

# カラー陰影解析とシルエット解析の融合による 回転非凸物体の3次元形状復元

佐藤 太一<sup>†</sup>, 斎藤 英雄<sup>†</sup>, 小沢 慎治<sup>†</sup>

本研究では、カメラ、光源を固定し物体を一定角度ずつ回転させながら撮影した画像列から、物体のシルエット解析とカラー陰影解析を融合して用いることにより、物体の3次元形状の復元を行う手法を提案する。まず、物体のシルエットから物体の凸包形状を物体領域として復元する。次に、シルエットのみでは復元できない窪みの部分を復元するために、見た目の輪郭線がセルフオクルージョンによって生じたものと仮定することで、輪郭線と視点を結ぶ直線を隣接する2視点の画像において検出し、これらによって挟まれる領域を物体領域から削り取る。さらに、視点から物体表面へ向かう直線上において、視点の異なる画像から得られるカラー陰影の明度変化曲線を解析し、拡散反射モデルに最もよく当てはまる点を物体表面位置として決定する。これにより、表面位置決定の際に当てはめられた拡散反射モデルに一致する視線方向には物体領域が存在しないことを用いて物体領域を削り取る。本手法を検証するために合成画像に対して手法を適用し定量的評価を行い、また実画像に対して本手法を適用することにより、本手法の有効性を示した。

## 3D Shape Recovery of Non-convex Rotating Object from Integrated Analysis of Color-shading and Silhouette

TAICHI SATO,<sup>†</sup> HIDEO SAITO<sup>†</sup> and SHINJI OZAWA<sup>†</sup>

This paper proposes a method for recovery of 3D shape from image sequence taken by rotating the object under a fixed light source environment. In the proposed method, the conventional shape from silhouette method initially recovers convex shape. For obtaining detailed shape that cannot be recovered from silhouette, occluding contour and color shading cues are analyzed in addition to the silhouette cue. The occluding contour cue carves extra volume from the shape recovered by only silhouette. The shading cue determines the 3D point such that change of the shading value with the rotation of the object is fitted to the bi-directional specular model. For evaluating the recovery accuracy of the proposed method, the shape is recovered from computer generated image sequence. In addition to this, some real object shapes are recovered by the proposed method. The results demonstrate that the proposed method provides more accurate 3D shape model than the conventional shape from silhouette method.

### 1. はじめに

#### 1.1 本研究の背景と目的

近年のインターネットの普及により、ネット販売は急速な広がりを見せている。ネット販売の欠点として物品を直接見られない点があるが、それを補うものとして静止画、動画に加えて3次元CGの利用が考えられる。3次元CGを利用すればユーザは物体を好きな方向から見ることができ、さらに、洋服や家具などにおいて複数商品の組合せを仮想空間で試みること

ができる<sup>11)</sup>。物体計測による3次元CG作成法にはレーザーなどを利用した3Dスキャナを用いる方法があるが、装置が高額で大規模であることが普及の妨げとなっている。一方で、CCDカメラにより撮影された画像から対象形状を復元し、3次元CGのための3次元モデルを構築する研究が、デジタルカメラやビデオカメラの普及とともに、最近非常にさかんに行われている。

本研究では、カメラ、光源を固定し物体を一定角度ずつ回転させながら撮影した画像列から、物体のシルエット解析とカラー陰影解析を融合して用いることにより、非凸物体の形状復元を行う手法を提案する。まず、物体のシルエットから、対象物体形状を包み込む凸包形状を物体領域として復元する。次に、見た目の

<sup>†</sup> 慶應義塾大学理工学部

Faculty of Science and Technology, Keio University  
現在、松下電器産業株式会社

Presently with Matsushita Electric Industrial Co., Ltd.

輪郭線がセルフオクルージョンによって生じたものと仮定することで、隣接する2視点の画像におけるセルフオクルージョンの輪郭線と視点を結ぶ直線に囲まれる範囲を物体領域から削り取る。さらに、視点から物体表面へ向かう直線上において物体表面位置を探索する。ここでは、探索点を各視点の画像に投影した画素の明度変化が、光源色と物体色の線形和で表される2色性反射モデルに従うものと仮定する。そして、光源色成分である鏡面反射による明度を除去しながら、物体色成分である拡散反射モデルに最も一致するような位置を探索し、これを表面位置として決定する。ここでは、この表面位置決定の際に当てはめられた拡散反射モデルに一致する視線方向には物体領域が存在しないことを用いて物体領域を削り取る。

このように、本手法は、物体のシルエットにより復元された物体の凸包領域から、セルフオクルージョンの輪郭線により物体領域を削り取り、そしてカラー陰影解析により物体領域をさらに削り取ることにより、非凸物体の3次元形状を復元する。本論文では、本手法の原理について述べ、本手法の有効性を検証するために行った実験の結果を示す。

## 1.2 関連研究

本研究のように、物体の周囲から撮影された多視点画像から形状復元する手法の研究は非常にさかんである。特に、全周にわたる3次元形状の復元を行うために、カメラ、光源を固定し、物体を一定角度ずつ回転させながら撮影した画像を用いる研究は多数行われている。従来の研究であるシルエットによる形状復元法<sup>7)</sup>では、視点とシルエットを結ぶ直線の外側に物体が存在しないことを利用して物体の存在範囲を決めていく。しかし、物体形状がシルエットに影響を与えないような窪みがある場合には、この窪みをシルエットから復元することはできないので、この方法では非凸物体を復元できない。そのため、シルエットによる形状復元法と他の方法を組み合わせた手法が多数提案されている。

シルエットに加えて、セルフオクルージョンの輪郭線を利用した手法<sup>20),21)</sup>では、回転にともなう輪郭線の移動量から非凸形状を復元する。セルフオクルージョンの輪郭線も利用するという意味においては、原理的に本論文の提案手法と同様の手法であるが、提案手法では、輪郭線に加えて、さらに陰影解析も利用することにより、輪郭線のみでは復元できない部位についても復元可能としている。

回転にともなう特徴点追跡を利用する手法<sup>3),6)</sup>では、物体表面上で法線方向または表面反射率の不連続が生

じる特徴点の画像への投影点を連続画像において追跡する。この特徴点は回転運動により連続画像上では回転軸に垂直に単振動している。そこで、単振動の振幅、位相を画像上で求め特徴点の3次元位置を決定する。この方法は特徴点の少ない物体の復元を不得手とする。また3次元復元された点群から面を形成するという問題を解決<sup>12),17),18)</sup>しないと、CGに適した3次元モデルを構築できない。これに対して、提案手法では、物体のシルエットとセルフオクルージョン、そしてカラー陰影解析を融合して形状復元を行う手法であるため、特徴点追跡を利用する手法では復元が困難な、表面の明度変化が乏しい物体の形状復元が可能になっている。さらに、特徴点ごとに3次元位置を復元するものではなく、シルエット、セルフオクルージョン、カラー陰影解析によって、物体存在領域を削り取っていく処理を行っているために、物体表面の形成が容易となっている。なお、提案手法では、明度変化が少ないことを条件にカラー陰影解析を行うものであるため、逆に物体表面の明度変化が激しい物体の形状復元は良好に行うことができない。

ハイライトの利用を融合する手法<sup>1)</sup>では、画像上に生じるハイライトの軌跡を追跡して形状復元を行う。この手法はハイライトを起こしやすい金属などにしか用いることができず、また対象形状によっては複雑な光源を必要とする。

複数方向からの画像から形状復元を行う際に、陰影解析も利用した方法が、Seitzら<sup>10)</sup>、Makiら<sup>5)</sup>によって提案されている。Seitzらの手法は、対象物体の存在する体積空間の各ボクセルに対して、そのボクセルが各画像に投影される位置での画像の画素値から、そのボクセルが物体表面かどうかを判定することにより3次元形状復元するものである。この手法では、形状復元にともなって物体自身のセルフオクルージョンを考慮しながら、各ボクセルの物体表面判定を行う画像の視線方向が自動的に決定される巧みなアルゴリズムを提案しているため、非凸物体にも適用することができる。しかし、ここで利用されている陰影解析は、物体表面の法線は考えずに視線方向のみを考えたにすぎないため、精度良く陰影解析を行うことが難しかった。Makiらの手法では、幾何の拘束と陰影モデルによる輝度拘束を統一的に扱える制約を導き、これに基づいた形状復元理論を提案している。ただし拡散反射をモデルに、主として凸物体を対象とするものであった。

ほかに、双方向レイトレースを行う方法<sup>19)</sup>がある。3次元空間上の各ボクセルのバックワードレイ(ボクセルと各視点を結んだレイ)のRGB値を調べ、投票

によってボクセルのRGB値を決定し、表面上の点か否かを判断する。この方法では窪みの部分は撮影できる方向が限られるため投票に残るとは限らず、非凸物体の形状復元には向かない。また、投票にRGB値を用いるので光源と視点の位置関係の変化を考慮しておらず投票の精度が期待できない。

本手法において形状復元に利用している、画像のカラー陰影解析に関する研究は、従来からさかに行われている<sup>13)~16)</sup>。カラー陰影解析を物体形状復元に利用した従来の研究例として、物体、カメラを固定し照明を移動することにより撮影を行うもの<sup>8),9)</sup>がある。これらの方法では、2.5次元の形状復元を行う。これに対し、提案する手法は物体全周からの画像を用いて形状全体の3次元復元を目的としている。

このように、本手法では、セルフオクルージョンを考慮したシルエット解析による形状復元法に、カラー陰影による復元法を組み合わせることにより、従来のシルエットからの形状復元法では復元が困難であった非凸物体の3次元形状を復元することが可能になっている。

## 2. 3次元形状の獲得

本研究では物体の全周にわたる形状の復元を行うために回転台を用いて撮影を行う。図1に示すようにカメラ、光源を固定し、物体を回転台上に載せる。この際、カメラの光軸および光源の向きは物体の回転軸に垂直になるようにし、物体の回転軸は画像上で垂直になるようにする。また背景には無地の暗幕を利用する。以上のような撮影環境において回転台を一定角度ずつ回転させながら物体を撮影する。

本研究では、撮影系に正射影を仮定することにより、物体の回転にともない撮影された連続画像の各画像から同じ高さ(y座標)の部分を集めてEpipolar Plane Image (EPI)を作成する。そして、EPIを入力として各高さごとに断面形状を復元することにより物体形状の復元を行う。図2に、合成画像を用いて作成したEPIの一例とその断面図を示す。

断面形状復元にはボクセル空間を考える。初期状態ではすべてのボクセルが物体の内部であるか外部であるか未知であり、すべてのボクセルが物体領域の候補となる。このボクセル空間から、まず、シルエットを検出して、物体の外側であると判断できるボクセルを物体候補から削除する。このとき、物体自身のセルフオクルージョンによるものと考えられる輪郭線も用いて空間と判断できるボクセルを削除する。次に、視点から物体へ向かう直線上において探索点を設け、探索

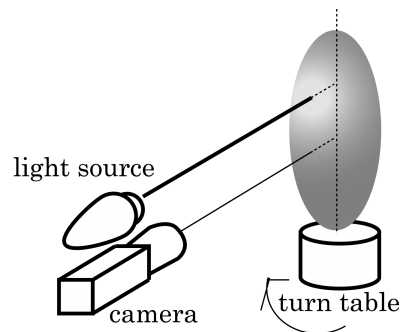


図1 撮影システム

Fig. 1 Scheme of the input image collection.

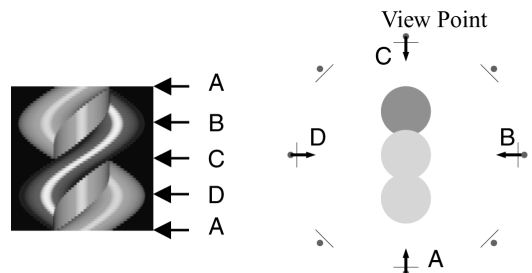


図2 EPIと断面図。EPIのA, B, C, D各段は断面をA, B, C, Dの各方向から撮影したときの画像である。

Fig. 2 EPI and cross-section.

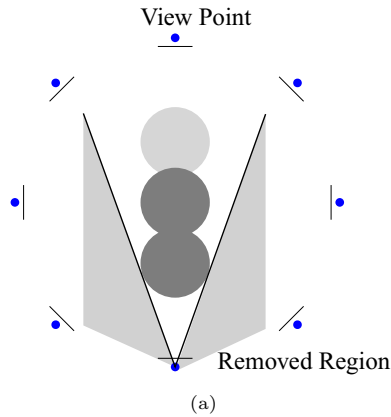
点上で視点の異なる画像から得られるカラー陰影の明度変化曲線を解析し、拡散反射モデルに最もよく当てはまる点を探ることにより、物体表面位置を決定する。ここでは、表面位置決定の際に当てはめられた拡散反射モデルに一致する視線方向には物体領域が存在しないことを用いて物体領域を削り取る。最終的に物体候補として残ったボクセルを物体の領域として決定する。

なお、シルエット画像による物体候補領域の決定の際に、隣り合う画像間で検出されるシルエットから、物体の内部であることが確定的なボクセルを「固定点」として選択しておき、これらは以降の処理で誤って削除されないようにする。

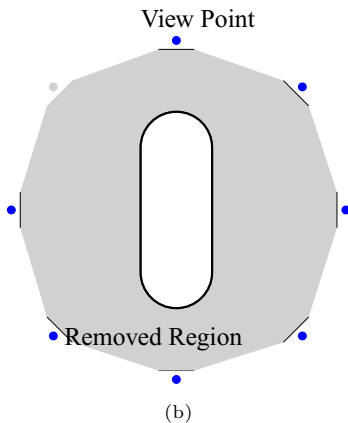
以下に処理の詳細を説明する。

### 2.1 シルエットによる凸包形状復元

シルエットによる形状復元では、シルエットの位置と視点を結ぶ直線が物体に対する接線になることを利用して、物体断面形状の推定を行う。まず、明度の閾値によりEPI各段を背景部分と物体部分とに分け、その境目の位置をシルエットの位置として抽出する。そして、図3に示すようにシルエットの位置と視点とを結ぶ直線の外側にあるボクセルを物体候補から削除す



(a)



(b)

図3 シルエットによる断面形状復元．(a) 1 視点により削除される領域，(b) 全視点により削除される領域

Fig. 3 Shape reconstruction by using silhouette. (a) Region carved from a view point, (b) Region carved from all of view points.

る．これを多方向から行うことにより，物体を含む凸包の断面形状が復元される．

シルエットを検出した際に，固定点を設定する．固定点は，この後に行われる，セルフオクルージョンとカラー陰影解析による物体領域の削り取りの際に，物体領域ということが確定的なボクセルが削り取られないようにするために決定する．固定点は，図4に示すように，隣接する画像間で，シルエットの位置と視点とを結ぶ直線の交点を検出し，その交点から一定距離の範囲（本論文の実験では20ボクセルと設定）に存在するボクセルの集合とする．ただし，シルエットによりすでに復元された凸包の外側のボクセルは固定点から除外する．

## 2.2 セルフオクルージョンによる物体外領域の削除

物体自身の遮蔽であるセルフオクルージョンの前方の物体と後方の物体の間に生じる見た目の輪郭線の候補を利用して，さらに物体外領域の削除を行う．セル

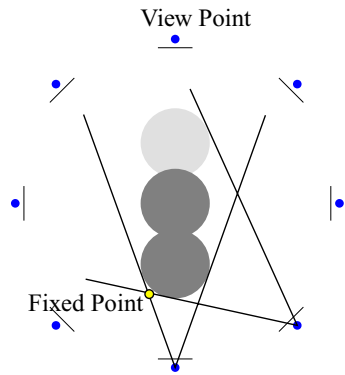
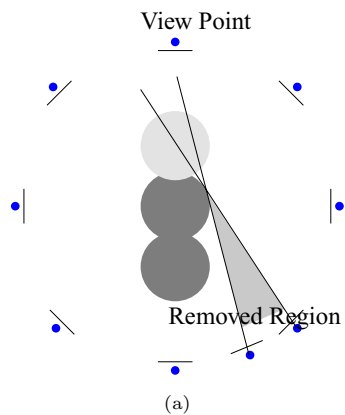
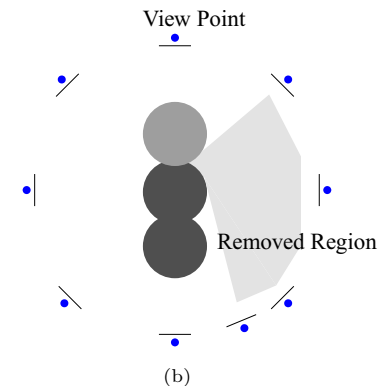


図4 固定点の設定

Fig. 4 Decision of the fixed point.



(a)



(b)

図5 セルフオクルージョンによる形状復元．(a) 2 視点により削除される領域，(b) 多視点により削除される領域

Fig. 5 Shape reconstruction by using occlusion. (a) Region carved from a view point, (b) Region carved from multi view points.

フオクルージョンの輪郭線に対しては，物体内部領域を削除しないように，図5に示すように近傍の位置にある2つの視点でセルフオクルージョンの位置に直線を引き2つの直線に囲まれる範囲にあるボクセルを物体候補から削除する．ただし，その範囲に前述の固定点

が一定個数(本論文の実験では20)以上ある場合には削除を行わない。

なお,前節で述べたシルエットによる凸包形状復元を省略して,本節で述べるセルフオクルージョンによる物体外領域の削除処理を行うだけでも,原理的には同様の物体領域が検出可能と考えられる。しかしながら,本論文において,これらを2段階の手順にしているのは,セルフオクルージョンの輪郭線よりも安定に検出できるシルエットから,あらかじめ物体外領域を決定し,セルフオクルージョンによる物体外領域の判定処理から除外しておいた方が,結果として物体外領域として削除できない領域を減らすことにつながるからである。

さて,セルフオクルージョンによる輪郭以外にも,表面反射特性や表面法線方向の不連続性やハイライトによる急激な明度変化によって輪郭が生じる。表面反射特性や表面法線方向の不連続による輪郭に対し上述の処理を行った場合は,前方の物体と後方の物体の境目に窪みが生じていないケースと考えることができ,やはり物体が存在しない範囲として削除することができる。しかし,ハイライトによる急激な明度変化による輪郭に対し上述の処理を行うと本来物体が存在する領域を削除してしまう。そこで,以下に述べるようにして,ハイライトによる輪郭以外の輪郭をセルフオクルージョンによる輪郭として抽出する。

測定対象となる物体は,表面の色によっていくつかのパーツに分けることができる。図2に示した例では,明るいグレーのパーツ(視点A側の2つの円)と,暗いグレーのパーツ(視点C側の1つの円)とに分けることができ,両方のパーツが撮影される場合には,その境目には輪郭線が生じる。つまり,セルフオクルージョンによる形状復元はパーツの境目を利用した復元法であり,輪郭抽出ではパーツの境目を見つけることになる。

さて,2色性反射モデルに従う物体では,たとえば赤の部分にハイライトが生じると明度が高くなって白みを帯びる。しかし厳密に明度を測定すれば赤みは残っている。そこで,本論文では物体表面は2色性反射モデルに従うものと仮定し,赤みや青みといった色味を評価して,パーツとパーツの境目を輪郭として抽出する。

本手法の撮影系では光の入射角と視線方向は等しく,2色性反射モデルは式(1)のように表すことができる。ここで, $i_d$ は測定される明度値, $i_0$ は光源の強さ, $R_{dr}$ , $R_{dg}$ , $R_{db}$ は拡散反射率RGB各成分, $R_s$ は鏡面反射率, $k$ は鏡面反射指数, $\theta$ は法線ベクトル

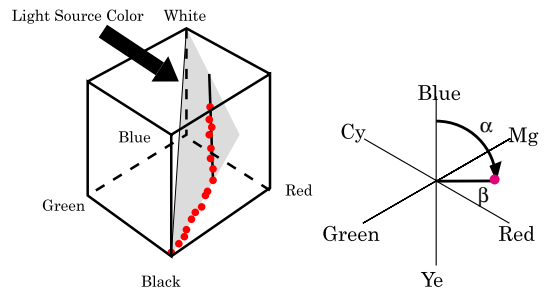


図6 2色性反射表面の明度変化(左)RGB空間上(右) $\alpha\beta$ 座標  
Fig. 6 Shading model of bidirectional reflectance surface, which is represented in RGB space (left) and  $\alpha\beta$  coordinate (right).

と視線方向のなす角である。

$$i_d = i_0 \begin{pmatrix} R_{dr} \\ R_{dg} \\ R_{db} \end{pmatrix} \cos \theta + i_0 \begin{pmatrix} R_s \\ R_s \\ R_s \end{pmatrix} \cos^k \theta \quad (1)$$

すなわち,物体表面の微小面を多方向から照明を当てながら撮影する場合の明度変化は,拡散反射の項と鏡面反射の項の和で表すことができ,拡散反射の項は1つのベクトルに比例し,鏡面反射の項は別の1つのベクトル(光源の色ベクトル)に比例する。これを,RGB空間で考えると微小面の明度変化は図6に示すように1つの平面上に推移する。この平面は拡散反射率のベクトルと光源の色のベクトルによって張られる平面である。

ここでは,輪郭線抽出を行うために新たな座標系を定義する。RGB空間を光源の色ベクトルに垂直な平面に投影し,図6に示すようにこの平面において青からの方向を $\alpha$ とし,原点からの距離を $\beta$ とする。

2色性反射モデルに従う物体においては同じパーツの $\alpha$ 値は,ハイライトの有無にかかわらず等しくなる。そこで, $\alpha$ 値の変化の輪郭を抽出することでハイライト以外の輪郭を抽出することができる。

ただし, $\beta$ 値が小さい場合は,微小なノイズによって $\alpha$ 値が大きく変化して本来輪郭がないところに輪郭を設けてしまうことがあるので, $\beta$ の値が閾値(本論文の実験では,RGB空間全体を表す立方体の大きさの5%とした)よりも小さい場合は無彩色と見なし輪郭とはしない。

### 2.3 カラー陰影による物体外領域の削除

セルフオクルージョンによる物体外領域の削除だけでは,セルフオクルージョンの輪郭線が検出されないような,滑らかな窪みの部分の形状を復元することが困難となる。そこで本手法では,同一の物体表面に対

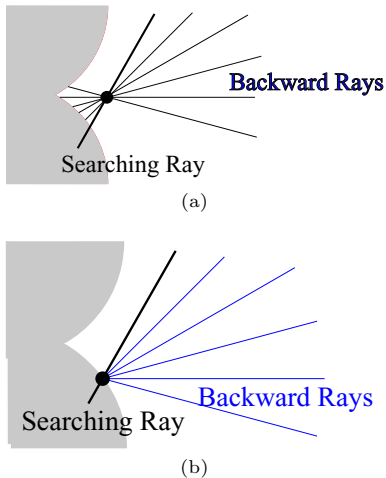


図7 バックワードレイと物体表面の交点．(a) 探索点が物体表面上にない場合，(b) ある場合

Fig. 7 Cross point of backward ray and object surface.  
(a) Searching point is located onto the surface, (b) Searching point is off the surface.

して複数の視点から観察される明度変化，つまり陰影を利用して，さらに物体領域の外側のボクセルを削除する．

まず，ある視点から物体表面の見えるある画素に対応する直線を探索レイとして選択する．そして，この探索レイ上に，探索点を移動させながら，探索点と各視点とを結ぶ直線（以下，バックワードレイと呼ぶ）を引き，バックワードレイと画像平面の交点の明度値を調べる．図7(a)に示すように，もし探索点の位置が物体表面の位置にない場合は，バックワードレイの明度はそれぞれ，異なった部分の面の明度変化であり，物体表面の反射モデルに従わない．これに対して，図7(b)に示すように，探索点の位置が物体表面の位置にある場合はバックワードレイの明度変化は同じ面を別の向きからみた明度となり，その明度は物体表面の反射モデルに従う．そこで，探索点を探索レイ上で移動させて，バックワードレイの明度変化が物体表面の反射モデルと一致する位置を探し，そこを物体表面位置として決定する．これにより，決定した物体表面位置から，反射モデルに従う明度値を与えた画像の視点に向かった直線を基準にして，物体外領域を削除する．

以下に，各処理の詳細について説明する．

### 2.3.1 探索レイの設置

探索レイが，物体表面の法線方向にできるだけ平行な直線になるように，EPI 各段で明度が極大となる点を検出し，この点に対応するレイを探索レイとして用

いることとする．これは，表面周辺の表面反射率が一樣なら，本研究のように視線方向と光源方向が等しいときには，式(1)における拡散反射の項も鏡面反射の項も，視線方向と法線方向が等しいときに最大になると考えられるため，画像上で周辺の位置より明度が高い点の法線方向は，その点と視点を結ぶ探索レイの方向と近い可能性が高いからである．ただし，極大の位置のみを探索レイとすると平らな部分には探索レイが1つしかできず復元が行われない．そこで，極大値だけでなく，明度が閾値（本論文の実験では，極大値に対して95%とした）以上の明度を有する点を探索点とする．そうすれば平らな部分の明度はおおよそ等しいので探索点を増やすことができる．

なお，探索レイと物体候補領域の交点が固定点の場合は，その探索では物体表面の探索は行わずに，固定点を物体表面とする．

### 2.3.2 探索レイ上での物体表面位置決定

設置した探索レイに沿って，探索点における各画像の視点へのバックワードレイの明度変化を物体の反射モデルに当てはめ，当てはめの一致度が最大となる点を見つけ，その位置を物体表面位置とする．ここでは，一致度はバックワードレイのうちで反射モデルに従うバックワードレイの数と定義する．

本論文では，物体表面の反射は物体色である拡散反射と，光源色である鏡面反射の線形和で表される2色性反射モデル（式(1)）を想定する．しかし，本研究では視線方向と光源方向が一致している装置を用いるため，鏡面反射は視線方向付近にしか生じないと考えられるので，鏡面反射も考慮した当てはめを行うのは困難となる．そこで，物体表面の反射モデルとの一致度を決めるには拡散反射を利用し，鏡面反射を含んだ明度については，拡散反射に従わないものとして除外した当てはめを行う．

拡散反射に従わないものを除外した当てはめを行うには，まず，探索点におけるすべてのバックワードレイの明度を用いて，拡散反射モデル当てはめを最小自二乗法により行う．そして，推定した拡散反射モデルからの誤差率が最も大きいバックワードレイを除去して再度，拡散反射モデルの当てはめを行い，当てはめの誤差率（反射モデルの値に対する誤差の割合）が5%以上のバックワードレイがなくなるまで以上の処理を繰り返す．そして，最終的に，誤差率が5%未満のバックワードレイの数をその位置での一致度とする．

このような，拡散反射に従わないものを除外した当てはめを，探索点の位置を変化させながら繰り返す行い，探索レイ上で一致度が最大値となる位置を探索す

る．この探索は、一致度が極大値に比べて5小さい点までの範囲で行うものとした．

最後に、当てはまった拡散モデルから求められる法線方向が、探索レイの方向から一定角度（本論文の実験では、30度）以上異なる場合は、拡散反射モデルの当てはめが失敗している可能性があるので以降の削除処理は行わない．これは、先に述べたように、探索レイは物体表面の法線方向に近くなるようにあらかじめ設定されているからである．

### 2.3.3 物体領域の削除

上記の処理により決定した物体表面位置において、反射モデルに一致した明度が表れるバックワードレイを用いて、物体領域の削除を行う．探索レイから時計回りに順にバックワードレイが反射モデルに従うかどうかをチェックし、従っているときには、隣接するバックワードレイに囲まれる範囲を物体領域から削除する．反射モデルに従わないレイが現れた場合には削除を中止する．探索レイから反時計回りにも同様に行う．

ただし、この方法を用いて削除を行うと、誤って物体内領域を大きく削除してしまうことがある．たとえば、図8のように、物体表面S1におけるバックワードレイA上に別の物体表面S2が存在し、S2がS1と同様の反射特性を有すると、S1におけるバックワードレイAが反射モデルに一致した明度になってしまうので、隣接するバックワードレイAとBにより囲まれた領域が物体外領域として誤って削除されてしまう．これを防ぐために、2.1節において設定された固定点が、バックワードレイに囲まれる範囲に一定個数（本論文の実験では20）以上含まれる場合は、このバックワードレイは反射モデルに従わないものと判断し、削除を行わないようにしている．この例でも、固定点がAとBの間に存在することになるので、これらに挟まれた領域は削除されないことになる．

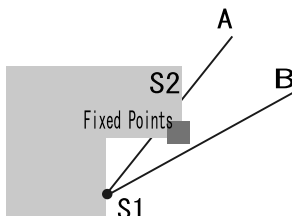


図8 バックワードレイが反射モデルに一致すると誤って判定されてしまう例．もし、固定点がなければ、バックワードレイAとBに囲まれる領域は物体外領域と誤判定されてしまう．

Fig. 8 Case that backward ray is wrongly recognized as satisfying with reflectance model. The fixed points prevent the removal of the region between the backward rays A and B.

## 3. 実 験

本手法に基づく形状復元実験を OpenGL で作成した合成画像とカラー CCD カメラで撮影した実画像に対して行った．画像は RGB それぞれ 256 階調、512 × 512 pixel のものを回転角 6 度おきに 60 枚撮影した．こうして撮影される 60 枚の画像から、同じ高さの画素列を集めてきて EPI を作成し、EPI 上で前章に述べた処理を行い、それぞれの高さにおける断層形状を復元した．この結果、対象の 3 次元空間は、物体の内側か外側かに応じた数値の入ったボクセルメッシュで表現されるデータとなるが、このデータから CG 合成に適したポリゴンメッシュモデルを合成するために、Marching Cube 法<sup>4)</sup>を利用した．また、表示速度を高め、扱いを容易にするために、必要に応じて、Qslim<sup>2)</sup> というポリゴンメッシュ削減アルゴリズムを適用した．下記に示す 3 次元モデルは、このアルゴリズムによってポリゴンメッシュ数を 2000 に削減したものである．

図9(a)に、作成した60枚の合成画像列のうちの1つを示す．ここでは、物体表面反射特性は2色性反射モデルに従うもの、つまり拡散反射成分のみでなく、鏡面反射も存在するものとして画像を合成した．このような合成画像列から、シルエットにより復元した凸包形状(2.1節の手法のみを利用して復元)、そして提案手法により復元した形状を図9(b),(c)にそれぞれ示す．ここでは、復元された3次元モデル形状を示すために、この形状から合成した陰影画像を示す．シルエットによる形状復元法では復元することができなかった球と球の間の窪みが、本手法では復元できるようになったことが分かる．

また、形状復元の誤差率を表1に示す．合成画像を作成するとき用いた3Dモデルの体積を100とし、本来物体の外側であるにもかかわらず物体の内側と判定した体積を out in の列に示す．すなわち、削り損ねた部分の体積率である．また物体の内側であるにもかかわらず外側であると判定した部分の体積率を in out の列に示す．すなわち、削りすぎた部分の体積率である．また、各誤差の2つの合計も示す．提案手法では、シルエットのみ、またシルエットとセルフオクルージョンでは削れなかった窪みの部分を陰影解析を用いてさらに削ることにより、out in の誤差つまり削り損ねた体積が減少していることが分かる．また、in out の誤差つまり削りすぎた体積誤差は提案手法のほうが増加しているものの、全体の誤差は減少しており、本手法が有効に機能していることが分かる．ところで、本手法はシルエットによる凸包形状復元の際

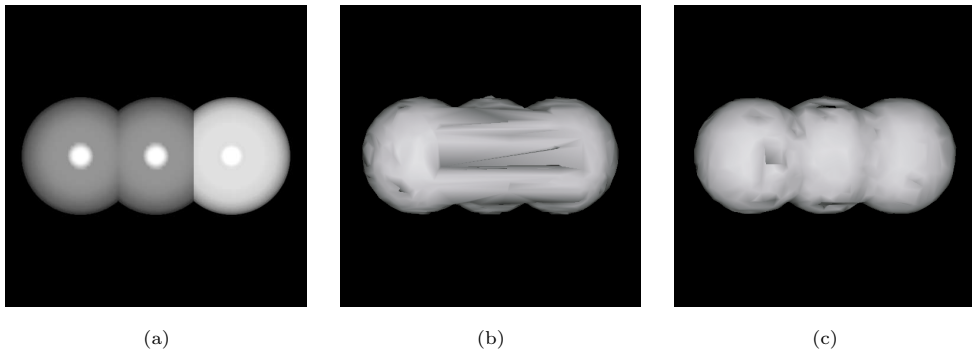


図9 入力画像，従来手法による復元結果，提案手法による復元結果  
 Fig. 9 Input image, recovered shape by the conventional shape from silhouette, and recovered shape by the proposed method.

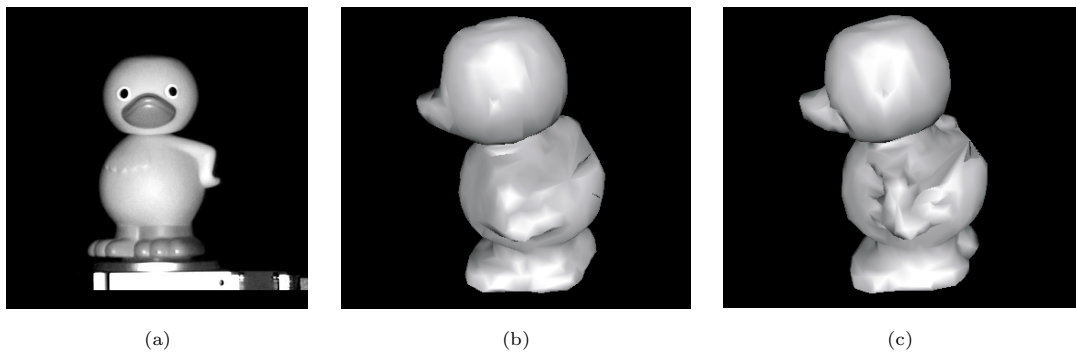


図10 入力画像，従来手法による復元結果，提案手法による復元結果  
 Fig. 10 Input image, recovered shape by the conventional shape from silhouette, and recovered shape by the proposed method.

表1 合成画像における誤差率

Table 1 Shape recovery error in case of computer generated input images.

	out	in	in	out	合計
シルエットのみによる復元 (図9(b))		6.23		1.58	7.81
シルエットとセルフオクルージョンによる復元		4.15		2.49	6.64
提案手法による復元 (図9(c))		1.30		3.17	4.47
固定点設置なし		1.17		14.84	16.01

に固定点を設定し，これ以降の物体領域の削除処理において本来物体領域である領域が誤って削除されるのを防いでいる．この固定点設置の効果を示すために，固定点を設置しないで復元された形状の誤差をこの表に示した．固定点の設置がないために，主に陰影による物体領域の除去の際に誤って削除されてしまった体積が大きいことが in out の値から示されている．

実画像での結果を図10から図13に示す．実画像は，実験室を暗くして，図1に示すような装置で撮影したが，実際には光源の多重反射などによる環境光は

少なからず存在した．この環境光の存在は，式(1)を厳密には満足させないために推定誤差の原因となると考えられるが，本実験では環境光の存在を無視しても大きな問題にはならなかった．逆に，環境光により，物体のシルエット境界が比較的明瞭に判定できた．

シルエットによる形状復元法と提案手法を比べると図10では人形のくちばし部分，腕の部分に改善が見られる．図11では，シルエットによる形状復元法では人形の腕と胸が一体化していたのが提案手法においては分離できている．図12では，椅子の背もたれと反対側の部分が，シルエットによる方法では誤って連結した形状になっているのに対して，提案手法ではそのような連結はみられずに，椅子の形状が良好に復元されている．図13では，シルエットによる方法だと腕が胴体部分と一体化しているのに対して，提案手法では腕付近の窪んでいる部分の形状が良好に復元されていることが分かる．

ここで示した例は，入力画像から分かるように，物体表面の明度変化が乏しく，特徴点の対応付けや追跡に基づく手法では，3次元情報を得ることのできる点



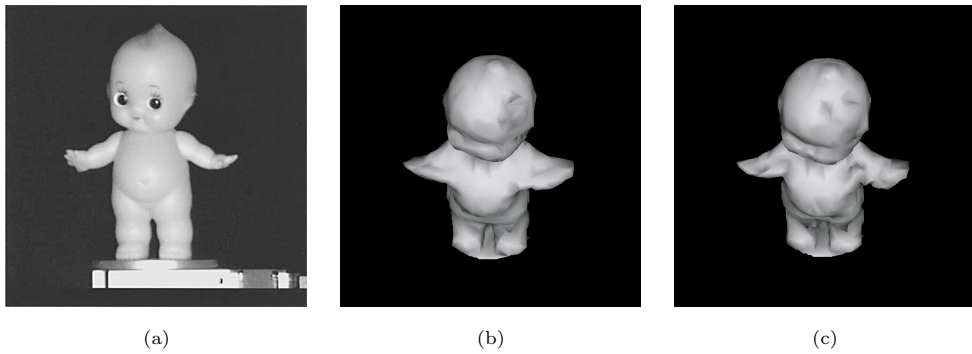


図 11 入力画像，従来手法による復元結果，提案手法による復元結果  
 Fig. 11 Input image, recovered shape by the conventional shape from silhouette, and recovered shape by the proposed method.

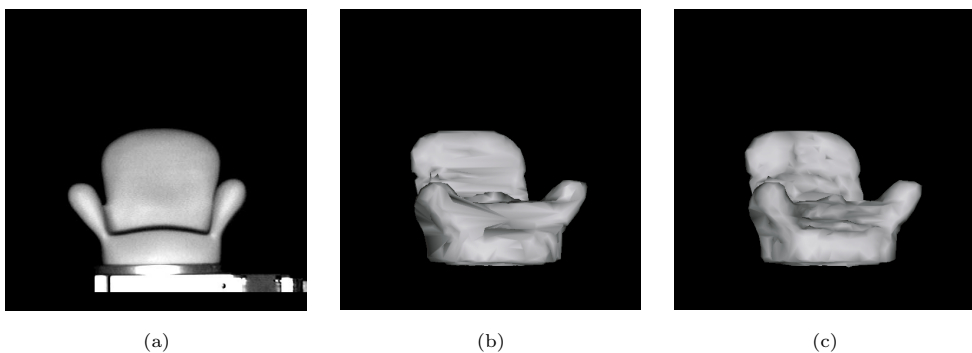


図 12 入力画像，従来手法による復元結果，提案手法による復元結果  
 Fig. 12 Input image, recovered shape by the conventional shape from silhouette, and recovered shape by the proposed method.

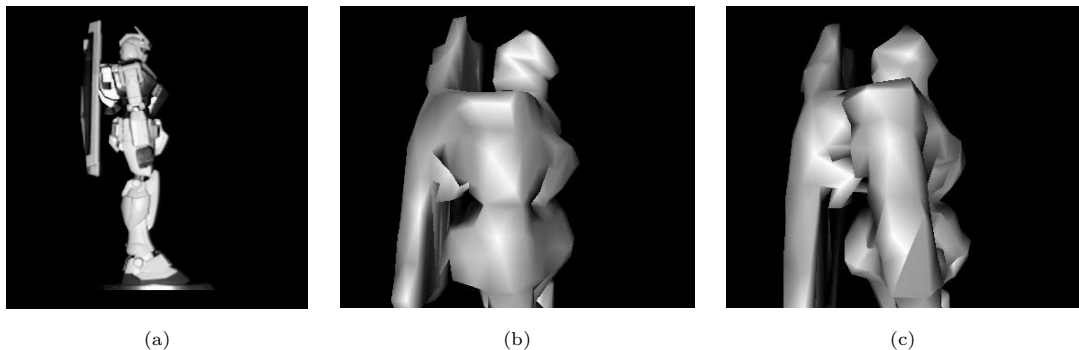


図 13 入力画像，従来手法による復元結果，提案手法による復元結果  
 Fig. 13 Input image, recovered shape by the conventional shape from silhouette, and recovered shape by the proposed method.

が明度変化の大きい特徴点に限定されてしまうために，全体の形状復元が困難と考えられるものである．しかし，本手法ではシルエット，セルフオクルージョン，陰影を用いることにより，明度変化が乏しい物体に対して良好な形状復元を行うことに成功している．

図 12 で，従来手法よりも形状に改善がみられるものの，主に背もたれや座面の部分に復元誤差による凹

凸が目立つ理由を考察する．この形状は図 14 に示す逆 U 字型に近い形状である．この形状の U 字の底は平らである．このような形状の場合に削り損ねが広範囲で生じる．探索点が B の位置のあるとき，バックワードレイの明度は物体上の異なる部分の明度を示すが，U 字の底が平らであるため，C 点や D 点の明度が A 点と同じ明度になっている．そのため，B 点で 2

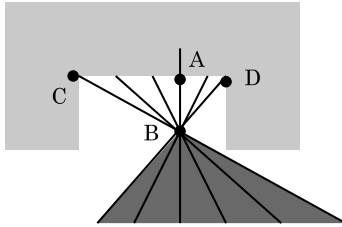


図 14 逆 U 字型の形状における復元  
Fig. 14 Shape recovery for U-shaped object.

色性反射モデルに一致するバックワードレイの数が A 点でのそれより多くなり、B 点を物体表面としてしまい、結果として削り損ねが生じてしまう。しかしながら、B 点でも法線方向は正確に求めることができると考えられるので、今後、法線方向を利用した改善法を行うことなどが考えられる。

本手法による形状復元処理には PentiumIII450 を用いた。計算時間は 82 分であった。処理の高速化は今後の課題である。この実験では、復元対象とする体積空間を単一解像度のボクセルメッシュで離散化して処理を行ったが、多重解像度表現を行い、処理の効率化を行うなどにより改善できると考えられる。

#### 4. む す び

本研究では、カメラ、光源を固定し物体を一定角度ずつ回転させて撮影することにより、物体の復元を行う方法を提案した。

本手法では、まず、シルエットを検出して、物体の外側であると判断できる領域を物体候補から削除することにより物体の凸包形状を復元する。次に、窪んでいる部分の形状復元のために、セルフオクルージョンの輪郭線を用いて、空間と判断できる領域を削除する。次に、視点から物体へ向かう直線上に設置した探索点において、視点の異なる画像から得られるカラー陰影の明度変化曲線を解析し、2 色性反射モデルと想定している物体表面反射のうち、物体色成分である拡散反射モデルに当てはめることにより、物体表面位置を決定する。さらに、表面位置決定の際に当てはめられた拡散反射モデルに一致する視線方向には物体領域が存在しないことを用いて、さらに物体領域を削り取る。

提案した手法を検証するために、合成画像に対して手法を適用し、定量的評価を行った。その結果、本手法により妥当な結果が得られることが確認できた。また、本手法を人形やプラモデルに適用しモデルを作成したところ、良好な結果が得られ、本手法の有用性が示された。

謝辞 本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費

奨励研究 (A) 課題番号 11750336 による。

#### 参 考 文 献

- 1) 深川義裕, 鄭 緯宇, 田中和明, 安部憲広: ハイライトの検出による 3 次元形状の獲得, 信学論 (D-II), Vol.J-79-D-II, No.7, pp.719-726 (1996).
- 2) Garland, M. and Heckbert, P.S.: Surface Simplification Using Quadric Error Metrics, *Proc. SIGGRAPH '97* (1997).
- 3) 日浦慎作, 佐藤宏介, 井口征士: 対象物体の回転による形状と反射率の同時計測, 情報処理学会論文誌, Vol.36, No.10, pp.95-119 (1995).
- 4) Lorensen, W. and Cline, H.: Marching Cubes: A High Resolution 3D Surface Construction Algorithm, *Proc. SIGGRAPH '87*, pp.163-170 (1987).
- 5) Maki, A., Watanabe, M. and Wiles, C.: Geotensity: Combining Motion and Lighting for 3D Surface Reconstruction, *IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV '98)*, pp.1053-1060 (1998).
- 6) 西山芳生, 斎藤英雄, 小沢慎治: 多視点カラー画像からの 3 次元形状および物体色の推定, 信学論 (D-II), Vol.J82-D-II, No.6, pp.990-1000 (1999).
- 7) Potmesil, M.: Generating Octree Models of 3D Objects from Their Silhouettes in a Sequence of Images, *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, series 40, pp.277-283 (1987).
- 8) Saito, H., Omata, K. and Ozawa, S.: Recovery of Shape and Surface Reflectance of Specular Object from Rotation of Light Source, *2nd International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling (3DIM99)*, Ottawa, pp.526-535 (1999).
- 9) Sato, Y. and Ikeuchi, K.: Temporal-Color Space Analysis of Reflection, Technical Report of Carnegie Mellon University, CMU-CS-92-207 (1992).
- 10) Seitz, S. and Kutulakos, K.N.: Plenoptic Image Editing, *IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV '98)* (1998).
- 11) 田村秀行, 北村素子: 3 次元仮想空間生成・表示へのモデル系&非モデル系アプローチ, 信学技報, HC 94-8, pp.47-54 (1994).
- 12) Tang, C.K. and Medioni, G.: Inference of Integrated Surface, Curve and Junction Descriptions From Sparse 3D Data, *IEEE Trans. PAMI*, Vol.20, No.11, pp.1206-1223 (1998).
- 13) 富永昌治, 岡山敏之: ハイライトや相互反射の影響を含むカラー画像の解析法, 信学論 (D-II), Vol.J-80-D-II, No.6, pp.1360-1369 (1997).
- 14) 富永昌治: カラー反射モデルを用いた相互反射の解析: 情報処理学会論文誌, Vol.34, No.2,

pp.302-402 (1993).

- 15) 富永昌治: 3次元空間における物体色のリアルな生成とその評価, 情報処理学会論文誌, Vol.34, No.2, pp.289-301 (1993).
- 16) 富永昌治, 大橋伸一郎: 物体のカラー反射モデル, 情報処理学会論文誌, Vol.33, No.1, pp.37-45 (1992).
- 17) 山本裕之, 内山晋二, 田村秀行: 3次元形状モデリングのためのドローン網生成法, 信学論(D-II), Vol.J78, No.5, pp.745-753 (1995).
- 18) 安野貴之, 鈴木 智: 時空間画像の遮蔽解析を用いた面構造復元, 情報処理学会論文誌, Vol.34, No.10, pp.2174-2183 (1993).
- 19) 財満久義, 山本 強: 連続カラー画像と双方向レイトレースによる物体形状と色の推定, 信学論(D-II), Vol.J80, No.12, pp.3139-3146 (1997).
- 20) 鄭 緯宇, 岸野文郎: 連続シルエットを用いた3次元モデルの復元とその未知領域の検出, 信学論(D-II), Vol.J-76-D-II, No.6, pp.1114-1122 (1993).
- 21) Zheng, J.Y.: Acquiring 3-D Models from Sequences of Coutours, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.16, No.2, pp.163-178 (1994).

(平成12年3月21日受付)

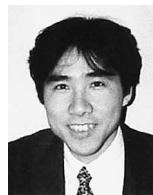
(平成12年9月14日採録)

(担当編集委員 日浦 慎作)



佐藤 太一

平成10年慶應義塾大学理工学部電気工学科卒業。平成12年同大学大学院修士課程修了。同年松下電器産業入社。在学中、3次元形状計測、カラー画像処理、3次元コンピュータグラフィックスに関する研究に従事。



齋藤 英雄 (正会員)

昭和62年慶應義塾大学理工学部電気工学科卒業。平成4年同大学大学院博士課程修了。同年同大学助手、平成7年専任講師。工学博士。コンピュータビジョン、画像処理等に関する研究に従事。平成9年から平成11年まで、日本学術振興会海外特別研究員として米国カーネギーメロン大学に留学。電子情報通信学会、計測自動制御学会、IEEE 各会員。



小沢 慎治 (正会員)

昭和42年慶應義塾大学工学部電気工学科卒業。昭和47年同大学大学院博士課程修了。昭和45年同大学助手、専任講師、助教授を経て、現在同大学教授。この間、昭和59年米メリーランド大学訪問助教授。デジタル通信および画像音声のデジタル信号処理の研究に従事。工学博士。電気学会、IEEE 各会員。