

## 照明変動に対応可能なスペースカービングを用いた 法線と形状の同時復元

松野翔太<sup>†1</sup> 坂上文彦<sup>†1</sup> 佐藤 淳<sup>†1</sup>

本稿では、照明が変動する環境下において撮影された画像群より形状復元を行うことが可能な新たなスペースカービングを提案する。本提案法では、法線方向および物体の反射率を含む6次元空間をスペースカービングの枠組みにより削り出し、これにより形状と法線方向の同時復元を実現する。この方法では陰影情報に基づき直接的に法線方向を推定することが可能であるため、復元結果を用いて任意視点から見た任意照明環境の映像を容易に生成することが可能である。本稿では6次元に拡張された空間の削り出しに使用する新しい光学的整合性について述べる。また、提案した方法を用いて実際に形状と法線方向の復元を行った結果を示し、提案方法の有効性を確認する。

### 6D Space Carving for Shape and Normal direction Recovery

SHOTA MATSUNO,<sup>†1</sup> FUMIHIKO SAKAUE<sup>†1</sup> and JUN SATO<sup>†1</sup>

This paper proposes a new method for recovering 3D shape from a set of images taken under a changing light source environment. The proposed method is based on a space carving. Our proposed method reconstruct 3D shapes and normals by carving 6D-space which consists of shape, normal and reflectance. Since this method enables us to estimate normals directly as well as shape, we can generate images of arbitrary view points under arbitrary lights. We propose a new photo-consistency which is used for carving 6D space. Some real object shapes are recovered by the proposed method. The results show that the proposed method works well.

#### 1. はじめに

画像からの3次元形状復元はコンピュータビジョンにおいて最も重要な課題の一つであり、盛んに研究がおこなわれている。画像による3次元形状復元手法の一つとしてスペースカービング<sup>1)</sup>と呼ばれる方法が提案されている。この方法では、物体表面の反射特性と色情報の整合性を用いて対象空間を削ることにより、明示的な対応点探索を行うことなく3次元復元を行うことができる。また、対象空間を速度等の情報を含む時空間に拡張することにより、対象物体の形状情報だけでなく、運動情報も同時に復元するスペースタイムカービング<sup>2)</sup>などが提案されている。

このように、スペースカービングをベースとした形状復元法は、明示的な特徴点を使用することなく物体情報を復元可能であるため、様々なシーンでの応用が期待できる。しかしこの方法は、基本的には同一の照明条件下で撮影された画像集合からしか形状復元を行うことができない。これは、スペースカービングで利用される光学的整合性判定が、光源環境の変化に対応していないことに起因する。そのため光源環境が異なる画像が入力された場合、誤った形状が復元されるという問題がある。

一方、復元された形状を用いて、自由視点・任意照明環境の画像を生成使用とする場合、形状情報だけでなく物体表面の法線方向の情報が重要であることが知られている。そのため、近年、物体の形状情報とは独立に陰影情報に基づき物体表面の法線方向を推定し、これを画像生成に利用する方法が提案されている<sup>3)</sup>。この方法では陰影情報から直接法線方向を計算するため、復元された形状を微分して法線を求めるよりも正確に法線方向が推定可能であり、より自然な画像を生成可能であることが示されている。しかし、この方法では一般的なShape from Shading<sup>4)</sup>の方法を利用するため、カメラと物体の位置関係を固定した状態で、複数の照明環境での画像を撮影する必要がある。

そこで本稿では、カメラの位置や照明環境が変化した状態で撮影された画像集合から形状と法線方向を同時に推定する方法を提案する。この方法は前述のスペースカービングをベースとする方法であり、これにより明示的な対応付けが存在しない場合でも法線方向を復元することが可能である。また、提案法では法線方向を考慮して光学的整合性を定義することにより、照明条件が変化した場合でもその影響を受けることなく対象物体の形状を復元することができる。

<sup>†1</sup> 名古屋工業大学大学院 情報工学専攻

Department of Computer Science, Nagoya Institute of Technology

## 2. スペースカービング

### 2.1 光学的整合性に基づく物体表面復元

本稿で提案する方法は、スペースカービング法による形状復元に基づく方法である。そこで本節では、スペースカービング法の概要について述べる。

いま、対象物体が複数台の校正済みカメラにより撮影されているとする。このとき、空間中のある一点を各カメラで撮影した場合を考える。この点が物体表面上にあった場合、画像点の観測色は物体表面の反射特性により決定され、全てのカメラは同一の3次元点を観測していることになる。一方、点が物体表面上にない場合や、他の物体によって死角になってしまった場合には、観測色はカメラの視線方向にある最も近い対象物体の反射特性によって決定され、各カメラは異なる3次元点を観測していることになる。そのため、ある3次元点に注目したとき、各画像から得られる観測色が物体の反射特性に整合すれば、その点は物体表面上の点であり、整合しなければ、物体表面上の点ではないと考えられる。

例えば、反射特性が完全拡散の物体を対象とすると、物体表面の観測色はカメラの姿勢や位置の依らず同一の色として観測される。そのため、図1のように対象物体を同一光源下で複数台のカメラで撮影したとき、物体表面上にある点(a)の観測色は、カメラ1では青色、カメラ2でも青色となり、物体の反射特性に整合する。一方、物体表面上にない点(b)の観測色は、カメラ1では青色、カメラ2では緑色と異なり、物体の反射特性に整合しない。

この原理を用い、対象物体を含む初期形状を対象空間とし、そこから各画像の観測色と物体の反射特性が整合しない点を削除し、整合する点を観測色で復元することで、明示的な対応点を用いることなく形状の復元を行うことができる。このような復元に用いる反射特性の整合性を光学的整合性と呼ぶ。また、この光学的整合性により復元される形状を photo hull と呼び、これは真の物体形状を内包する形状となる。なお、photo hull 中には点(c)のように物体表面上にないが、各カメラにおける観測色が物体の反射特性に整合する点が含まれる。

### 2.2 ボクセルを用いた3次元空間の表現

このような方法を用いて形状復元を行う場合、対象となる空間をなんらかの方法により標本化しておく必要がある。標本化の方法には、画像からの射影復元結果を利用する方法や単純な格子による標本化などがあるが、本研究では、実現の容易性や取扱いの簡単化の観点から、図2に示すような、空間を小立方体の集合として表現するボクセル空間を用いた標本化を用いる。このようなボクセル空間を用いスペースカービングを実現する場合、各ボクセル

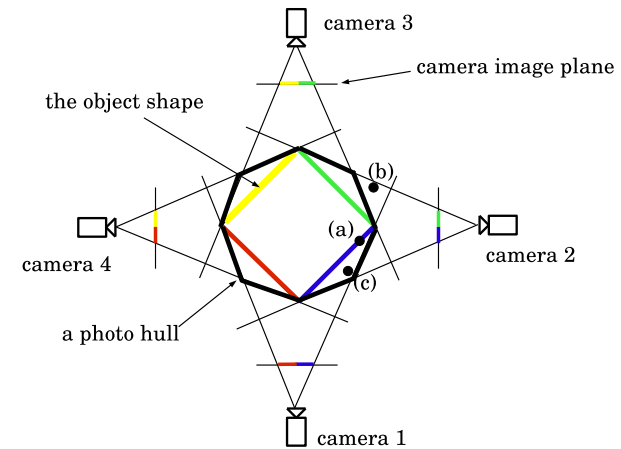


図1 完全拡散反射面における photo hull の例  
Fig. 1 Example of photo hull.

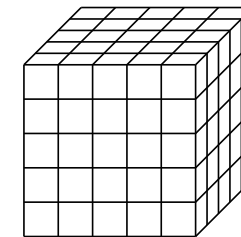


図2 ボクセル空間  
Fig. 2 Voxel Space.

を複数台のカメラで撮影したときの光学的整合性を基に、削除(または保持)が行われることになる。

### 2.3 ランバート反射モデルに基づく光学的整合性

次に、ボクセルの削除に用いる光学的整合性について述べる。スペースカービングでは、対象物体の表面か否かの判別に観測色の整合性を用いている。これを本稿では、光学的整合性(photo-consistency)と呼ぶ。本節では本稿で用いる光学的整合性について具体的に定義する。

物体の形状復元のためには、従来より、様々な光学的整合性が提案されている<sup>1),5)</sup>。本研究ではランバートモデル<sup>6)</sup>に基づいた光学的整合性を用いる。物体表面の反射特性がランバートモデルに従うとすると、その観測色は観測位置に関わらず一定となる。そのため、各カメラで観測された色を直接比較することにより、光学的整合性の判定が行える。

本研究では、各カメラから得られる観測色を用いて物体の表面特性に対する投票を行い、その得票数を光学的整合性として用いる。今、ボクセル X に関する物体表面の観測色を  $c_i$  とし、 $c_i$  の得票数を  $N_{c_i}$  としたとき、光学的整合性  $f_c(\mathbf{X})$  を以下のように定義する。

$$f_c(\mathbf{X}) = \begin{cases} c_i & \text{if } \max N_{c_i} \geq \theta_N \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 $\theta_N$  は投票数に対する閾値である。したがって、この関数は観測色  $c_i$  において得票数が最大となり、かつ、その得票数が一定値以上である場合、そのボクセルが色  $c_i$  について光学的に整合していることを表している。

例えば、図 3 のように、完全拡散反射面をもつ物体を 4 台のカメラで撮影した場合を考える。ボクセル A をカメラ  $i$  で画像面に投影した点を  $a_i$  と表し、ボクセル B を投影した点も同様にして  $b_i$  と表す。このとき、式 (1) に基づく光学的整合性を、それぞれのボクセルについて考える。

まず、ボクセル A について考えると、カメラ 1 と 4 による観測色は赤色、カメラ 2 は青色、カメラ 3 は黄色である。このとき、赤色には 2 票、黄色と青色には 1 票ずつ票が入る。ここで  $\theta_N = 2$  であるとする、 $f_c(A) = \text{赤}$  となり、赤色でボクセル A は光学的に整合する。一方、ボクセル B について考えると、カメラ 1 による観測色は赤色、カメラ 2 は緑色、カメラ 3 はオレンジ色、カメラ 4 は黄色である。したがって、赤色、緑色、オレンジ色、黄色それぞれ 1 票ずつ入り、 $f_c(B) = 0$  となり、ボクセル B は光学的に整合しない。このようにして、式 (1) に従えば、各ボクセルについて光学的な整合性を判定することができる。

これを利用してボクセル空間のカービングを行う。対象空間中のあるボクセル X に注目したとき、 $f_c(\mathbf{X}) = 0$  であれば、ボクセルを削除し、 $f_c(\mathbf{X}) = c_i$  であれば、観測色  $c_i$  でボクセルの復元・彩色を行う。この処理を対象空間中の全てのボクセルに対して行うことで対象物体の 3 次元復元および彩色が実現できる。

しかし、実際にはカメラで観測される物体表面色は撮影誤差や反射特性の混在により影響を受けるため、観測色が同一となることはあまりない。そこで、観測色の投票時には、ある程度近い観測色は同一色として判定する。本研究では、下記のような単純な閾値処理によ

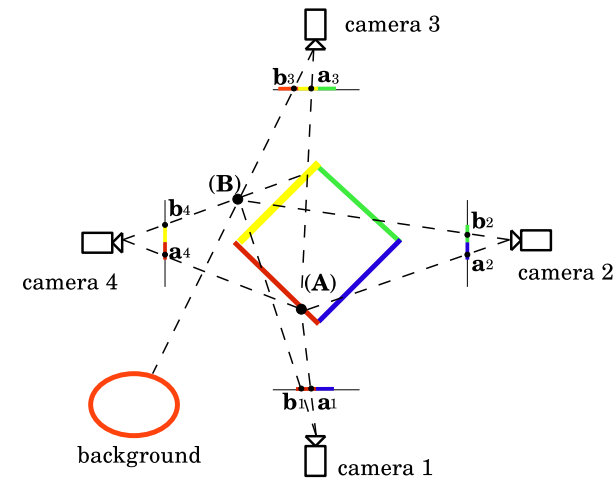


図 3 光学的整合性の例  
Fig. 3 Example of photo consistency.

り、同色判定を行う。

$$s(c_1, c_2) = \begin{cases} 1 & \text{if } |c_1 - c_2| \leq \theta_c \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 $c_1, c_2$  は画像から得られた観測色であり、 $\theta_c$  は観測色に関する閾値である。

得られた観測色が、既に存在する観測色に近い色と判別された場合は、この既存の観測色に投票し、そうでない場合は、得られた観測色に投票する。これにより、ある程度の観測色の誤差に対応することが可能となる。以上の方法を用いて、スペースカービングによる対象物体の 3 次元形状復元が実現できる。

### 3. 照明環境の変動に対応可能なスペースカービング

#### 3.1 照明変動に対応した光学的整合性

従来のスペースカービングは、物体表面の色情報を物体の反射特性の光学的整合性を基準とした 3 次元形状復元を行っている。しかし、物体表面の観測色は、光源の方向や強さが変わると変化してしまう。そのため、異なる光源環境下で撮影した画像を用いる場合、従来の

観測色の投票では、正しく物体表面か否かの判別ができない問題がある。

そこで、本節では光源情報の変動を考慮した光学的整合性を提案する。本稿では、光源情報として光源強度  $\nu$  と光源方向  $\mathbf{S} = [s_1, s_2, s_3]^T$  ( $|\mathbf{S}|=1$ ) を用い、これらのパラメータが各画像ごとに変動するものとして議論を進める。

いま、光源情報が既知であるとする観測色  $I$  はランバートモデルに基づき以下の式 (3) により算出される。

$$I = \max(\nu\rho\mathbf{S}^T\mathbf{N}, 0) \quad (3)$$

ここで、 $\rho$  は物体表面の反射係数、 $\mathbf{N} = [n_1, n_2, n_3]^T$  は物体表面の法線方向である (ただし  $|\mathbf{N}|=1$ )。本稿では、これらを光源情報に対して、物体情報と呼ぶ。物体情報は物体固有の情報であり、同一物体である限り、光源環境が変化しようと不変である。したがって、観測色と光源情報から物体情報を推定することができれば、どのような照明環境下で撮影された画像からも不変な情報を抜き出すことができる。本研究ではこの物体情報に注目し、これに基づいた光学的整合性を考える。

それではまず、物体情報の推定方法について考える。本稿では、前節で述べたスペースカービングの利点を用い、明示的な対応点を用いることなく物体情報の復元を行う方法を提案する。さらに、この物体情報を光学的整合性として用いることにより異なる光源下で撮影された画像を用いた 3 次元復元法を提案する。

いま、図 4 のように、対象物体が、異なる光源下で、カメラにより撮影されている場合を考える。このとき、撮影されたシーンの光源情報は既知であり、またカメラは校正されているとする。空間中のあるボクセル  $X$  は  $i$  番目のカメラ画像中に  $m_i$  として投影される。このとき、物体表面の法線方向を  $\mathbf{N}$  と仮定すると、物体表面の観測輝度は式 (3) を用いて計算される。ボクセル  $X$  が物体表面上にあり、かつ、仮定した法線  $\mathbf{N}$  が真の法線に等しい場合には、 $i$  番目のカメラにおける観測色  $c_i$  と推定された輝度  $\hat{c}_i$  は等しくなる、すなわち光学的に整合する。一方、ボクセル  $Y$  のように物体表面上にない場合や、仮定された法線  $\mathbf{N}$  が誤っていた場合、観測色と推定された輝度は一致しない。本研究では、このような性質を利用して新たな光学的整合性を定義する。

いま、3次元空間中の点  $X$  が法線方向  $\mathbf{N}$  をもっていると仮定する。点  $X$  を  $i$  番目のカメラに撮影して得られる点  $m$  における観測色  $c_i$  が  $\mathbf{N}$  およびシーンの光源情報  $\mathbf{S}$  により推定される輝度と等しい場合、点  $X$  及び、法線  $\mathbf{N}$  に対して色  $c_i$  に対する投票を行う。色  $c_i$  の得票数を  $N_{c_i}$  として表すとき、3次元点  $X$ 、法線  $\mathbf{N}$  に関する光学的整合性を以下のように

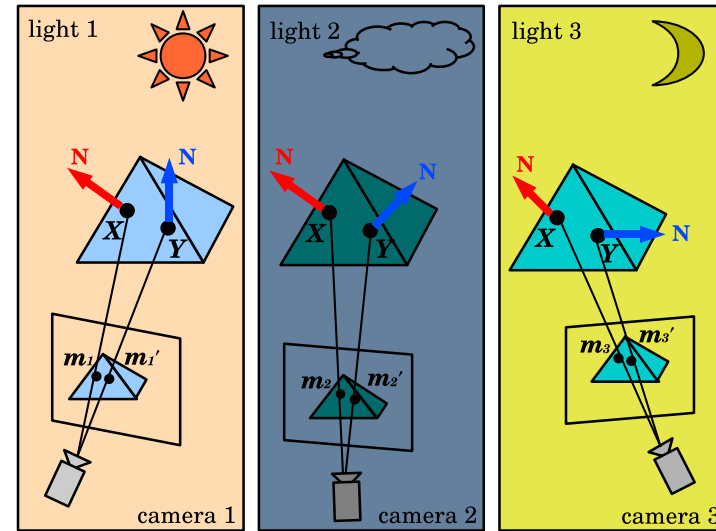


図 4 対象物体と光源とカメラとの関係

Fig. 4 Change in lighting condition and camera position.

に定義する。

$$f_c(\mathbf{X}, \mathbf{N}) = \begin{cases} c_i & \text{if } \max N_{c_i} \geq \theta_N \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

ここで、 $\theta_N$  は投票数に対する閾値である。

このような新たな光学的整合性を利用することにより、異なる光源環境下でも、3次元形状復元が実現できる。また、3次元形状の復元を行うと同時に物体表面の法線方向を推定することが可能となる。

### 3.2 6次元ボクセルカービングによる形状と法線の同時復元

次に、3.1節で述べた新たな光学的整合性を用いて、光源環境が変化する環境下における3次元形状と法線の同時復元を行う方法について述べる。このような復元をおこなう場合、3次元空間だけでなく、法線方向についても標準化した空間を用いて表現する必要がある。本研究では形状と法線の情報が互いに独立しているとし、6次元ボクセル空間を用いて形状と法線を表現する。いま、物体表面の法線方向  $\mathbf{N} = [n_1, n_2, n_3]^T$  を式 (5) に示すような極

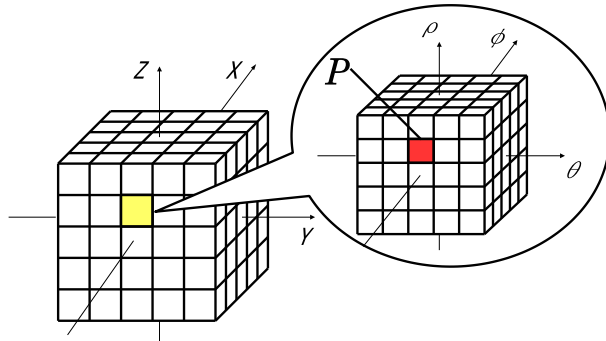


図 5 6次元ボクセル空間により表現する空間

Fig. 5 6-dimensional voxel space for representing shape and normal direction.

座標表現を用い,  $(\theta, \phi)$  の 2 要素で表すことにする.

$$\mathbf{N} = \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \theta \cos \phi \\ \sin \theta \sin \phi \\ \cos \theta \end{bmatrix} \quad (5)$$

このとき, 形状情報  $X, Y, Z$ , および物体情報  $\theta, \phi, \rho$  の 6 要素により以下の 6 次元空間を定義する.

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ \theta \\ \phi \\ \rho \end{bmatrix}, \mathbf{P} \in \mathbf{R}^6 \quad (6)$$

このような 6 次元空間  $\mathbf{R}^6$  を 6 次元ボクセル集合を用いて図 5 のように離散的に表現する. この空間を対象に式 (4) に示す光学的整合性に基づいて削る. この後に残されたボクセルは光学的に整合した形状と法線をもつ. これにより, 明示的な対応点を用いることなく形状と法線方向の同時復元が実現できる.

以上により, 異なる光源環境下で撮影した画像を協調して形状と法線の復元を行うことが

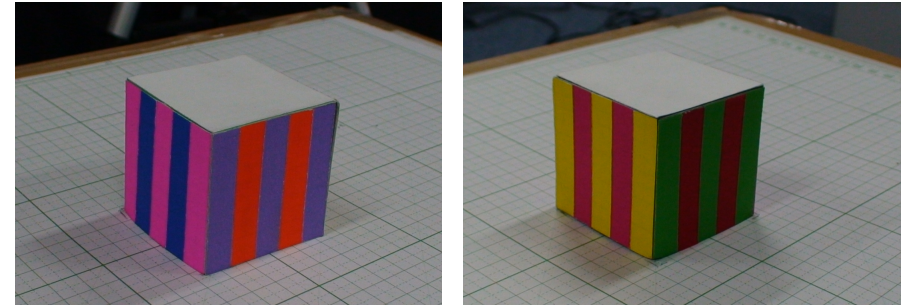


図 6 復元対象物体  
Fig. 6 Target object.

できる. 以降では実環境およびシミュレーション環境上で提案法を用いて形状と法線を復元した実験結果を示す.

## 4. 実験

### 4.1 実画像実験

まず, 実際に撮影された画像から形状・法線の同時復元をおこなった結果を示す. この実験では図 6 に示す物体をカメラで撮影し, 復元を行った. 撮影に用いたカメラはあらかじめ基準儀を撮影することにより校正を行った.

スペースカービングの対象空間は, 立方体を完全に包含する  $6.0\text{cm} \times 6.0\text{cm} \times 6.0\text{cm}$  の空間とし, この空間を  $31 \times 31 \times 31$  のボクセル集合により表現した. 法線方向  $\mathbf{N}$  については, 式 (5) で示すような極座標表示で表現し,  $\theta$  は  $0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$  の範囲で  $10^\circ$  間隔で,  $\phi$  は  $0^\circ \leq \phi < 360^\circ$  の範囲で  $10^\circ$  間隔でそれぞれサンプリングした. 反射係数  $\rho$  については,  $0 \sim 255$  までを 5 間隔でサンプリングした.

照明にはプロジェクタを用い, これを移動させることにより照明変動を表現した. プロジェクタは対象物体から十分に距離を取って設置することで無限遠光源を仮定できるようにした. 画像の撮影は, 暗室内で行い, 照明以外の光が対象物体に照射されないようにした. このようにしてプロジェクタの位置とカメラの位置を変えながら画像 24 枚を撮影した. 撮影された画像の例を図 7 に示す. これらの画像では, 視点の位置のみでなく光源の位置も変動していることがわかる.

これらの画像を用いて, 提案法により形状と法線の復元を行った. 形状の復元結果をを



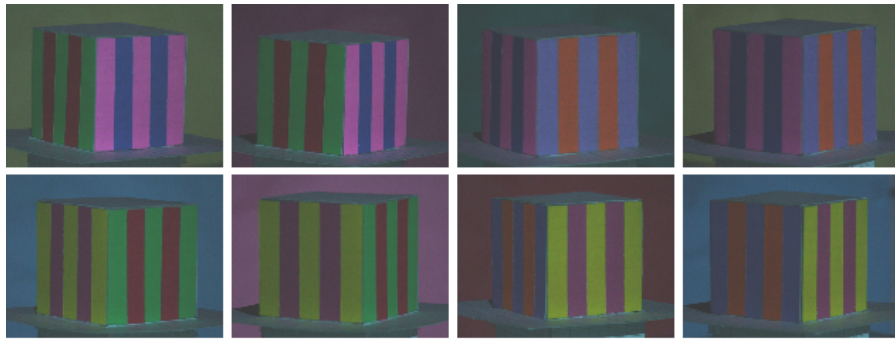


図 7 入力画像の例  
Fig. 7 Examples of input image.

8に、法線の復元結果を図9に示す。なお、復元された形状については復元結果より得られる反射率を用いて彩色してある。また、法線方向については復元された各ボクセルに対してニードルマップにより表現している。

図8を見ると、元の立方体の形が正しく復元されていることが確認できる。また、法線についても、各面に対して妥当な法線の復元が行えていることが確認できる。しかし、同一色の判定に用いる閾値をある程度大きめに設定したために、天面周辺には少々ボクセルが削られずに残ってしまった。これらを考慮しても、形状と法線に対しておおむね良好な復元が確認できた。これにより、提案手法により、照明条件が変動するシーンにおいても形状と法線が同時に復元可能であることが確認できた。

#### 4.2 シミュレーション実験

次に、計算機上で作成した画像を用いて従来法と提案法の性能を評価した結果を示す。復元対象物体は図10に示す立方体を用い、その周囲に12の異なる光源を配置した。また、それぞれの光源に対して光源を囲むように2台のカメラを配置した。このような環境下で、照明条件を変動させながら各カメラで撮影した画像を生成した。さらに、作成した画像の各画素の輝度に標準偏差 $\sigma = 2$ のガウシアンノイズを印加した。作成した画像の例を図10に示す。これらの画像サイズは $320 \times 240$ である。

スペースカーピングの対象空間は、対象物体の周辺を $31 \times 31 \times 31$ のボクセル空間で表現し、これを用いた。以上の環境において提案法と従来のスペースカーピング法により3次元形状(および法線)の復元を行った。提案法による復元結果と、従来のスペースカーピング

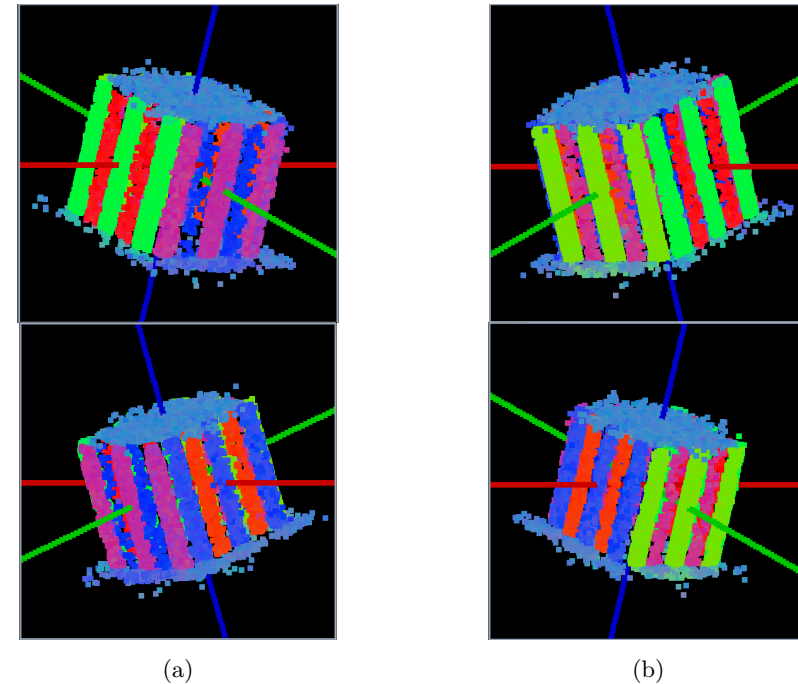


図 8 提案手法による形状復元結果  
Fig. 8 Shape recover result by proposed method.

法による復元結果を図12(a),(b)にそれぞれ示す。

復元結果画像において、提案法については復元された反射率による彩色を行っている。また、従来法については画像より得られた色を用いて彩色を行っている。まず従来法の結果を見ると、照明変動による輝度の変化により、観測色の整合性が取れず、過剰に空間が削られていることがわかる。また、正しい反射率を復元することができないため、彩色結果が照明変動の影響を受けてしまっている。一方、提案法での復元結果については、照明変動を考慮することにより従来法での過剰な削り取りが抑制できていることがわかる。また、推定された反射率により彩色を行うことで妥当な彩色が行えていることが確認できる。

次に、法線の復元結果を真横と真上から見たものを図11に示す。この図では、復元された法線をニードルマップにより表示してある。どちらの視点についても各面の法線方向と

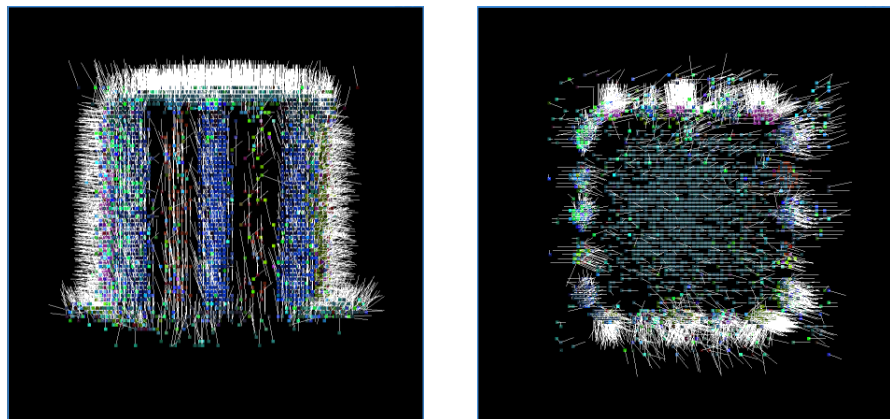
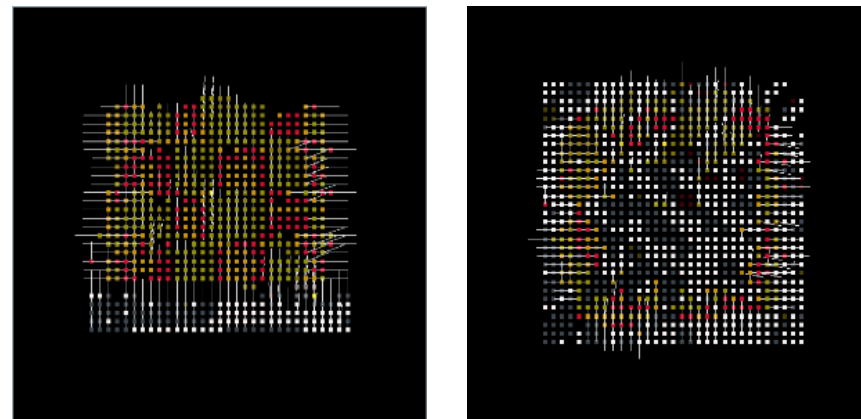


図 9 提案手法による法線復元結果  
Fig. 9 Estimated normal direction by proposed method.



(a) 真横 (b) 真上

図 11 法線の復元結果  
Fig. 11 Estimated normal direction .

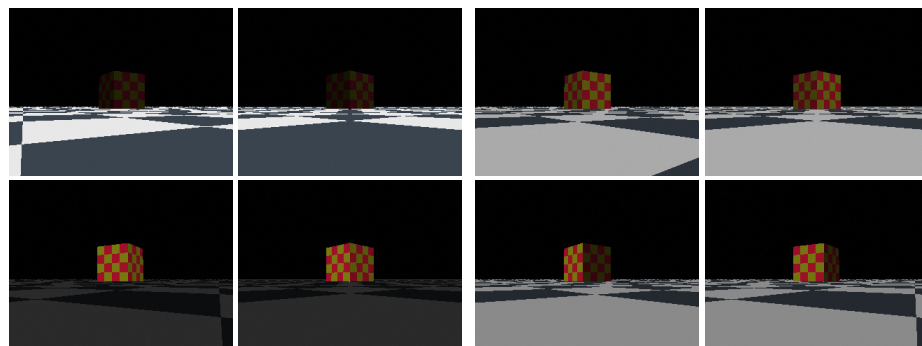


図 10 入力画像の例  
Fig.10 Examples of input image.

復元された法線方向がほぼ一致しており、正しく法線が復元されていることが確認できる。また、真の法線と復元された法線との平均誤差は  $10.83^\circ$  であり、妥当に法線復元が行えていることが確認できた。

## 5. ま と め

本研究では、異なる光源環境において撮影された画像からでも形状と法線が同時に復元可能な新たなスペースカービング法を提案した。そのために、光源情報と物体情報を考慮した光学的整合性を新たに定義し、これを用いて空間のカービングを行った。また、上記の光学的整合性を用いたカービングを行うために、物体情報を含む 6 次元のボクセル空間を定義し、これをカービングした。さらに、実環境とシミュレーション環境で提案法による物体の復元を行い、異なる光源環境下で撮影した画像から 3 次元形状および法線方向を復元可能であることを示した。今後の課題としては、光源位置が未知の場合への拡張やその他の反射モデルを用いた場合への適用が考えられる。

## 参 考 文 献

- 1) K.Kutulakos and S.Seitz: "A theory of shape by space carving", International Journal of Computer Vision, **38**, 3, pp. 199-218 (2000).
- 2) F.Sakaue, M.Takami and J.Sato: "Space time carving for shape and motion recovery", International Journal of Virtual Reality, **9**, 1, pp. 7-12 (2010).
- 3) 岡崎, 岡谷, 出口: "構造化光投影と照度差ステレオを組み合わせた自動校正による 3

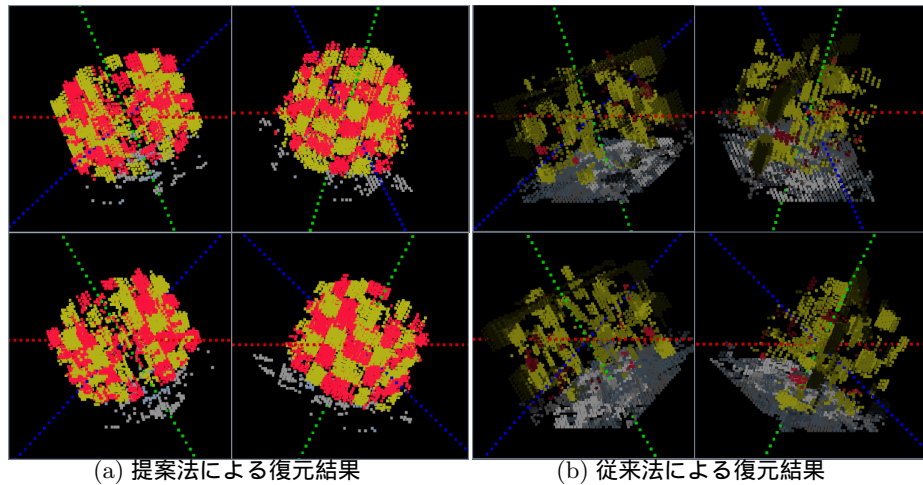


図 12 提案手法と従来法による形状復元結果

Fig. 12 Shape recovery result by (a)proposed method and (b)previous method.

次元物体計測手法：プロジェクタによる仮想反射特性再現の質感向上”，第 11 回画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2008) 予稿集, pp. 1100–1107 (2008).

- 4) R. Woodham: “Photometric stereo: A reflectance map technique for determining surface orientation from a single view”, Proc. SPIE 22nd Annual Technical Symp., Vol. 155, pp. 136–143 (1979).
- 5) G.Slabough, W.Culbertson, T.Malzburger, M.Stevens and R.Schafer: “Methods for volumetric reconstruction of visual scenes”, International Journal of Computer Vision, **57**, 3, pp. 179–199 (2004).
- 6) R.Zhang, P.-S. Tsai, J.E. Cryer and M.Shah: “Shape from shading: A survey”, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, **21**, 8, pp. 690–706 (1999).