

形状変形に基づく多視点投影のモデル: 地形案内図生成の研究例

高橋 成雄*

爰島 快行†

太田 直哉†

* 群馬大学総合情報処理センター † 群馬大学工学部情報工学科

376-8515 群馬県桐生市天神町 1 5 1

E-mail: takahashis@acm.org

我々が手で描く絵は、しばしば異なる複数の視点から見られたように描かれる点で、普通の写真とは異っている。本報告では、そのような多視点投影図を、形状変形の手法を利用して作成する、新たなモデリング手法を提案する。例として、地形標高データからの多視点投影案内図を生成する。我々の手法は、ユーザが編集しやすいように、まず対象となる地形形状を特徴領域に分割する。システムへの入力としては2次元の視覚効果が与えられ、さらにそれらは地形形状変形のための3次元幾何制約に変換される。2次元の視覚効果を、地形形状特徴から半自動的に求めるアルゴリズムについても、考察する。

Modeling Multiple-viewpoint Projection based on Shape Deformation: A Case Study of Geographical Guide-map Generation

Shigeo Takahashi*, Yoshiyuki Kokojima†, and Naoya Ohta†

*Computer Center, Gunma University

†Department of Computer Science, Gunma University

1-5-1 Tenjin-cho, Kiryu, Gunma 376-8515, Japan

E-mail: takahashis@acm.org

Hand-drawn pictures are different from ordinary photographs in that they are often drawn as seen from multiple viewpoints. This report presents a new modeling approach for editing such multiple-viewpoint images based on shape deformation techniques. As a case study, multiple-viewpoint guide-maps are generated from 3D geographical elevation data. Our method first partitions a target geographical surface into feature areas to provide users with landmarks suitable for editing. The system takes as inputs 2D visual effects, which are reduced to 3D geometric constraints for geographical surface deformation. An algorithm for computing such 2D visual effects semi-automatically from the geographical shape features is also considered.

1 はじめに

一般的に、3次元形状を2次元の絵として表現する際には、その3次元形状を、ピンホールカメラモデルのように、ひとつの視点を仮定して投影した透視投影図を用いることが多い。カメラで撮影される写真は、このような透視投影図の代表例である。透視投影図は、射影幾何学の法則を満たすため、物体の幾何形状の正確な描写に非常に適している。特に工業製品など長方形面が多数存在する物体の表現においては、コンピュータ・ビジョンの形状復元技術を利用して、2次元の透視投影図から3次元形状が非常に正確に復元できる。ここでは、このような透視投影図を単視点投影

図とも呼ぶことにする。

それに対して、我々が手で描く絵の中には、写真のようにひとつの視点ではなく、あたかも形状の部分部分が異なる視点からとらえられ、それらが全体として貼り合わされたような絵になるものが多数存在する。例えば、図1に見られるように歯医者のカルテは、歯の欠損部分を効果的にとらえるために、それぞれの歯を異なる方向から描いたものを、全体として貼り合わせた絵となっている。

このような絵は、キュービズムなどの絵画作品から、医者カルテの絵、あるいはガイドブックの案内図や山の案内板など、我々の周りに非常に数多く存在

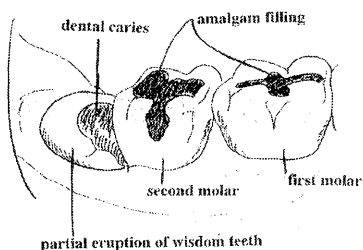


図 1: 歯医者のカルテの例 (指宿真澄氏提供)

する。そして、そのような複数の視点を持つ絵は、滑らかな形の特徴をとらえるのに特に適しており、人の目に分かりやすい2次元の絵の表現として、既に我々の生活に欠かせないものとしてその効果を発揮している。このような効果は、2次元の透視投影図を単に歪ませるだけで得られる効果ではなく、3次元形状を、その形状特徴を考慮に入れて2次元平面に投影することで、はじめて得られる効果である。ここでは、あたかも複数の方向からとらえられたような絵を、**多視点投影図**と呼ぶことにする。

しかし、この写真と異なる2次元多視点投影図の作成に関しては、特に明確なモデルがあるわけではなく、人の手に頼らざるを得ないのが現状である。本研究では、そのような多視点投影図の作成過程を、形状変形の技法を応用してモデル化し、さらに計算機を用いて支援できるようにすることが目的である。特に今回は、地形形状を例にとり、その特徴を効果的に表現できるように、多視点投影案内図作成システムを構築していく。

2 本研究の位置づけ

従来のCG研究においては、写真のようなフォトリリスティックな絵をディスプレイ上に描き出すことが、長い間重要な課題とされていた。ところが、それに対して昨今、人に目に優しい絵を生成する技法の開発も盛んに行われるようになってきた。このような手法は、CGの分野において**ノンフォトリリスティックレンダリング手法**と総称され、今日なお、**フォトリリスティックレンダリング手法**とともに、盛んに研究が行われている。この**ノンフォトリリスティック表現**の追求は、2次元に投影した形状をディスプレイ上に描く際のレンダリング手法を中心に研究がなされていて、3次元形状を2次元に投影する際の投影手法については、あまり研究が行われていない。本研究は、**ノンフォトリリスティック投影法**、あるいは、**フォトリリスティック表現を越える投影法**を実現す

る研究として位置づけることができる。

ところで我々は過去に、視点を形状全体に関して滑らかに移動することで、多視点投影図を作成する手法[1]を提案した。しかし、この手法では3次元形状から2次元平面へ投影する際、投影像に予期せぬ折り重ねが生じ、投影を表す写像も明確に定義できないなどの問題があった。本手法は、投影写像を明確に定義するため、2次元の絵における歪みの効果を、視点の変化ではなく、形状の変形に反映させるところが、従来とは異なる特筆すべき点である。さらに本研究では、2次元の絵の視覚効果を3次元形状への幾何制約に変換するため、従来の3次元形状の変形手法を直接応用できる利点がある。最近、視点に応じて幾何形状を変形させるモデル[2]が提案されたが、このモデルでは、いくつかの特定の視点においてユーザが別途編集したキーフレーム形状を与える必要があり、それらを視点に関して補間をする段階にとどまっている。

3 本研究のアプローチ

3.1 提案するモデル

本研究では、地形形状から多視点投影案内図を作成するための、次の3つのモデルを提案する。

(1) 特徴領域への分割のモデル

3次元地形形状から、頂上・峠・谷底、尾根線・谷線などの形状特徴を抽出し、さらにこれらの特徴を用いて、全体の形状を特徴領域に分割する。

(2) 多視点投影図のための視覚効果のモデル

2次元の絵の視覚効果を、3次元形状の幾何制約に変換し、その制約を満たすように変形した3次元形状から通常の透視投影図を作ること、指定した視覚効果を持つ多視点投影図を生成する。

(3) 視覚効果の半自動計算のモデル

3次元地形形状を解析して、特徴の見え方に関する仮定をおき、指定された特徴の位置や向きを計算する。

最後の2つのモデルは、相補的な関係にある。例えば、地形形状に視覚効果を指定する際、すべての視覚効果をユーザが指定するのは煩雑であり、地形形状から候補となる視覚効果を計算できれば、ユーザの手間を減らすことができる。また、計算で得られた視覚効果に加えて、人それぞれの芸術的感性を計算機上の多視点投影図に反映させることができるよう、視覚効果を編集できる機能も重要である。ここで、視覚効果の計算を、自動ではなく半自動としているのは、計算で求められる視覚効果はあくまで候補であり、必ずしも個々のユーザの感性に合致するとは限らないためであ

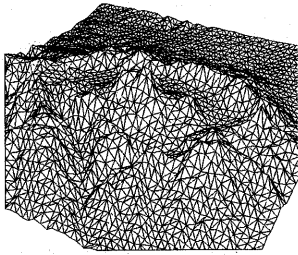


図 2: 箱根・芦ノ湖周辺の地形形状の三角形メッシュ表現

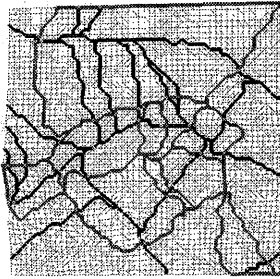


図 3: 特徴抽出の結果: 尾根線 (灰) と谷線 (黒)

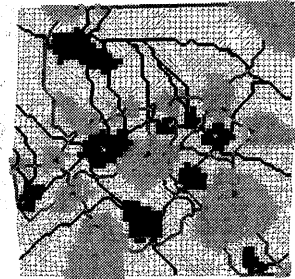


図 4: 特徴領域を縮小した結果: 頂上領域 (灰) と谷底領域 (黒)

る。第 4 節以降で、これら 3 つのモデルについて詳しく述べていく。

3.2 多視点投影案内図作成手順

本手法において、多視点投影案内図の作成手順は以下のようにまとめられる。

- (1) 地形標高データを入力として与える。
- (2) 地形形状を解析し特徴領域に分割する。
- (3) 地形形状全体の構図となる向きを決める。
- (4) 視覚効果を付加したい特徴領域を指定する。
- (5) 指定した特徴領域の視覚効果を与える。
- (6) 指定した特徴領域の視覚効果を計算させる。

先に述べた通り、手順 (5) と (6) は相補的な関係であり、どちらが先でも構わない。

4 特徴領域への分割のモデル

4.1 地形形状の表現

入力される地形形状としては、 z 軸を高さとしたとき一価関数 $z = f(x, y)$ で表される地形形状曲面を、 xy 平面に関して 50m 間隔でグリッド状にサンプルしたものをを用いる。実装したシステムでは、まず格子状になるようにサンプル点に稜線を加え、さらにそれぞれの格子に曲面が滑らかになるように対角線を加え、最終的に地形表面を三角形メッシュとして表現している。図 2 は、三角形メッシュで表現された、箱根・芦ノ湖周辺の地形形状である。本報告では、箱根の地形を例として、実現される視覚効果を示していく。

4.2 局所平滑化フィルタリング

次に、構成された三角形メッシュから特徴を抽出して、地形形状全体を特徴領域に分割する。ただし、一般的にオリジナルの地形形状からそのまま特徴を抽出すると、形状の高周波成分の影響を大きく受け、大まかな特徴のみを抽出するのが難しい。そのため、本手

法では、Taubin の局所平滑化フィルタリングを用いて、高周波成分を取り除く。

Taubin の局所平滑化フィルタリング [3] は、平滑化のみならず形状の変形など、本報告の至るところで参照されるため、以下に簡単にまとめておく。今、頂点番号 i の頂点座標を v_i と書くと、この頂点は以下の式で平滑化され、座標 v'_i に更新される。

$$v'_i = v_i + \mu \sum_{j=0}^n w_{ij}(v_j - v_i) \quad (1)$$

ここで、 j は頂点 i に隣接する頂点番号を表していて、それに対応する重みが w_{ij} である。特に記載のない場合は、 $w_{ij} = \frac{1}{n}$ を用いる。また、 μ はスケール因子である。Taubin の平滑化は 2 つの操作から成り、まず $\mu = p > 0$ となる正のスケール因子で計算した後再度 $\mu = q < 0$ となる負のスケール因子で計算し、1 回の平滑化操作としてこれを繰り返す。[3] では、 $\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = 0.1$ を満たす p, q の値を用いている。

地形形状の高周波成分を取り除く際には、上のフィルタリングを標高サンプル点の z 座標のみに適用して、地形形状を平滑化する。その際、地形全体の 4 つの角の頂点だけは、固定しておくことに注意する。

4.3 特徴領域への分割

次に、 z 座標のみ平滑化された三角形メッシュから、[4] の特徴抽出アルゴリズムを用いて、図 3 に示されるように、臨界点 (頂上・峠・谷底) と特徴線 (尾根線・谷線) を抽出する。図 3 から分かるように、地形上表面上において、抽出された尾根線は峠と頂上を結び、谷線は峠と谷底を結び、尾根線と谷線は、その性質として交わらないように抽出することができ、尾根線と谷線が地形表面上において双対の関係を成す。さらに、尾根線が作る閉路の中に谷底がひとつ、谷線が作る閉路の中に頂上がひとつ存在するよう、領域を分割することができる。本手法では、地図

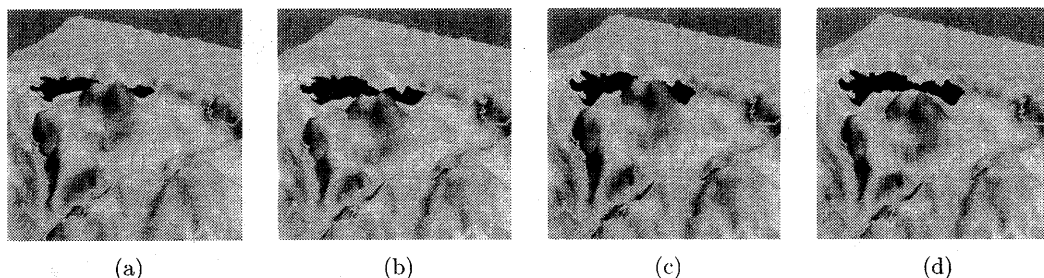


図 5: 3次元形状変形を用いた視覚効果の実現例: (a) 普通の単視点投影図, (b) 山の位置を変更する視覚効果, (c) 湖の向きを変更する視覚効果, (d) ふたつの視覚効果を合わせたもの

上で特徴となる点はだまかに頂上と谷底であると考え、谷線の閉路に囲まれる部分を(初期)頂上領域、尾根線の閉路に囲まれる部分を(初期)谷底領域として、基本となる特徴領域とする。もちろん、特徴を抽出したあとは、地形形状は平滑化前のオリジナルの標高データに書き戻しておく。

4.4 特徴領域の縮小

上記の領域分割においては、隣接する頂上の谷底の特徴領域同士が重なりを持ってしまうために、別々に視覚効果を与えることが難しい。本手法では、それぞれの特徴領域を一定の割合で縮小して、領域同士の重なりを取り除き、最終的に用いる特徴領域とする。

例えば、谷線に囲まれる頂上領域の場合、次のように領域を縮小する。まず、その頂上領域に含まれるそれぞれの頂点から、頂上への距離を l_P 、一番近い谷線上の頂点への距離を l_B とする。そして、その領域内の頂点が縮小する割合 γ ($0 < \gamma < 1$) に関して、

$$\frac{l_P}{\gamma} < \frac{l_B}{1-\gamma} \quad (2)$$

を満たす場合、縮小した特徴領域にも含まれると判断する。尾根線に囲まれる谷底領域についても同様である。今回は、 γ の具体的な値として一律0.6を用いている。図4は、図3のそれぞれの特徴領域を縮小したものを、塗りつぶして表示している。

5 多視点投影図のための視覚効果のモデル

5.1 視覚効果のモデル

本手法においては、先に抽出した特徴点や特徴領域、さらには湖や道路などの付加的な部分に対して、2次元視覚効果を付加する。そのように視覚効果が付加される部分を、以後**地理特徴**と総称する。導入部分で述べた通り、あたかも地形形状の部分部分が、異なる方向から投影されているような絵を作るためには、地理特徴に対して向きを視覚効果として指定できる必

要がある。さらには、まず2次元投影図上における、地理特徴の位置を指定できると便利である。本手法では、向きと位置の2つの視覚効果を実現することを考え、これらをどのように3次元形状の幾何制約に変換するかを見ていく。

まず先に、地理特徴の位置の視覚効果であるが、これは2次元投影面上で指定された位置の移動量を、3次元空間における xy 平面に投影して、3次元形状に対する幾何制約を求める。この際、高さを表す z 座標は元の標高値を保ったまま、 x, y 座標のみ変更する。

次に、地理特徴の向きの視覚効果については、以下のよう求めていく。まず、地理特徴に指定された向きと、あらかじめ与えられている形状全体の構図を決める向きとの角度の、差分と回転軸を求める。そして、求められた角度の分だけ地理特徴に含まれる点の座標を回転する。回転する際には、先の求められた頂上領域や谷底領域の場合には、その境界部分の頂点を、対応する頂上や谷底を中心として回転を行う。それ以外の地理特徴に対しては、該当する頂点の座標の重心を取り、そこを中心として回転を行う。単一の頂点に向きが指定された場合には、指定された頂点を中心として、その点に隣接する頂点を求められた角度の分だけ回転する。このようにして、2次元の視覚効果を3次元形状の幾何制約に変換し、変形された3次元形状の透視投影図を作ることによって、指定された2次元投影図の視覚効果を実現していく。

5.2 視覚効果のための形状変形

本手法のように、3次元形状を変形する目的が、2次元の視覚効果の実現である場合には、ひとつ考慮すべき点がある。それは、視線方向に垂直な投影面において、形状の投影像がむやみに折り重なると、生成された投影図に違和感が生じてしまうことである。本研究では、これを避けるために、地形形状が埋め込まれている座標系の xy 平面に関して、折り重なりが生じない変形を施すことで、投影図に生じる違和感を避け

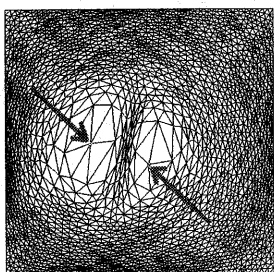


図 6: 山(箱根山)と湖(芦ノ湖)の位置の計算結果

ることにする。

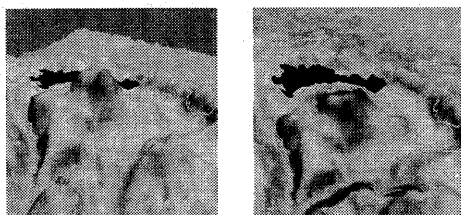
先に示した通り、すべての2次元視覚効果は、3次元地形形状の頂点位置を指定する幾何制約に変換される。課せられた制約を満たしながら地形形状を変形する操作は、式(1)にあげた Taubin の局所平滑化フィルタリング[3]を用いる。ただし、 z 座標に関しては[3]に提案されたフィルタリングをそのまま用いるが、 x, y 座標に関しては、先の無用な折り重なりを避けるために、(1)において $\mu = 1.0$ の計算を1度だけ行う平滑化を繰り返すことにする。これは、通常の Laplacian フィルタリングを施すことに相当し、 xy 平面における投影図の折り重なりを効果的に取り除くことができる。ただし、この平滑化においては、形状全体の境界上の頂点を固定しておく。

以上の手法を用いて実現される視覚効果を、図5に示す。ここでは、湖(芦ノ湖)が山(箱根山)に隠れるような方向を、全体の構図の向きとしてとり、山と湖それぞれに位置と向きの視覚効果を与えて、実現される効果を示している。普通の透視投影図である図5(a)に対し、山の位置を手前に移動したものが図5(b)、湖の向きを正対させたものが図5(c)、両方の視覚効果を合わせたものが図5(d)となっている。

6 視覚効果の半自動計算モデル

6.1 視覚効果のための仮定

今までは、地形形状のそれぞれの特徴に、ユーザが適当な視覚効果を与えていた。しかし、それぞれの特徴はその形状から、ある程度与えられるべき視覚効果に仮定をおくことができる。例えば、頂上領域に含まれる山は、上から見るよりは少し斜めからの方が、その輪郭がとらえやすいという仮定をおくことができる。そのような仮定に基づき、必要に応じて地理特徴の与えられるべき視覚効果を計算して、ユーザに提供することは、ユーザが個々の地理特徴に関して視覚効果を指定する煩わしさを軽減することができる。以



(a) (b)

図 7: 計算して求められた向き、(全体の構図の向きは図 8(a)を参照): (a) 箱根山の向き、(b) 芦ノ湖の向き

下、この節では、視覚効果である地理特徴の位置と向きを、半自動で計算するモデルについて述べていく。

6.2 位置の視覚効果の計算

2次元投影図において、それぞれの地理特徴は、お互いに干渉し合うことなく、目立つような配置にあることが望まれる。そのため、強調したい地理特徴を、2次元投影図上で等方的に配置する必要がある。

本手法においては、次のようにして指定された地理特徴の等方的配置を求める。まず、位置を求めたい地理特徴に対応する特徴点を指定する。次に、三角形メッシュの頂点 v_i と v_j を結ぶ稜線 e_{ij} において、その稜線の中点と、地理特徴に対応する特徴点の中で一番近いものとの距離を求め、その逆数を稜線の重み g_{ij} とする。そして、これを用いて、再度式(1)の Taubin の平滑化を、今度は x, y 座標のみに適用する。その際、平滑化の重み w_{ij} は、

$$w_{ij} = \frac{g_{ij}^{\alpha}}{\sum_{k=0}^n g_{ik}^{\alpha}} \quad (3)$$

を用い、さらにスケール因子を $\mu = 1.0$ として、一回の操作の平滑化を繰り返す。べき乗を表す α は、今回は $\alpha = 2$ と設定する。この平滑化においても、形状全体の境界部分を固定しておく。図6は、先の箱根の例において、山(箱根山)と湖(芦ノ湖)のそれぞれの特徴点の位置を計算した結果を示している。

6.3 向きの視覚効果の計算

ここでは、頂上領域と谷底領域やその他の地理特徴に分けて、特徴をとらえやすい向きに関する仮定をおく。まず、頂上領域についてであるが、頂上領域に含まれる山は通常、真上からではなく少し斜めから見る方が、山の形の輪郭をとらえやすい。さらに、山の領域の xy 平面における広がりを楕円と見なしたとき、楕円の長径に沿う方向よりは短径に沿う方向から見た方が、山のすそ野の広がりを緩やかになり、特徴がと

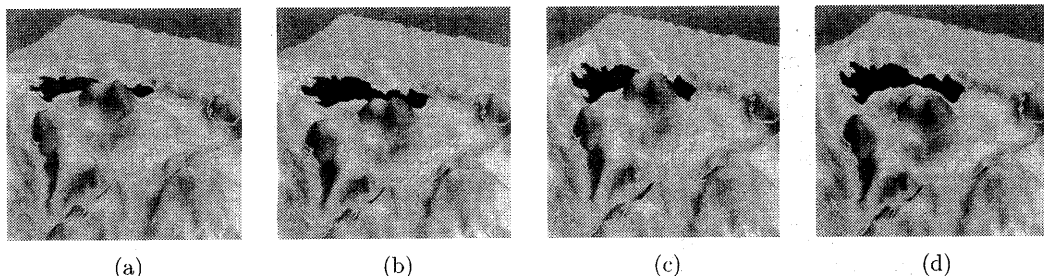


図 8: 半自動で計算された視覚効果を用いた多視点投影図の作成例: (a) 普通の単視点投影図, (b) 計算された山の視覚効果, (c) 計算された湖の視覚効果, (d) ふたつの視覚効果を合わせたもの

らえやすい。一方、谷底領域やその他の地理特徴に関しては、周りを山に囲まれるため、単純に真上に近い方向から眺めればよいと考えることにする。

以上の仮定に基づき、本手法では、特徴領域に含まれる点の分布の共分散行列から主軸を求め[5]、それに用いて地理特徴の向きを計算する。頂上領域の向きは、 xy 平面に関する点の分布の楕円の短径の方向になる。よって、 x, y 座標に関する共分散行列の、固有値の小さい方の固有ベクトルを、求める xy 平面上の向きとする。向きの z 座標成分、つまり正の z 軸と成す角である仰角に関しては、今回は一律の値 60° に設定する。谷底領域とその他の地理特徴に関しても、同様に点の分布の共分散行列を用いて、向きを計算する。しかし、今度は頂上領域とは異なり、 x, y, z 座標すべてを用いた 3×3 の共分散行列を利用する。そして、共分散行列より求められた単位固有ベクトルの中で z 座標の一番大きいものを、真上に近い向きとして用いる。

しかし、ここでふたつ考えるべきことがある。ひとつは、ここで求められた地理特徴の向きには、正と負のふたつの方向の候補が存在することである。これに関しては、あらかじめ指定されている構図の向きとの角度を計算し、その角度が 180° 以下になる方を採用する。ふたつめは、このように求めた地理特徴の向きをそのまま用いて多視点投影図を作成すると、全体の構図の向きとの差が大きくなりすぎる場合があることである。ここでは、それぞれの地理特徴に関して求めた向きと、全体の構図の向きの成す角を考え、それを2等分する方向をその地理特徴の最終的な向きとして用いることにする。

このようにして求めた、山(箱根山)と湖(芦ノ湖)の向きを表す通常の透視投影図を図7に示す。さらに、このように計算機で求められた位置と向きの視覚効果を利用して、生成された箱根の多視点投影案内図を図8に示す。

7 まとめ

本報告では、形状変形手法を応用して多視点投影図を作成するための特徴領域への分割のモデル、多視点投影図のための視覚効果のモデル、視覚効果の半自動計算のモデルの、3つのモデルを提案した。今後の課題として、全体の構図の向きの半自動計算や、特徴領域の等方的な配置を計算する際の重み付けの実現があげられる。さらに、ノンフォトリアリスティックレンダリング技法を応用して、より手描き風に近い案内図の作成を試みる。また、深さ方向の変形もさらに積極的に取り入れて、遠近感効果の変更を実現するのも、興味深い拡張である。本研究の成果を、一般の3次元形状に適用することも今後の課題である。

謝辞 本研究の一部は、科学研究費奨励研究(A)(No. 12780185)及び栢森情報科学振興財団の助成による。

参考文献

- [1] Takahashi, S. and Kunii, T. L.: Manifold-based Multiple-viewpoint CAD: A Case Study of Mountain Guide-map Generation, *Computer-Aided Design*, Vol. 26, pp. 622-631 (1994).
- [2] Rademacher, P.: View-dependent Geometry, *Computer Graphics (Proceedings Siggraph '99)*, pp. 439-446 (1999).
- [3] Taubin, G.: A Signal Processing Approach to Fair Surface Design, *Computer Graphics (Proceedings Siggraph '95)*, pp. 351-358 (1995).
- [4] Takahashi, et al.: Algorithms for Extracting Correct Critical Points and Constructing Topological Graphs from Discrete Geographical Elevation Data, *Computer Graphics Forum*, Vol. 14, pp. 181-192 (1995).
- [5] Paquet, E. and Rioux, M.: Nefertiti: A Query by Content System for Three-dimensional Model and Image Databases Management, *Image and Vision Computing*, Vol. 17, pp. 157-166 (1999).