

# マルチカメラを用いた人体頭部 3 次元モデリングシステムとその応用

藤村 恒太<sup>†</sup> 大上 靖弘<sup>†</sup> 寺内 智哉<sup>†</sup>

人体頭部全体の 3 次元情報を獲得するシステムは、カメラとプロジェクタを使用したアクティブステレオ手法によるレンジセンサユニットを複数台組み合わせることで実現するのが一般的である。この手法は、スリット光やパターン光などを照射して撮影した画像に基づき計測を行うため、物体表面の材質により計測不能もしくはノイズが発生するなどの問題やユニット間のキャリブレーションや計測データの統合に多大な労力と時間を要するという課題がある。これらの問題に対して我々は、複数台のデジタルカメラとカラーパターンプロジェクタを人体頭部の周囲に配置して撮影した画像を用いる Shape-from-Silhouette 手法とマルチカメラアクティブステレオ手法を併用したハイブリッドモデリング手法を提案した。本手法を適用した 3 次元モデリングシステムは、頭髪を含む頭部全体の形状と写真画質のテクスチャからなるモデルを全自動で生成することが可能である。しかし、より幅広い応用展開には精度と速度の面で十分であるとはいえなかった。本論文では、このハイブリッドモデリング手法について示すとともに、そのステレオ手法において、特徴点ベースステレオ処理の結果を初期値として領域相関ベースステレオ処理をサブピクセルレベルで実行する 2 段階ステレオ処理手法を提案し、実用的な時間で高精度な結果が得られることを示す。また、本手法が彫像切削加工やクリスタル加工などの応用展開においても有効であることを示す。

## A Human Head 3D Modeling System Using Multiple Cameras and the Applications

KOUTA FUJIMURA,<sup>†</sup> YASUHIRO OUE<sup>†</sup> and TOMOYA TERAUCHI<sup>†</sup>

Generally, a system that is able to reconstruct the 3D information of a whole human head is made up of several units of range sensors which are based on the active stereo method by using a camera and a projector. However, some problems may be occurred caused by the quality of the surface material of a target object because the depth estimation is based on each appearance of the projected light. Also a calibration process between each unit and a registration process of each estimated result are very time-consuming. In order to overcome these problems, we have proposed a hybrid modeling method where the Shape-from-Silhouette technique and the Active-Stereo technique are combined. The method uses several images captured by using the plural number of digital cameras and two slide projectors that are set around the target object. So, the whole shape and photo-realistic textures of the human head including hair can be easily digitized at a time on a personal computer. However, the system should be improved in terms of the accuracy and the processing time to expand its application field. In this paper, we describe the hybrid modeling method and propose a novel two-stage stereo algorithm in which area based stereo method is carried out with sub-pixel estimation based on the estimated result of the feature point based stereo method. The proposed method makes it possible to reconstruct the shape precisely in practicable processing time. Some applications are also described, for example statues carved from wood, crystals engraved by laser.

### 1. はじめに

3 次元コンピュータグラフィックス (CG) はゲームや映画などの制作現場で広く利用されるとともに一般

ユーザにとってもより身近な存在になり、よりリアリティの高いものが求められるようになってきた。特に人体・顔の 3 次元の情報は映像制作だけでなく計測・認証・造形などのさまざまな応用展開も期待されている。しかし、実在する 3 次元物体をありのままにデジタル化することは、装置の価格、使い勝手、対象への制限などから容易ではないのが現状である。

<sup>†</sup> 三洋電機株式会社  
SANYO Electric Co., Ltd.

市販されている 3 次元スキャナ・デジタイザは次の 2 つに分類できる。1 つは接触式と呼ばれるもので、アーム型の装置を用いて対象物に触れ、各点の 3 次元座標を取得することを繰り返すことにより対象物表面の 3 次元情報を点群として獲得する。もう 1 つは非接触式と呼ばれるもので、主には光を照射するアクティブ方式がある。この方式は、光源から照射された光が物体に当たっている様子を別の角度からセンサで観測することにより三角測量の原理で 3 次元情報を算出する。光源には、スポット光、スリット光、空間コード化パターン光（バイナリパターン、正弦パターン、カラーパターン）などがある<sup>1),2)</sup>。これらもまた物体表面の 3 次元情報を点群として獲得する。このような 3 次元スキャナ・デジタイザは精度が高く、計測・検査の分野で広く普及している<sup>3)~8)</sup>。しかし、以下に示すような問題をかかえているのも事実である。特に人体や顔を対象とした場合に、これらの問題は重要となる。

- (1) 接触式は、時間と労力が相当必要で、長時間の静止が困難な対象には不向きである。
- (2) 非接触アクティブ方式は、光を鏡面反射、透過、吸収する対象（黒髪など）は計測できない、もしくはノイズが発生しやすい。
- (3) 全周囲の 3 次元データの取得には、複数のスキャナユニットが必要で、ユニット間のキャリブレーションや各ユニットの計測データの統合に多大な労力と時間を要する。

一方、非接触式には特別な光を照射することなく撮影された画像から 3 次元情報を獲得するパッシブ方式もある。これは一般的に Shape-from-X (X には、Shading, Silhouette, Stereo, Motion などがある<sup>9)~13)</sup>) と呼ばれている。このパッシブ方式は対象表面の材質に影響されにくいという特徴がある。

我々は、より幅広い対象を入力可能にすることを目的に、パッシブ方式の 1 つである Shape-from-Silhouette (SfS) 手法（視体積交差法とも呼ばれる）を拡張したアルゴリズムを採用した 3 次元モデリングシステムを開発した<sup>14)</sup>。このシステムは、デジタルカメラと自動回転台を使用した非常にコンパクトで簡便なシステムになっており、全周囲の形状とテクスチャを全自動で獲得することを特徴としている。しかしながら、SfS 手法ではシルエットの輪郭に現れない凹凸が再現できないという問題があった。これに対して我々は、SfS 手法に領域相関ベースのパッシブステレオ手法を併用した Shape-from-Silhouette/Stereo (SfS<sup>2</sup>) 手法を提案した<sup>15)</sup>。この手法では、SfS 手法により求められる形状を初期形状とし、これを基にステレオ対応付けを

制限することにより、実用的な時間での細部の再現を可能にした。同様に複数の手法を組み合わせた方式はいくつか提案されている。たとえば、我々と同じ SfS 手法とパッシブステレオ手法を組み合わせた方式<sup>16)</sup>、SfS 手法と Shape-from-Focus 手法を組み合わせた方式<sup>17)</sup>などがあげられる。しかし、人体や顔を対象とした場合には、物体表面のテクスチャ特徴が不十分なため、パッシブ方式のステレオ手法は不向きである。そこで人体頭部全体をモデリング対象とする本システムにおいては、SfS 手法にアクティブ方式のステレオ手法を併用したハイブリッドモデリング手法を開発し、採用している<sup>18)</sup>。本システムの特徴は次の 3 つである。

- (1) モデリングに必要な全画像を短時間（3 秒以内）で撮影する。
- (2) ハイブリッドモデリング手法により、頭髪を含んだ頭部全体をモデリングするとともに、目鼻口耳などの細部も高精度に再現する。
- (3) 全周囲の形状と写真画質のテクスチャを撮影画像のみからパソコンで全自動生成する。

本ステレオ手法では、周期的に繰り返されたカラーストライプパターンを対象物体に投影して複数の視点から撮影した画像を用いており、各パターン画像のエッジ上の点における左右の色情報の特徴量とした特徴点ベースのステレオ手法により安定した結果を得ている。しかしながら、実際に本システムでモデリングした 3 次元データを活用し、頭部全体を再現する彫像切削やクリスタル加工のシステムに応用展開する場合、大型彫像制作時における形状再現精度の不足や撮影したその場で制作するクリスタル加工における処理速度が実用上の課題であった。

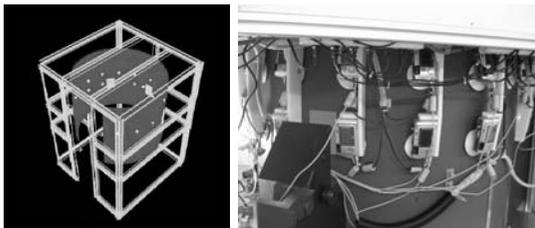
本論文では、本システムの特徴を生かしながら形状再現精度と処理速度を向上させるために、従来の特徴点ベースステレオ処理に領域相関ベースステレオ処理を追加した 2 段階ステレオ処理手法を提案する。本手法は、前段の結果を初期値にして、後段においてその対応点の近傍のみを探索範囲とすることにより、実用的な時間でより多くの正しい計測結果を得るとともに、さらに隣接点の相関値を用いたパラボラフィッティングによるサブピクセル推定を導入し、全体として形状再現性向上を実現する。また本手法により、低解像度画像使用時の形状再現性も向上し、アプリケーションの要求精度に応じて使用する画像解像度を調整することが可能となり、結果として高速化が実現可能であることを示す。

以下、2 章ではシステムの概要を、3 章では 3 次元モデリングアルゴリズムの概要を、そして 4 章では今



(a) システム外観

(a) Exterior



(b) システム内部の様子

(b) Internal appearance

図 1 システム概要

Fig. 1 System overview.

回提案する 2 段階ステレオ処理手法の詳細について示す。続いて、5 章ではモデリング実験結果を考察し、6 章では彫像切削加工やクリスタル加工などへの応用展開における本手法の有効性について示す。

## 2. システム概要

本システムは、28 台のデジタルカメラ、2 台のスライドプロジェクタ、照明装置、および 1 台のパソコンからなる (図 1)。デジタルカメラは、テクスチャ情報および SfS 手法に用いるシルエット情報を取得するために通常光のもとで撮影を行う 16 台と、アクティブステレオ手法に用いるためにパターン光を投影して撮影を行う 12 台である。各カメラは、パソコンに USB 接続されており、複数台が同時に制御される。また、スライドプロジェクタと照明装置は、それぞれ RS-232C でパソコンに接続された専用コントローラを介して自動制御される。撮影は、通常光撮影と左右のパターン光撮影の順で行われ、3 秒以内で完了する。なお、システム内部はシルエット情報が安定に得られるように単一色となっている。

## 3. アルゴリズム概要

本システムでは、まずカメラのキャリブレーション

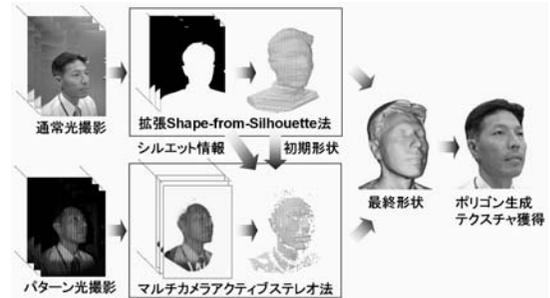


図 2 ハイブリッドモデリングアルゴリズム

Fig. 2 Hybrid modeling algorithm.

処理として、専用の参照物体を撮影した画像に基づきカメラの内部パラメータの算出と外部パラメータである各カメラの位置・姿勢計算を行う<sup>14)</sup>。そしてこれらの情報を基に、入力対象を撮影した画像を用いて、以下の 3 つのステップで 3 次元モデルを生成する。

- (1) ボクセル空間での 3 次元形状生成
- (2) ポリゴン生成
- (3) テクスチャ生成

本章では、各ステップの概略について述べる。

### 3.1 ボクセル空間での 3 次元形状生成

各カメラのキャリブレーション情報と撮影画像を用いて、ボクセル空間での投票方式をベースにした拡張 Shape-from-Silhouette (SfS) 手法とマルチカメラアクティブステレオ手法を併用したハイブリッドモデリングアルゴリズム (図 2) により、対象物体の 3 次元形状を再現する<sup>18)</sup>。

#### 3.1.1 拡張 Shape-from-Silhouette 手法

通常光撮影の各画像から、あらかじめ指定した背景領域の色情報を基準に類似色を背景として分離し、シルエット情報を得る。次に、各カメラのキャリブレーション情報とシルエット情報に基づき、物体位置に設定された 3 次元ボクセル空間への投票 (ポーティング) を行い、その結果を閾値処理することにより 3 次元形状を獲得する<sup>14)</sup>。この投票・閾値処理により、シルエット情報に多少のエラーがあっても形状再現精度の低下が抑えられる。以降、これを初期形状とする。

#### 3.1.2 マルチカメラアクティブステレオ手法

シルエットの輪郭に現れない凹凸形状は、初期形状には再現されない。そこで、複数台のカメラで撮影されたパターン光撮影画像 (以下、パターン画像と記す) を用いてステレオ処理を行い、人体頭部で重要な目鼻口耳などを含む詳細な形状をデプスマップとして獲得し、初期形状に統合する。その結果、拡張 SfS 手法とアクティブステレオ手法の長所をあわせ持つ、黒髪を含む人体頭部全体の形状が獲得できる。このとき、拡

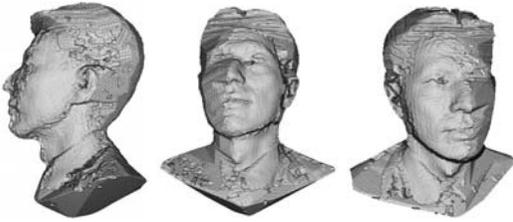


図3 デプスマップ画像例

Fig. 3 Example images of depth map.

張 SfS 手法により得られたシルエット情報と初期形状を制約条件とすることにより、効率的かつ安定なステレオ処理が可能となる。

このアクティブステレオ手法において、従来は各パターン画像のエッジ上の点における左右の色情報の特徴量とした特徴点ベースステレオ処理のみを用いていたのに対し、本論文では、その結果を初期値として領域相関ベースステレオ処理をサブピクセルレベルで実行する 2 段階ステレオ処理を提案する。これについては、次章で詳しく述べる。

### 3.1.3 デプスマップ統合

複数のカメラ視点でのデプスマップ (図 3) を、初期形状に統合し、最終形状を獲得する。ここでは 3 次元ボクセル空間への投票方式を採用することにより、デプスマップに含まれるエラーの影響を軽減しながら、詳細形状を反映した全体形状を獲得する<sup>15),18)</sup>。図 4 にカメラ視点のデプスマップをボクセル空間へポータリング処理している様子を示す。ここで、 $L(v, i)$  はボクセル  $v$  と視点  $i$  との距離を示し、視点  $i$  のデプスマップの座標  $(x, y)$  の値  $dixy$  は、ボクセル  $v$  と視点  $i$  を結ぶ直線とデプスマップの交点  $(x, y)$  の奥行き値を示している。ポータリング処理では、まず拡張 SfS 処理で得られた初期形状内部のボクセルに 1 を与える。以降、各カメラ視点において  $L(v, i)$  が  $dixy$  以上のボクセル  $v$  に 1 を加える。この処理を 3 次元ボクセル空間全体に対して処理することで、視点  $i$  のデプスマップのポータリング処理が終了する。そして、すべての視点のデプスマップをポータリング処理した結果を閾値処理することにより、最終形状を確定する。

### 3.2 ポリゴン生成

ボクセル空間で生成された 3 次元形状を、ポリゴン (三角パッチ) を用いた表面モデルで表現する。ここでは、表現に必要なポリゴン数を少なく抑え、かつ形状表現の精度を維持することが要求される。本アルゴリズムでは、以下に示す方法でポリゴンを生成することにより、これらの要求を満たしている<sup>14)</sup>。

(1) 物体表面を構成するボクセルの中心を頂点とし

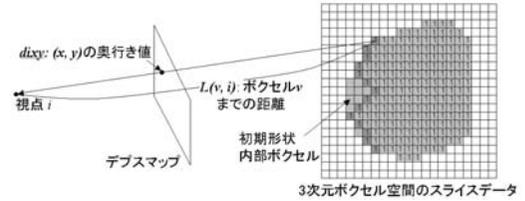


図4 デプスマップポータリング処理

Fig. 4 Process of depth voting.

て隣接頂点を接続し、初期ポリゴンを生成する。

(2) 隣接するポリゴンを統合する前後の形状の変化を評価し、変化が小さい隣接ポリゴンを順に統合することでポリゴン数を目標値まで削減する。

### 3.3 テクスチャ生成

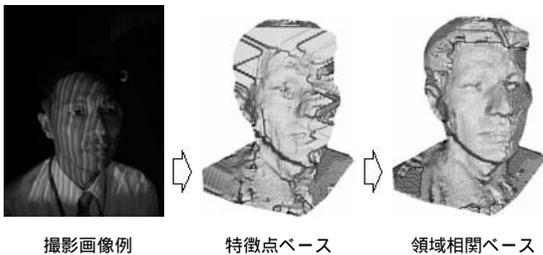
全周囲の通常光撮影画像から全ポリゴンのテクスチャ情報を以下の手順で獲得する<sup>14)</sup>。

- (1) 各ポリゴンのテクスチャ情報を取得する画像 (以下、参照画像と呼ぶ) をポリゴン面の法線を基準に決定する。
- (2) ポリゴンを参照画像に逆投影し、その投影部分の色情報をテクスチャ情報として獲得する。
- (3) 各テクスチャ情報についてカメラ位置の隣接する画像のテクスチャ情報を用いて平均化する。

以上により、より情報量の多い画像から情報を取得するとともに画像の連続性を高め、カメラ間の色のばらつきを吸収したテクスチャ情報が生成される。

## 4. マルチカメラアクティブステレオ手法 ——2 段階ステレオ処理手法

従来の特徴点ベースステレオ処理のみの手法では、ステレオ対応をパターン画像のエッジ上の点の対応で求めており、画像中のノイズに影響されてエッジ抽出誤りが発生し、対応点の位置ずれや対応が得られない場合があった。また抽出されるエッジには対象物体自体のエッジも含まれており、エッジ点の特徴量をその左右の色情報から求めているため、エッジが局所的に画像の水平方向に一致する場合に対応が得られなかった。本章では、これらの問題を解決する手法として、特徴点ベースステレオ処理の結果を初期値として領域相関ベースステレオ処理をサブピクセルレベルで実行する 2 段階ステレオ処理手法について述べる (図 5)。ここでは、ステレオ処理の基準となる画像をマスタ画像、他方をスレーブ画像と記し、マスタ画像を共有する 2 組のステレオペアを用いた 3 眼ステレオ処理では、各スレーブ画像をスレーブ画像 1、スレーブ画像 2 と記す。



撮影画像例      特徴点ベース      領域相関ベース

図5 2段階ステレオ処理

Fig. 5 Two-stage stereo processing.

#### 4.1 第1段：特徴点ベースステレオ処理

パターン画像を用いた特徴点ベースステレオ処理の手順を以下に示す。

- (1) 初期形状をパターン画面へ投影し、ステレオ処理用マスク画像を生成する。
- (2) パターン画像を色情報により領域分割し、マスク画像内の領域境界エッジを抽出する。
- (3) 各エッジ上の点（以下、エッジ点と記す）に対し、左右のそれぞれの領域内で平均化された色情報を特徴量として与える。
- (4) マスタ画像の各エッジ点に対し、各スレーブ画像のエピポーラ線上のエッジ点を対応点候補とする。
- (5) 各対応点候補について奥行き値を求める。
- (6) スレーブ画像1の各対応点候補の中で、初期形状から得られる奥行き値を基準に、設定された範囲内にある奥行き値を持つ点を候補として残す。
- (7) スレーブ画像1の各対応点候補について、スレーブ画像2の対応点候補との奥行き値の差を求め、その差が設定された閾値内の点が存在する候補を残す。
- (8) スレーブ画像1の対応点候補から特徴量の類似度が第1位の候補を選択し、その奥行き値をマスタ画像のエッジ点の奥行き値とする。ただし、候補がない場合は、奥行き値は与えない。

#### 4.2 第2段：領域相関ベースステレオ処理

前段の特徴点ベースステレオ処理の結果を初期位置にし、その近傍を再探索する領域相関ベースステレオ処理を導入するにあたり、前段で対応が得られなかったエッジ点の奥行き値も、対応が得られたエッジ点の奥行き値で補間して与える前処理を施すことにより、計測可能点数の増加を図る。そしてこの奥行き値に基づく領域相関ステレオ処理とサブピクセル推定により、計測点の増加を含む形状再現性向上を実現する。以下に一組のステレオペアに対する処理手順について示す。

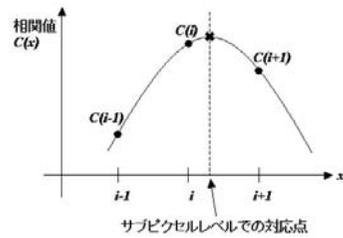


図6 相関サブピクセル推定

Fig. 6 Correlation-based subpixel estimation.

- (1) マスタ画像において、前段で対応が得られたエッジ点の奥行き値を基に、距離重み付け補間により対応が得られなかったエッジ点の奥行き値を求める。
- (2) マスタ画像のエッジ点について、その奥行き値で求まる3次元点をスレーブ画像へ投影した位置を対応点の初期位置とする。
- (3) スレーブ画像において、その初期位置を中心にエピポーラ線上の設定された範囲内の近傍点を対応点候補として相関値を求める。
- (4) 得られた相関値が設定された閾値よりも大きい対応点候補の中で、相関値が最大の点を対応点として求める。

以上の処理を3眼ステレオの両ペアについて行い、それぞれの結果から相関値の大きい方を対応点として決定する。そして最後に、得られた対応点とそのエピポーラ線上の左右の隣接点の各相関値を用いてサブピクセル推定を行い、奥行き値を決定する。なお、サブピクセル推定では、図6に示すように対応点を $i$ 、そのエピポーラ線上で隣接する2点を $i-1, i+1$ とし、それぞれ相関値を $C(i), C(i-1), C(i+1)$ としたとき、その3点の相関値に基づきパラボラフィッティングすることにより相関が最大となる対応点をサブピクセルレベルで求める<sup>19)</sup>。

以上のように、従来の特徴点ベースステレオ処理のエッジ抽出誤りによる精度低下と特徴量抽出に起因して水平エッジで計測できない問題に対し、奥行き値補間による初期値設定の前処理と領域相関ベースステレオ処理を追加することにより誤対応を修正し、計測点数の増加を実現する。さらにサブピクセル推定を導入することにより、全体として形状再現性向上を実現する。

## 5. モデリング実験結果と考察

本章では、基礎実験として形状が既知の円筒物体をモデリングした結果に基づく定量的評価と、応用実験



(a) 通常光撮影 (b) パターン光撮影  
(a) Normal lighting (b) Patterned lighting

図7 撮影画像例

Fig. 7 Examples of captured images.

として実際の人体頭部に適用した結果について示し、考察する。

### 5.1 基礎実験

直径 10 cm, 高さ 20 cm の円筒物体 (製作精度は 0.1%) を対象としてモデリングを行い、計測精度と計算時間に関して以下の 3 つの手法で比較を行った。

- 従来手法: 初期形状に基づく特徴点ベースステレオ手法
- 2 段階手法: 初期形状に基づく特徴点ベースステレオ手法の結果を基に領域関連ベースステレオ手法を行う提案手法
- 領域関連手法: 初期形状に基づく領域関連ベースステレオ手法

まず精度評価については、以下の手順で行った。

- (1) 縦に置いた円筒物体を本システムで撮影し、モデリングした結果に対して、円筒中心線に垂直な平面上で最小二乗法により円あてはめを行い、中心点を求める。
- (2) (1) の処理により円筒中心線に沿って複数の中心点を求め、得られた結果から最小二乗法により直線あてはめを行い、円筒中心線を推定する。
- (3) 各手法で奥行きが求まった点について、円筒中心線からの距離を計算し、半径 50 mm と比較し評価する。

なお、円筒には実際の条件に近づくよう人体頭部のテクスチャ情報を印刷した紙を張っている。図 7 にその撮影画像例を示す。ここで、2 段階手法の各設定値は、第 1 段の 3 眼ステレオの奥行き差許容値は  $\pm 1.5$  mm、初期形状からの探索奥行きは約 40 mm で、第 2 段の領域関連には正規化相互相関を用い、領域のサイズは 7 画素  $\times$  7 画素、探索範囲は  $\pm 3$  画素、相関値の閾値は 0.8 で実験を行った。また、従来手法の各設定値は、2 段階手法の第 1 段と同じであり、領域関連手法

表 1 計測精度の比較  
Table 1 Comparison of accuracy.

	平均半径	標準偏差	計測点数
従来手法	51.09	0.37	8329
2 段階手法	51.08	0.42	10844
2 段階手法*	51.09	0.47	11015
領域関連手法	50.94	1.04	1362

\*はサブピクセル推定なし

の各設定値は、領域関連の探索範囲を 2 段階手法の第 1 段と同じ初期形状からの探索奥行き約 40 mm に相当する範囲に設定し、それ以外は 2 段階手法の第 2 段と同じとした。評価結果を表 1 に示す。平均半径、標準偏差の単位は [mm] である。いずれも 12 視点のステレオ処理の平均で求めている。また、ここで使用した画像解像度は  $1360 \times 1024$  で、ボクセル空間は各カメラから約 570 mm の距離に設定し、その解像度は  $1024 \times 1360 \times 1024$ 、1 ボクセルの分解能は約 0.4 mm である。表 1 において、従来手法との比較では、計測精度を落とすことなく計測点数を増加できていることが分かる。この計測点数の増加は、より忠実な形状再現に寄与するものと考えられる。一方、計測精度に関しては大きな向上はみられなかった。その理由としては、入力対象が円筒という単純な物体であり、パターンも直線的に投影されたため、エッジ抽出が精度良くできたためであると考えられる。これについては今後、より複雑な既知の物体を対象とした評価を行う予定である。また、サブピクセル推定の効果については、若干の向上はみられたが、有意な差ではなかった。これについては評価式とフィッティングの関数について、より詳細な検討が必要であると考えられる<sup>19)</sup>。領域関連手法との比較では、平均半径でわずかに誤差が大きくなっているが、標準偏差は小さくなっており、計測点数に関しては大幅に増加し、改善効果が現れている。

次に、計算時間については、領域関連手法が平均 47.7 秒であったのに対し、2 段階手法は平均 10.5 秒であった。計測に使用した計算機環境は、Pentium IV 2 GHz、主記憶 1 GB のパソコンである。本手法での関連処理の探索範囲が第 1 段の結果の近傍に限定されている効果が現れている。

なお、各デプスマップを統合した最終形状による評価では、本手法での平均半径は 50.28 mm、標準偏差は 0.42 mm であり、統合の効果を示しているといえる。

以上この基礎実験では、従来手法に対しては計測点数増加による形状再現性の向上について、また領域関連手法に対しては計測精度と計算速度の両面について、本手法の有効性を示せた。



図 8 モデリング結果例 1

Fig. 8 Screenshots of modeling result no.1.



従来手法

2段階手法

図 10 モデリング結果の比較

Fig. 10 Comparison of modeling results.



図 9 原画像例とモデリング結果例 2

Fig. 9 Original image and screenshot of modeling result no.2.

## 5.2 応用実験

人体頭部を対象としたモデリング実験として、男性と女性に適用した結果を、それぞれ図 8、図 9 に示す。

図 8 は、図 2 で例示した撮影画像から、10 万ポリゴンでモデリングした結果についてのシェーディング表示(左)とテクスチャ表示(右)のスクリーンショットである。また、図 9 の左の画像は、通常光撮影の画像例であり、右の画像は 5 万ポリゴンのモデリング結果をワイヤフレーム表示したスクリーンショットである。いずれも、頭髪を含む頭部全体の形状を目鼻口耳などの細部の形状とともに良好に再現している。また、図 8 では、写真画質のリアルなテクスチャを全周囲で獲得できているのが分かる。

次に、別の撮影データで従来手法と 2 段階手法を比較した結果を図 10 に示す。いずれもボクセルデータから生成したポリゴンそのままをシェーディング表示した結果のスクリーンショットである。ポリゴン数は約 90 万ポリゴンであった。従来手法の結果に見られる鼻や口、頬の不要な凹凸がなくなり、本手法による形状再現性向上が視覚的に確認できる。なお、使用した画像解像度は  $1360 \times 1024$  で、ボクセル空間は  $512 \times 680 \times 512$ 、その分解能は 1 ボクセルあたり約 0.8 mm である。

次に、撮影画像の解像度を  $680 \times 512$  に削減して処理した結果について図 11 に示す。いずれも 10 万



従来手法

2段階手法

図 11 画像解像度を削減したモデリング結果の比較

Fig. 11 Comparison of modeling result using reduced resolution images.

表 2 モデリング時間の比較(秒)

Table 2 Comparison of processing time (sec).

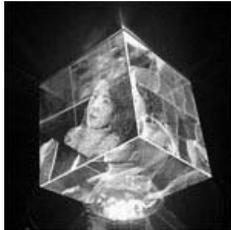
画像解像度	1360 × 1024	680 × 512
従来手法	653.7	160.0
2段階手法	940.3	278.3

ポリゴンで作成したモデルをシェーディング表示した結果のスクリーンショットである。従来手法に比べて 2 段階手法では、画像解像度の低下による形状の崩れが少ないのが分かる。これは、高解像度に比べて低解像度ではエッジ抽出誤りの影響が大きく、従来手法では形状再現性が悪くなるのに対し、本手法では後段の領域相関処理により誤対応が修正され、さらにサブピクセル処理されることにより形状再現性が向上していることを示している。なお、使用したボクセル空間は  $256 \times 340 \times 256$ 、その分解能は 1 ボクセルあたり約 1.6 mm である。

表 2 に、各入力画像解像度における従来手法との処理時間の比較を示す。いずれもシルエット抽出から最終モデル出力までの総処理時間であり、ステレオ処理は 12 視点で、ポリゴン数は 10 万ポリゴンを指定してポリゴンリダクション処理を行っている。計測に使用した計算機環境は、PentiumIV 2.4 GHz、主記憶 512 MB のパソコンである。



(a) 彫像切削加工例



(b) クリスタル加工例

図 12 応用展開例

Fig. 12 Examples of applications.

以上の結果から、2段階ステレオ手法により形状再現精度が大きく向上し、その計算コストは従来の1.5倍程度に抑えられていることが分かる。また、この形状再現性向上により画像解像度を低くしても形状の悪化が少なく、アプリケーションの要求精度によっては、低解像度画像を使用することにより高速化が実現可能であることを示している。

## 6. 応用展開

実際に本システムを活用した応用展開について示す。本システムが頭髪を含んだ頭部全体のモデルを生成可能であるという特徴を生かして、3次元データから切削加工用データを生成し、リアルな彫像・人形を自動造形するシステムへの展開が可能となった。図12(a)に示した彫像例は、図9に示した結果から加工した例で、左から1/8, 1/2, 1/4サイズとなっている。材料は主にケミカルウッドやセラミックボードを使用している。図10に示すように、本手法では後処理をしない状態でも滑らかな形状が得られていることが分かる。実際の自動造形においても、従来必要であった手作業による修正が削減され、本手法の有効性が確認された。

このほかに、生成した3次元データから点群データを生成し、クリスタルをレーザーで自動加工するシステムでは、360度全周囲の形状とテクスチャを活用し、リアルかつ全方向から観賞できるクリスタル製作が可能である。図12(b)に、そのクリスタル加工の例を示

す。クリスタル加工は加工自体が数分程度で可能なため、高精度化よりも、撮影当日、撮影したその場で加工可能な高速な処理が重視される。本手法では、図10、図11の結果から、低解像度の画像を使用した場合でも、高解像度の画像を従来手法で処理した結果と同等で、なおかつクリスタル加工に十分な形状再現性を実現可能であることが分かる。これは従来11分程度かかっていた処理が半分以下の5分未満で処理できる(表2)ということである。つまり、このような応用においても本手法は有効であるといえる。

これらのことから、本アルゴリズムは要求精度に応じて画像解像度を変えることにより速度を優先した処理も可能であり、要求精度の異なる幅広い応用に簡単に対応できる汎用性と実用性を兼ね備えているといえる。

## 7. おわりに

本論文では、複数台のデジタルカメラとカラーパターンプロジェクタを人体頭部の周囲に配置して撮影した画像を用いるShape-from-Silhouette手法とマルチカメラアクティブステレオ手法を併用したハイブリッドモデリング手法について示すとともに、そのステレオ手法において、特徴点ベースステレオ処理の結果を初期値として領域相関ベースステレオ処理をサブピクセルレベルで実行する2段階ステレオ処理手法を提案した。本手法により、従来の特徴点ベースステレオ処理のエッジ抽出誤りによる精度低下と特徴量抽出に起因する計測点数減少の問題を解決し、誤対応の削減、計測点数の増加を実現するとともに、サブピクセル推定を導入し、全体として形状再現性向上を実現した。実験では、本手法を円筒物体、および実際の人体頭部に適用し、精度と速度の両面から従来手法および領域相関手法と比較し、本手法の有効性を示した。また、本手法の応用展開として、精度が要求される人形造形と速度が要求されるクリスタル造形という相反する2種類のアプリケーションについて、形状再現性向上による修正作業の削減と低解像度画像を使用した高速化が実現可能であることを示し、本アルゴリズムが要求精度の異なる幅広い応用に対応できる汎用性と実用性を兼ね備えていることを示した。

今後の課題としては、CG応用などに向けた、よりリアルティの高いモデルを生成するために、表面テクスチャの反射特性の推定技術、髪の毛や肌などの質感を重視した再現性向上技術などがあげられる。また、対象を広げる意味では、人体全身への拡張や動物体への対応、並列処理による高速化などがあげられる<sup>20),21)</sup>。

謝辞 日頃から本システムの応用展開に活躍され、本論文作成においても資料提供など多大なご協力をいただいた、三洋電機(株)ニュービジネスセンタービジネスユニット、ピエリモプロジェクトの石川猶也リーダー、およびメンバ全員に深く感謝する。

### 参 考 文 献

- 1) 井口征士, 佐藤宏介: 三次元画像計測, 昭晃堂 (1990).
- 2) 吉澤 徹(編): 三次元工学 1—光三次元計測, 新技術コミュニケーションズ (1993).
- 3) Cyberware, Inc.: Head & Face Color 3D Scanner.
- 4) InSpeck, Inc.: Head System.
- 5) VITRONIC Dr.-Ing. Stein Bildverarbeitungssysteme GmbH: VITUS ahead.
- 6) Genex Technologies, Inc.: Rainbow 3D Camera.
- 7) Minolta Co., Ltd.: Vivid.
- 8) NEC Engineering, Ltd.: Danae.
- 9) Giblin, P. and Weiss, R.: Reconstruction of surfaces from profiles, *Proc. Intl. Conf. Computer Vision*, pp.136–144 (1987).
- 10) Horn, B.: *Obtaining shape from shading information*, McGraw-Hill (1975).
- 11) Marr, D.: *Vision*, W.H. Freeman and Co. (1982).
- 12) Ullman, S.: The interpretation of structure from motion, *Proc. Royal Society of London*, pp.405–426 (1979).
- 13) Witkin, A.: Recovering surface shape and orientation from texture, *Artificial Intelligence*, Vol.7, pp.17–45 (1981).
- 14) Matsumoto, Y., Fujimura, K. and Kitamura, T.: CyberModeler: A compact 3D scanner based on monoscopic camera, *Proc. SPIE*, Nurre, J.H. and Conner, B.R. (Eds.), San Jose, CA, SPIE, Vol.3640, pp.2–10 (1999).
- 15) Matsumoto, Y., Fujimura, K. and Kitamura, T.: Shape-from-Silhouette/Stereo and Its Application to 3-D Digitizer, *Proc. DGCI*, 1568, L. (Ed.), pp.177–188, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg (1999).
- 16) Zhou, L. and Gu, W.: 3D Model Reconstruction by Fusing Multiple Visual Cues, *Proc. ICPR*, pp.640–642 (1998).
- 17) Lin, H. and Subbarao, M.: A Vision System for Fast 3D Model Reconstruction, *Proc. CVPR*, Vol.2, pp.663–668 (2001).
- 18) Fujimura, K., et al.: Multi-camera 3D modeling system to digitize human head and body, *Proc. SPIE*, Corner, B.D., Nurre, J.H. and Par-

gas, R.P. (Eds.), San Jose, CA, SPIE, Vol.4298, pp.40–47 (2001).

- 19) 清水雅夫, 奥富正敏: 画像のマッチングにおけるサブピクセル推定の意味と性質, *電子情報通信学会論文誌 D-II*, No.12, pp.1791–1800 (2002).
- 20) Li, M., Schirmacher, H., Magnor, M. and Seidel, H.: Combining Stereo and Visual Hull Information for On-line Reconstruction and Rendering of Dynamic Scenes, *Proc. Workshop on Multimedia and Signal Processing* (2002).
- 21) Cheung, K., Baker, S. and Kanade, T.: Visual Hull Alignment and Refinement Across Time: A 3D Reconstruction Algorithm Combining Shape-From-Silhouette with Stereo, *Proc. CVPR* (2003).

(平成 16 年 1 月 16 日受付)

(平成 16 年 3 月 4 日採録)

(担当編集委員 亀田 能成)



藤村 恒太

昭和 37 年生。昭和 62 年神戸大学大学院工学研究科システム工学専攻修士課程修了。同年三洋電機(株)入社。パターン認識, 動画像解析, 動画像圧縮符号化, 3次元モデリングの研究開発に従事。現在, 同社デジタルシステム技術開発センタービジネスユニット, ネットワークシステム研究部主管研究員。電子情報通信学会会員。



大上 靖弘(正会員)

昭和 41 年生。平成元年神戸大学工学部電気工学科卒業。同年三洋電機(株)入社。並列処理, 画像処理, 3次元モデリングの研究開発に従事。現在, 同社デジタルシステム技術開発センタービジネスユニット, ネットワークシステム研究部主任研究員。



寺内 智哉

昭和 50 年生。平成 12 年京都大学大学院情報学研究科知能情報学専攻修士課程修了。同年三洋電機(株)入社。3次元モデリングの研究開発に従事。現在, 同社デジタルシステム技術開発センタービジネスユニット, ネットワークシステム研究部。