

対話的なレリーフ形状作成システムに関する研究

吉田 英正 大野 義夫

慶応義塾大学 理工学部

写真等の2次元画像をもとにして対話的にレリーフ状の立体形状をモデリングするためのシステムやツールについて述べる。これまで、平面濃淡画像から3次元形状を推定する研究が数多くなされているが、形状推定が成功するには、条件がかなり厳しく、そのような条件が満たされていても必ずしも目的の形状が得られるとは限らない。本論文では、対話的な操作によってレリーフ形状を作成するための道具を提供するシステムについて述べる。

An Interactive Relief Design System

Hidemasa Yoshida Yoshio Ohno

Faculty of Science and Technology, Keio University

“Shape from shading” has been studied, but to reconstruct good shape, severe conditions must be satisfied. Therefore, we adopted another approach. This paper describes interactive tools and a system for designing relief surface based on a 2D shading image like a photograph.

1 はじめに

3次元形状のモデリングは、常にコンピュータグラフィックス(CG)の中で主要な研究分野であり、それは、幾何モデルの定義とそのデザイン手法の発達を担ってきた。従来のシステムは基礎をなす幾何モデルによったデザインまたは、デザインの方法によった幾何モデルを用いてきた。この解決法は、ある特定のアプリケーションに対しては、効果的である。

一般のユーザーが写真等の2次元濃淡画像からまたは、自らのイメージに基づいて3次元形状データの制作を行なう場合、実際の造形の複雑さ、修正の困難さ等の理由から、作業の効率を落とし、ひいてはその自由な発想の阻害、作業に対する意欲の減退を引き起こしている。回転体の生成や挿引などの操作により平面図形に厚みをつける機能は一般的となったが、より複雑な形状の制作には対応するのが困難で、原始的なデータ入力による煩雑な作業は依然として無くならない。

3次元形状の制作者は、煩雑なデータの制作作業を受け入れるか、複雑な形状を制作することを避ける等の対処をしなければならない。

1枚の2次元濃淡画像から3次元物体の形状を推定する問題(shape from shading)の研究は、惑星探査機によって撮影された写真から惑星の地表の形状の推定する等、画像処理の分野で数多くなされている。しかし、推定が成功するには、条件がかなり厳しく、光源の方向、対象となる物体の反射率が既知でありさらに、物体の表面形状が滑らかでなければならないなど、実際に得られる2次元濃淡画像の中でも極めて稀な条件が揃っていることが必要である。また、そのような条件が揃っていても必ずしも望みの形状が得られるわけではない。

しかし、全く何もない状態から3次元形状を制作するのはかなりの造形能力を必要とする。そこで本研究では、完全な3次元ではないが、レリーフなど、平面上の高さが1価関数で表せるような曲面を対話的に作成することを考え、そのためのシステムの構築や、そうした、システムが備えるべきツールについて考察する。このとき、写真等の2次元濃淡画像を作成の補助として有効に利用できるように配慮

する。

2 濃淡画像に基づく形状データの生成

人間は1枚の画像から、ある程度の奥行き情報を得ることができる。その時に、人間が用いていると考えられる多くの手がかりの中には、オクルージョン、テクスチャ、方向、見なれた物体の大きさ、および濃淡の滑らかな変化がある。しかしこれらをもとに自動的な形状復元ができるのは、極めて制限された場合だけである。ここでは、本研究に最も関連の深い、濃淡にもとづく3次元形状推定問題(shape from shading)についてその概要を紹介する。

2.1 Hornの理論

2次元濃淡画像から3次元形状を反射率地図(reflectance map)を用いて再構成する方法が、B.K.P. Horn [Horn 75, Horn 77]によって提案された。一様な表面を持った滑らかな物体の画像では、反射光の強さが連続的に変化し、その変化を物体形状の決定に利用することができる。しかし、画像の各点において取得できる情報は、対応する物体上の点の反射光強度のみである。特殊な点では、反射光強度から物体表面の局所的な法線方向を決定できるが、ほとんどの点では決定できない。したがって、物体形状は局所演算だけでは決定できない。

この方法では、画像濃度に混入した雑音によって勾配推定が著しく影響を受けるという問題がある。また、物体表面のすべての点における勾配の導出には、膨大な計算量を必要とする。

2.2 Ikeuchi-Hornの反復推定法

物体表面の境界上の各点における勾配を既知として固定する外縁線拘束と物体表面の滑らかさの条件を用いた反復推定法がK.IkeuchiとB.K.P. Horn [Ikeuchi 81]によって提案された。

この方法の問題は、凹表面を持つ物体表面の推定ができない。外縁線拘束から伝搬によって勾配を推定するので、局所的には画像-

放射輝度方程式ならびに滑らかさの条件を満たすが、大局的には推定された勾配間に矛盾を生じる。勾配推定の伝搬はこの矛盾を解消しないまま停止してしまう。

2.3 その他の方法

[Ikeuchi 81]の方法は、凹表面を持つ物体の推定には適用できない。そこで、濃度の2次微分の零交差 (zero-crossing) (以下、単に零交差と呼ぶ) における拘束条件を用いた新しい推定法が提案された [小島 90]。零交差とは、その2次微分の値が零を通過する点である。

零交差の集合は、常に単純な閉曲線を形成する。したがって、物体の外縁線拘束を用いて表面 S の勾配を反復推定するとき、零交差が形成する曲線上で何らかの拘束条件を設定するのが極めて効果的である。

3 対話型システム

第2節で述べた方法は適用条件がかなり厳しく、また必ずしも望みの形状が得られない。本論文では、2次元濃淡画像から3次元形状データを自動的に求めることが主たる目的ではなく、それらの方法を用いて得られた形状を対話的に修正・変更するためのツールを検討することを目的としている。

一般のユーザーが形状のモデリングを行なうときに必要とするのは、高度に対話的で直観的なモデリング手法である。そのためのツールを考察する場合、彫刻や造形などの伝統的な手法や、それらの手法で使用する道具を模倣することが自然である。

3.1 形状の表現形式

本システムで扱うデータは、2次元濃淡情報をもとにしており、得られる3次元形状もレリーフ状である。そこで形状を一般的な3次元の形式で表現する必要はなく、各点における画像平面までの高さが表現できる形式になっていればよい。そこで本システムでは、各点の Z 値 (高さ) を2次元配列 (Z バッファ) に格納する方法をとっている。したがって扱う形状は、3次元というよりは、2.5次元といった方が

よい。

3.2 表示の方法

得られた形状を表示する手法には、さまざまな方法があるが、今回は以下の方法を採用した。

3.2.1 デプス・キューイング

デプス・キューイングは、高さ (深さ) にもとづくシェーディングで、点の奥行きが深くなる程、色を暗くして表示する手法である。 Z バッファに形状データの各点の高さ (深さ) を保存してあるため、表示する点の色を特別な計算を用いず決定できる。また、視線方向と Z バッファの Z 値の表す方向が同じである場合には、表示が近傍の点の影響を受けないので、高速でかつリアルタイムな描画を行なう場合に非常に有利である。

しかし、特に予備知識のないユーザーには表示される画像が直観的に理解しにくい。また、表示に用いるディスプレイの物理的特性にも大きく依存するが、肉眼で表示された画像を見る場合に隣あう点の色が近い色同士であるときに判別しにくいことも欠点の1つである。

実際に表示するときには、高さ (深さ) は相対的なものとし視点から一番低い (深い) ものを最小値0に設定し、一番高い (浅い) ものを1として、ピクセルの色に掛け合わせる。

3.2.2 ランバート・シェーディング

ランバート・シェーディングは、表示する形状の各点で法線ベクトルを求め、光源の方向を与えたときに光線ベクトルと法線ベクトルの角度からその点の明度を決定する方法である。今回採用した方法の中では、最も実際に形状を見るとききの画像に近いものが得られ、一般のユーザーにとっても非常に判りやすい画像である。

各点の法線ベクトルを求めるには、隣接する4点の Z 値からその4点で構成される面の法線ベクトルを計算する (図1)。一般には、4点が同一平面内にあることはまれであるので、4角形を2つの3角形に分け、各3角形についてそれぞれ法線ベクトルを求める。次にその

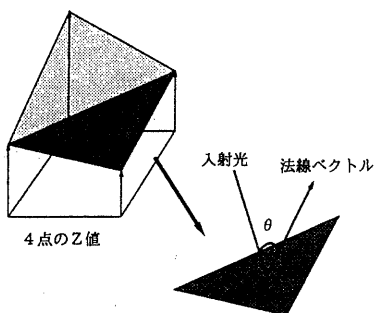


図 1: 4角形の法線ベクトルの決定

法線にもとづいて明度の計算を各三角形に対して行ない、得られた明度の平均をフレームバッファに書き込み、表示する。

点の明度は、環境光、拡散反射光の2つの成分によって決定されるものとする。環境光の明度を B_d 、拡散反射光の明度を B_r とすると各点の明度 B_p は

$$B_p = B_d + B_r \quad (1)$$

$$= B_{d0} \cdot R_p + B_{r0} \cdot R_p \cdot \cos \theta \quad (2)$$

で求められる。ここで、 B_{d0} は全体的な環境光、 R_p はその点における反射率、 B_{r0} は全体的な環境反射光、 θ はその点に対する入射角、つまり光源からの光線ベクトルと法線ベクトルのなす角度を示す。

3.2.3 表示手法のまとめ

対話的にレリーフ形状を修正・変更するためには、画像表示の手法に関して、次の点が重要である。

- 表示した画像がわかりやすいこと。
- 描画に要する時間が短いこと。すなわち形状の変化に伴うリアルタイムな再描画が可能であること。

ユーザーが表示画像を見ながら形状の変形を行なう場合には、デプス・キューイングを使用した。また、視点を変える場合は、補助的に他の描画方法で概観を確認できるようにした。また、2階調しか表示できないディスプレイで

も描画可能な方法として max-minimum 法および等高線表示を行なった。

また、本システムの扱う形状は、硬貨の表面にあるようなレリーフであるが、ユーザーが形状の修正・変更を行なう場合に、形状をそのまま表示したのでは、画像平面に対する物体形状の高さの割合が小さ過ぎるため、微小な変更が困難である。そこで、高さ方向を誇張した表示を行なっている。

3.2.4 視点位置の変更

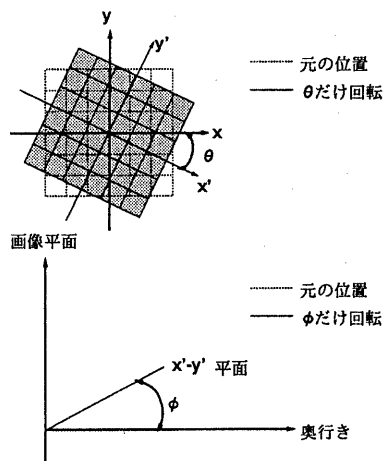


図 2: 形状データの回転

ユーザーが物体の形状の概観を確認するためには、視点方向が1方向だけでは理解しにくい。そこで、別の視点からの画像の生成が要求される。本研究では、対象形状が一般的な3次元形状でなくレリーフ形状であり、視点をあらゆる方向に設定する必要はない。

そのため、視点方向の変更は、視点方向に対して目的の物体を回転させることによって実現する(図2)。

3.3 修正・変更のためのツール

形状モデリングを直観的に行なう場合、彫刻や造形の手法や道具を模倣することが、自然な考え方であり、また多くのユーザーにとって判りやすい。彫刻で使われる道具、動作には次のようなものがある。

- キリやポンチを代表とする、穴を開ける道具。
- 彫刻刀やノミを代表とする、表面を削る道具。
- ヤスリやカンナを代表とする、表面を磨く道具。
- パテ等のように、一部分を盛る材料
- 粘土のように形そのものの変形

これらの道具、動作を模倣する。しかし、ワークステーション上のシステムでこれらの道具、動作を疑似的に実行する場合、必要なパラメータ等の入力、ワークステーションに接続された物理的入力デバイスを通して行なう。本システムでは、画像上の各点のポインティングと各動作、作業の決定を、ユーザーが複雑なプロセスを経ずに指定できるデバイスが必要となる。そこで、一般のワークステーション環境では既に標準的なデバイスとなっているマウス、そして筆圧を入力できるデータタブレットを用いて作業を行なうことを考える。

3.3.1 穴開け

この動作は、穴を開ける、または微小な部分を叩くのに用いる。実際の実行では、ポインティングデバイスを用いて、穴を開ける部分にポインタをあわせ、ボタンをクリックすることにより指定する。

ポインタの指す画像上の点 (x, y) の Z 値を Z パッファより読みとり、その点の新しい Z 値をユーザーが指定する強さによって決定する。強さはマウスの場合メニューを用いて、タブレットの場合はユーザーが押し当てた筆圧によって決定する。

3.3.2 盛り上げ

この動作は、穴埋め、微小な部分の装飾などに用いる。実際の実行では、3.3.1と同様に、ポインティングデバイスを用いて形状を盛り上げる部分にポインタをあわせ、ボタンをクリックすることによって指定する。システムの内部では、穴開けと逆の行なう。

3.3.3 切削

この動作は、形状の大まかな切削を行う。実行においては、粗く削る部分に対して、ポインティングデバイスを用いて点を2個設定し、その2点を対角線とする矩形部分を粗く削る。

システムの内部では、矩形部分に含まれる部分の切断面の高さを線形補間によって求め、各点の Z 値がその結果よりも大きい場合に限り値を代入する。

3.3.4 研磨など

この動作は、粗い形状の部分の研磨を行なう。実際の彫刻においては、研磨は表面の粗い部分に対して行なうことにより、表面を滑らかにする動作であるが、本システムでは、いわゆる研磨の他にスムージングを考える。

研磨 この動作は、彫刻などで行なう研磨の作業と同様に、部分的に表面が粗い、または微小な起伏がある部分を磨く(削る)ことによって表面を滑らかにすることを行なう。ポインティングデバイスによって2点を設定し、その2点を対角線とする矩形部分に対して処理を行なう。

スムージング この動作は、研磨と同様に表面を滑らかにするのが目的であるが、形状を削るのではなく、スムージングが適用された部分の起伏をならす効果を持つ。研磨と同様にポインティングデバイスによって2点を設定し、その2点を対角線とする矩形部分に対してスムージングを行なう。

内部処理のアルゴリズムとしては次の通り、

1. 全ての点に対して同時に各点の両隣の2点の Z 値の平均を求める。
2. 1を x 方向、 y 方向のそれぞれに対して行なう。
3. 2で求めた平均値と求める点の Z 値との平均をとる。
4. 3で求めた平均値をその点の Z 値とする。

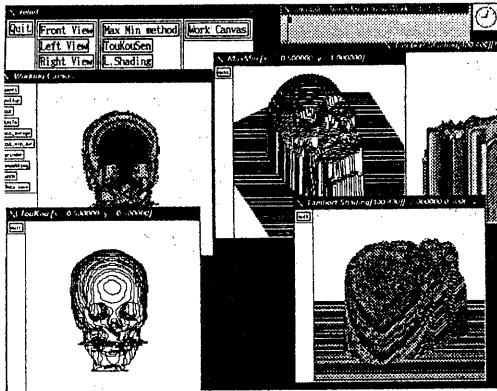


図 3: 画面例

3.3.5 動作の訂正

この動作は、直前にユーザーが行った動作の訂正を行なう。実際の彫刻や造形では、一度作業を行なった後で前の状態に復元することは、ほぼ不可能であるため、この機能は本システムの最大の利点である。ユーザーが何か操作を行なった後で、予期したような形状が得られなかったときに、このコマンドを選択することによって、直前の状態に戻すことができる。

システムの内部では、形状データを保存するZバッファを2つ用意し、ユーザーが操作前の状態を保存することにより、このコマンドを実現している。

3.4 動作環境

本システムのプロトタイプを Sun SPARC-station, 及び X-Window 上で行なった。図3に画面の例を示す。

4 結果

この節では、これまでに述べたシステムを用いて実際に作業した結果を例示する。本システムの本来の使い方からすれば、濃淡画像にもとづいて初期形状を作るべきであるが、ここではCTスキャナのデータをつみ上げて作成したボリュームデータを初期形状として作業を行なった(図4)。ここで得られたデータは、歯に入れてあった金属(金歯)の影響によ

る乱反射で生じたノイズが含まれている。本システムを用いて、この部分の形状の修正・変形を行なってみた(図5-図7)。

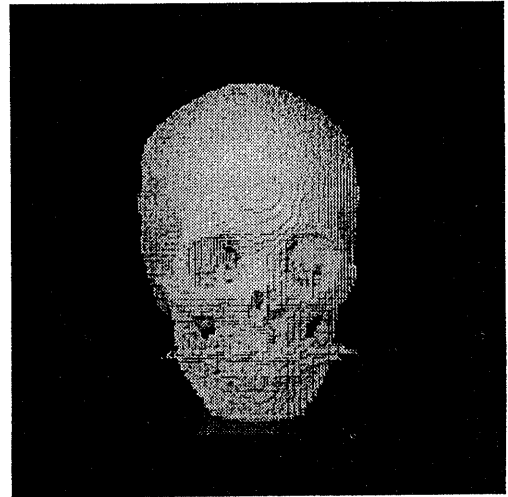


図 4: 元の形状

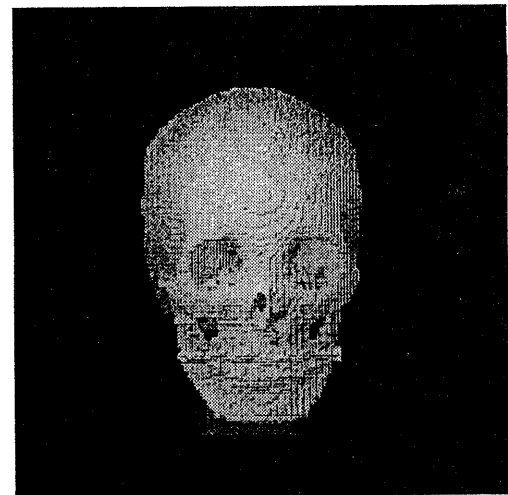


図 5: 顎の両側の削除

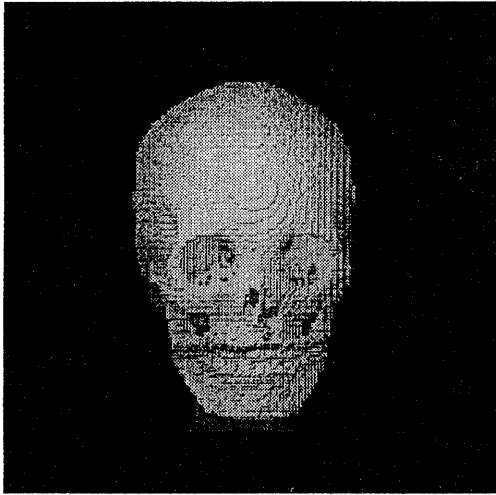


図 6: 口の周辺の削除

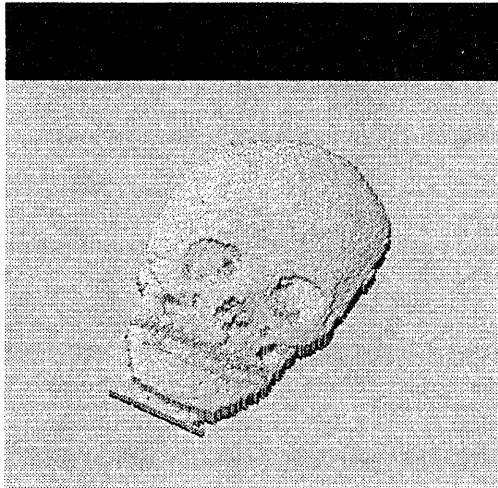


図 7: 最終的に得られたレリーフ

5 評価

本システムを用いて、対話的にレリーフ形状の修正・変更を行なうことができた。しかしながら、一般のユーザーが使用するには、まだまだ不十分な点がみられる。

5.1 問題点

CGについての予備知識のないユーザーにとっては、現在のシステムが表示する画像と、その画像が表す物体形状の関係が、直観的にはつかみにくい。ユーザーが実際に接する画像は、リアルなものほど理想的ではあるが、高速な再描画が必要なので、ある程度の妥協をせざるを得ない。また、デプスキューイングなど、ピクセルの明度を用いて描画する方法では、暗く表示した部分に対する作業が困難になってしまう。

実際の彫刻や造形の手法、道具の模倣という形をとったとはいえ、まだまだ不十分な点が多く目だった。道具の模倣を行なったが、現状で実現できているのは、そのツールを用いたときに得られる結果(形状の修正)であり、実際の道具を用いるときのその使い方や、その動きを模倣できているわけではない。ある動作を行なうときに、入力デバイスを通して指定した画像上の領域もしくは点に対して、なされた動作の結果に対応する計算を施しているだけであり、その領域に対してなされるべき動作・作業の方向等の決定は、領域内の各点に対応するZ値から得ているからである。すなわち、ツールを用いた作業がなされる方向をユーザーが完全に指定できるわけではない。また、道具の角度だけでなく、形状の修正・変更をおこなう領域の指定においても入力デバイスによるポインタ(カーソル)の移動だけで実現しているため、実際の道具の特性による動きが模倣できているわけではない。それらの問題点を克服するには形状画像の他に、ツールの3次元的な方向を表現するものが必要となる。

5.2 今後の課題

本研究で試作したシステムは、第2節で述べたような3次元形状データを対話的にモデ

リングするためのものである。今後さらに検討・開発することが必要と思われる機能を以下に述べる。

- 一般のユーザーにとってわかりやすく、かつ高速に再描画可能な画像の作成方法
- 物体形状の修正・変更を行なうツールに3次元的な方向を持たせること
- 物体表面の切除、研磨等ではなく形状そのものの変形
- 切削器と結合した3次元出力

参考文献

- [吉田 91] 吉田 謙二. デプスキューイングを用いたペイントモデリング法, NICOGRAPH 論文集, pp. 102-109, 1991.
- [Horn 75] B.K.P.Horn. Obtaining Shape from Shading Information, in ed. Winston, P.H., Psychology of Computer Vision., pp. 115-155, MacGraw-Hill, New York, 1975.
- [Horn 77] B.K.P.Horn. Understanding Image Intensities, Artificial Intelligence, Vol. 8, pp. 201-231, 1977.
- [Ikeuchi 81] K.Ikeuchi and B.K.P.Horn. Numerical Shape from Shading and Occluding Boundary, Artificial Intelligence, Vol. 17, pp. 141-184, 1981.
- [Woodham 81] R.J.Woodham. Analysing Image of Curved Surfaces, Artificial Intelligence, Vol. 17, pp. 117-140, 1981.
- [小島 89] マナス サンワラシ, 小島 康一, 熱田 清明, 近藤 正三. 濃淡情報を用いた3次元曲面の局所近似理論, 電子通信学会春期全国大会, D-570, 1989.
- [小島 90] マナス サンワラシ, 小島 康一, 熱田 清明, 近藤 正三. 2次微分の零交差における拘束条件を用いた2次元濃淡画像からの3次元形状の推定法, 電子通信学会論文誌, Vol. J73-D-II, No. 5, pp. 738-746, 1990.
- [Nevatia 82] R.Nevatia. Machine Perception, Prentice-Hall, Inc. 1982.(南 敏 監訳. 画像認識と画像理解 — 視覚的マシン知覚 —, 啓学出版, 1986.)