

概略形状の設計法に関する研究

藤井みゆき¹・小林一也²・松田三知子¹

¹ 情報工学科

² 富山県立大学工学部機械システム工学科

Simple Operations for 3D Shape Deformation

Miyuki FUJII¹, Kazuya G. KOBAYASHI², Michiko MATSUDA¹

Abstract

In this paper, an operations method for 3D shape deformation using skeleton and imaginary-force is proposed. Rough shape is expressed triangular mesh. This method is applicable to the design process at an early stage when a rough shape is given but an exact shape is not yet fixed. Shape of triangular mesh model is formed some skeletons which put inside of the triangular mesh model. When a designer operates on the skeleton, the triangular mesh model deforms by following the skeleton. At that time, imaginary-forces such as contraction, smoothness, a repulsion force from the skeleton and inhibition affect on the surface of the triangular mesh model, determine a shape of the triangular mesh model by balancing these imaginary-forces. A designer inputs coefficients for each force and the number of repetitions for the calculations. Here, balancing of the imaginary-force is calculated automatically. The triangular mesh model representation with skeleton, an operations method of deformation, and examples are shown.

Key Words: Computer Aided Design, Shape deformation, Triangular mesh model, Skeleton model, Imaginary-force

1. はじめに

意匠性の高い製品開発における設計工程の初期段階では、形状イメージからクレイモデルなどの実体モデルを作成し、それを検討することで、製品形状を決定する。このとき、製品形状は大まかな形状しかできておらず、細部にわたる詳細な形状は決定していない。本研究では、この初期段階において作成される大まかな形状を「概略形状」と呼ぶ。設計期間の短縮化・効率化のためには、概略形状の設計を計算機上で実現することが不可欠である。しかし、従来のCADシステムを用いて概略形状を生成・変形するには、煩雑な操作¹⁾を必要とし、設計者の意図する通りに形状を作り出すことが困難である²⁾。

本研究の目的は、概略形状の生成・変形に関して簡単な操作法を提供することにより、形状設計の初期段階を支援することである。ここでは、概略形状の外殻を三角形メッシュモデルで表現する。三角形メッシュモデル内部に「骨格(skeleton)」を置き、設計者が骨格を操作し、三角形メッシュモデル表面上に想定した「仮想的な力(imaginary-force)」を加えることにより、概略形状の

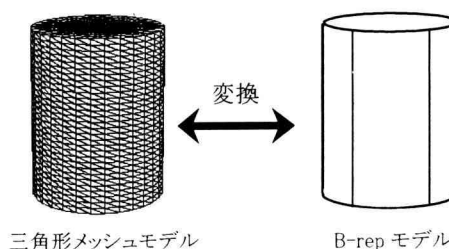


図1 三角形メッシュモデルと B-rep モデル

生成・変形を実現する。本論文では、このような概略形状の設計支援法について述べる。

2. 三角形メッシュモデル

2.1 三角形メッシュモデルの利用

本研究で用いる三角形メッシュモデルは、三角形のみで構成する多面体メッシュを外殻とした3次元形状モデルである。本研究では、概略形状の設計に三角形メッシュモデルを利用する³⁾。その利点として、以下の4点

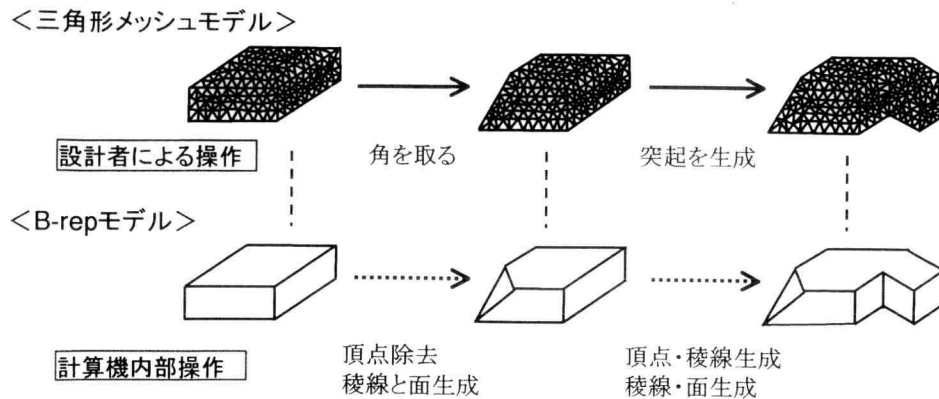


図2 三角形メッシュモデルを用いた形状変形

が挙げられる。(1)データ構造が単純で曲面を含む形状モデルと比較してデータ量が少なく、必要に応じて三角形の細かさを調節できる⁴⁾、(2)加工・解析など設計工程後の処理工程への利用が容易、(3)干渉計算などの解析処理が高速化できる、(4)図1に示すように、三角形メッシュモデルの表面を曲面近似することにより、境界表現法によるソリッドモデル(以下、B-repモデルと表記する)の曲面情報(幾何)として利用可能である。

(4)で挙げた利点を用いた設計支援の例として、B-repモデルと関係付けされている三角形メッシュモデルを変形する手法がある⁶⁾。図2は、三角形メッシュモデルの変形操作に伴い、B-repモデルの形状も変形する様子を示している。図2では、設計者が直方体形状の角を取ると、B-repモデルでは、システムが自動的にオイラー操作により頂点や稜線を変更する。また、三角形メッシュモデルに突起を生成すると、システムはB-repモデルの位相を変更し、新たに生成した面の幾何として元の三角形メッシュモデルの形状から近似曲面を生成する。すなわち、設計者が三角形メッシュモデル上で形状変形操作をすることにより、計算機は内部操作としてB-repモデルの位相や幾何を更新する。また、形状変形後の三角形メッシュモデルの表面をWelchらによる薄板曲面近似手法⁷⁾などを利用して自由曲面に変換すると、B-repモデルとしても利用可能となる。

2.2 三角形メッシュモデルの形状変形操作

三角形メッシュモデルの形状変形操作とは、三角形メッシュモデル上の節点を任意の方向ベクトルに移動する操作である。設計者が任意の方向と移動量を直接指定し複数の節点を移動する方法は、一般的に非常に煩雑である。そのため、概略形状の設計に三角形メッシュモデルを用いるためには、三角形メッシュモデルの形状変形を簡単な操作で行う機構が必要である。

そこで本研究では、三角形メッシュモデルの内部に形状決定の軸となる骨格を設定し、この骨格を設計者が操作することで、三角形メッシュモデルの形状変形を行う。

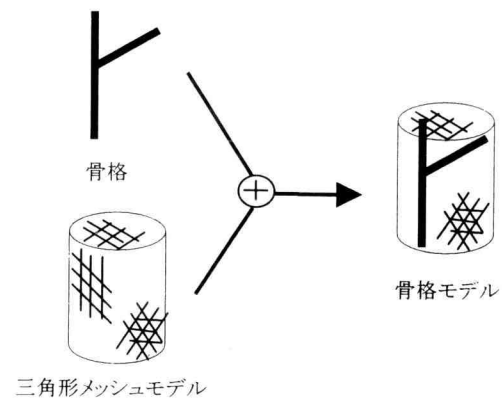


図3 骨格モデルの構成

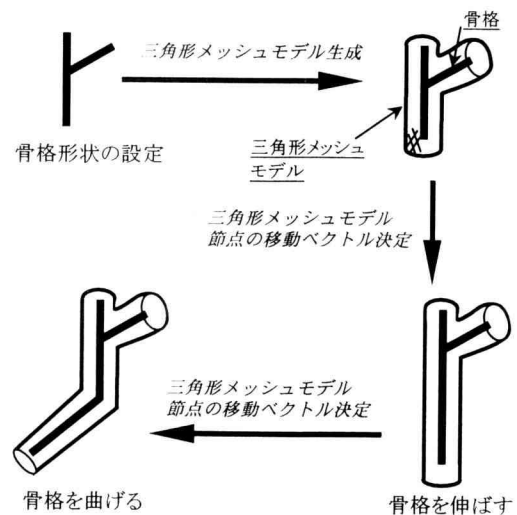


図4 骨格を用いた形状変形操作

3. 骨格を用いた形状操作

3.1 骨格モデル

骨格は、稜線列として表現され、概略形状の核である軸を表す。図3に示すように、三角形メッシュモデル内部に骨格を設定したものを「骨格モデル(skeleton model)」と呼ぶことにする。設計者は骨格モデルを概略形状に見立て、骨格を「曲げる」「伸ばす」「追加す

る」などの変形操作をすることで、三角形メッシュモデルの形状を概略形状として制御する。図4は、骨格モデルを用いた概略形状の形状操作の様子である。図中の太線が骨格、それを覆う線が三角形メッシュモデルを表している。

設計者が骨格の変形操作をすると、計算機は三角形メッシュモデル上の節点の移動ベクトルを計算し、同時に節点を移動する。その結果、三角形メッシュモデルの形状は骨格を肉付けするような形状に変形する。このため、設計者は、三角形メッシュモデル上の節点群の移動ベクトルを直接指定することなく、概略形状の生成・変形操作が可能となる。また、設計者は操作する形状を直感的に捉えることができる。

3.2 形状設計の手法

図5に本研究で提案する概略形状の操作手順を示す。

まず、設計者は生成する形状の概略を表す骨格を設定する。骨格形状が決定すると、計算機で骨格を覆う三角形メッシュモデルを初期形状として生成する。

本論文では、三角形メッシュモデルの形状変形は、三角形メッシュモデル上の節点や骨格との間に作用する「仮想的な力」の影響を受けて起こると想定する。設計者は、変形条件として仮想的な力の各力の係数値と計算回数を入力する。仮想的な力の釣り合いを計算することで、節点の移動ベクトルが求められ、その結果により節点を移動する。この処理を指定した計算回数分繰り返すと、三角形メッシュモデルの変形形状に反映し、骨格を肉付けする形状となる。設計者が入力する各力の係数値の大きさや組み合わせ・計算回数の違いにより、三角形メッシュモデルの形状に差異が生ずる。

骨格形状の修正は繰り返し行うことが可能で、そのたびに三角形メッシュモデルの形状は骨格形状に追従する。最終的に得られる三角形メッシュモデルの変形形状が、概略形状である。

また、既にあるB-repモデルの外殻に三角形メッシュモデルを生成し、その内部に骨格を設定して形状操作することもできる。これにより、既存の形状モデルを利用して、骨格操作による概略形状設計も可能である。

4. 仮想的な力による形状変形処理

4.1 変形処理の概要

三角形メッシュモデルの形状変形は、仮想的な力が三角形メッシュモデルに作用して起こるものである。仮想的な力は物理学における「力」そのものではないが、三角形メッシュモデルの形状変形に関する物理的な特性を単純化したものである。ここでは、仮想的な力として「伸縮力 (contraction)」「平滑化力 (smoothness)」「骨格からの反発力 (repulsion force)」「抑制力 (inhibition)」を用いる。各力には、特徴的な挙動を数式により定義し、三角形メッシュモデル上の節点の方向

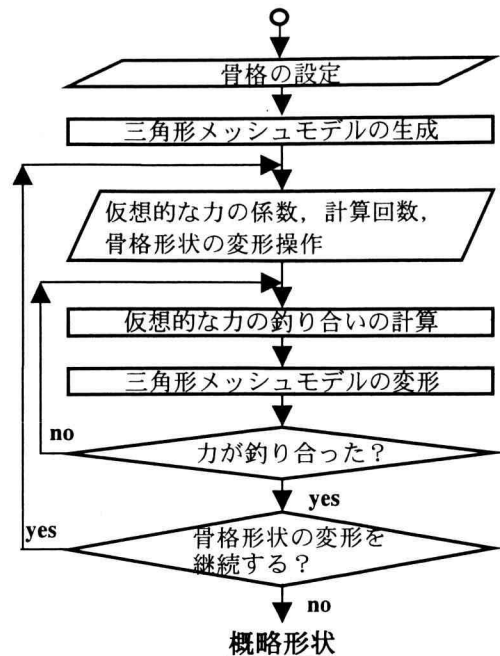


図5 概略形状の設計処理の流れ

ベクトルを計算する際に用いる。三角形メッシュモデルの形状変形処理において、仮想的な力の釣り合いの計算を繰り返し、節点を移動する。各力が釣り合うと、三角形メッシュモデル上の節点の移動がなくなり、変形形状が決定する。

4.2 伸縮力

伸縮力は、三角形メッシュモデル上の節点間の距離を一定に保つ力として定義する。図6(a)では、三角形メッシュモデル上の節点 P_0 と隣接する n 個の節点 P_i ($1 \leq i \leq n$) がある。形状変形により節点が移動する際、節点 $P_0 P_i$ 間には元の距離に戻ろうとする力が働く。この力の総和 F_c を節点 P_0 にかかる伸縮力とし、式(1)と定義する。 k_c は伸縮係数である。

$$F_c = \sum_{i=1}^n k_c (P_i - P_0) \quad (1)$$

伸縮力は、三角形メッシュモデル上の三角形の大きさを均一にする際に利用する。ところが、式(1)では、至る所で $F_c = 0$ となり伸縮力が打ち消される場合がある。これを解消するため、 P_0 を含む三角形の面積に比例して重みづけをし、式(2)とした。 a_i は三角形 $P_0 P_i P_{i+1}$ の面積、 $i=n$ のとき $i+1=1$ (以降の式でも同様) である。図6(b)に示すように、 P_0 を含む4辺形の面積が小さいほど P_0 は中心の方に移動する。その結果、 P_0 周辺の三角形の大きさは均一になる。

$$F_c = \sum_{i=1}^n k_c (a_i + a_{i+1}) (P_i - P_0) / 2 \sum_{i=1}^n a_i \quad (2)$$

4.3 平滑化力

平滑化力は、三角形メッシュモデル表面の起伏形状を均す力である。図7では、平滑化力は、節点 P_0 と隣接す

る n 個の節点 $P_i (1 \leq i \leq n)$ で構成する多角形の重心 g を通り、 P_i が平均的に存在する平面 $H \perp P_0$ を移動している。平面 H の単位法線ベクトルを m 、 $v_i = P_i - g$ 、 $v_i \times v_{i+1}$ は v_i と v_{i+1} の外積とすると式(3)となる。

$$m = \frac{\sum_{i=1}^n (v_i \times v_{i+1})}{|\sum_{i=1}^n (v_i \times v_{i+1})|} \quad (3)$$

平滑化力による節点 P_0 の移動は、平面 H に垂直な方向に沿う。すなわち、平滑化力 F_s は m と平行である。平滑化係数を k_s 、 $P_0 - g$ と m のなす角を θ とすると、 F_s は $F_s = -k_s \cos \theta m$ 、 $\cos \theta = (P_0 - g) \cdot m$ の2式により、式(4)を導く。

$$F_s = -k_s ((P_0 - g) \cdot m) m \quad (4)$$

平滑化により、隣接する三角形同士の接続が滑らかになる。図 8 の操作は、平滑化力 F_s を設定して隣接する三角形の並びを平らにする例である。

4.4 骨格からの反発力

骨格形状を変えると、三角形メッシュモデルと骨格との距離は変動する。このとき、骨格には三角形メッシュモデルとの距離を一定に保つため、以前の状態に戻そうとする力が働く。この力を三角形メッシュモデル上の節点が骨格から受ける反発力と定義する。

図 9 は、 j 個の骨格をもつ骨格モデルの一部である。節点 P_0 から骨格 B_j 上を下ろした垂線と骨格 B_j の交点を x_j とすると、 $P_0 x_j$ 間の距離は骨格 B_j への最短距離である。節点 P_0 が骨格 B_j 上の点 x_j から受ける力を節点 P_0 にかかる反発力とすると、反発力 F_r は式(5)の通り計算できる。

$$F_r = S \frac{kr_j(P_0 - x_j) \cdot m}{|P_0 - x_j|^4} (P_0 - x_j) \quad (5)$$

S は節点 P_0 と隣接する節点 $P_i (1 \leq i \leq n)$ からなる三角形群の総面積、 kr_j は骨格 B_j における反発係数である。 m は式(3)と同様、 P_i が平均的に存在する平面の単位法線ベクトルである。図 10 に形状操作による反発力の挙動と変形形状を示す。骨格形状を変更すると、骨格と三角形メッシュモデル間の距離の変化に伴い、反発力の大きさも変化する。式(5)により、骨格からの距離が一定になるよう三角形メッシュモデルの大きさがシステムにより調整される。設計者は反発係数の値を変えることで、三角形メッシュモデルの大きさ(太さ)を変えることができる。

4.5 抑制力

抑制力は、三角形メッシュモデル上に働く力を抑制する力である。抑制力は、伸縮力・平滑化力・反発力の合力と逆方向に働く力として定義する。抑制係数を k_c とすると、抑制力 F_c は式(6)となる。

$$F_c = -k_c (F_e + F_s + F_r) \quad (6)$$

抑制力は通常利用しなくてもよいが、骨格からの反発力の計算が発散するなどして求めることができなかった

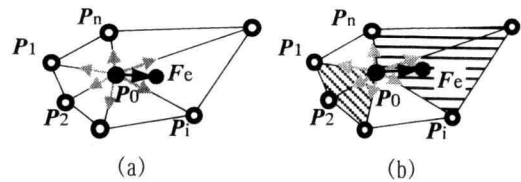


図 6 伸縮力

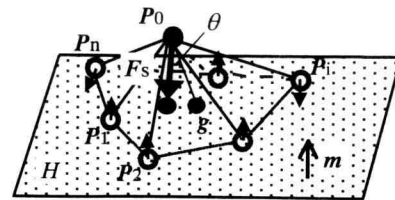


図 7 平滑化力

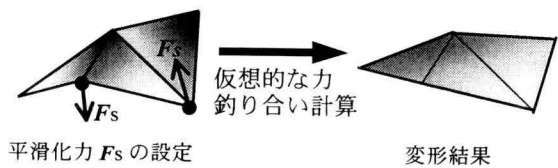


図 8 三角形の平滑化の操作

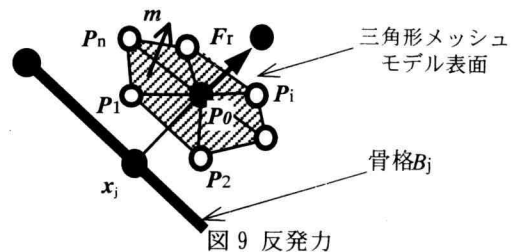


図 9 反発力

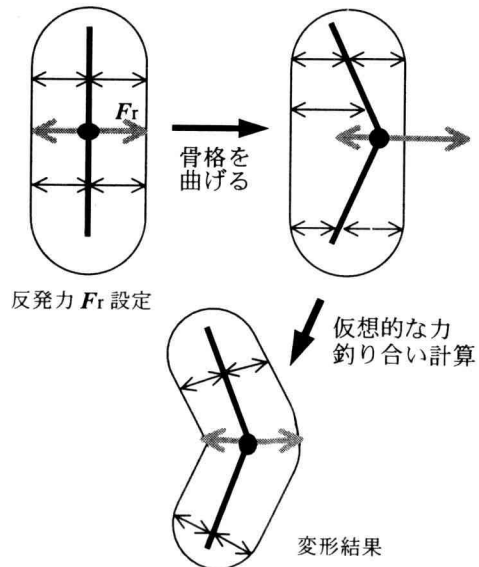


図 10 骨格操作による反発力の挙動

場合に用いると、安定解を得ることがある。

5. システムの試作

5.1 設計支援システムの構成

概略形状の設計支援システムを試作し、骨格と仮想的

な力を用いた三角形メッシュモデルの形状変形操作を行い、提案する形状操作の設計支援法の有効性を確認した。提案する設計支援システムの構成を図 11 に示す。このシステムは、骨格操作部(skeleton operator)、仮想的な力の計算部(imaginary-force calculator)、および三角形メッシュモデルの形状変形操作を行う三角形メッシュモデラ(triangular mesh modeler)で構成する。

骨格操作部では、骨格の生成・変形として設計者が入力した骨格形状や骨格への操作を処理する。その結果は、三角形メッシュモデラを通して三角形メッシュモデルの変形として反映する。また、入力した仮想的な力の係数の値は、仮想的な力についての計算部での各力の釣り合い計算に用いられ、計算結果は三角形メッシュモデラにより、三角形メッシュモデルの変形に反映する。三角形メッシュモデルの変形の様子は、三角形メッシュモデラとユーザインタフェースを経由して表示する。設計者は、ディスプレイで形状変形の状態を見ながら骨格を操作し、仮想的な力の係数の値を変更する。これにより、対話形式による概略形状の設計を行うことが可能となる。

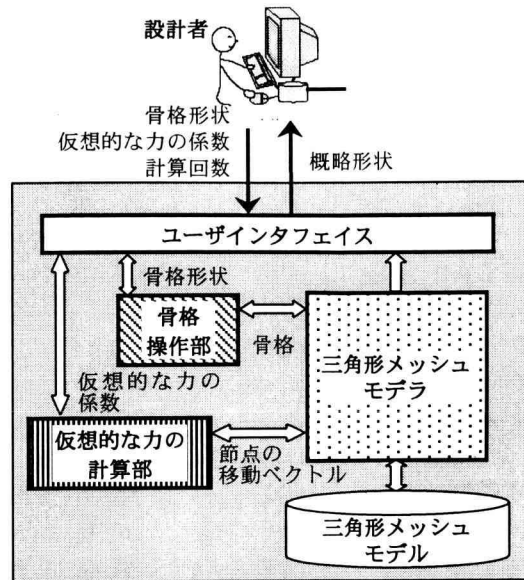


図 11 試作システムの構成

5.2 システムの実装

提案する設計支援システムの中心部分(骨格操作部・仮想的な力の計算部・三角形メッシュモデラ)を、自作 PC (CPU: PentiumII 450MHz, ビデオカード: Leadtek 社 WinFast L3100, OS: Windows 2000 / Vine Linux 2.1.5) 上に、C 言語を用いて構築した。骨格モデルの描画には OpenGL ライブラリを利用した。図 12 は Windows2000 上に構築した設計支援システムの操作画面である。左側のウィンドウに操作するモデルが表示され、形状変形の様子がリアルタイムで表示される。図の右側は仮想的な力の係数値を入力するダイアログである。

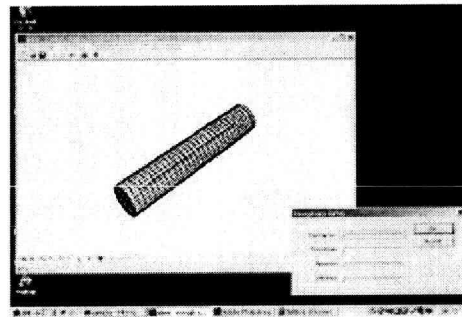


図 12 試作システムの操作画面

6. 形状操作例

6.1 共通する変形条件

試作したシステムを用いて、仮想的な力の釣り合い計算、骨格の曲げ変形操作、枝分かれした骨格の変形操作を実行した。本来、各力の係数の値と計算回数は、変形形状を決定するため重要であるが、最適な設定値と変形形状との関係は現段階では未検証なため、事前のテストで良好な結果が得られた際の設定値を利用した。変形条件として、変形の前後に三角形メッシュモデルを構成する三角形の数は不変とし、抑制力は扱わない。

6.2 仮想的な力の釣り合いの例

円柱形状の三角形メッシュモデル内部に骨格を設定し、仮想的な力の釣り合いの計算とそれに伴う形状変形を実行した。図 13(a)は、円柱形状の三角形メッシュモデル(三角形数 2132, 節点数 1068)の中心部に直線分形状の骨格を 1 本設定した状態を示している。仮想的な力の係数として、伸縮係数 $k_e=0.1$, 平滑化係数 $k_s=0.1$, 平滑化

係数 $k_r=0.01$ を設定した。計算回数を 400 回として形状変形を行ったところ、図 13(b)の骨格モデル形状を得た。計算に要した時間は約 40 秒であった。この例により、三角形メッシュモデルが骨格の形状を肉付けするように形状変形したことがわかる。三角形メッシュモデルの表面に着目すると、各三角形の大きさはほぼ均等になり、隣接する三角形同士の接続が滑らかになっている。

6.3 骨格の曲げ変形の例

図 13(b)の骨格モデルを初期形状として、骨格を曲げたときの三角形メッシュモデルの変形形状を図 14 に示す。仮想的な力の各係数の値は、伸縮係数 $k_e=0.1$, 平滑化係数 $k_s=0.1$, 反発係数 $k_r=0.01$, 計算回数は 100 回である。(b)は 1 箇所、(c)は 2 箇所、骨格を曲げたときの形状変形例である。(b)、(c)とも骨格形状に沿った変形形状結果を得た。変形後の三角形メッシュモデルでは、骨格の湾曲部分に対応する節点群は平滑化力により滑らかに配置されている。この変形結果より、平滑化力は三角形メッシュモデル表面上の隣接する三角形同士の接続を滑らかにするのに有効であるといえる。

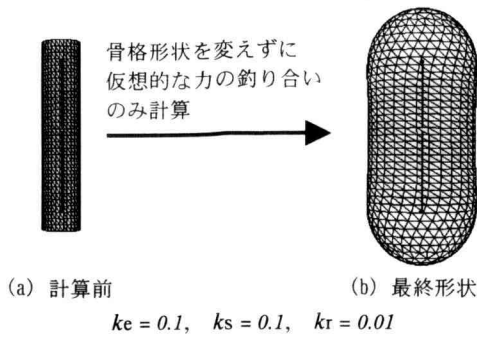


図13 仮想的な力の釣り合い計算の例

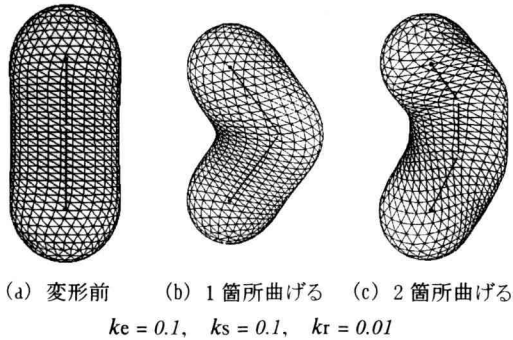


図14 骨格の曲げ変形の実例

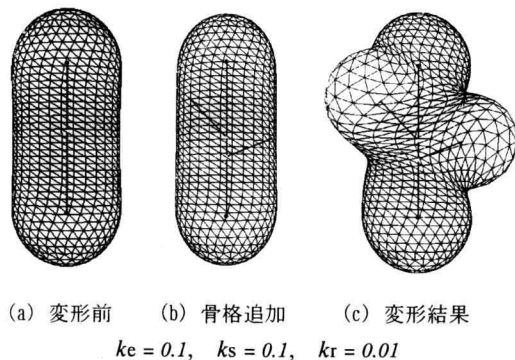


図15 枝分かれをもつ骨格の変形例

6.4 枝分かれをもつ骨格の変形例

図13(b)のモデルの骨格に別の骨格を結合することにより、骨格に分岐をもたせ、枝分かれした骨格を作ることができる。図15(b)は、図15(a)(図13(b)と同一)のモデルの骨格に2本の枝分かれを設定したものである。仮想的な力の係数は、伸縮係数 $ke=0.1$ 、平滑化係数 $ks=0.1$ 、平滑化係数 $kr=0.01$ と設定し、計算回数を200回とした。

図15(c)は、図15(b)で設定した骨格に沿った変形結果である。新たに追加した骨格の先端部分に対応する三角形群が盛り上がり、付け根部分には凹部形状が出現している。

6.5 変形形状と形状操作の評価

前節までに示した形状操作例において、最終的に得た変形形状は設計者が指定した計算回数終了したときの形状である。実際には、それ以前に仮想的な力の釣り合

いが取れて形状変化がないもの、逆に計算終了時点でもまだ変形途中にあり形状が定まらないもの、計算結果が発散して形状が求まらないものがある。現状では、設計者の判断により最終的な変形形状を決定している。しかし、概略形状設計支援システムとしては、仮想的な力の釣り合いがとれたことをシステムで検出し自動的に形状変形を終了するなど、変形形状を決定する機構が必要となる。

仮想的な力の組み合わせや各力の係数値の大きさは、変形形状に大きな影響を及ぼし、設計者による形状操作の際は形状を制御する手段となる。安定した形状変形を得るためには、仮想的な力の組み合わせや係数値の大きさの検証をすることが必要である。

6. おわりに

本論文では、概略形状の生成・変形を簡単な操作により支援することを目的とし、三角形メッシュモデルを利用した概略形状の形状操作法を提案した。三角形メッシュモデルとして表現された概略形状の核となる軸として骨格を設定し、骨格の屈曲・伸展・分岐などの形状操作に伴い三角形メッシュモデルを変形する手法を提案した。さらに、仮想的な力を導入し仮想的な力の釣り合いをとることにより、設計者が入力した仮想的な力の係数値と計算回数から三角形メッシュモデルの節点群の移動ベクトルを計算し、三角形メッシュモデルの形状変形を行った。また、三角形メッシュモデルと提案する形状操作法をシステムとして計算機上に実装し、その有効性を確認した。

今後の課題として、最終的な変形形状を決定するための指標の設定、ユーザインタフェースの改良などがある。

7. 参考文献

- 1) 千代倉弘明: ソリッドモデリング CAD/CAM のための基礎技術, 1985.
- 2) 鳥谷浩志, 千代倉弘明: 三次元 CAD の基礎と応用, 1992.
- 3) 藤井みゆき, 小林一也, 大坪克俊: 骨格と擬似的な力による三角形メッシュモデルの形状変形, 日本設計学会誌, 2002. 7, PP360.
- 4) 鈴木宏正: 3次元メッシュモデルの生成と表現, 情報処理学会誌, 2000. 10, PP1103.
- 5) 藤井みゆき, 小林一也, 松田三知子: 三角形メッシュモデルに基づいた概略形状設計, 第20回設計シンポジウム, 2002. 7, PP48.
- 6) K.G. Kobayashi, M. Fujii, T. Honda: B-rep Modeling with Global Modification, Rapid Product Development, Chapman & Hall, 1997, 415.
- 7) W. Welch, A. Witkin: Free-Form Shape Design Using Triangulated Surfaces, Proc. ACM SIGGRAPH '94, 1994, PP247.