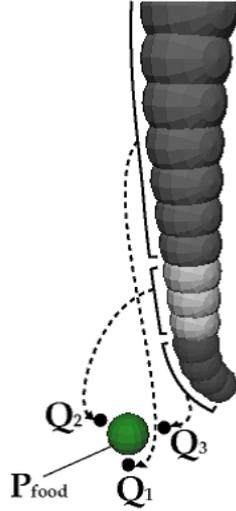


図 3.7: ボーンごとに異なる位置に向かわせる

またヘッド角、ピッチ角の増減の条件分岐に用いる外積の算出方法は式 (3.8) のようになる。

$$\begin{cases} (\mathbf{P}_{14} - \mathbf{P}_i) \times (\mathbf{Q}_1 - \mathbf{P}_i) & (0 \leq i \leq 13) \\ (\mathbf{P}_{17} - \mathbf{P}_i) \times (\mathbf{Q}_2 - \mathbf{P}_i) & (14 \leq i \leq 16) \\ (\mathbf{P}_{20} - \mathbf{P}_i) \times (\mathbf{Q}_3 - \mathbf{P}_i) & (17 \leq i \leq 19) \end{cases} \quad (3.8)$$

このように鼻を任意のエサの位置まで横からまきつけるようにして近づける。縦につかむ場合と同様にエサの位置と鼻の先端の位置  $|\mathbf{P}_{20} - \mathbf{P}_{food}|$  の長さが適当な長さまで縮まったとき処理を終了する。このときゾウは横からまきつけたまま少し持ち上げる。それを実現するために  $\mathbf{P}_{food}$  の  $y$  の値についてのみ増加させ、ダミーの収束位置  $Q_1$ 、 $Q_2$ 、 $Q_3$  も再度算出する。この状態で前途の移動を再び行い、この処理が終わったところで口に運ぶ。

### 3.2.4 中間形状の補間

ここまで、インバースキネマティクスをベースとした方法でエサの位置まで鼻を運ぶ動きが実現できた。本研究では以降の口に運ぶ動きはキーフレームアニメーションで表現する。キーフレームはオイラー角で事前に鼻の形状の数値化したものを用いる。エサをつかんだときの鼻の形状から次のキーフレーム、またはキーフレームからキーフレーム間のモーシヨンの補間手法としてクォータニオン [18][19] 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、オイラー角と相互変換が可能である。これを使うことにより2つの鼻の形状から線形補間した形状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、本研究では単純線形補間 [20] を採用している。

異なるモーシオン間をスムーズに繋ぐため、前モーシヨンのオイラー角を  $A$ 、後モーシヨンのオイラー角を  $B$  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 (3.9) である。

$$Q(t) = \frac{(1-t)Q_a + tQ_b}{|(1-t)Q_a + tQ_b|} \quad (3.9)$$

### 3.2.5 速度の設定

動きをよりリアルなものにするために速度に変化を付ける。今回は加速度的にそれを表現した。また場面を、鼻を最初の位置からエサの位置に移動するまで、エサを口に運ぶまで、口からもとの位置に戻すまで、というように3つにわけ、場面が変わるごとに速度を0にする。

# 第 4 章

## 結果と考察

実装した結果を述べる。図 4.1、4.2、4.3、4.4、4.5、4.6、4.7 は食べ物を上からつまんで食べる一連の動きである。図 4.1 は鼻を動かす前のデフォルトの形状として定めた状態である。図 4.2 は IK(Inverse Kinematics) で鼻を食べ物の位置まで移動させた状態である。以降の図 4.3、4.4、4.5、4.6、4.7 は口に運ぶ動きであり、キーフレームとして定めた形状を抜き出した。

上から食べ物をつかむまでの、本研究で自動制御した鼻の動きは、食べ物がどんな位置にあってもほとんどの場合、比較的リアルで、スムーズな動きが実現できた。

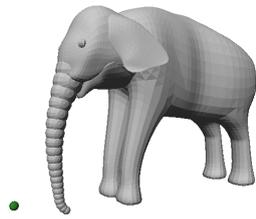


図 4.1: 最初の位置

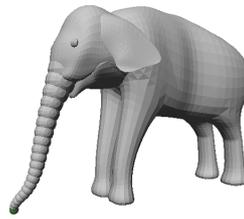


図 4.2: IK で移動

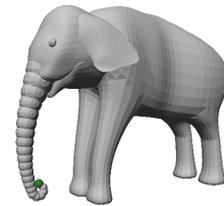


図 4.3: 手前に寄せる

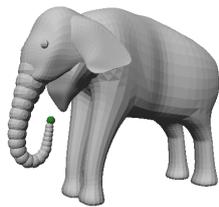


図 4.4: 口に入れる途中

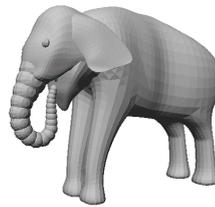


図 4.5: 口に入れる

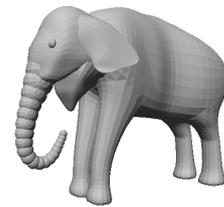


図 4.6: おろす途中

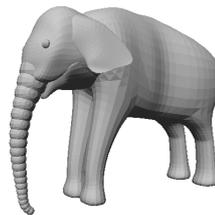


図 4.7: 元の位置

図 4.8、4.9、4.10、4.11、4.12、4.13 は自分より右側にある食べ物を横からまきつけるようにしてつかんだときの実装結果である。図 4.8 は鼻を動かす前の状態を示す。図 4.9 は鼻を食べ物に巻きつけながら IK で移動するところである。次に図 4.10 は巻きつけて少し持ち上げた状態を示す。このときも IK を用いる。以降はキーフレームで定めた形状を抜き出したものである。図 4.11 は鼻を手前に寄せた状態を示す。このとき左右の曲げは無くなる。図 4.12 は食べ物を口に入れたときの状態を示す。このとき鼻は食べ物をつかんだときとは左右逆のほうに曲がっている。最後、図 4.13 は鼻がもとの位置の戻った状態を示す。これらは食べ物が自分より右側にある場合の動きであり、左側にある場合は左右の曲がり方が

逆になる。

図 4.14 は横からつかむ動きに関して、食べ物をつかむまでの動きをさらに細かく切り取ったものを示す。鼻はボーンごとに色分けしてある。

これら横からまきつけて食べる動きは、食べ物の場所によって鼻がぶるぶると震えてしまったり、おかしい方向に曲がってしまったりといった不具合がある。またうまくいった場合であっても、IK によって生成された鼻を食べ物に巻きつけている形状に改善の余地がある。

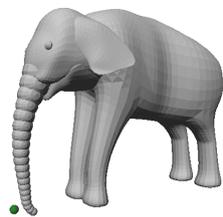


図 4.8: 最初の位置

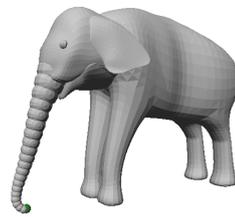


図 4.9: IK で移動

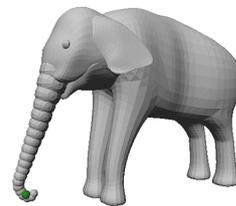


図 4.10: 持ち上げる

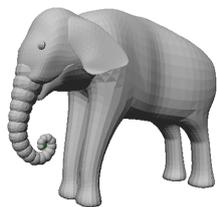


図 4.11: 手前に寄せる

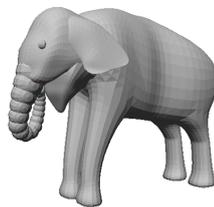


図 4.12: 口に入れる

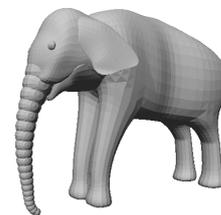


図 4.13: 下に下ろす

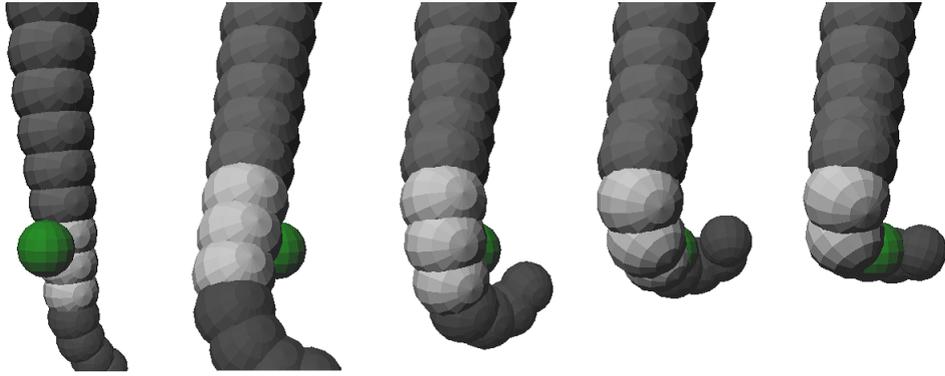


図 4.14: 横からつかむ動き

## 第 5 章

### まとめ

本研究のベースとなったインバースキネマティクスの発見的方法 (Heuristic Method) は一般的にクネクネとした挙動をし、人などの関節物体を動かすには不向きな手法である。しかしこれをゾウの鼻に応用し、1 度に回転する角度を少なくし、鼻全体を同時に動かすことでそれらしいゾウの動きが実現できた。またこの発見的方法は目的の位置への収束が速く、リアルタイムアプリケーションでは効果的である。

食べ物をつかんだ後、口に運ぶまでの動きは、食べ物をつかみ直したり、鼻のねじり方が変わったりといった、複雑な動きをするため IK ではなくキーフレームアニメーションで表現した。この口に運ぶまでの動きも自動化することが望ましい。

さらに今回の研究では食事をする際の鼻の動きのみに焦点を当てたが、水を飲む、背中を搔く、歩行中の揺れ、ゾウ同士のスキンシップなどといったその他の鼻の動きを自動化することで、より実用的なゾウのモーションの生成が可能となる。

# 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ユアル 2004-2005, 東京工科大学クリエイティブラボ, 2005.
- [2] 山崎信寿, ヒトの体形と歩行運動, バイオメカニズム, No7, 287-294, 1984.
- [3] Petros Faloutsos, Michiel van de Panne, Demetri Terzopoulos<sup>3</sup>, Composable Controllers for Physics-Based Character Animatio, SIGGRAPH, 2001.
- [4] Harold C. Sun, Dimitris N. Metaxas, Automating gait generation, SIGGRAPH, 2001.
- [5] Born Digital CAT,  
<<http://www.borndigital.co.jp/software/CAT/>>.
- [6] クリス・レイヴァース, ゾウの耳はなぜ大きい? 「代謝エンジン」で読み解く生命の秩序と多様性, 早川書房, 2002.
- [7] CGWORLDvol.32, ワークスコーポレーション, 2001.
- [8] 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.
- [9] Adam Kirk, James F. O'Brien, David A. Forsyth, Skeletal Parameter Estimation from Optical Motion Capture Data, SIGGRAPH, 2004.

- [10] 渡辺大地, FK Tool Kit System,  
<<http://www.media.teu.ac.jp/~earth/FK/>>.
- [11] DK & 同朋舎出版編集部, ビジュアルディクショナリー 4 動物 ANIMALS, 同朋舎出版, 1993.
- [12] イアン・レッドモンド, ビジュアル博物館 第 42 巻 象, 同朋舎出版, 1994.
- [13] 久保田一郎, 宇治社中, インバースキネマティクス, C MAGAZINE, 110-115, 7月号, 2001.
- [14] Jeff Landar, Game Developer Magazine, Sep 1998 Sep, 1998 Nov,  
<<http://darwin3d.com/>>.
- [15] Monacha D and Zhu Y, A Fast Algorithm and System for the Inverse Kinematics of General Serial Manipulators, IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1994.
- [16] Chin K, Closed-Form and Generalized Inverse Kinematic Solutions for Animating the Human Articulated Structure, Bachelor's Thesis in Computer Science, Curtin University of Technology, 1996.
- [17] Welman Chris, Inverse Kinematics and Geometric Constraints for Articulated Figure Manipulation,  
<<http://fas.sfu.ca/pub/cs/theses/1993/ChrisWelmanMSc.ps.gz>>.
- [18] Eric Lengyel, 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.
- [19] 金谷 一郎, 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.
- [20] 土永 まり子, 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, 東京工科大学, 2006.