

# 高速処理に適した弾性プリミティブモデルによる 仮想弾性物体とのリアルタイムインタラクション

鈴木茂樹\* 山田雅之\*\* 宮崎慎也\*\* 長谷川純一\*\* 安田孝美\*\*\* 横井茂樹\*\*\*\*

\*中京大学大学院情報科学研究科 \*\*中京大学情報科学部

\*\*\*名古屋大学情報文化学部 \*\*\*\*名古屋大学大学院人間情報学研究科

## Real-time Interaction with Virtual Elastic Objects Constructed by Computation Accelerated Elastic Primitives

Shigeki Suzuki\*, Masashi Yamada\*\*, Shinya Miyazaki\*\*,  
Junichi Hasegawa\*\*, Takami Yasuda\*\*\* and Shigeki Yokoi\*\*\*\*

\*Graduate School of Computer and Cognitive Science, Chukyo University

\*\*School of Computer and Cognitive Science, Chukyo University

\*\*\*School of Informatics and Sciences, Nagoya University

\*\*\*\*Graduate School of Human Informatics, Nagoya University

E-mail: sssuzu@katch.ne.jp

{ myamada, miyazaki, hasegawa } @sccs.chukyo-u.ac.jp

{ yasuda, yokoi } @info.human.nagoya-u.ac.jp

### 1 はじめに

物理法則に基づいた弾性物体のモデリング手法は、物体の局所的性質を比較的単純な力学モデルを用いて記述するのみで、変形物体の自然な動きを容易に生成できるとしてその有効が知られている[1]. 弾性物体モデルは元来コンピュータアニメーションの分野において変形物体のリアルな動きをアニメーションとして生成することを主目的とされてきたが、最近のコンピュータの性能の飛躍的な向上により、かなり大規模なサイズのモデルを実時間処理アプリケーション用途として利用できる可能性が高まってきた. とはいえ、実時間での運動生成のための計算量は局所力学モデルである弾性プリミティブの数に比例するため、例えば局所力学モデルの性質を単純な線形弾性のみに限定したとしても、モデルの分解能を上げれば、プリミティブの総数は飛躍的に増大してしまう. したがって、実時間処理用途を考えた場合、弾性プリミティブの総数を如何に削減するかは重要な問題となる.

弾性運動の計算を積極的に高速化した研究例として Promayon らのモデル[2]があげられる. 彼らは中空のボールを模倣した弾性物体モデルを提案しており、概略的には、物体の表面付近にのみ弾性格子を配置し、それに内部の空気圧に相当する体積保存の応力を組み合わせることにより計算量の少ない効率の良いモデルを提案している. しかしこのモデルにおいて純粋に弾性材質であるのは物体の表面のみであり、このモデルにより表現しうるのはやはり空気の充填されたゴムボールのような物体である. これに対し、我々の興味はむしろゴムやスポンジのように内部が均質な弾性材質の汎用モデルの構築にある. 均質な、すなわち内部についても弾性応力を生じるようなモデルは、少なくとも内部についても弾性プリミティブを配置する必要がある. そこで、本研究では、物体の表面から中心に向かって弾性体プリミティブのサイズが増大する可変解像度モデル (*gradational resolution model*)を用いて、仮想弾性物体のリアルタイムでの対話操作環境を実現する. 物体内部に配置される弾性プリミティブの数を大幅に削減する

ことにより弾性物体運動を飛躍的に高速化できるためリアルタイム処理に有利となる。

弾性物体モデリングにおける別の問題として、自由形状のモデルの生成がある。リアルタイム CG における剛体モデルの形状表現では、自由形状を少ない構成要素で効率的に表現できるポリゴンモデルが通常用いられる。しかしながら、弾性物体モデルでは基本的に物体を均一なサイズのプリミティブに分解する必要があるため、ポリゴンモデルで与えられた形状の弾性物体モデルを作成することは容易ではない。これに対して、立方体の組み合わせによって形状を表現するボクセルモデルは、立方体という同一サイズの正多面体で構成されているため、弾性物体モデルの入力形状として適している。また、ボクセルモデルとポリゴンモデルの間の変換に関する研究は古くから行われており、そのノウハウはかなり完成されている。加えて、CT データから形状データを得る医療分野のようにボクセルモデルが主流となっている分野も少なくない。したがって、本研究では入力形状がボクセルデータであることを前提とする。

我々の研究グループでは大変形においても適正な弾性応力が得られ、自由な多面体形状をとることが可能な弾性プリミティブモデルを既に提案している。弾性プリミティブのサイズを可変とするためには、異なるサイズの立方体プリミティブをシームレスに結合する必要があるが、

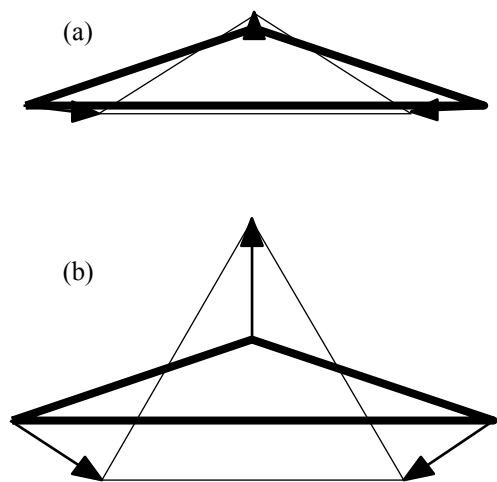


図1 極度に変形した正三角形要素に働く応力

あるが、本プリミティブモデルの頂点配置に関する柔軟性は可変解像度モデルの構築において有効に寄与する。

## 2 弾性プリミティブ

### 2.1 運動計算の基本的な方法

動的特性を含めた物体運動の計算方法としては、弾性プリミティブの頂点にかかる力を何らかの方法で定め、それに応じて頂点の運動を時間軸方向の線形差分近似式で逐次的に求めていく方法[3]が、特にリアルタイム処理が前提となる対話操作システムでは有効である。すなわち時間軸上の離散化された各時刻  $T$  において、頂点  $i$  にかかる力ベクトル、速度ベクトルおよび位置ベクトルがそれぞれ  $\mathbf{F}_i(T)$ 、 $\mathbf{V}_i(T)$  および  $\mathbf{P}_i(T)$  として、式(1)、式(2)により、離散時刻間隔  $\Delta T$  後の速度および位置が逐次的に決定される。

$$\mathbf{V}_i(T + \Delta T) = \mathbf{V}_i(T) + \frac{\mathbf{F}_i(T)}{m_i} \Delta T \quad (1)$$

$$\mathbf{P}_i(T + \Delta T) = \mathbf{P}_i(T) + \mathbf{V}_i(T) \Delta T \quad (2)$$

ここで、 $\Delta T$  の値は、ばねの振動周期に対して十分小さくとる必要がある。

### 2.2 従来の弾性プリミティブモデル

現在までに、既に多くの弾性物体モデルが考案されており、それらにおける弾性力の定義方法も様々なものが考えられているが、それらのほとんどの基本的考え方は、質点-ばねモデル、または有限要素法における一次

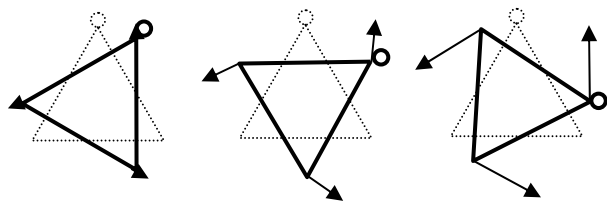


図2 有限要素法モデルにおいて要素の剛体回転によって生じる不適切なひずみ

要素のいずれかに基づいている。

質点-ばねモデルとは、立方体等の格子の頂点に質点を、辺にばねを配置したものであり、質点を共有するばね同士は質点を介して互いに結合している。質点-ばねモデルは、ばねという直感的な弾性力に基づいており、プログラムによる実装も容易なことから広く用いられているモデルの一つである。しかしながら、質点-ばねモデルは、1次元的な弾性要素であるばねをトラス構造に配置することにより、要素の変形に対する復元力すなわち弾性応力を間接的に得ているため、要素の大変形時の復元力が不適当になるという問題がある。図1(a)に示すのは3本のばねを組み合わせた正三角形要素において3頂点に生じる応力を示しているが、このように変形の度合いが大きい場合には、ばねの応力間に競合が生じた結果、上端の頂点に生じる応力がほとんど打ち消され、三角形形状の復元にほとんど貢献していない。

有限要素法(FEM)による方法では、2次元における三角形または3次元における四面体である一次要素の変形を線形ひずみとして近似し、そのひずみを生じるのに等価な頂点応力を求める。有限要素法は物体が連続体であることを前提とした理論であるため、ヤング率やポアソン比といった物理特性値を与えることにより実際に存在する物質に近い性質の仮想物体を生成することが可能である。反面、弾性要素を一次要素に分解し、変形ひずみを求める際に剛体回転成分を取り除くなどの処理を行う必要がある(図2)。

### 2.3 局所形状保持モデル

上記の2種類のモデルの長所および短所を考慮し、大変形時にも適正な応力が得られ、要素の形状が自由な多面体形状を取りうる弾性要素モデルとして、我々の研究グループは局所形状保持モデルを提案している[4]。具体的には、格子の体積的な基本要素となる多面体要素ごとに、多面体の平衡形状の位置を求め、それに対する各頂点の変位に比例した力をその頂点に働く応力とするようなモデルである(図1(b))。本モデルは、質点-ばねモデルの1次元の弾性要素であるばねを3次元の弾性体積素に拡張したものと考えることができる、ばねのばね定数に相当する変位量に対する弾性応力の比例定数を調節することにより本質的にはFEMモデルヤング率と同様に弾性物体の弾性に関する性質を表現することが可能である。特に要素形状が正多面体の場合には両モデルによる応力は等価になる。

### 2.4 多面体要素の応力計算

多面体要素の応力を決定するためには、要素の各頂点の変位を定める基準となる、ばねの自然長にあたる要素の平衡形状の位置を物体の剛体回転を考慮して定める必要がある、これは要素内の内力である応力の合力および力のモーメントの総和がともに零ベクトルとなるという条件により一意に決めることができる。

したがって、ある瞬間の多面体要素の頂点  $i$  の、平衡形状での重心に対する相対ベクトルを  $\mathbf{R}_i$ 、変形形

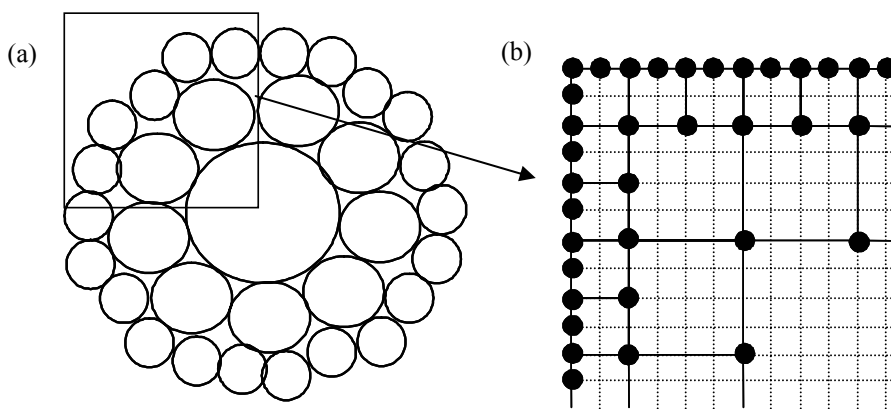


図3 可変解像度モデルにおける弾性要素の配置

状でのそれを  $r_i$  とすれば、その変位ベクトルは ( $r_i - R_i$ ) で与えられるので、 $\{r_i\}$  を既知、 $\{R_i\}$  を未知とする力のモーメントの釣り合いの方程式

$$\sum_i r_i \times k(R_i - r_i) = k \sum_i r_i \times R_i = \vec{0} \quad (3)$$

を解くことにより、多面体の平衡形状位置および頂点に働く応力が一意に定まる。方程式(3)の比較的高速な数値的解法については文献[4]を参考されたい。

### 3 可変解像度モデル

プリミティブ数を削減するという操作を、複数のプリミティブをそれらの領域を占める単一のプリミティブで置き換える操作と考える。仮に比較的変形の小さいプリミティブのみにこの削減操作を適用できたとすれば、それは効率の良い削減と言える。しかしながら、変形の小さいプリミティブを探索する操作は、結局全プリミティブに対する処理となるため、運動計算の高速化につながらない。変形が大となる部分をあらかじめ特定することは容易ではないが、物体の変形が大となるのは物体に外力が作用する時であり、特に剛体物体との衝突においては変形物体の表面において、大きく変形する。反面、変形物体の内部では互いに作用する力は弾性プリミティブ間に弾性力であり、それらは剛体から受ける外力と比較して明らかに小さい。また、変形物体内部ではプリミ

ティブ同士が互いに結合していることにより互いの変形を抑制しあっている。そこで、物体の内部に行くほど、より大きなプリミティブとなるようなモデルを用いれば、物体表面ではボクセルデータの本来の解像度を維持しつつ、計算量を効果的に削減することができる(図3)。

#### 3.1 弾性プリミティブモデル

プリミティブの大きさが、物体の表面から中心に向けて徐々に大きくなるような配置となるためには、図4に示すような物体の表面側の方が中心側よりも頂点数が多く配置されたプリミティブを用いる必要があるが、我々の提案している弾性プリミティブモデルは自由な多面体形状をとることができるので、このような頂点の配置にも容易に適用できる。また、物体の表面付近ではボクセル値が1のボクセルと0のボクセルが混合しているので、このような部分には図5に示すようなプリミティブを配置する。

#### 3.2 物体表面の平滑表示

ボクセル形状は、形状の表面が階段状になるため、Marching Cubes 法をはじめとする表面を平滑化表示する手法が考えられている。本弾性モデルに Marching Cubes 法を適用するためには、弾性モデルの変形に応じてポリゴンの頂点を再計算する処理が必要となる。そこでここでは、図6に示すように、ボクセル形状表面の階段部分の凹み部分を隠すように面を張る方法を用いる。

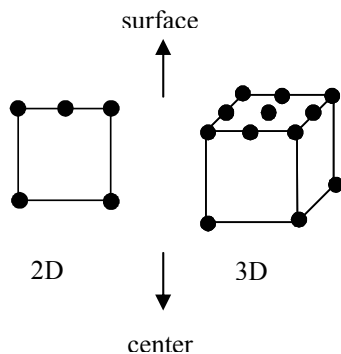


図4 頂点を非対称に配置した弾性プリミティブ

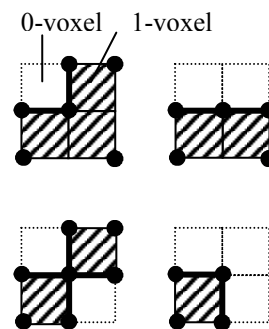


図5 ボクセル値に応じた弾性プリミティブ

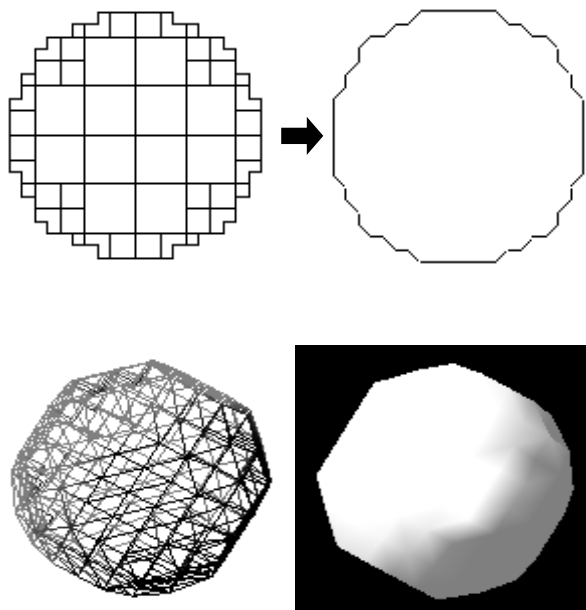


図6 ボクセル形状の表面に張られた平滑面

ただし、頂点の法線ベクトルには近傍の面の法線ベクトルの平均値をとる。これにより比較的単純な処理で簡易的な平滑表示が実現できる。

### 3.3 要素数の削減による効果

計算量削減の大まかな効果は、 $n \times n \times n$  の3次元ボクセルの場合には、頂点数である  $8n^3$  から  $26n^2$  に削減される。言い換えれば計算量がおおよそ  $3/n$  に削減されることになる。計算量オーダーの次数が3次から2次へ減少することからその効果は大きいといえる。

表1に、現状での最速の部類に入る標準的なPCによるパフォーマンスを示す。現状では、要素数100個程度がリアルタイム処理の限界であるが、今後PCの性能が向上していけば、実用的なアプリケーションの実現も可能になってゆくと考えられる。

### 3.4 対話操作環境の実現

長方形領域の空間内での円形または円柱状の剛体マニピュレータによるリアルタイムの対話操作環境を実現した。図7に対話操作の実行例を示す。円または球

表1 リアルタイム処理可能な弾性プリミティブ数

CPU	Pentium4 (1.9G)	AthlonXP (1900+)
computation time per vertex( $\mu$ s)	7.06	4.22
max element number ( $k=10000$ )	68	114

の領域を占めるボクセルデータを入力として、可変弾性プリミティブを自動的に配置したモデルを生成した。2マニピュレータにより弾性物体をはさむ操作においてはマニピュレータの位置の移動とマニピュレータ間の距離を同時に行う必要があるため、市販のゲームパットのボタンを入力に用いることにより容易に操作ができるようにした。マニピュレータと弾性物体の跳ね返り処理は、マニピュレータの形状を干渉判定が容易な幾何学形状に限定し、弾性物体の表面の各頂点とマニピュレータとの干渉時に、頂点をマニピュレータの表面で弾性衝突させる処理のみを行う。跳ね返り処理は、それらの巨視的な結果として実現される。

開発プラットフォームには Microsoft 社の Visual C++ と Direct X SDK を用いた。

## 4 むすび

本研究では、弾性プリミティブの大きさが、物体の表面から中心に向けて徐々に大きくなる、可変サイズのプリミティブにより、運動計算を高速に行える弾性物体モデルを用いて、リアルタイムの対話操作環境を実現した。

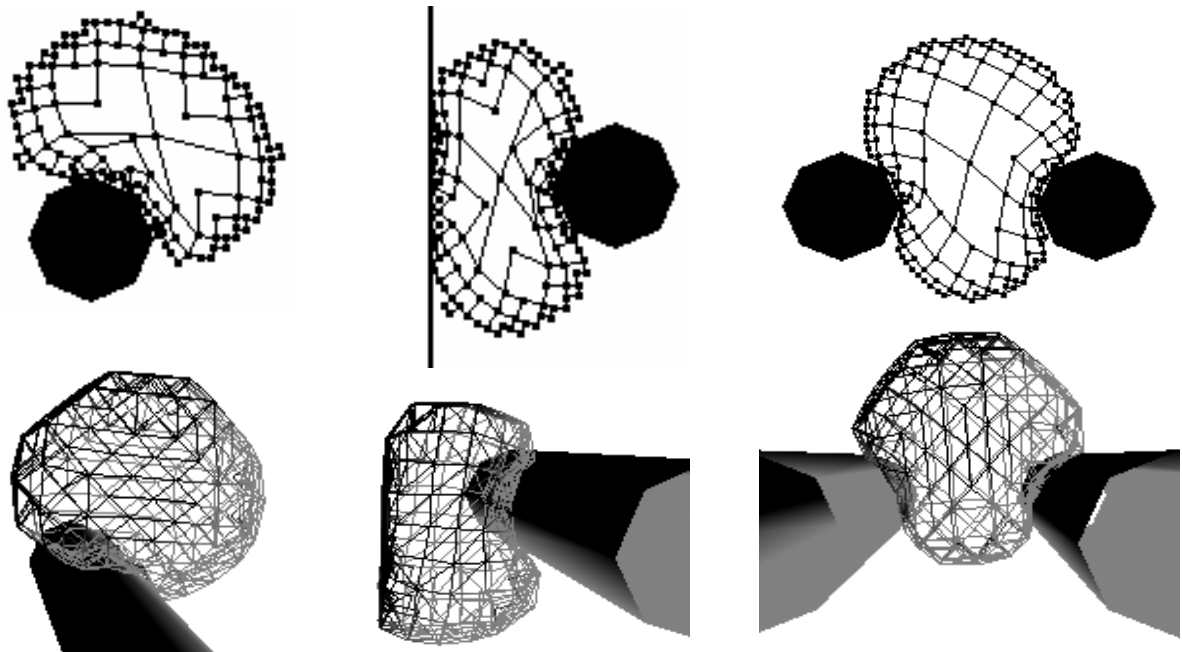
本モデルは任意のボクセル形状を入力としているので、医療やスポーツ等の実用的な分野において汎用の弾性物体モデルとして利用できる可能性がある。今後は、本モデルによって生成される運動の妥当性等について検証していきたい。

**謝辞** 日頃熱心にご討論いただく研究室の皆様へ感謝します。本研究の一部は文部省私立大学ハイテク・リサ

ーチ・センター補助金による。

### 参考文献

- [1] Terzopoulos D. Platt J. Barr A. Fleisher K. “Elastically Deformable Models”, Computer Graphics, 21(4), pp.205-214, 1987.
- [2] Promayon E. Baconnier P. Puech C. “Physically-based Deformations Constrained in Displacements and Volume”, In Computer Graphic Forum, 15(3), pp. 155-164, Eurographics96, 1996.
- [3] Norton A. Turk G. Bacon B. Gerth J. Sweeney P. “Animation of Fracture by Physical Modeling”, The Visual Computer, 7, pp.210-219, 1991.
- [4] 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, 電子情報通信学会論文誌, J82-A,7, pp. 1148-1155, 1999.7



(a) マニピュレータによる打撃 (b) マニピュレータと壁による把持 (c) 2つのマニピュレータによる把持

図7 対話操作環境の実現例