

## 弾性網を用いた複雑な形状に対するテクスチャマッピング†

中嶋正之†† 安居院 猛†† 永井宏一††

一般に、テクスチャマッピングでは2次元平面のテクスチャを3次元物体上にマッピングするが、対象物体の形状が球や凹凸のある曲面などの場合にはテクスチャが歪むのを避けられないという欠点がある。一般のテクスチャマッピング画像は、2次元テクスチャを3次元物体に貼り付けた後、透視変換を行って生成する。生成された画像のテクスチャは、元のテクスチャが歪んだものになる。この歪みは、2次元テクスチャを球や凹凸のある曲面にマッピングしたために生じる歪みと、透視変換による見かけ上の歪みの2種類がある。後者は3次元グラフィックスである以上必然的に生じる歪みであるが、前者は、極力少ないほうが好ましい。そこで本論文では、この前者の歪みを低減するために二段階から構成される手法を提案する。第一段階では、対象物体に弾性を持った格子状の網をかぶせたと想定し、弾性エネルギーが最小になるようにその網を変形させることによって各格子の歪みを低減する。第二段階では、変形した網に対してテクスチャをマッピングする。本手法によって実際に従来の手法より歪みの少ないマッピング画像を生成することができた。

## 1. はじめに

近年、コンピュータグラフィックスは、様々な分野に応用されるようになってきているが、それに伴い、ますます高品質な画像が要求されるようになりつつある。高品質な画像を生成するためには、より高度な、モデリング、レンダリング、アンチエイリアシング処理などの技術が必要であり、様々な研究が行われている。本論文では、レンダリング技術の1つであるテクスチャマッピングの高品質化について検討を行う。

テクスチャマッピングは、精密な形状のモデリングを行う場合と比較して、計算量が少ない割には高品質な画像を生成できるため、様々な手法が提案されている<sup>1)~5)</sup>。一般のテクスチャマッピングでは、2次元のテクスチャを3次元物体に貼り付ける。しかし、対象物体の形状が球や凹凸のある曲面などの場合にはテクスチャが歪んでしまう欠点がある。これは、歪みのない2次元の世界地図を作成することができないことと同じ理由である。歪みをなくすためには、あらかじめマッピング時に歪むことを考慮した歪んだテクスチャを用意するしかない。しかし、自然画像をマッピングするときには、これは困難である。また、人工のテクスチャをマッピングするときでも、マッピングによって生じる歪みを予想しつつ、テクスチャを作成するのは困難である。

そこで、本論文では、テクスチャマッピングによる

歪みを減らすために二段階から構成される手法を提案する。対象物体には、多数の3角形によって構成された凹凸のある物体を扱う。第一段階では対象物体に弾性を持った格子状の網をかぶせたと想定し、弾性エネルギーが最小になるようにその網を変形させることによって各格子の歪みを低減する。第二段階では変形した弾性網に対して、テクスチャをマッピングする。本手法によって実際に良好なマッピング結果を得ることができた。

本論文で用いる用語、記号については次のように定める。ベクトルは特に断わりのない限り、3次元列ベクトルとする。表記法は小文字の太文字を用いる。ベクトル  $\mathbf{a}$  の  $X$  方向、 $Y$  方向、 $Z$  方向の成分をそれぞれ  $a_x$ ,  $a_y$ ,  $a_z$  と表記する。

座標系は特に断わりのない限り、 $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  右手系直交座標系を用いる。座標系は大文字、例えば  $M$  で表す。なお、あるベクトル、あるいは座標系がどの座標系で表示されているかを明示する場合には、左上付き文字を用いる。例えば、座標系  $M$  上のベクトル  $\mathbf{P}$  は  ${}^M\mathbf{P}$  と表す。

## 2. 従来のテクスチャマッピング

テクスチャマッピングでは、(1)式によってテクスチャの各画素の2次元テクスチャ座標  $(T_x, T_y)$  と対象物体上の3次元座標  $\mathbf{P}$  を対応させる。そして、(2)式の透視変換によって  $\mathbf{P}$  を画面の2次元座標  $(P_x, P_y)$  に対応させる。

$$\mathbf{P} = \mathbf{F}1(T_x, T_y) \quad (1)$$

$$(P_x, P_y) = \mathbf{F}2(\mathbf{P}) \quad (2)$$

(1)式の写像が、マッピングによるテクスチャの歪

† Texture Mapping for Complex Object Using an Elastic Net by MASAYUKI NAKAJIMA, TAKESHI AGUI and KOICHI NAGAI (Imaging Science & Engineering Laboratory, Tokyo Institute of Technology).

†† 東京工業大学像情報工学研究施設

みの生じ方を決める。したがって、いかにして、歪みが少なくなるように  $F1$  を決めるかが問題となる。写像の方法には、大きく分けて、対象物体のパラメトリックな表現を利用する方法と、幾何学的な形状だけに依存する、投影法を利用した方法がある。

対象物体のパラメトリックな表現に依存した方法<sup>6)</sup>では、対象物体の表面上の点  $P$  が、(3)式に示す変数  $u, v$  の関数で与えられるとき、この式を利用して、例えば(4)式のように、テクスチャ座標  ${}^T x, {}^T y$  と対象物体表面との写像を決定する。

$$P = F(u, v) \quad (3)$$

$$P = F(a^T x + b, c^T y + d) \quad (4)$$

$a, b, c, d$ : テクスチャの大きさと位置を決定する任意の定数。

しかし、ある形状を表すパラメトリック表現は一般に無数に存在する。したがって、対象物体のパラメトリックな表現を利用したマッピング法は、モデリングに依存することになり、初めからマッピングすることを考慮したモデリングを行わないと、歪みの少ないマッピングを行うことができない。また、コンピュータグラフィックスでは、複雑な形状は、多数の小さな3角形で近似的に表現する場合が多いが、このような物体にパラメトリックな方法で歪みの少ないマッピングをすることは難しい。したがって、この手法が有効なのは、平面、直方体、円筒、球など、比較的簡単な、形状の物体にマッピングする場合に限られている。

対象物体の形状に依存した方法では、幾何学的な計算だけでテクスチャをマッピングしている。代表的な方法に、投影法がある。まず、対象物体の周囲にテクスチャ画像をマッピングした面  $R$  を仮想的に配置する。そして、視点  $v$  を定め、対象物体表面を投影面として、 $R$  上のテクスチャを対象物体に投影する。 $R$  が平面で、 $v$  が  $R$  に垂直な無限遠点だとすると、平行投影法になる。対象物体の形状に依存した方法は、対象物体のパラメトリックな表現に依存した方法に比べて複雑な形状の物体にもマッピングが可能であり、幾何学的な関係を用いているため、結果を予想しやすい、という利点がある。

上の2つの方法を組み合わせた手法もある<sup>7)</sup>。まず、対象物体の周りに、円筒、直方体などの中間面と呼ばれる簡単な面を置く。そして、パラメトリックなマッピング法によって、中間面にマッピングを行う。次に幾何学的な方法によって、中間面のテクスチャを、対象物体にマッピングする。中間面と、幾何学的なマッ

ピング法の選び方により、凹凸の小さい回転体や、球など比較的単純な形状の物体に対しては、ある程度歪みの少ないマッピングができるが、凹凸の大きい物体に対しては十分良好な結果を得られない。

以上のように、いずれの方法も、簡単な形状の物体以外に対しては、一般的にあまり良好な結果を得られない。

### 3. 弾性網を用いたテクスチャマッピング

複雑な形状の物体に対して歪みの少ないマッピングを効果的に行う方法は、以上述べたようにほとんど提案されていない。そこで、本論文では、新たに、弾性を持った網、すなわち弾性網を利用して歪みの少ないマッピングを行う手法を提案する。本手法の根拠となる考え方は次のようなものである。

テクスチャが薄いゴム膜のような弾性体に描かれていると想定し、テクスチャマッピングによって生じる歪みは、その弾性体の歪みによる弾性エネルギーとして評価できると仮定する。そして、ゴム膜を対象物体に貼り付けて、対象物体から離れないようにして、ゴム膜の弾性エネルギーが最も小さくなるまで変形すれば全体として歪みの少ないマッピングができる。

しかし、この方法をそのまま実現するのは、拘束条件が非常に複雑となり実現が困難である。そこで、弾性膜の代わりに、図1のように弾性を持った格子状の網を用いることにした。さらに、マッピングを行う対象物体上には、網の格子点だけを拘束して、格子点を結ぶ線が対象物体と交わったり、離れたりしてもよいことにした。このため、網の形状と、対象物体の形状は正確には一致しなくなるが、網の目を十分細かくすることで、近似的に対象物体を表すことができる。このような単純化によって、モデルの複雑さを減少させ、実現を容易にした。

曲面を多面体で近似することは一般に可能であるため、現在のコンピュータグラフィックスでは、曲面を多面体で近似して扱うことが多い。そこで、汎用性を持たせるために、本手法では、3角形で構成された形状データを用いることにした。しかし本手法の基本的な考え方は、対象物体が3角形によって構成されていることに依存しない。したがって、曲面で構成された物体にも、3角形に分割せずに適用できるように、本手法を変更することは可能であると考えている。このほかに対象物体の形状データには、いくつかの条件を設けてある。まず、3角形の頂点を除く辺上に、他

球歪体  
体れ

グ  
是  
生  
い  
な

て  
る

ン  
本  
イ  
し

ミ  
単

の  
付  
き

の  
こ  
ろ

の  
こ  
ろ

の  
こ  
ろ

の  
こ  
ろ

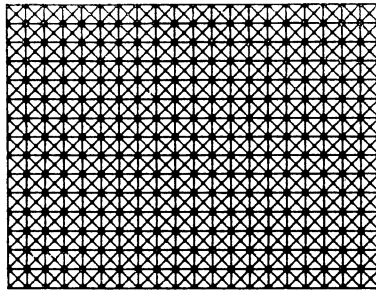
の  
こ  
ろ

の  
こ  
ろ

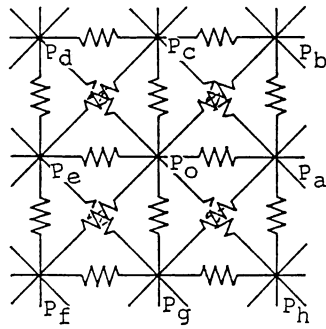
の  
こ  
ろ

の  
こ  
ろ

の  
こ  
ろ



(a)



(b)

図 1 長方形の弾性網

Fig. 1 A rectangular elastic net.

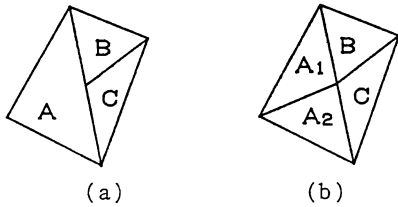


図 2 対象物体の3角形の分割

Fig. 2 Triangulation of an object.

の3角形の頂点が存在しないことが必要である。したがって、図2(a)のように3角形、A、B、Cが接している場合(b)のように3角形AをA1、A2に分割する必要がある。なお、1つの頂点から出る辺の数の制限は設けていない。

対象物体の形状については、何らかの方法で、平面のテクスチャがマッピング可能なことが必要である。これは、対象物体に弾性網をマッピングするための十分条件である。本手法では、後で述べるように、まず、従来の方法を用いて弾性網を対象物体にマッピングしなければならないため、この条件が必要になる。

4. 弾性網の対象物体へのマッピング

弾性網は、格子状にならんだ点を、ばねで連結したと想定したものである。弾性網上の点 P<sub>0</sub> は、周辺部を除いて、通常は図1(b)のように周囲の8点、P<sub>a</sub>~P<sub>h</sub> とそれぞれ弾性係数 k<sub>a</sub>~k<sub>h</sub> と自然長 d<sub>a</sub>~d<sub>h</sub> のば

ねで連結されている。もし、P<sub>0</sub> が縁の点ならば周囲の点は5個以下となる。

P<sub>i</sub> が P<sub>j</sub> から受ける力 f<sub>i,j</sub> は(5)式で与えられる。したがって、P<sub>i</sub> に加わる力の和 f<sub>i</sub> は(6)式で与えられる。なお、p は P の位置ベクトルであり、Σ<sub>j</sub> は P<sub>i</sub> に結合している格子点の番号を j に与えて和を取ることを表すことにする。

$$f_{i,j} = k_j (|\mathbf{p}_j - \mathbf{p}_i| - d_j) \frac{(\mathbf{p}_j - \mathbf{p}_i)}{|\mathbf{p}_j - \mathbf{p}_i|} \quad (5)$$

$$k_j \geq 0, d_j \geq 0$$

$$\mathbf{f}_i = \sum_j \mathbf{f}_{i,j}, \quad (6)$$

なお、通常は、ばねの自然長にはゼロを与えたほうがよい。これは、ばねが縮んだ場合には弾性網が折れ曲がる場合があるためである。簡単のため、図3のように平面上に拘束された点 X が平面上に固定された点 A、B と弾性係数が等しく、自然長 d<sub>0</sub> のばねで固定されているとする。

(a)のようにAとBの間の距離が d<sub>0</sub> の2倍以上の場合、Xに加わる力の和が0となるのはA、Bの中点Cである。しかし、(b)のようにA、B間の距離が d<sub>0</sub> の2倍より短い場合には、C、D、Eの3点が存在する。また、直線A、Bの垂直二等分線上でXを移動させた場合、A、Bの中点Cで弾性エネルギーが最大になり、A、Bからの距離が d<sub>0</sub> のところで、弾性エネルギーが0になる。また、Cは弾性エネルギーが極大値になり不安定な位置である。このような理由によって、ばねが縮んだ状態は避ける。しかし、弾性網を作るときには、便宜上、長さを与える。

図1は初期状態の長方形の弾性網の例である。この図の直線の交点が格子点であり、ばねは直線で表示している。初期状態の弾性網は対象物体の形状に応じて、円筒にしたり、数枚を組み合わせた。例えば球にマッピングする場合には、正4角柱の弾性網

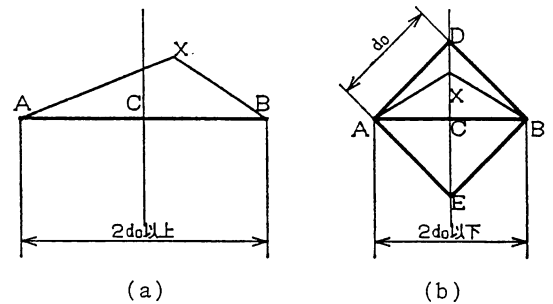


図 3 ばねの自然長と安定性

Fig. 3 The length of a natural spring and its stability.

と、2枚の正方形の弾性網を組み合わせて図4のような立方体を作る。

それぞれの弾性網には、図5に示すような座標系  $N$  を与える。各格子点は  $P_{i,j}$  で表す。ここで  $i, j$  は0以上の整数である。特に網の番号も示すときには  $P_{n,i,j}$  のように与える。ここで  $n$  は弾性網の枚数以下の自然数である。なお、座標系  $N$  は他の座標系と違い弾性網に固定されている2次元の座標系である。したがって、 $P_{i,j}$  の座標系  $N$  上での位置は、弾性網が変形しても、常に  $P_x$  は  $i$ 、 $P_y$  は  $j$  である。1組の弾性網の全格子点は、通し番号を用いて、 $P_k$  と表すこともできる。ここで  $k$  は0以上の整数である。 $k$  と  $n, i, j$  は(7)式のような関係を持つ。

$$k = \sum_{m=1}^{n-1} (X_m \times Y_m) + j \times X_n + i \quad (7)$$

$X_m$ :  $m$  枚目の弾性網の  $X$  方向の格子点数

$Y_m$ :  $m$  枚目の弾性網の  $Y$  方向の格子点数

3角形で構成された対象物体のデータを用いて、対象物体に、初期状態の弾性網をマッピングする。このときに用いるマッピング法は、どのような方法を用いてもかまわない。しかし、本手法では、一般のマッピング法によって生じる歪みを減らすための手法であるので、なるべく歪みの少ないマッピング法が望ましい。

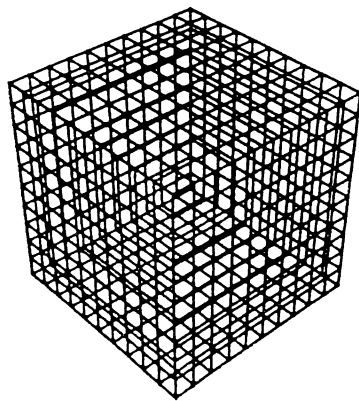


図4 立方体の初期状態の弾性網  
Fig. 4 An initial elastic net of a cube.

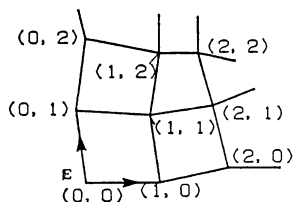


図5 弾性網の座標  
Fig. 5 The coordinates of the elastic net.

## 5. 弾性網の変形手順

対象物体にマッピングした弾性網は、一般にばねが不均一に伸びている。この伸びによる弾性エネルギーが少なくなるように弾性網を変形する。

まず、変形処理の前に、弾性網にさらに適切な拘束条件を与える。これは弾性網が、縮んで対象物体を覆わなくなったり、対象物体の上を移動するのを防ぐためである。拘束条件には、適切な格子点をいくつか固定する場合と、適切な折れ線上にいくつかの格子点を拘束する場合がある。例えば、図8(a)の物体に長方形の弾性網をマッピングした場合には、弾性網の4辺上の格子点を、4辺の格子点を結ぶ対象物体の表面の折れ線上に拘束し、4つの頂点の格子点を固定する。

拘束条件を与えた後、弾性網の歪みが少なくなるように弾性網の格子点を移動させる。(5)式から、 $P_i$  に結合されているばねを持つ弾性網の全体の弾性エネルギー  $E_i$  は(8)式で与えられる。したがって弾性網の全体の弾性エネルギー  $E_{all}$  は、 $m$  を(弾性網の全格子点数 - 1) とすると(9)式で与えられる。歪みを減らすには、拘束条件下で格子点を移動して、 $E_{all}$  が最小値になるようにすればよい。 $E_{all}$  が最小値を取る必要条件是(10)式に示す  $E_{all}$  の全微分  $dE_{all}$  が0となることである。 $dE_{all}$  が0になる十分条件は、 $E_i$  の全微分が0になることである。したがって、(5)式の各格子点に加わる力の和が0になるような格子点の位置を求めればよい。このような点の配置は、一般には複数存在する。しかし、 $f_i$  は  $P_i$  の2次式であり、 $f_i$  は、 $P_i$  の周りの格子点の位置に影響を受け、また、 $P_i$  には、複雑な拘束条件であるため、すべての配置を求めるのは非常に困難である。そこで、まず、次のような方法によって格子点の配置を1つ求める。

$$E_i = \sum_j k_j (|\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j| - d_j)^2 / 2 \quad (8)$$

$$E_{all} = \sum_{i=0}^m E_i / 2 \quad (9)$$

$$dE_{all} = \sum_{i=0}^m dE_i / 2 \quad (10)$$

まず、ある1つの格子点  $P_i$  に着目し、その格子点に結合されている他の格子点が固定されているとみなす。そして、 $P_i$  に加わる力の和  $f_i$  の、 $P_i$  が移動できる方向の成分が0になる位置に、 $P_i$  を移動させる。この処理を全格子点に適用した結果、最も移動した格子点の移動量があるしきい値より小さくなるまで、繰り返す。なお、 $f_i$  の適切な成分が0となる位置

は、Newton-Raphson<sup>9)</sup>法を用いて求める。格子点の移動は、その格子点の拘束条件に応じて次のように行う。

I. 固定されている場合

何も行わない。

II-a. 線上に拘束されている場合

図6(a)に示すように線分BC上に格子点 $P_i$ が拘束されているとする。まず、原点が $b$ 、X軸の向きが $c-b$ である座標系 $Q$ を設定する。そして、 $P_i$ に加わる力の和 $f_i$ の $^QX$ 方向成分 $^Qf_{ix}$ が0になる直線BC上の点Eを求める。その結果(a)のようにEが、線分BC上に存在すれば、 $P_i$ をEの位置に移動させて処理を終える。(b)のように、線分BCの外にEがあるときには、 $P_i$ をCの位置に移動させる。そして、線分CDが存在するときには、 $P_i$ の拘束している線分をCDに変更して再びII-aの処理を行う。存在しないときには、処理を終える。

III-a. 3角形上に拘束されている場合

図7(a)のような3角形ABC上に格子点 $P_i$ が拘束されているとする。まず、図のように、原点が3角形ABC上にあり、Z軸が3角形に垂直な座標系 $M$ を設定する。そして、 $P_i$ に加わる力の和 $f_i$ の成分、 $^Mf_{iz}, ^Mf_{iy}$ が0になる平面ABC上の点Rを求める。その結果、Rが3角形ABC内に存在するときには、Rに $P_i$ を移動させて処理を終了する。同図(b)のようにRが3角形ABCの外に存在するときには $P_iR$ と3角形ABCの辺との交点Sに $P_i$ を移動する。Sの存在する辺を持つ3角形ABCに隣接した3角形BDCが存在すれば、 $P_i$ を拘束する3角形を3角形BDCに変更して、再びIIIの処理を行う。隣接する3角形が存在しないときには、Sを含む線分BCに $P_i$ を拘束し、I-aの処理を行う。なお、このとき線分BCには接続する線分はないものとして処理する。そしてI-aの処理の後に $P_i$ の拘束条件を、3角形ABC上に戻して処理を終了する。

以上の処理で得られるのは、弾性網のエネルギーの極小値の1つである。したがって、さらに、エネルギーの低い格子の配置を求めるために、上で述べた処理のII-a、III-aに、それぞれII-b、III-bの処理を加えた処理を、全格子点に行い、最も移動した格子点の移動量が、あるしきい値以下になるまで繰り返す。

II-b. まず $P_i$ に結合しているばねのエネルギーを(8)式から得る。そして、 $P_i$ を $P_i$ を含む線分の隣の線分に移動させ、その線分上に、 $f_i$ の線分方向の成分

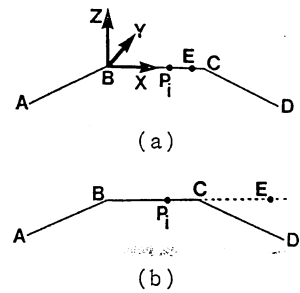


図6 格子点が折れ線上に拘束されている場合  
Fig. 6 A case of lattice points restriction on connected line segments.

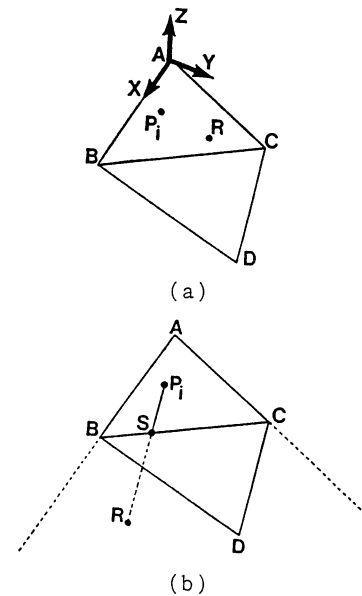


図7 格子点が3角形に拘束されている場合  
Fig. 7 A case of lattice points restriction on a triangle.

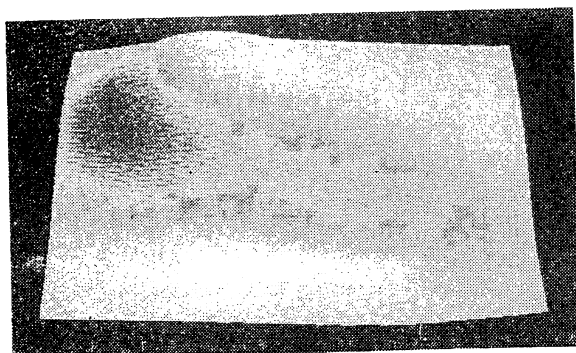
が0となる場所が存在すれば、その場所でのエネルギーを求める。その結果が元の場所でのエネルギーより小さければそこに $P_i$ を移す。

III-b.  $P_i$ に結合しているばねのエネルギーを(8)式から得る。そして、 $P_i$ を、 $P_i$ を拘束している3角形を囲むすべての3角形上に写し、 $f_i$ の面に平行な方向の成分が0となる場所Rを求める。Rが、その3角形内に存在すれば、その場所でのエネルギーを求める。その結果が、元の場所でのエネルギーより小さければRに $P_i$ を移す。

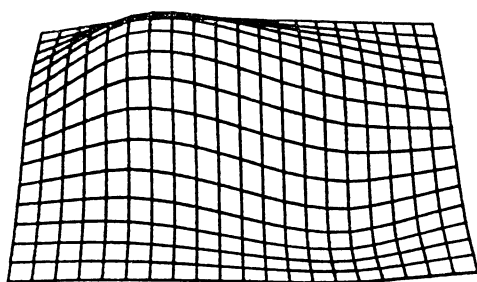
6. 弾性網の変形結果

以上の処理を実際に、図8(a)に示す凹凸のある対象物体に投影法を用いてマッピングした弾性網に対して適用した結果を、図8(b)~(d)に示す。(b)が処理前の弾性網、(c)がI、II-a、III-aの処理を行った

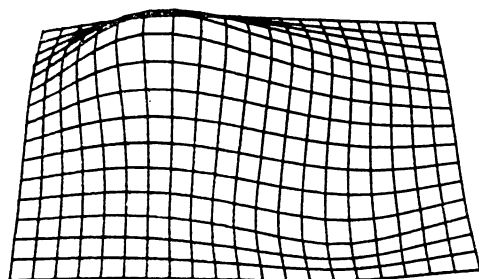
点  
な  
で  
る  
格  
線  
置



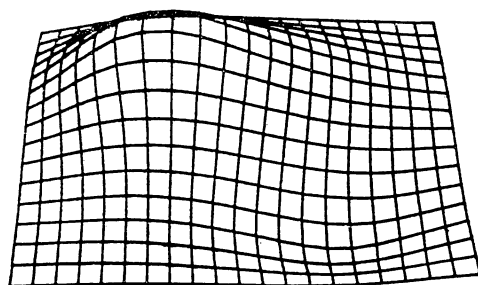
(a)



(b)



(c)



(d)

図 8 弾性網の変形処理  
Fig. 8 An elastic net modification.

中間結果, (d)が最終結果である。(b)の面の傾斜の大きい部分では格子が、縦長に引き延ばされているが、(c)では正方形に近づいていることがわかる。

## 7. 歪みの評価

弾性網の歪みの変化を数値で評価するために、弾性網の $^NX$ 方向、および $^NY$ 方向の格子点間距離、格子のアスペクト比の平均と分散、および、弾性エネルギー

表 1 弾性網の歪みの評価

Table 1 Evaluation of elastic net distortion.

(a)  $^NX$  方向の格子点間距離

	処理前	中間結果	最終結果
平均値	20.917	20.818	20.813
最小値	19.883	19.015	19.017
最大値	25.771	27.077	27.453
分散	1.1848	1.5269	1.5341

(b)  $^NY$  方向の格子点間距離

	処理前	中間結果	最終結果
平均値	22.518	22.292	22.813
最小値	19.883	19.779	19.790
最大値	30.016	28.491	30.163
分散	2.7342	1.7981	1.8056

(c) アスペクト比

	処理前	中間結果	最終結果
平均値	1.0801	1.0715	1.0713
最小値	0.7736	0.9444	0.9575
最大値	1.5070	1.2683	1.2080
分散	0.1433	0.0482	0.0421

(d) エネルギー

	処理前	中間結果	最終結果
エネルギー	261115	251150	251014

の評価を行う。格子点  $P_{i,j}$ ,  $P_{i+1,j}$ ,  $P_{i+1,j+1}$ ,  $P_{i,j+1}$  で構成される格子のアスペクト比は、(11)式の  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$ ,  $a_4$  で近似した。ただし、これらの評価値は、弾性網の変形の前後を比較するための相対的な値であり、それ以外の定量的な比較はできない。表 1 に図 8 の (b) (c) (d) について評価した結果を示す。対象物体をいろいろ変えて評価した結果、本手法には、格子のアスペクト比の分散を小さくする効果があり、II-b, III-b の処理の効果は小さいことがわかった。

$$\begin{aligned}
 x_1 &= |P_{i+1,j} - P_{i,j+1}| \\
 x_2 &= |P_{i+1,j+1} - P_{i,j+1}| \\
 y_1 &= |P_{i,j+1} - P_{i,j}| \\
 y_2 &= |P_{i+1,j+1} - P_{i+1,j}| \\
 a_1 &= y_1/x_1, \quad a_2 = y_2/x_1 \\
 a_3 &= y_1/x_2, \quad a_4 = y_2/x_2
 \end{aligned} \tag{11}$$

## 8. 弾性網に対するテクスチャのマッピング

前章までの処理によって得られた弾性網にテクスチャをマッピングする。まず、格子を 2 分割して、3 角形にする。そして 3 角形 ABC の各頂点を Pa, Pb, Pc

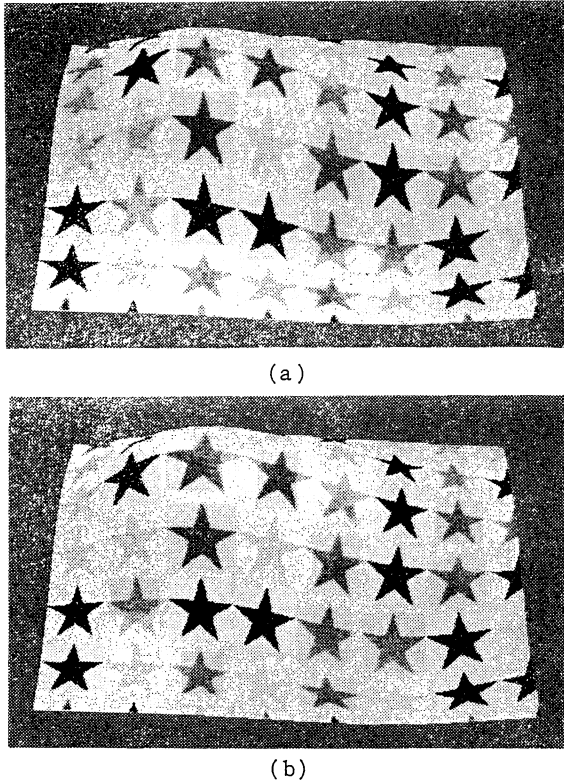


図 9 凹凸のある面にマッピングした結果  
Fig. 9 Mapping results on an uneven surface.

とする。これによって、対象物体は、新たに多数の3角形で構成されることになる。

次に(12)式によって格子点  $P_i$  に対応するテクスチャ座標  ${}^T p_i = ({}^T p_{i,x}, {}^T p_{i,y}, 0)^T$  を求める。ここで、 $m_x, m_y$  はテクスチャの縮尺を決める定数、 $n_x, n_y$  は弾性網上のテクスチャの位置を決める定数である。また、 $a$  は格子点のアスペクト比の平均である。 $a$  を用いるのは、弾性網が偏って引き延ばされる場合に、これを補正するためである。

$$\begin{aligned} {}^T p_{i,x} &= m_x \times (N p_{i,x} + n_x) \\ {}^T p_{i,y} &= m_y \times (N p_{i,y} + n_y) \times a \end{aligned} \quad (12)$$

そして、3角形 ABC 内の点  ${}^M p$  が(13)式で表されるとき、対応するテクスチャ座標  ${}^T p$  は(14)式で求まる。

$$\begin{aligned} {}^M p &= x \times ({}^M p_b - {}^M p_a) \\ &\quad + y \times ({}^M p_c - {}^M p_a) + {}^M p_a \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} {}^T p &= x \times ({}^T p_b - {}^T p_a) \\ &\quad + y \times ({}^T p_c - {}^T p_a) + {}^T p_a \end{aligned} \quad (14)$$

この対応を用いて、弾性網にテクスチャをマッピングする。図9に図8(b)(d)の弾性網にテクスチャマッピングを行った結果を示す。図9(a)は、変形前の弾性網に、アスペクト比の補正をせずにマッピング

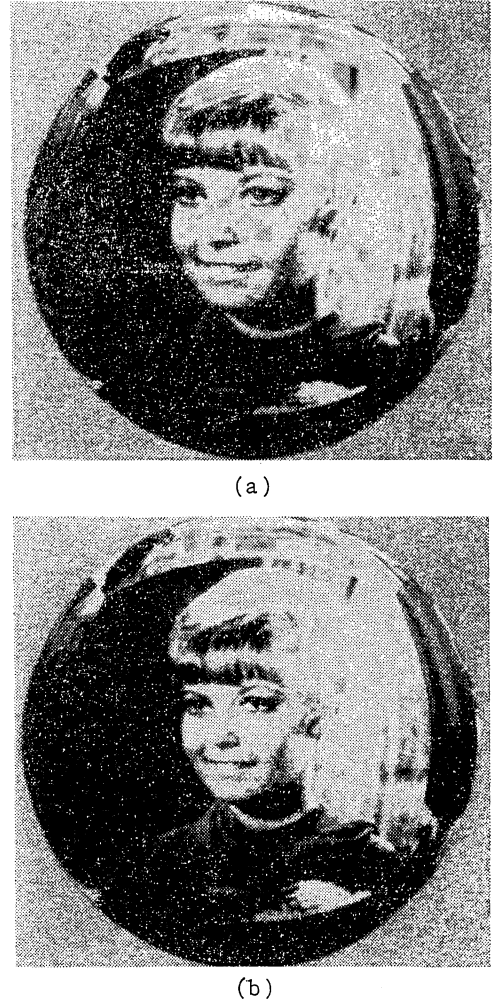
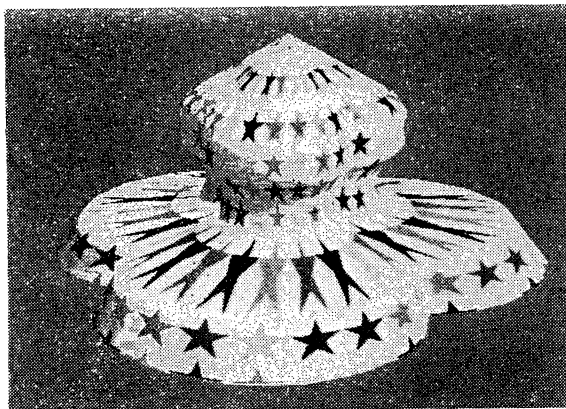


図 10 球にマッピングした画像  
Fig. 10 Mapped images on a sphere.

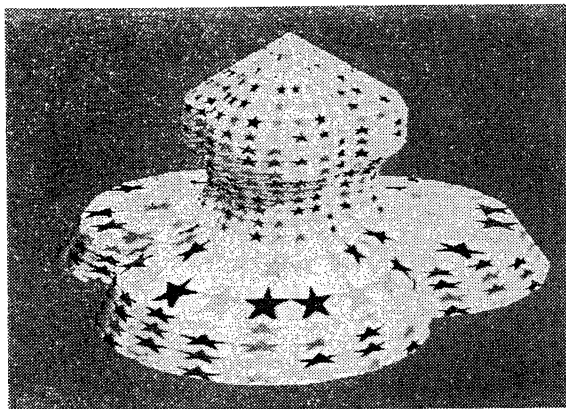
したもので、従来の幾何学的なマッピング法の結果とほぼ等しい画像である。なお、図10に球に対して応用した例を、図11に凹凸のある回転体に応用した例を示す。図10の物体に対しては立方体の弾性網を用い、図11の物体に対しては円筒形の弾性網を用いている。いずれも、本手法の効果がわかる。図11の例では、アスペクト比の補正の効果が大きく現れ、そのためにパターン数が違っていることがわかる。なお、これらのマッピング画像の計算時間の中で、約80%が弾性網の変形処理であった。

### 9. おわりに

本手法で、実際に歪みの少ないテクスチャマッピングが行えることがわかった。今後は、弾性網をモデリングに応用して、曲面の多い形状を、人間にとって、直感的に理解しやすく作成できるかどうかを試みる予定である。また、本手法では、弾性網に複雑な拘束条



(a)



(b)

図 11 凹凸のある回転体へのマッピング  
Fig. 11 Mapped images on an uneven surface of revolution.

件を与えて変形を行っているが、この変形手法を拡張して、柔軟な物体が剛体と接したときの形状変化を、自動的に与えることも試みる予定である。

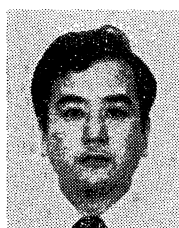
#### 参 考 文 献

- 1) Heckbert, P. S.: Survey of Texture Mapping, *IEEE CG & A*, Vol. 6, No. 11, pp. 56-67 (1986).
- 2) Smith, A. R.: Planar 2-Pass Texture Mapping and Warping, *Comput. Gr. (SIGGRAPH '87)*, Vol. 21, No. 4, pp. 263-272 (1987).
- 3) Oka, M. et al.: Real Time Manipulation of Texture-Mapped Surfaces, *Comput. Gr. (SIGGRAPH 87)*, Vol. 21, No. 4, pp. 181-188 (1987).
- 4) Fiume, E. et al.: Conformal Texture Mapping, *EUROGRAPHICS '87*, pp. 53-64 (1987).

- 5) Wyvill, G. et al.: Solid Texturing of Soft Objects, *IEEE CG&A*, Vol. 7, No. 12, pp. 20-26 (1987).
- 6) 安居院猛, 中嶋正之, 井上政夫: コンピュータグラフィック技法を用いた簡単な立体模様付けシステム, 印刷学会論文集, Vol. 23, No. 1, pp. 41-48 (1985).
- 7) Bier, E. A. and Sloan, K. R., Jr.: Two-part Texture Mappings, *IEEE CG&A*, Vol. 6, No. 9, pp. 40-53 (1986).
- 8) 新谷尚義: 数値計算 1, pp. 180-186, 朝倉書店 (1967).

(平成元年 4 月 13 日受付)

(平成元年 10 月 11 日採録)



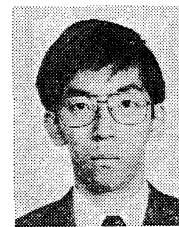
中嶋 正之 (正会員)

昭和 44 年東京工業大学工学部電気卒業。昭和 50 年同大学院博士課程修了。同年同大勤務。現在、同大像情報工学研究施設助教授。コンピュータ・グラフィクス、画像処理の研究に従事。工学博士。52, 55, 60, 63 年度日本印刷学会論文賞受賞。著書「画像工学の基礎」(昭晃堂), 「パソコングラフィクス入門」(オーム社)。



安居院 猛

昭和 34 年東京工業大学工学部電気卒業。昭和 39 年同大学院博士課程修了。現在、同大像情報工学研究施設教授。制御理論、印写機器、コンピュータ・アニメーションなどの研究に従事。工学博士。52, 55, 60 年度日本印刷学会論文賞受賞。著書「画像工学の基礎」(昭晃堂), 「コンピュータグラフィクスの技法」(新オーム文庫)。



永井 宏一

昭和 61 年東京工業大学工学部機械物理工学科卒業。昭和 63 年同大学院総合理工学研究科物理情報工学専攻修了。現在、東芝総合研究所機械研究所勤務。情報機器の研究開発に従事。