

# 複数弾性物体を用いた対話操作が可能な弾性物体キャラクターモデル の構築法の提案

渡辺 隆史\*1 大谷 淳\*1 糊沢 順\*2\*3 徳永 幸生\*4

\*1 早稲田大学大学院国際情報通信研究科 \*2 千葉商科大学政策情報学科

\*3 早稲田大学国際情報通信研究センター \*4 芝浦工業大学工学部

**あらまし** 本論文では、伸縮を含むインタラクティブな変形操作が可能な、多関節3次元弾性物体モデルを提案する。本モデルは複数の弾性物体パーツから構成され、外骨格が全体を囲む。隣接する弾性物体パーツは関節構造に対応する接合面で結合される。各弾性物体パーツは、ボーンと弾性物体要素から構成される。外骨格はインタラクティブな変形操作を行うために用いられ、外骨格の頂点の移動に応じて伸縮を含むボーンの変形の計算がインバースキネマティクスなどを用いて行われる。ボーンの変形に基づき、弾性物体要素の変形、関節構造の動作などの計算が、境界要素法などを用いて行われる。本モデルをキャラクターモデルに適用し、実験的に有効性を確認した。

**キーワード** 物理シミュレーション、弾性物体、多関節モデル、境界要素法、アニメーション

## Propose of Construction Method for Elastic Character Models that Enable Interactive Manipulation by Using Two or More Elastic Objects

Takafumi WATANABE<sup>†</sup> Jun OHYA<sup>†</sup> Jun KURUMISAWA<sup>†,†,†,†</sup> Yukio TOKUNAGA<sup>†,†,†,†</sup>

<sup>†</sup> Graduate School of Global Information and Telecommunication Studies, Waseda University

<sup>††</sup> Faculty of Policy Informatics, Chiba University of Commerce

<sup>†††</sup> Global Information and Telecommunication Institute, Waseda research center

<sup>††††</sup> Faculty of Engineering, Shibaura Institute of Technology

**Abstract** This paper proposes an articulated 3D elastic object model that allows interactive deformations including expansions and contractions. The proposed model consists of multiple elastic object parts, and is surrounded by an exoskeleton. Adjacent elastic object parts are connected by a joining surface, which corresponds to a joint. An elastic object part consists of a bone and elastic object primitives. The exoskeleton is used for interactive deformations; i.e., according to the displacement of the vertex of the exoskeleton, the bone's deformation including expansion and contraction is computed by inverse-kinematics etc. Based on the bone's deformation, the deformations of the elastic object primitives and joining surfaces are computed by the boundary element method. By applying the proposed method to character models, the effectiveness of the proposed model was confirmed.

**Keyword** Physical Simulation, Elastic Object, Articulated Model, Boundary Element Method, Animation

### 1. まえがき

コンピュータグラフィックス (CG) における弾性物体シミュレーションの研究は、近年急速に進んでいる。しかし、映画などの非リアルタイム CG は、柔軟に変形する物体のアニメーションが頻繁に用いられるようになってきたが、リアルタイム性が必要なコンピュータゲームやバーチャルリアリティでは、弾性物体が用いられることは未だにほとんどない。従って、リアルタイムで処理可能な非剛体のシミュレーションモデルのさらなる研究が重要となっている。

過去の研究では単純な形状の物体に限られていたが、近年の研究では多数の頂点から構成される複雑な形状の弾性物体のシミュレーションも可能となってきた。

これらのモデルの多くは、やわらかいゴム人形のような挙動を示す弾性物体に対して、主に剛体との衝突や一部を掴むことによる変形をリアルタイムで計算することで、弾性物体のインタラクティブな操作が可能である。弾性物体の変形の計算法は主に、境界要素法、有限要素法、ばねモデルがある。

ばねモデルは、質点をばねで結び、各質点において運動方程式を立てることで弾性物体を再現する。しかし、質点の運動を収束させることが難しいため、質点やばねの配置法や計算法を検討する必要がある、任意の形状のオブジェクトをシミュレーションすることが困難である[1]。

有限要素法は、工学の分野で用いられる物理シミュレーション法であり、物理学的に正確な計算結果を得

ることできる。また、任意の形状のオブジェクトがシミュレーション可能である。計算コストが大きいという欠点はあるが、有限要素法によってシミュレーションされる点をコントロールポイントとして複雑な形状の物体を扱う方法[2]や線形化による計算効率の向上[3]で、計算コストの問題を解決する試みがされている。

境界要素法も、物理学的に正確な結果を得ることができ、任意の形状のオブジェクトもシミュレーション可能だが、計算コストが問題となっている[4]。有限要素法との違いは、有限要素法が体積積分であるのに対して、境界要素法は面積積分になる。したがって、有限要素法は、計算に物体内部の頂点も必要になるが、境界要素法は物体表面の頂点のみで計算でき、オブジェクトの構築が簡便である。つまり、3DCG のソフトでモデリングした形状データを、そのまま境界要素法に適用することも可能である。

現在、有限要素法や境界要素法が抱えている問題点として、線形近似による数値誤差の問題がある。計算コストを削減するためには線形近似が必要になるが、線形近似では数値誤差が発生するために長いものを曲げるような変形が難しい[3]。したがって、線形近似では、人や動物のようなキャラクターモデルを構築したとしても手足を曲げるなどの変形ができない。

この問題に対処可能なモデルも提案されており[5]、この方法ならば有限要素法を用いて非線形のような変形が可能である。ただし、全体を弾性物体として計算しているため、キャラクターモデルを構築しても、その挙動はゴム人形のようにしか感じられない。

それに対して、ボーンを用いてキャラクターモデルを構築し、有限要素法を用いて手足の曲げなどの変形が可能なモデルも提案されている[6][7]。このモデルは関節構造を持つため、単純なゴム人形ではない挙動が可能である。しかし、この手法の結果はボーンとスキンのような関係であり、キャラクターモデルの皮膚をアニメーションする手法となるため、キャラクターモデル全体が伸縮し弾性物体のように振舞う挙動はできない。

これらのことから本論文では、インタラクティブ操作が可能で、ボーンにより関節構造を持ち、弾性物体のように伸縮可能なキャラクターモデルの構築を目的とする。キャラクターモデル全体が伸縮し、ユーザが手足の先などを操作することは可能にする。そこで本論文では、複数の弾性物体を接合し関節構造を持たせた、多関節弾性物体モデルを提案する。また、弾性物体のシミュレーション法は、上述のような利点を持ち、本論文で提案するモデルにおいては計算コストを削減できる条件を満たせるため、境界要素法を用いる。

本論文の構成は以下の通りである。2章では、多関節弾性物体モデルの基本構造について述べる。3章では、提案モデルの詳細な計算法について述べる。4章で、提案モデルを用いたキャラクターモデルのシミュレーション結果を示す。5章で、本論文をまとめる。

## 2. 多関節弾性物体モデルの基本構造

図1は、提案モデルの基本構造を示している。多関節弾性物体モデルにおいて、弾性物体のキャラクター

モデル(図1左上)は、外骨格と多関節弾性物体パーツから構成される(図1右上)。さらに、多関節弾性物体パーツは、弾性物体要素とボーンからなる(図1下)。

はじめに図1右上のようなキャラクターモデルを囲む外骨格を用意する。外骨格は弾性物体でできているものとし、外骨格の頂点を用いてキャラクターモデルを操作する。外骨格のシミュレーションには、境界要素法を利用する。

次に、多関節弾性物体パーツを複数組み合わせることで、キャラクターモデルを形作る(図1右上)。多関節弾性物体パーツは、分岐のないボーンに複数の弾性物体要素を取り付けた形で構築され(図1下)、ボーンの両端を操作することで運動を制御する。キャラクターモデルは、手・足・胴体と頭などをそれぞれ1つの多関節弾性物体パーツとし、それぞれを接合することで構築する。接合は、多関節弾性物体パーツ間に接合面があると考えることで行う。ボーンの端点の座標は、外骨格または接合面から与える。

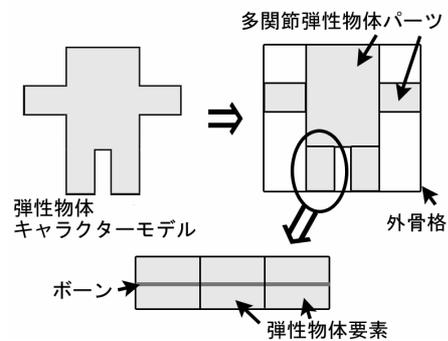


図1 多関節弾性物体モデルの基本構造

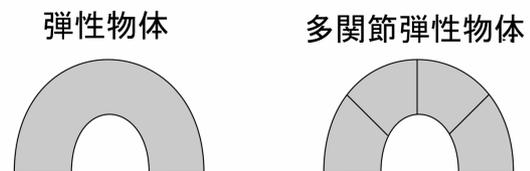


図2 弾性物体と多関節弾性物体の違い

弾性物体パーツのボーンはインバースキネマティクス (IK) によって制御するが、さらに、ボーンの関節点に対して運動方程式を立てることでボーンを伸縮させ、多関節弾性物体パーツの伸縮を再現する。弾性物体要素は、単一の弾性物体とし、変形には境界要素法を用いる。弾性物体要素同士は、接合面を用いて接合する。

多関節弾性物体モデルならば、目的の条件を達成できる。まず、計算コストに関しては、境界要素法で計算コストを削減するための条件(3.1節)を満たせる。次に、ボーンを伸縮させることで、多関節弾性物体全体の伸縮が再現できる。また、ボーンを持ったことで関節構造が得られるため、全体を弾性物体として計算した場合のゴム人形のような挙動とは違う挙動が可能である。さらに、細長いものの曲げにおける問題に関しては、複数の弾性物体を用いることで解決できる。例えば、棒状の弾性物体を曲げる場合を考える。1つ

の弾性物体からなる弾性物体の場合、線形近似では図 2 左のように変形はできない。しかし、4 個の弾性物体要素から構築された多関節弾性物体パーツならば、図 2 右のように 1 つ 1 つの弾性物体要素の変形は小さいため、線形近似したシミュレーションを用いても問題は無い。

### 3. 多関節弾性物体モデルの計算法

本章では、2 章で述べた多関節弾性物体モデルの詳細な計算法について述べる。

#### 3.1. 境界要素法

本手法では、弾性体シミュレーションに境界要素法を用いる。一般的に線形弾性物体の境界要素法の式は、最終的に以下の式となる[8][4][9]。

$$\mathbf{HU} = \mathbf{GT} \quad (1)$$

この式で、 $\mathbf{U}$ 、 $\mathbf{T}$  はそれぞれ、弾性物体の各頂点における変位および表面力の値を並べた  $n \times 1$  の行列 ( $n$  は、弾性物体の頂点数  $\times$  次元)、 $\mathbf{H}$ 、 $\mathbf{G}$  は、境界要素法によって求めた  $n \times n$  の行列である。各頂点では、変位または表面力の一方を未知の値、もう一方を既知の値とし、式 (1) を用いて未知の値を求める。既知の値を右辺、未知の値を左辺に移項すれば、連立方程式の問題に帰着する。

$$\mathbf{AX} = \mathbf{Z} \quad (2)$$

$\mathbf{X}$  は、 $\mathbf{U}$  または  $\mathbf{T}$  の未知の値を移項したことによってできた  $n \times 1$  の行列である。 $\mathbf{A}$  は、移項操作によってできた、 $\mathbf{H}$  または  $\mathbf{G}$  の成分からなる  $n \times n$  の行列、 $\mathbf{Z}$  は、既知の値のみの  $n \times 1$  の行列である。

未知の値をどちらか一方に設定し、以後変更しない場合、式 (2) は、以下の式を使って計算できる。

$$\mathbf{X}' = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{Z} - (\mathbf{A}^{-1}\mathbf{H})\delta\mathbf{U} + (\mathbf{A}^{-1}\mathbf{G})\delta\mathbf{T} \quad (3)$$

この式は、既知の値が初期条件 (ここでは、式 (2) の場合とする) から変化した場合の未知の値  $\mathbf{X}'$  を求める式である。この式で  $\delta\mathbf{U}$ 、 $\delta\mathbf{T}$  はそれぞれ初期条件からの変位および表面力の変化量 (未知の値とした成分については 0 としておく) である。

これらの式から、境界要素法を低い計算コストで解くためには、式 (3) を用い、かつ、式 (3) を効率良く計算する必要がある。したがって、計算コストを低くする条件は、①未知の値を固定し式(3)を利用する、②既知の値を変化させないようにすることで、 $\delta\mathbf{U}$ 、 $\delta\mathbf{T}$  において 0 の値の成分を多くし、行列の積の計算コストを減らす、である。

#### 3.2. 外骨格

外骨格の変形には、境界要素法の線形弾性物体のシミュレーション (3.1 節) を用いる。境界条件は、すべての頂点において変位が既知の値となるようにする。この場合、境界要素法を実行すると各頂点で表面力が求まる。アニメーションさせる場合、各頂点で求めた表面力を用いて運動方程式を立てる。そして、微小時間後の座標を求め、その座標から再び変位の境界条件を求め境界要素法を実行する。この処理を繰り返すことで、アニメーションする。ここで、境界要素法に

は回転運動が含まれていないため、運動方程式にしたがって、外骨格を回転運動させる必要がある (外骨格の座標系を回転する)。また、必要に応じて境界要素法における重力のシミュレーション[9]も行う。

#### 3.3. 接合面の計算

接合面は、多関節弾性物体パーツ同士の接合時や多関節弾性物体パーツ内部において、弾性物体要素同士を接合するために用いる。

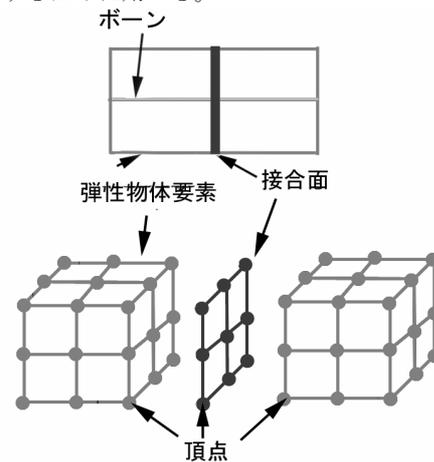


図 3 多関節弾性物体パーツの構造と接合面の形状

図 3 は、2 個の立方体型の弾性物体要素を持つ多関節弾性物体パーツにおいて、弾性物体要素同士を接合するときの接合面を表している。接合面は任意の頂点数を持ち、また、接合面の各頂点は、それぞれ隣り合う弾性物体要素の頂点に一対一に対応させる。多関節弾性物体パーツ同士を接合する場合も、同様な接合面を用いて、それぞれのパーツの弾性物体要素を接合する。

弾性物体要素は、境界要素法による変形のシミュレーションによって形状が変化する。その変形に合わせて、接合面の各頂点を変位させることで接合面も変形する。頂点の移動量は次の式で求める。

$$d\mathbf{x} = \kappa(-\mathbf{F}_{p1} - \mathbf{F}_{p2}) \quad (4)$$

ここで、 $d\mathbf{x}$  は頂点座標ベクトルの移動量、 $\kappa$  は任意の定数、 $\mathbf{F}_{p1}$ 、 $\mathbf{F}_{p2}$  はそれぞれ、接合面の頂点に一対一に対応させた弾性物体要素の頂点において、境界要素法によって求めた表面力とする。ただし、ボーンの関節部にあたる頂点は、ボーンに固定されるようにし、式 (4) を用いて移動はしない。多関節弾性物体パーツ同士の接合では、パーツ間の接合面はすべての頂点を、式 (4) を用いて変位する。

#### 3.4. 多関節弾性物体モデルの構築法

キャラクターモデルは、複数の多関節弾性物体パーツを組み合わせることで構築する。例として、手足があるような人型のキャラクターモデルを構築する場合を考えてみる。

はじめに、頭や胴体となる多関節弾性物体パーツを用意する (図 4 左)。そして、ボーンの座標は外骨格の

頂点の座標から与える。次に、手や足を接合していく。手や足はそれぞれを1つの多関節弾性物体パーツとし、その端は一方を外骨格、もう一方を胴体と接合する(図4右)。

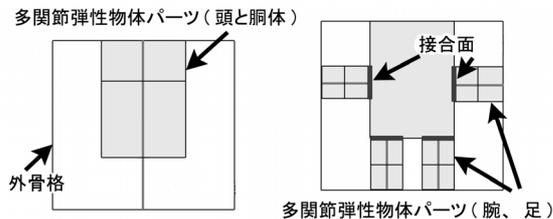


図4 キャラクターモデルの構築

### 3.5. ボーンの伸縮

ボーンは、はじめにIKを実行することで座標や角度を計算する。本論文では、IKにCCD(Cyclic Coordinate Descent)法[10]を用いた。CCD法は、反復計算をするが反復回数はあまり多くないため、低い計算コストで処理可能である。

IKを実行した後、弾性物体としての伸縮を再現するために、ボーンを伸縮させる。ただし、IKを実行しても、ボーンの長さが足りないために、ボーンが与えたい座標まで届かないことがある。この場合、ボーンの終端の座標を与えたい座標に移動することで対処する(終端のボーンのみが伸びることになる)。

ボーンの伸縮は、各関節点において運動方程式を立てることで行う。関節点には2つの力が働くとし、1つ目は隣り合うボーンの長さに依存する力、2つ目は関節点を挟む2つのボーンが成す角に依存する力とする。i番目の関節点(座標 $X_i$ 、角度 $\theta_i$ )におけるこれらの2つの力は、次のように与える。

長さに依存する力は、以下の式で求める(図5)。

$$F_{li} = \alpha(L_i - l_i)(X_{i-1} - X_i) / L_i + \beta(L_{i+1} - l_{i+1})(X_{i+1} - X_i) / L_{i+1} \quad (5)$$

ここで、i番目の関節点の座標を $X_i$ 、ボーンの長さを $L_i$ 、ボーンの内長を $l_i$ 、 $\alpha$ 及び $\beta$ は任意の定数とする。

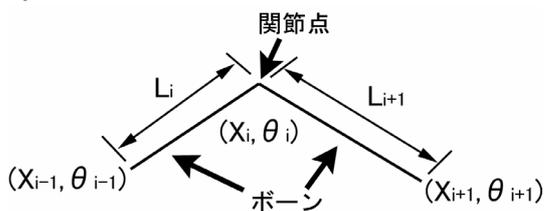


図5 ボーンの長さに依存する力

角度に依存する力は、以下の式で求める(図6)。

$$F_{\theta i} = \gamma(\theta_i - \theta_0)N_i + \eta(\theta_i - \theta_0)N_{i+1} \quad (6)$$

ここで、i番目の関節間の角度を $\theta_i$ 、関節間で安定する角度を $\theta_0$ とする。また、2つのボーンが作る平面において、i番目のボーンの単位法線ベクトルを $N_i$ 、 $\gamma$ および $\eta$ は任意の定数とする。

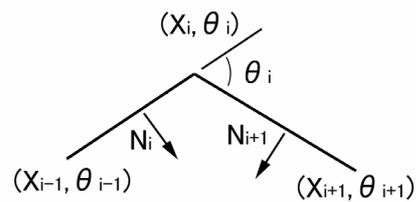


図6 ボーンの角度に依存する力

### 3.6. 弾性物体の付加・変形

IK及びボーンの伸縮によりボーンの色度や座標が求まったら、弾性物体要素を付加する。弾性物体要素の計算では、境界要素法のシミュレーションのために弾性物体要素の境界条件と多関節弾性物体モデルの座標系に対する弾性物体要素の座標系が必要となる。

このうち座標系は、弾性物体要素を回転するために必要となる。線形弾性体のシミュレーションでは、回転の際に大きな誤差が発生するため、弾性物体要素の座標系に適切な回転を与えることで弾性物体自体を回転し、大きな誤差が生じないようにするためである。

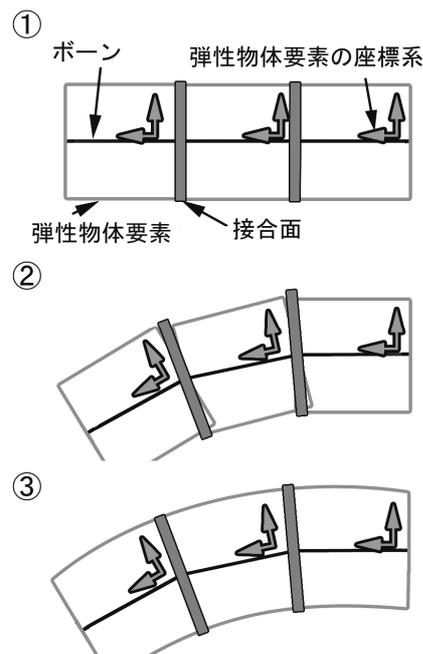


図7 キャラクターモデルの構築

多関節弾性物体パーツの初期状態は図7①のように与えておく。ボーンは一直線にし、各弾性物体要素の座標系はボーンと平行になるようにする。接合面は、ボーンの関節部を通るように配置する。

IK及びボーンのアニメーションを行い、ボーンの状態が図7②のようになったとする。このとき、各弾性物体要素の座標系は、ボーンの回転に合わせて回転しボーンと平行にする。また、本論文ではねじれは扱わず、ボーンの軸周りの回転は考えない。接合面もボーンの回転に合わせて回転するが、ボーン間の接合面の場合はボーン間の角を2等分するように回転する。

境界要素法を実行するときを与える境界条件は、接

合面に接合する頂点では変位を既知の値とし、接合面に接するように変位を与える。また、図 7①でボーンの端点と接していた弾性物体要素の頂点も、変位を既知の値としボーンの端点に接するように変位を与える。他の頂点では表面力を既知の値とし、表面力は 0 とする (図 7③)。この境界条件なら式 (3) を利用でき、接合面に対応する頂点以外では境界値が 0 で一定になるため、3. 1 節の計算を効率化する条件を満たせる。

#### 4. シミュレーション結果

図 8 は、頂点数 82 の円柱型の弾性物体要素から構築した多関節弾性物体パーツを伸縮した結果である。接合面では多少凹凸が発生しているが、アニメーションさせた場合、凹凸を感じさせないくらい滑らかな挙動が可能であった。

図 9 は多関節弾性物体パーツを曲げた状態である。提案モデルならば曲げを行っても、歪な変形はせず、細長い物体のシミュレーションも可能なことがわかる。

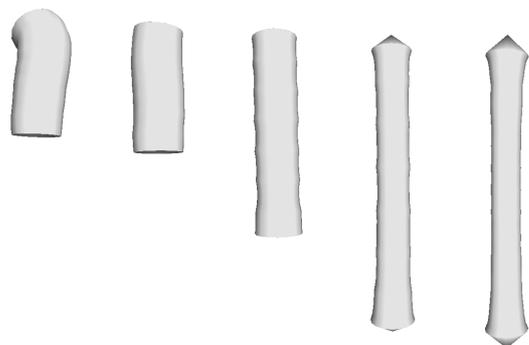


図 8 7 個の円柱からなるパーツを伸縮した結果



図 9 13 個の円柱からなるパーツを曲げた結果

表 1 頂点数と計算速度

円柱数	頂点数	ポリゴン数	計算時間 (msec)
10	658	1312	5.3
30	1938	3872	17.5
50	3218	6432	34.8
70	4498	8992	43.5
100	6418	12832	64.5

円柱型の弾性物体要素を複数接合した場合の計算速度 (1 フレームあたりの計算時間) が表 1 である。表 1 の頂点数とポリゴン数は、円柱同士が接合されることによる頂点の重なりやポリゴンが隠れることを考慮に入れた、多関節弾性物体パーツの実質的な値となっている。実験環境は、OS Windows XP(32bit)、CPU Pentium4 650 (3.4GHz)、言語に VisualStudio.NET 2003 C#を使用した。ただし、Hyper-Threading や SSE など

の特殊な命令は使用していない。表 1 から、比較的頂点数の多いオブジェクトに対しても、インタラクティブ操作が可能になることがわかる。

表 2 は、外骨格をアニメーションした場合の頂点数と計算速度の関係を示している。以下の実験では、頂点数 26 の外骨格を用いてキャラクターモデルを構築できたことから、外骨格の計算コストは非常に小さいことがわかる。

表 2 頂点数と計算速度

頂点数	26	56	98	218	386
時間(msec)	0.12	0.35	1.9	9.4	28

多関節弾性物体モデルを用いてキャラクターモデルを構築した結果は以下ようになる。

図 10③は、9 個の多関節弾性物体パーツを用いたキャラクターモデル (総頂点数 2402) である。このモデルでは、図 10①の多関節物体パーツを外骨格の上下に接合し、図 10②と同じ形状のもの 8 個を外骨格の底面の中心と底面の他の頂点を結ぶように配置することでモデルを構築した。図 11 が、アニメーション結果である。表 1 と同様の環境を用いた場合、計算速度は約 20msec である。

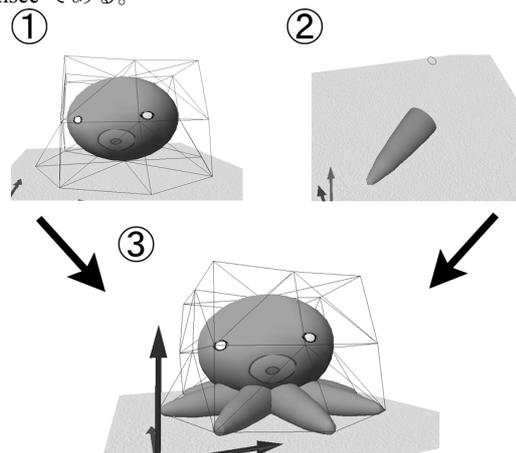


図 10 9 個の多関節弾性物体パーツを配置して構築したキャラクターモデル

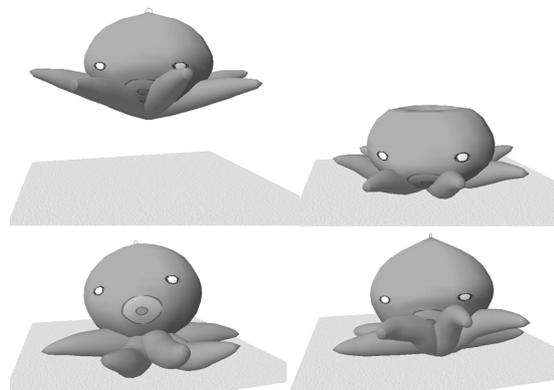


図 11 図 10 のモデルをアニメーションした結果

図 12③は、8 個の多関節弾性物体パーツを接合したキャラクターモデル (総頂点数 1466) である。このモ

デルでは、頭と胴体（図 12①）に手足など（図 12②）を接合することでキャラクターモデルを構築した。多関節弾性物体パーツ同士の接合箇所では、図 13 上から 1 段目から分かるように、胴体が他の多関節弾性物体パーツである足に引っ張られる様子がシミュレーションでき、複数の多関節弾性物体パーツが相互作用を持って変形できた。表 1 と同様の環境を用いた場合、計算速度は約 10msec である。

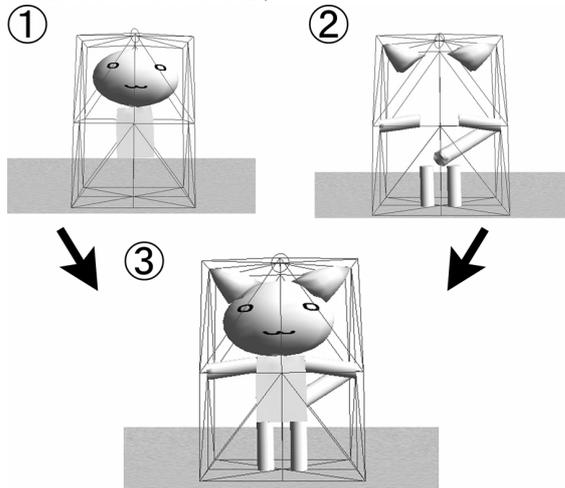


図 12 8 個の多関節弾性物体パーツを接合して構築したキャラクターモデル

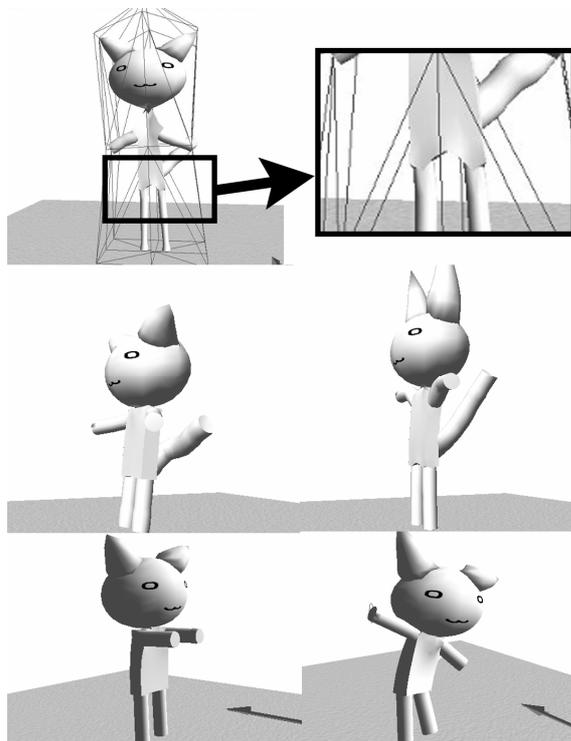


図 13 図 12 のモデルをアニメーションした結果

## 5. むすび

複数の弾性物体を接合することで、関節構造を持ち、インタラクティブな操作が可能なキャラクターモデル

を構築できる多関節弾性物体モデルを提案した。

弾性物体のキャラクターモデルを構築する場合、ボーンによる関節構造を持ちながら、弾性物体として振舞えなければならない。この場合、リアルタイム計算のために線形近似した弾性物体のシミュレーション法では困難な変形と、ボーンを持ちながら弾性物体のようにキャラクターモデルを伸縮させる変形が必要となる。

そこで、本論文では、複数の弾性物体を接合することで上記の問題を解決した。提案モデルでは、ボーンによる関節構造を持ち、曲げや伸縮が自由にできる多関節弾性物体パーツを外骨格や他のパーツに接合することで、曲げや伸縮が可能な弾性物体のキャラクターモデルを構築できる。

今後は、キャラクターモデルに適した変形ができる外骨格や、弾性物体要素を直接操作する手法の検討をしていく。

## 文 献

- [1] 宮崎慎也, 吉田俊介, 安田孝美, 横井茂樹, “局所形状保持に基づく仮想弾性物体モデルの提案”, 信学論, vol.J82-A,7, pp.1148-1155, July 1999.
- [2] Steve Capell, Seth Green, Brian Curless, Tom Duchamp, Zoran Popović “A multiresolution framework for dynamic deformations” ACM SIGGRAPH Symposium on Computer Animation, pp.41-48, July 2002.
- [3] Kris K. Hauser, Chen Shen, James F. O’Brien, “Interactive Deformations Using Modal Analysis With Constraints” Graphics Interface 2003, June, pp. 247-256.
- [4] Doug L.James, Dinesh K.Pai, “ARTDEFO: Accurate real time deformable objects”, SIGGRAPH1999, pp.65-72.
- [5] M. Muller, J. Dorsey, L. McMillan, R. Jagnow, B. Cutler, “Stable Real-Time Deformations”, ACM SIGGRAPH Symposium on Computer Animation, pp 49-54, 2002.
- [6] Steve Capell, Seth Green, Brian Curless, Tom Duchamp, and Zoran Popović. “Interactive skeleton-driven dynamic deformations” ACM SIGGRAPH Transaction on Graphics, 21(3), pp.586-593, 2002.
- [7] Steve Capell, Matthew Burkhart, Brian Curless Tom Duchamp, Zoran Popović “Physically Based Rigging for Deformable Characters” ACM SIGGRAPH Eurographics Symposium on Computer Animation, pp.301-310, 2005
- [8] 結城良治, 木須博行, “境界要素法による弾性解析”, 培風館, 1987.
- [9] 渡辺隆史, 大谷淳, 棚沢順, 徳永幸生, “2 段階境界要素法を用いる三次元弾性物体の変形と移動の実時間アニメーション法”, 信学論, VOL.J88-D2 No.9, pp.1876-1888, September 2005.
- [10] Damian Merrick, Tim Dwyer, “Skeletal Animation for the Exploration of Graphs”, invis.au 2004, pp.61-70.