

曲面テクスチャの平面展開法

丸家 誠

NEC 情報メディア研究所

郵便番号 216 川崎市宮前区宮崎 4-1-1

あらまし スtereオ立体計測で得られた物体表面上の画像、すなわち曲面上のテクスチャを2次元平面に展開し、平面テクスチャを生成する方式を提案する。ステレオ立体計測の目的の一つは被計測物体のCG画像の作成であるが、計測時テクスチャは曲面上の画像としては得られるため、そのままではテクスチャマッピングに利用できない。提案法によりテクスチャマッピングを利用したテクスチャ表現が可能になり、少數のポリゴンでも計測されたデータを有効に利用したリアルな表示が可能となる。また本方式では展開図を用いるため、テクスチャの記録密度がほぼ一定であるという特徴もある。

和文キーワード スtereオ立体計測、テクスチャ、マッピング、平面展開、展開図

Development of a Curved Texture Image into a Plane

Makoto Maruya

Information Technology Research Labs., NEC

4-1-1 Miyazaki, Miyamae, Kawasaki, 216, JAPAN

Abstract Proposed here is a method to develop a texture image on a curved surface, measured by stereopsis, into a plane. One of the purpose of the stereo measurement is to utilize the data in the field of Computer Graphics. However, the measured texture on the object surface must be transformed into a plane, because the texture mapping technique presupposes that the texture image to be mapped is a plane. The proposed method enables to use the texture mapping technique to produce the object image, which means the object image can be produced with a small number of polygons.

英文 key words stereopsis, texture, mapping, develop, development

1 まえがき

ステレオ立体計測では、物体形状とともに物体表面のテクスチャの計測が可能である。形状やテクスチャを計測する主要な目的の一つは、被計測物体のコンピュータグラフィックス（CG）画像の作成であるが、計測されたテクスチャデータは、CG 画像作成に適したデータ形式になっていない。

通常、CG ではテクスチャマッピングによりテクスチャを表現する。しかし、ステレオ立体計測で得られたテクスチャデータを、そのままマッピングすることはできない。なぜならテクスチャマッピングは 2 次元平面のテクスチャ（以降、平面テクスチャと呼ぶ）を曲面に張り付ける方法であるのに対し、ステレオ立体計測では、テクスチャデータは物体表面上の画像、すなわち曲面上の画像（以降、曲面テクスチャと呼ぶ）として得られるからである。

そこで、本論文では、曲面テクスチャを 2 次元平面に変換する方式を提案する。本方式では、ステレオ立体計測で得られた曲面を、比較的少数のポリゴンで構成される多面体で近似表現する。そして、多面体の展開図を作成し、展開図上のテクスチャデータから平面テクスチャを生成する。この平面テクスチャを用いることにより、テクスチャマッピングを利用した被計測物体のテクスチャ表現が可能になる。そのため少数のポリゴンでも、計測されたテクスチャデータを有効に利用したリアルな表示が可能になる。また、平面への変換に展開図を利用しているため、テクスチャの記録密度がほぼ一定であるという特徴がある。なお、本方式はステレオ立体計測に限らず、3 次元ディジタイザなどで得られるテクスチャデータにも適用できる。

2 ステレオ立体計測による形状とテクスチャの計測

ステレオ立体計測 [丸家 93] を用いた形状とテクスチャの計測方法、および形状及びテクスチャを表現するデータ形式について述べる。

ステレオ立体計測では、被計測物体をステレオカメラで撮影し、得られた左右の画像間で対応付けを行なう（図 1）。そして、左画像と右画像間の対応点が指示する物体表面上の一点（測定点）の 3 次元座標を求める。

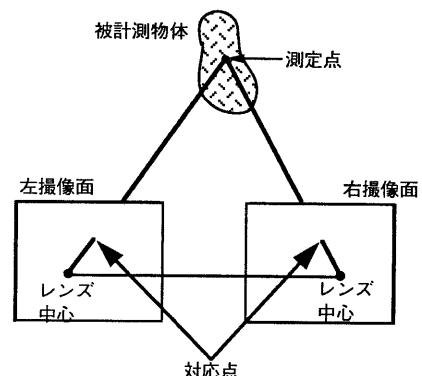


図1 ステレオ立体計測の原理

測定点は 3 次元空間中で離散に得られるため、本方式では測定点を微少な三角形（三角パッチ）で結び、三角パッチで構成された多面体により被計測物体の面を表現する。三角パッチの生成には、Christiansen の手法を用いている [Chris78]。この手法はアルゴリズムが簡単であり、かつ三角パッチの形や大きさがそろうという利点がある。さらに、三角パッチの頂点の色、すなわち測定点の色を二つの対応点の RGB 値の平均をとることにより求める。この RGB 値により被計測物体のテクスチャを表現する。以上に述べたように、本ステレオ立体計測により得られる形状およびテクスチャデータのデータ形式は、三角パッチの集合および各三角パッチの頂点での RGB 値である。3

次元ディジタイザで形状、テクスチャデータを計測した場合でも、このデータ形式になっていれば提案法を用いた表示が可能である。

一組のステレオ画像から得られる形状及びテクスチャデータは、物体の一部である。そこで、本ステレオ立体計測では、複数の視点からステレオ画像を撮影し、各ステレオ画像から得られた複数の部分形状を接続することにより、物体全体の形状及びテクスチャデータを得ている。しかし、得られるデータの形式は前述の通りである。

ステレオ立体計測において画素毎の密な対応付けを行なうと、多量のデータが得られる。例えば、被計測物体が 200 画素 × 200 画素の大きさで撮影されたとすると、対応点の数、すなわち頂点の数は約 4 万となる。三角パッチの数を頂点数の 2 倍として求めると、約 8 万である。物体全体では、頂点数、ポリゴン数ともさらにその数倍となる。データが多いほど精密な表現が可能になるが、特にリアルタイム性が要求される場合には利用できるポリゴン数が限られるため、従来法ではこれだけのデータを全部有効に利用した CG 画像の作成は困難であった。次章ではこの問題を考察する。

3 従来のテクスチャ表現方法

前述のステレオ立体計測で得られた形状、テクスチャデータから、従来のテクスチャ表現方法により CG 画像を作成することを考える。ここでは 2 つの基本的な方式である、頂点カラー方式と円筒を用いたテクスチャ内部表現方式を取り上げる。

3.1 頂点カラー方式

三角パッチ等のポリゴンの頂点に RGB 値を与えることにより、テクスチャを表現する方法がある [GL91]。これを、ここでは頂点カラー方式と呼ぶ。ポリゴンの内部の RGB 値は、頂点での RGB

値から補間して求めるため、ポリゴンが大きいと、テクスチャがぼやけてしまう。従って、テクスチャの正確な表現を行なうには、小さなポリゴンを多数使う必要がある。

当然、ポリゴン数が多いほど形状表現も正確になる。しかし、形状をより少ないポリゴンで近似的に表現する手法が開発されており [Schroeder92]、またレンダリング時に Gouraud シェーディング等を用いればポリゴンの境界がなめらかに見えるため、形状表現だけのためならば、一般的にそれほど多数のポリゴンは必要ない。

前述のステレオ立体計測で得られた形状、テクスチャデータのように、ポリゴンの頂点と、RGB 値が同じ位置で求められている場合には、この表示方式が最も画質がよい。しかし、前に述べたようにテクスチャを正確に表現するために膨大な数のポリゴンが必要である。

3.2 円筒を用いたテクスチャ内部表現方式

被計測物体を囲む仮想的な円筒を考え、三角パッチの頂点に与えられている RGB 値を、この円筒に投影してテクスチャの内部表現を得る方法がある（図 2）。3 次元ディジタイザで得られた

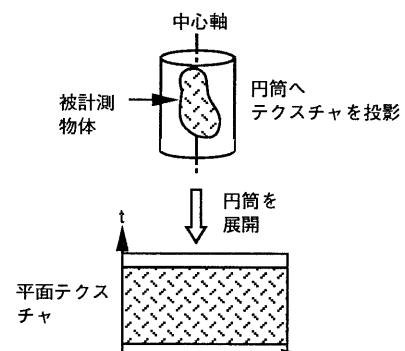


図2 円筒を用いたテクスチャ内部表現

テクスチャの表現にこれに似た方法が使われている [渡部 90]。円筒は平面に展開可能であり、また何らかの方法でポリゴン数を削減したとしても、

ポリゴンと円筒上の画像との対応が明確であるため、得られた2次元画像をそのまま平面テクスチャとしてマッピングに用いることができる。

しかし、円筒方式では、物体の上端部、下端部のテクスチャを表現できない。また、円筒に投影される三角パッチの形や面積が三角パッチの向きに応じて大きく変化するため、テクスチャの記録密度も三角パッチ毎に変化してしまう。したがって、物体全体のテクスチャを欠落なく表現したい場合、あるいは物体形状が複雑な場合には、本方式が十分であるとはいえない。

4 平面展開法

本論文で提案する曲面テクスチャの平面展開法を詳細に説明する。

4.1 頂点／ポリゴン削減

頂点／ポリゴン削減処理の入力となるデータは、三角パッチ及び三角パッチの頂点に与えられているRGB値である。前に述べたように、一般に三角パッチの数や頂点の数は膨大なので、三角形パッチ及びその頂点の数を削減する必要がある。

頂点／ポリゴン削減を行う手法はいくつか提案されているが、ここではSchroederの手法を用いる [Schroeder92]。この手法を以下に説明する。



図3 頂点pの削除

ある頂点 p を共有する三角パッチ群を取り出し、そのパッチ群の平均の傾き、三角パッチ群の重心位置の平均を求める。そこから、平均面を生成する。こうしてできた平均面と頂点 p との距離をもとめ、その距離がしきい値以下ならば、頂

点 p を削除する。そして、三角形パッチ群が占めていた多角形領域を、既存の頂点を結んで三角形パッチで埋める。図3の例では、頂点 p の削除で、三角パッチが2個減っている。以上の処理をすべての頂点に対し繰り返し行う。この手法により、平面に近い領域は、大きな三角パッチで表現されることになり、三角形パッチの数が減少する。頂点を単純に間引くよりはるかに元の形状を保った頂点／ポリゴン削減ができる（図5）。

以上がSchroederの手法であるが、提案法では、頂点を削除した場合でも頂点におけるRGB値を保存するために以下の処理を行なう。すなわち、頂点を一つ削除する毎に、頂点での法線と新たに生成された三角パッチとの交点を求め、交点で頂点が持っていたRGB値を保存する。このような交点をRGBデータ点と呼ぶ。内部にRGBデータ点を持つ三角パッチを削除する場合には、RGBデータ点の法線と、新たに生成された三角パッチとの交点を求め、その交点を、新たなRGBデータ点とする（図4）。

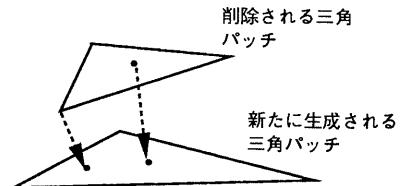


図4 三角パッチ内部でのRGBデータの保存
(黒丸はRGBデータ点を示す)

なお、頂点やRGBデータ点の法線と、新たに生成された三角パッチが交わらない場合には、RGB値を保存しない。しかし、頂点やRGBデータ点の法線と、新たに生成された三角パッチは通常交わるので、入力されたテクスチャデータはほぼ保存できる。

4.2 展開図作成

ここでは、前の処理の出力である、三角パッチで構成された多面体の展開図を作成する。ここで作成する展開図は、必ずしも一つにまとめる必要はなく、複数に分割しても良い。極端な場合として、三角形パッチひとつひとつを切り離した展開図でも良い。重要なのは、三角パッチが展開図上で重ならないようにする事と、なるべく小さな2次元平面領域に効率よく展開図を納めることである。

しかし、一般に展開図を分割するほど、小さな2次元平面領域に納めるための計算が複雑になる。そこで、分割をさけることを第一の条件とし、その上でなるべく小さな2次元領域に三角形パッチを展開する方法を採用した。ここでは、展開図の大きさの評価を展開図の外接四角形の面積により行なっている。なおこの方法は、計算量を抑えるため全探索を行なわずに、部分的な評価を順次行いながら展開図を作成していく。したがって、この方式で得られる展開図は最適ではない。

以下にアルゴリズムを説明する。

(1) 三角パッチを一つ任意に選ぶ。この三角パッチ一つを、アルゴリズムスタート時の初期展開図とする。

(2) 現段階での展開図を構成する三角パッチ(群)と、共通の辺をもつ、未展開三角形を列挙する。

(3) 展開図に追加する三角パッチ、及び三角パッチを追加する位置を、(2)で列挙した未展開三角パッチの中から、以下に述べる二つの基準で選ぶ。

・現段階での展開図に対し、展開図上で三角パッチ同士の重なりが生じる追加位置と、重なりが生じない追加位置をもつ三角パッチを優先させる。そして、重なりが生じない追加位置に追加する。

(三角パッチは、三つの辺の中の一つを介して展開図とつながるわけであるが、すでに一辺が接続に使えないことが分かった時点で、早めに展開

図と接続させる。)

このような三角パッチが複数ある場合、あるいは一つもない場合、次の基準を用いる。

- ある三角パッチを追加することにより、現段階の展開図の外接四角形の面積がどれだけ増加するかを求めて、その外接四角形面積の増加量を C とする。その三角パッチの面積を A として、優先度 $pri = C/A$ を計算する。そして pri が小さい三角パッチを優先して追加する。三角パッチが複数の追加位置を持つ場合、それぞれの位置について以上の評価をおこなう。

(外接四角形の面積の増加を抑えるための順位づけである。 pri 計算時に A を考慮することにより正規化を行い、小さな三角パッチだけが先に展開されることを防いでいる。)

(4) 上記の基準でもっとも優先度の高い三角パッチを展開図に追加する。そして、(2)にもどる。

(5) メインの展開図に接続できなかった三角パッチは、それぞれを個々の展開図とする。

展開図上の三角パッチを変形させることにより、さらに効率よく2次元平面領域に展開図を納めることができる。しかし、展開図上の三角パッチの形や面積を変化させると、円筒方式と同様にテクスチャの記録密度が変化する問題が生じるため、この様な変形は行なっていない。テクスチャ表現に影響を与えない程度の、微少な変形による展開図の圧縮に関しては今後の課題である。

4.3 平面テクスチャ生成

展開図上の頂点およびRGBデータ点から、平面テクスチャを納める2次元画像領域の各格子点での輝度を求める。ここでは、簡単のために、各格子点から最も近い頂点あるいはRGBデータ点のRGB値を、その格子点のRGB値とした。

5 実験

実験方法及び評価結果を述べる。

5.1 実験方法

実験には、ステレオ立体計測[丸家93]により得られた貝（イトマキボラ）のデータを用いた。ステレオ立体計測を容易にするために、貝の開口部は、ランダムテクスチャを印刷した赤い紙で塞いである。形状およびテクスチャの計測時、貝は横250画素、縦300画素程度の範囲で撮影された。

CG画像生成には、高速画像生成装置[石田92]を用いた。照明モデルには、Gouraudシェーディングを用いた。

5.2 評価

提案方式で生成されるCG画像の画質を、頂点カラー方式を用いたCG画像の画質と比較することにより評価した。まず、オリジナルのデータから、頂点数4491／三角パッチ数8933の基準モデルを作成した。基準モデルに対し、Schroederの手法で頂点／ポリゴン削減を行い、頂点数792／三角パッチ数1530の比較モデル1を作成した。また、ポリゴンの削減方法によるテクスチャ表現の違いを評価するために、基準モデルの頂点を等間隔に間引いて、頂点数1144／三角パッチ数2263の比較モデル2を作成した。

図5に、比較モデル1と比較モデル2をワイヤフレームで示す。比較モデル1では、平面に近い部分は、大きな三角パッチで表現されていることが分かる。

基準モデルから提案方式により平面テクスチャを生成した(図6)。サイズは、横400画素、縦310画素である。ほぼまとまっているが、左上、右下には無駄な空間がある。なお、これはメインの展開図であり、これとは別に約30個の独立した展開図が生成された。

図7に、頂点カラー方式で表示した基準モ

ル(左上)、提案方式で生成した平面テクスチャをマッピングした比較モデル1(右上)、頂点カラー方式で表示した比較モデル1(左下)および比較モデル2(右下)を示す。当然基準モデルが最も画質がよい。提案方式を用いた比較モデル1のテクスチャは、基準モデルと比べて、輝度の変化が強調されており、また色の境界がなめらかではない。これは平面テクスチャを生成する際、輝度の補間に最近傍法を用いたためと思われる。しかし、基準モデルに見られるテクスチャはほぼ表現できている。

頂点カラー方式では、比較モデル1のテクスチャを表現できないことが分かる。特に、平らな部分(赤い部分)は三角パッチが大きいため、テクスチャは完全に失われている。頂点カラー方式で表示した比較モデル2は、頂点カラー方式で表示した比較モデル1よりはテクスチャを表現できている。これは、比較モデル1より約40パーセント頂点数が多いことと、頂点が等間隔に存在することによると思われる。しかし、比較モデル2は比較モデル1より頂点、三角パッチ数とも多いにもかかわらず、提案方式を用いた比較モデル1よりもかなり不鮮明である。

6まとめ

本論文では、ステレオ立体計測で得られた曲面テクスチャを平面に展開する方式を提案した。提案法を用いると、頂点数及びポリゴン数を1/6程度に減らしても、画質の劣化が少ないことが実験より分かった。本方式では、原理的にどのような物体形状でもテクスチャを欠落なく表現できる。また、テクスチャの記録密度がほぼ一定であるため、円筒方式と比較して、均一なテクスチャ表現が可能である。

今後の課題は、よりコンパクトな展開図を生成する方法の開発と、平面テクスチャ生成時のRGB値の補間法の工夫である。

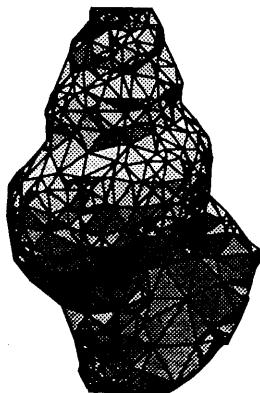
参考文献

- [Chris78] H.N. Christiansen and T.W., Sederberg, "Conversion of Complex Contour Line Definitions into Polygona Element Meshes", SIGGRAPH Computer Graphics, Vol.12, No.3, pp187-192(1978)
- [GL91] "Graphics Library Programming Guide G07-121-040", Silicon Graphics, Inc. (1991)
- [Schroeder92] William J. Schroeder, Jonathan A. Zarge, William E. Lorensen, "Decimation of Triangle Meshes", SIGGRAPH Computer Graphics, 26, 2, July 1992

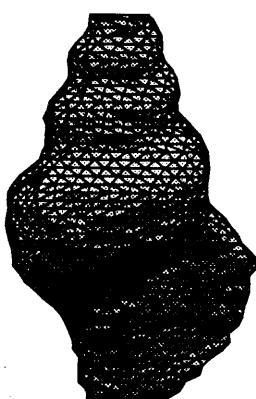
[石田 92] 石田 博文、中川 滋雄、根本 啓次、"リアルタイム CG 映像生成装置の開発(1)"、1992 年電子情報通信学会春季大会 D-650

[丸家 93] 丸家 誠、高島 洋典、"テクスチャを手がかりにした形状再構成"、1993 画像電子学会年次大会予稿

[渡部 90] 渡部 保日児、末永 康仁、"3D 形状と輝度(色)を同時計測可能なスキャナとその応用"、第 6 回 NICOGRAF 論文コンテスト論文集 pp181-189 (1990)



<比較モデル1>
Schroederの手法による削減
(頂点数792、三角パッチ数1530)



<比較モデル2>
頂点の等間隔間引き
(頂点数1144、三角パッチ数2263)

図5 実験結果1(頂点/ポリゴン削減)

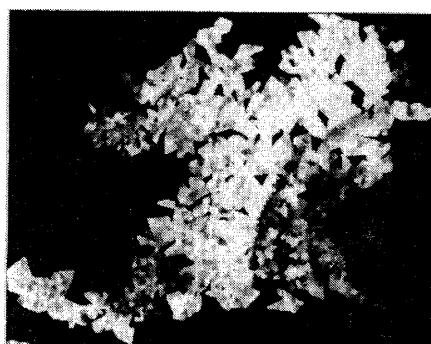
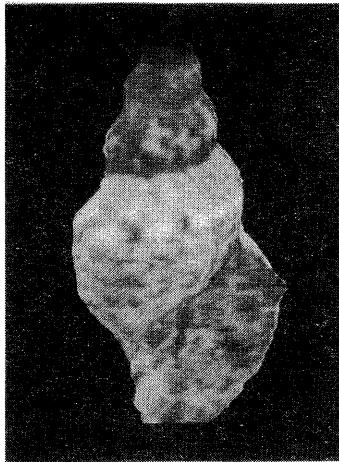
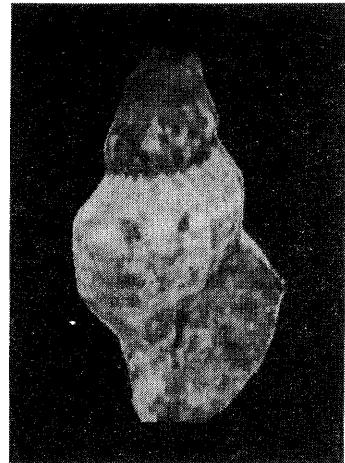


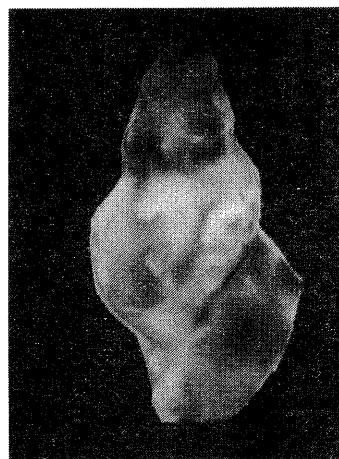
図6 実験結果3(平面テクスチャ)



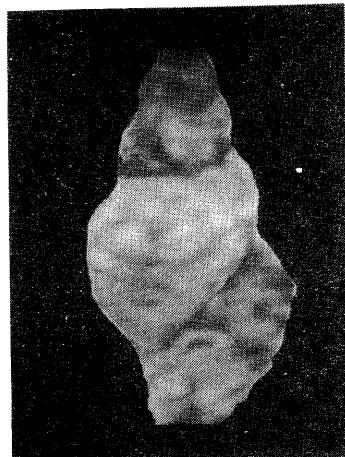
<基準モデル>
頂点カラー方式による表示
(頂点数4491、
三角パッチ数8933)



<比較モデル1>
提案方式により作られた
テクスチャをマッピング
(頂点数792、
三角パッチ数1530)



<比較モデル1>
頂点カラー方式による表示
(頂点数792、
三角パッチ数1530)



<比較モデル2>
頂点カラー方式による表示
(頂点数1144、
三角パッチ数2263)

図7 実験結果2(CG画像生成)