

曲面モデルに対する直接操作性を 考慮した形状変形手法の提案

高橋 晋 米倉 達広

茨城大学工学部

〒316 茨城県日立市中成沢町4丁目12番1号

あらまし コンピュータグラフィックス (CG)、及び高速な演算処理能力を持った計算機の開発といったソフトウェア、ハードウェア両面における技術の進歩に伴い、3次元の形状変形を行う様々な手法が提案されてきている。それら既存の変形手法の大部分は、形状変形の単位として、3次元の形状 (以下オブジェクトと称す) を構成する点及び輪郭線を用いている。そこで、本稿では、オブジェクトを構成する面素 (三角形パッチ) に着目し、その一つの面素を形状変形の単位として用いる。具体的に、ある面素に対して、「押す」、「引く」といった直接操作を加えることにより、その作用面に連結する面素どうしが相互作用し合い形状変形を行う手法を提案する。

和文キーワード 形状変形、面素、直接操作、相互作用

A Proposal of Form Deformation Method considered Direct Operation to Surface Models

Susumu Takahashi Tatsuhiko Yonekura

Faculty of Engineering, Ibaraki University

4-12-1 Nakanarusawa, Hitachi, Ibaraki, 316, Japan

Abstract With advance of technology, in both software and hardware sides, of computer graphics and development of high performance architectures, several form deformation methods of 3D models (i.e. objects) have proposed. The most of their methods were using nodes or outlines of object as a form deformation unit of object. thus, in this paper, we propose a method which uses a surface unit in place of them. With operating ("push" or "pull" and so on) a surface unit directly, the object is deformed by interaction of surface units related to the operated surface.

英文 key words form deformation, surface unit, direct operation, interaction

1. まえがき

近年、コンピュータグラフィックス (CG) 及び高速な演算処理能力を持った計算機の開発といったソフトウェア、ハードウェア両面における技術の進歩に伴い、CAD、CAEに代表されるように、計算機内部に3次元形状 (以下オブジェクトと称す) を構築し、それに対して、変形操作を行い、その変形の様子を実時間でグラフィックス表示する変形手法の提案、及びシステムの開発が盛んに行われてきている。[1]~[4]

具体的には、完成形状に合わせて、平行六面体の制御点格子を当てはめ、その制御点に変位を与えることによりスプライン近似を利用して変形を行うFree - Form Deformation (FFD)[5] やオブジェクト表面上の点を直接移動したい所に動かしてFFDを利用する手法[6]が報告されている。

また、2次元の輪郭線により、3次元の形状が決定する回転体にモデル形状を限定し、粘土の性質を持たせた体積一定の条件下での変形[7]、また同様に体積一定の変形ではあるが、その変形に関してエネルギーと呼ぶ評価関数を定義して、それが最少となるように形状を決定するエネルギー最少化手法[8]やカーソルによる形状への変形操作量を、形状を定義するパラメータの変化量に変換し、新しい形状を生成する直接操作変形手法(2次元DDM)[9]などは、オブジェクトのリアルな変形行程を目標とするものである。

以上の既存の変形手法の大部分は、そのオブジェクト表面上の点、輪郭線あるいはオブジェクト全体を囲む制御点格子を形状変形の単位として扱い、その部分に様々な制約 (重み、変位等) を与えており、個々の線分の物理的特性を基本とした大局的変形を扱おうとする点で共通である。しかしながら、3次元グラフィックスで最もしばしば用いられるサーフェスモデルをその面素どうしの相互作用に基づいて直接扱おうとする手法は、ほとんど報告されていない。

そこで本稿では、制約を与える部分として、オブジェクトを構成する面素 (三角形パッチ) に着目して、その一つの面素を形状変形の単位として扱う。具体的には、ある面素に対して「押す」、「引く」といった直接操作を加えることにより、その作用面に連結する面素どうしが形状を保持しながら、相互作用し合い形状変形を行う手法を提案する。

以下、2. で3次元のモデル化に必要な蝶番

を用いた2次元モデルの変形手法、3. でこれを拡張することにより得られる3次元モデルの変形手法について述べる。

2. 2次元モデル (蝶番) の変形手法

2.1 モデル設定

3次元のモデル化に必要な2次元の蝶番のモデルについて考察する。これは、図1に示すように、3次元のモデルを真横から見た場合で、2次元との対応は以下ようになる。ここでは、一般の辺を線素と定義する。

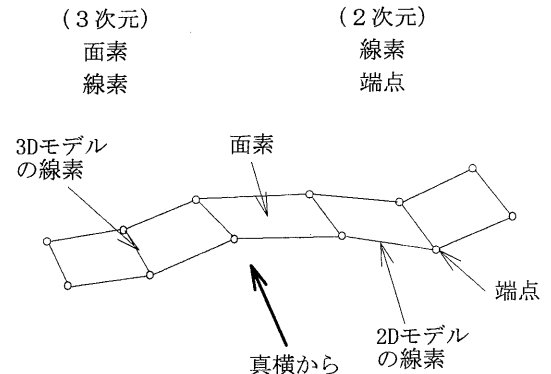


図1. 2次元と3次元の対応

2次元モデルにおいて、1線素には、1つの外力しか加わらないものとする。変位を得る時刻は離散的に分割し、その線素の両端点が初期変位を得る。これにより、変位を与えられた端点に連結する端点どうしが線素の長さを保持しながら変位を得る。

2.2 モデル例

簡単なモデル例として、以下の条件の下で変形を行うものとする (図2参照)。

- ①ある線素を $m:n$ の比に内分する点に垂直に外力 F が加わる。
- ②①の両端点の座標値を右側 $G_1(x_1, y_1)$ 、左側 $G_0(x_0, y_0)$ とし、隣り合う線素 $G_{i-1}G_i, G_iG_{i+1}$ の成す角を Φ_i とする。
- ③線素と端点との部分 (蝶番の部分) の摩擦係数を μ 、時間変数を t とする。
- ④線素の強度を示す比例係数を線素と水平方向に k_x 、垂直方向に k_y とする。また、隣接する線素を引っ張る、押すといった線素の効力を該当の線素 $G_{i-1}G_i$ と水平方向に K_i とする。

⑤全体座標系において時刻 $t = 0$ で初期変位 $(\Delta x_1, \Delta y_1)$ を得るとする。

ここで、外力の与えられた線素を中心に、左右に分割して考察する。左右について同様なので、一方向(右側)についてのみ考察する。また、端点 $G_i (i = -n_1 \approx +n_2)$ は、左右に十分多く連結し、そのいずれも固定されていないものとする。

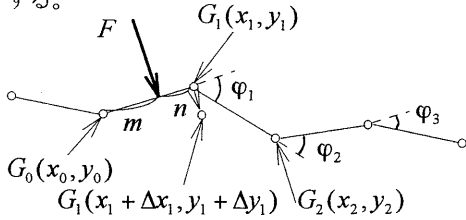


図2. 2次元モデル図

2. 3 初期外力と初期変位

初期外力 F を全体座標系の x, y 方向に分力すると、端点 G_1 には次のような外力が加わる。

$$\begin{bmatrix} f_{x1} \\ f_{y1} \end{bmatrix} = \frac{m}{m+n} \begin{bmatrix} F_{x1} \\ F_{y1} \end{bmatrix} \quad (1)$$

このモデルは蝶番モデルなので、端点 G_1 は端点 G_0 を瞬間中心として回転することにより変位を得る。この時、線素 G_0G_1 に、線素 G_1G_2 からの効力が働く。また、線素に対して垂直に働く力には、その逆方向に摩擦力が生じる。よって力の関係式から、外力と初期変位との関係は次式で得られる。

$$\begin{bmatrix} k_x \Delta x_1 \\ k_y \Delta y_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{x1} \\ f_{y1} \end{bmatrix} + K_1 \sin \varphi_1 \begin{bmatrix} x_{12} \\ y_{12} \end{bmatrix} - \mu K_1 \cos \varphi_1 \begin{bmatrix} x_{12} \\ y_{12} \end{bmatrix} \quad (2)$$

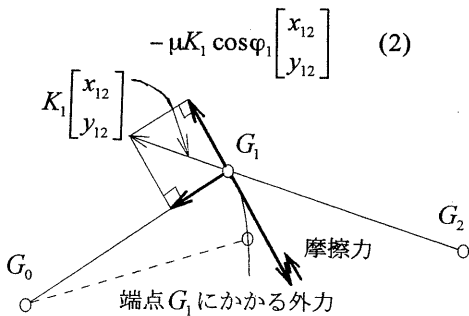


図3. 端点 G_1 付近での力の関係図

2. 4 任意の $t = n$ の変位

2. 3 と同様に、連結する線素を通じて力が伝達するとし、変位を全体座標系の x, y 方向に分けて考えると、 $t = n$ の G_{n+1} の変位

$(\Delta x_{n+1}, \Delta y_{n+1})$ と力の関係式は、次式で与えられる。(3式)の右辺第一項には、任意の線素 $G_n G_{n+1}$ に新たに加わる外力を示す。

$$\begin{bmatrix} k_x \Delta x_{n+1} \\ k_y \Delta y_{n+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{ext(x)} \\ F_{ext(y)} \end{bmatrix} + \cos \varphi_n \begin{bmatrix} f_{xn} \\ f_{yn} \end{bmatrix} + K_{n+1} \sin \varphi_{n+1} \begin{bmatrix} x_{n+ln+2} \\ y_{n+ln+2} \end{bmatrix} - \mu \left\{ \sin \varphi_n \begin{bmatrix} f_{xn} \\ f_{yn} \end{bmatrix} + K_{n+1} \cos \varphi_{n+1} \begin{bmatrix} x_{n+ln+2} \\ y_{n+ln+2} \end{bmatrix} \right\} \quad (3)$$

2. 5 K_i の条件

K_i は前述のように、変位のある端点に連結する線素からかかる効力であるため、この力により線素はその長さを保持する。以下に K_i についての条件を示す。

($t = 0$)

・ $x_1 \neq x_0$ のとき

$$K_1 = \frac{C_1 k_x f_{y1} - k_y f_{x1}}{k_y g(\varphi_1, x) - C_1 k_x g(\varphi_1, y)}$$

$$\begin{cases} g(\varphi_1, x) = \sin \varphi_1 x_{12} - \mu \cos \varphi_1 x_{12} \\ g(\varphi_1, y) = \sin \varphi_1 y_{12} - \mu \cos \varphi_1 y_{12} \\ C_1 = -\frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0} \end{cases} \quad (4)$$

・ $x_1 = x_0$ のとき

$$\Delta y_1 = 0 \quad \therefore K_1 = \frac{f_{y1}}{y_{12} (\mu \cos \varphi_1 - \sin \varphi_1)} \quad (y_{12} \neq 0) \quad (5)$$

($t = n$)

・ $x_n \neq x_{n+1}$ のとき

$$K_{n+1} = \{ (C_{n+1} k_x F_{ext(y)} - k_y F_{ext(x)}) + (C_{n+1} k_x f_{yn} - k_y f_{xn}) (\cos \varphi_n - \mu \sin \varphi_n) \} \times 1 / (k_y g(\varphi_{n+1}, x) - C_{n+1} k_x g(\varphi_{n+1}, y))$$

$$\begin{cases} g(\varphi_{n+1}, x) = \sin \varphi_{n+1} x_{n+ln+2} - \mu \cos \varphi_{n+1} x_{n+ln+2} \\ g(\varphi_{n+1}, y) = \sin \varphi_{n+1} y_{n+ln+2} - \mu \cos \varphi_{n+1} y_{n+ln+2} \\ C_{n+1} = -\frac{y_{n+1} - y_n}{x_{n+1} - x_n} \end{cases} \quad (6)$$

・ $x_n = x_{n+1}$ のとき

$$\Delta y_{n+1} = 0 \quad \therefore K_{n+1} = \frac{f_{yn} (\mu \sin \varphi_n - \cos \varphi_n) - F_{ext(y)}}{y_{n+ln+2} (\sin \varphi_{n+1} - \mu \cos \varphi_{n+1})} \quad (y_{n+ln+2} \neq 0) \quad (7)$$

3. 3次元モデル

3.1 モデル設定

本稿では、最も一般性の高いサーフェスモデルとして全ての面素が三角形よりなる3次元モデルを考える。

前述のように、2次元と3次元の対応から、3次元モデルにおいても、1面素には、1外力しか加わらないとし、変位を得る時刻を離散的に分割する。そして、外力の加わった作用面が初期変位を得る。つまり、ある面素が変位を与えられる（その面素を囲む線素が影響を受けて変位を生じる）ことにより、連結する面素どうしがその大きさを変えずに相互作用し合っただけの変位を得る。以下、端点 G_0, G_1, G_2 に囲まれてできる面素を $\Delta G_0 G_1 G_2$ のように呼び、これにかかる力と変位の関係を考察していく。

3.2 モデル例

- ①面素 $\Delta G_0 G_1 G_2$ に端点との距離が $1:m:n$ の比に内分する点に垂直に外力 F が加わる。
- ②①の端点の座標値をそれぞれ、 $G_0(x_0, y_0, z_0)$, $G_1(x_1, y_1, z_1)$, $G_2(x_2, y_2, z_2)$, また隣接する面素の端点 G_0, G_1, G_2 の座標値をそれぞれ、 $G_0(x_0, y_0, z_0)$, $G_1(x_1, y_1, z_1)$, $G_2(x_2, y_2, z_2)$ とする。及び $\Delta G_0 G_1 G_2$ と隣接する面素の成す角を $\Delta G_0 G_1 G_2$, $\Delta G_0 G_1 G_2$, $\Delta G_0 G_1 G_2$ それぞれに対して、 $\varphi_0, \varphi_1, \varphi_2$ と設定する（図4参照）。
- ③面素と線素との部分（蝶番の部分）の摩擦係数を μ 、時間変数を t とする。
- ④線素の強度を示す比例係数を線素と水平方向に k_x 、垂直方向に k_y とする。また、隣接する線素を引っ張る、押すといった線素の効力をその線素と水平方向に K_i とする。
- ⑤全体座標系において時刻 $t = 0$ で面素 $\Delta G_0 G_1 G_2$ の端点それぞれが、初期変位 $(\Delta x_0, \Delta y_0)$, $(\Delta x_1, \Delta y_1)$, $(\Delta x_2, \Delta y_2)$ を得る。
ここでは、外力の加えられた面素を中心に、それに隣接する1つの面素 $\Delta G_0 G_1 G_2$ についてのみ考察する。（他の連結する面素について、考え方は同様である。）

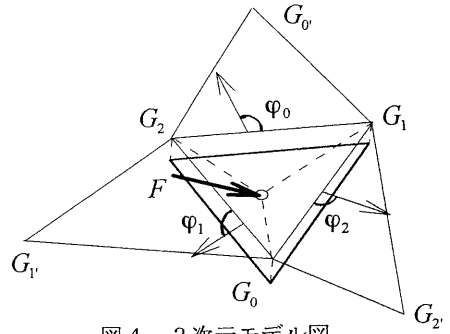


図4. 3次元モデル図

3.3 初期外力と初期変位

初期外力を全体座標系の x, y, z 方向に分力すると、端点 G_0, G_1, G_2 にかかる初期外力は、それぞれ次式で与えられる。

$$F_0 = \begin{bmatrix} f_{x0} \\ f_{y0} \\ f_{z0} \end{bmatrix} = \frac{m+n}{2(l+m+n)} \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix}, F_1 = \begin{bmatrix} f_{x1} \\ f_{y1} \\ f_{z1} \end{bmatrix} = \frac{n+l}{2(l+m+n)} \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix},$$

$$F_2 = \begin{bmatrix} f_{x2} \\ f_{y2} \\ f_{z2} \end{bmatrix} = \frac{l+m}{2(l+m+n)} \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix}, \quad (F_0 \geq F_2 \geq F_1) \quad (8)$$

2次元の蝶番モデルから推測すると、3次元モデルの変位は、面素を構成する各端点が、面素に関して、これと向かい合う線素を瞬間中心軸として、回転することにより、変位を得る。また、ここでは、外力の大きい端点から変位を得るものとする。端点と瞬間中心軸の対応を以下に示す。

(端点)		(瞬間中心軸)
G_0	\leftrightarrow	$G_1 G_2$
G_1	\leftrightarrow	$G_2 G_0$
G_2	\leftrightarrow	$G_0 G_1$

端点に変位が生じるとき、隣接する両側の面素から線素を通じて効力が加わる。また、2次元モデルの場合と同様に、面素に対して垂直に働く力には、その逆方向に摩擦力が生じる。これらを考慮すると、面素 $\Delta G_0 G_1 G_2$ の端点についての外力と初期変位の関係式は、次式で得られる。（端点 G_0 についてのみ記述）

$$\begin{bmatrix} k_x \Delta x_0 \\ k_y \Delta y_0 \\ k_z \Delta z_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{x0} \\ f_{y0} \\ f_{z0} \end{bmatrix} + K_0 \left\{ \sin \varphi_2 \begin{bmatrix} x_{02'} \\ y_{02'} \\ z_{02'} \end{bmatrix} + \sin \varphi_1 \begin{bmatrix} x_{01'} \\ y_{01'} \\ z_{01'} \end{bmatrix} \right\}$$

$$- \mu K_0 \left\{ \cos \varphi_2 \begin{bmatrix} x_{02'} \\ y_{02'} \\ z_{02'} \end{bmatrix} + \cos \varphi_1 \begin{bmatrix} x_{01'} \\ y_{01'} \\ z_{01'} \end{bmatrix} \right\} \quad (9)$$

3. 4 t = n の変位

図5に示すように、端点 G_n には線素 $G_{n+1} - G_{n+2}$ に加わる力が面素 $\Delta G_n G_{n+1} G_{n+2}$ を通じて伝達するように、その面素に平行になるような力と隣接する両面素から、線素を通じて効力が加わるため、変位と力の関係式は、次式で与えられる。(式(10)の右辺第一項に、面素 $\Delta G_n G_{n+1} - G_{n+2}$ に新たに加わる外力を示す。)

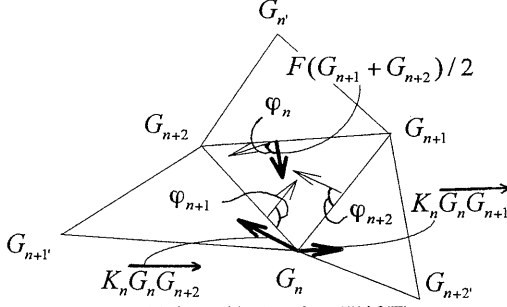


図5. 端点 G_n 付近の力の関係図

$$\begin{bmatrix} k_x \Delta x_n \\ k_y \Delta y_n \\ k_z \Delta z_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{\text{ext}(x)} \\ F_{\text{ext}(y)} \\ F_{\text{ext}(z)} \end{bmatrix} + \frac{\cos \varphi_n}{2} \begin{bmatrix} f_{xn+1} + f_{xn+2} \\ f_{yn+1} + f_{yn+2} \\ f_{zn+1} + f_{zn+2} \end{bmatrix} \\ + K_n \left\{ \sin \varphi_{n+2} \begin{bmatrix} x_{nn+2'} \\ y_{nn+2'} \\ z_{nn+2'} \end{bmatrix} + \sin \varphi_{n+1} \begin{bmatrix} x_{nn+1'} \\ y_{nn+1'} \\ z_{nn+1'} \end{bmatrix} \right\} \\ - \mu \left[\frac{\sin \varphi_n}{2} \begin{bmatrix} f_{xn+1} + f_{xn+2} \\ f_{yn+1} + f_{yn+2} \\ f_{zn+1} + f_{zn+2} \end{bmatrix} \right] \\ + K_n \left\{ \cos \varphi_{n+2} \begin{bmatrix} x_{nn+2'} \\ y_{nn+2'} \\ z_{nn+2'} \end{bmatrix} + \cos \varphi_{n+1} \begin{bmatrix} x_{nn+1'} \\ y_{nn+1'} \\ z_{nn+1'} \end{bmatrix} \right\} \quad (10)$$

(10)式では、係数の繁雑さを防ぐために、時間変数 t の記述は省略した。右辺では、 $t = n-1$ で、 $(f_{xn+1} + f_{xn+2}, f_{yn+1} + f_{yn+2}, f_{zn+1} + f_{zn+2})$ が求められ、 $t = n$ で、その他の項が求められる。

3. 5 K_i の条件

2次元モデルのときと同様に K_i の条件を以下に示す。

($t = 0$) ($z_2 = z_1$) のとき

$$\begin{aligned} & \cdot x_2 \neq x_1 \\ K_0 &= C_0 k_x f_{y0} - k_y f_{x0} \\ & \times 1 / ((k_y g \sin(\varphi_0 x) - \mu g \cos(\varphi_0 x)) \\ & \quad - C_0 k_x (g \sin(\varphi_0 y) - \mu g \cos(\varphi_0 y))) \end{aligned} \quad (11)$$

$\cdot x_2 = x_1$

$$K_0 = \frac{f_{y0}}{\mu g \cos(\varphi_0 y) - g \sin(\varphi_0 y)} \quad (12)$$

($z_2 \neq z_1$) のとき

$$\begin{aligned} K_0 &= -(C_{x0} f_{x0} + C_{y0} f_{y0} + C_{z0} f_{z0}) \\ & \times 1 / (C_{x0} (g \sin(\varphi_0 x) - \mu g \cos(\varphi_0 x)) \\ & \quad + C_{y0} (g \sin(\varphi_0 y) - \mu g \cos(\varphi_0 y)) \\ & \quad + C_{z0} (g \sin(\varphi_0 z) - \mu g \cos(\varphi_0 z))) \end{aligned} \quad (13)$$

但し、

$$C_0 = -(y_1 - y_0) / (x_1 - x_0)$$

$$C_{x0} = x_1 - x_0, C_{y0} = y_1 - y_0, C_{z0} = z_1 - z_0$$

$$(v) = x_{02}, (v') = x_{01}$$

$$g \sin(\varphi_0 v) = \sin \varphi_2(v) + \sin \varphi_1(v')$$

$$g \cos(\varphi_0 v) = \cos \varphi_2(v) + \cos \varphi_2(v')$$

$$(v = x, y, z)$$

とする。

($t = n$) ($z_{n+2} = z_{n+1}$) のとき

$$\begin{aligned} & \cdot x_{n+2} \neq x_{n+1} \\ K_n &= \{ 2(C_n k_x F_{\text{ext}(y)} - k_y F_{\text{ext}(x)}) + \\ & (C_n k_x F_{n+1n+2}(y) - K_y F_{n+1n+2}(x)) (\cos \varphi_n - \mu \sin \varphi_n) \} \\ & \times 1 / 2 \{ (k_y g \sin(\varphi_n x) - C_n k_x g \sin(\varphi_n y)) \\ & \quad - (k_y g \cos(\varphi_n x) - C_n k_x g \cos(\varphi_n x)) \} \end{aligned} \quad (14)$$

$\cdot x_{n+2} = x_{n+1}$

$$K_n = \frac{F_{n+1n+2} (\mu \sin \varphi_n - \cos \varphi_n) - 2F_{\text{ext}(y)}}{2(g \sin(\varphi_n y) - \mu g \cos(\varphi_n y))} \quad (15)$$

($z_{n+2} \neq z_{n+1}$) のとき

$$\begin{aligned} K_n &= [(\mu \sin \varphi_n - \cos \varphi_n) \times \{ k_x k_z C_{nx} F_{n+1n+2}(x) \\ & + k_x k_z C_{ny} F_{n+1n+2}(y) + k_x k_y C_{nz} F_{n+1n+2}(z) \} \\ & - 2(k_x k_y C_{nz} F_{\text{ext}(z)} + k_y k_z C_{nx} F_{\text{ext}(x)} + k_x k_y C_{ny} F_{\text{ext}(y)})] \\ & \times 1 / 2 \{ (g \sin(\varphi_n x) - \mu g \cos(\varphi_n x)) \\ & \quad + (g \sin(\varphi_n y) - \mu g \cos(\varphi_n y)) \\ & \quad - (g \sin(\varphi_n z) - \mu g \cos(\varphi_n z)) \} \end{aligned} \quad (16)$$

但し、

$$C_n = -(y_{n+2} - y_{n+1}) / (x_{n+2} - x_{n+1})$$

$$C_{vn} = v_{n+2} - v_{n+1}$$

$$(v) = x_{n+2}, (v') = x_{n+1}$$

$$g \sin(\varphi_n v) = \sin \varphi_{n+2}(v) + \sin \varphi_{n+1}(v')$$

$$g \cos(\varphi_n v) = \cos \varphi_{n+2}(v) + \cos \varphi_{n+1}(v')$$

$$F_{n+1n+2}(v) = f_{vn+1} + f_{vn+2}$$

$$(v = x, y, z)$$

とする。

3. 6 アルゴリズム

以上の3次元モデルの変形手法をコンピュー

タ上で効率よく行うための簡単なアルゴリズムを示す。

〈 3次元面素モデル変形アルゴリズム 〉

(手順1) 3次元のオブジェクトデータから、初期値として、端点の座標値を受け取り、線素ベクトル、面素どうしの成す角 φ_i を算出する。角 φ_i については、両面素の法線ベクトルどうしの内積を用いることによって得られる。また、この値は、1面素が変位を得ることにより随時、更新されるものとする。

(手順2) 任意の面素に外力が加わる。

(手順3) まず最初に(11)~(13)式(外力、作用面素の座標値、求める端点を含む隣接した面素と成す角 φ_i 、及び連結する両線素の単位ベクトル、摩擦係数)により、 K_i を求める。この K_i を(9)式に代入することにより、作用面素の初期変位を得る。

(手順4) (手順3)で得られた変位と力の関係(9)式の左辺)が、作用面に隣接する面素の変位に影響する。この場合も(手順3)と同様にまず(14)~(16)式により、 K_i を求めてから、この値を(10)式に代入することにより、隣接する面素の変位を得る。

(手順5) (10)式、及び(14)~(16)式によって得られる変位と力の関係((10)式の左辺)と K_i 、角 φ_i を随時更新することによって任意の時刻での任意の面素の変位を得る。

4. むすび

本稿では、オブジェクトを構成する面素(三角形パッチ)を形状変形の単位として扱い、その面素自体に「押す」、「引く」といった直接操作を加えることによって、作用面に連結する面素どうしがその形状を保持しながら、相互作用し合い、形状変形を行う手法を提案した。なお、本手法による実際のシミュレーション結果は都合により割愛する。

3次元のモデル化を行う前に2次元の蝶番モデルにおいての変形手法を示し、その動作確認をおこなった。

次に、2次元モデルからの推測により3次元の面素モデルについての変形手法を示した。

今後の課題としては、以下のものが挙げられる。

- ①高速なアルゴリズムの開発
- ②固定点を指定しての局所的な変形モデルへの拡張

③直接操作性を考慮したサーフェイス(面素)モデル変形システムの構築

④風船、シャボン玉のような表面積及び体積が不変なモデルへの応用

謝辞

本研究に関して、様々な御意見、御協力をいただいた本研究室の院生諸氏、及び学部生の方々に深く感謝致します。

参考文献

- [1] Alan, H. Barr : "Global and Local Deformation of Solid Primitives", Computer Graphics, 18, 3, July, 1984
- [2] D. Terzopoulos, J. Platt, A. Barr, K. Fleischer : "Elastically Deformation Models", Computer Graphics, 21, 4, August, 1987
- [3] Pentland. A., Williams. J. : "Good Vibrations: Model analysis for graphics and animation", Computer Graphics, 23, 3, 1989
- [4] 佐藤 誠、平田幸広、河原田弘 : "空間インターフェース装置SPIDARの提案" 信学論(D-II), J74-D-II, 7, pp. 887-894(1991-07)
- [5] Thomas W. Sederberg, Scott R. Parry : "Free-Form Deformation of Solid Geometric Models", Computer Graphics, 20, 4, August, 1986
- [6] William M. Hsu, John F. Hughes, Henry Kaufman : "Direct Manipulation of Free-Form Deformation", Computer Graphics, 26, 2, July, 1992
- [7] 佐藤 誠、沼崎俊一 : "動的操作のための回転体形状の変形アルゴリズム", 信学論(D-II), J75-D-II, 2, pp. 267-274(1992)
- [8] 亀井克之、中村泰明、阿部茂 : "エネルギー最少化による変形可能仮想ろくろモデル", 信学論(D-II), J76-D-II, 8, pp. 1772-1779(1993-8)
- [9] 山下樹里、福井幸男 : "形状の直接変形手法DDMの提案 - 2次元DDM -", 信学論(D-II), J76-D-II, 8, pp. 1780-1787(1993-8)