

共面性情報を用いた影による自由曲面形状の復元手法

川崎 洋[†] 古川 亮^{††}

[†] 埼玉大学工学部 〒 338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255

^{††} 広島市立大学 情報科学部 〒 731-3194 広島県広島市安佐南区大塚東 3-4-1

E-mail: [†]kawasaki@cgv.ics.saitama-u.ac.jp, ^{††}ryo-f@cs.hiroshima-cu.ac.jp

あらまし シーンの形状復元に影を使う手法が、これまで提案されて来ている。影は、光のあるシーンにおいて常に存在するため、特殊な装置を用いることなく、屋外など、あらゆるシーンで観測できるという利点がある。特に、直線状物体の影であれば、その線上の点は同一平面上にある(共面である)ため、これを利用した手法が多く提案されている。これらの手法では、カメラの内部パラメータや光源位置、参照平面のキャリブレーションなどが必要である。このため、適用可能なシーンが限られており、これまで実際に利用されることはあまり無かった。もし、これらの値が未知であっても形状復元が可能であれば、利用範囲が大きくひろがりその利便性も増す。そこで、本論文では、直線物体の影が作る共面と、シーン中の平面の集合から、それら平面間に成り立つ関係式を導き出し解くことで、上記パラメータや参照平面が未知の場合において形状復元する手法を提案する。シミュレーションおよび実画像を用いた実験により、提案手法により正しく形状復元できることを示す。

キーワード 影からの形状復元, 共面性, 単眼カメラ, 自校正

Shape Reconstruction of Free-form Surface using Cast Shadow and Coplanarity Information

Hiroshi KAWASAKI[†] and Ryo FURUKAWA^{††}

[†] Faculty of Engineering, Saitama University Shimo-okubo, Sakura-ku, Saitama, Japan

^{††} Faculty of Information Sciences, Hiroshima City University Ozuka-higasi, Asaminami-ku, Hiroshima, Japan

E-mail: [†]kawasaki@cgv.ics.saitama-u.ac.jp, ^{††}ryo-f@cs.hiroshima-cu.ac.jp

Abstract To date, various techniques of scene shape reconstruction using shadows have been proposed. Shadows have the advantage that they can be applied to outdoor and various other scenes without the need to use special devices, since they exist wherever light is present. Previous shape reconstruction techniques using shadows require calibration of camera parameters, light source position, and reference plane. Since the application ranges are limited, the techniques have not been widely used. Under these circumstances, a technique capable of realizing reconstruction even when these values are unknown would be applicable to various scenes. For example, scenes can be reconstructed from views through stationary cameras positioned all over the world. This paper realizes such a technique. This technique reconstructs a 3D shape by solving expressions of inter-plane relations from visible planes in a scene and shadow planes created by shadows of straight objects or straight edges. We conducted an experiment using simulated and real images to verify correct shape reconstruction by the proposed technique.

Key words shape from cast shadow, coplanarity, 3D reconstruction, single camera, uncalibrated methods

1. はじめに

シーンの形状復元に影を使う手法がこれまで提案されて来ている [1], [2]. 影を使うことの利点として、影は、光源があれば常に存在するため、特殊な装置を用いることなくシーンの情報を取得できることが挙げられる。また、単眼カメラによる復元が

可能であることも、影を使う形状復元の利点の一つである。

最近、直線物による影を用いた効率的な形状復元手法が提案されている [3], [4]. これはアクティブスキャンにおいて光源の代わりに影を用いた手法であり、レーザの代わりに棒などを振って、固定された光源によって生じる影を用いて対象シーンをスキャンする手法である。この手法では、カメラの内部パラメー

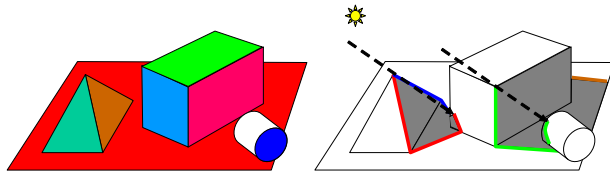


図1 シーン中の共面性情報:(左) Explicit な共面情報. 白以外のそれぞれの領域は共面な点集合. 白い領域は曲面のため共面ではない. (右) Implicit な共面情報. 色のついた線分は共面な点集合.

Fig. 1 Coplanarities in a scene:(left) Explicit coplanarities. Regions of each color except for white are a set of coplaner points. (right) Implicit coplanarities. Segmented lines of each color are a set of coplaner points.

た, 固定光源の位置, 参照平面のキャリブレーションが必要である. このため, 計測する前のキャリブレーションや平面設定など, 多くの準備や専門知識を必要とするため, 実際に利用されることはあまり無かった.

もし, これらのパラメータが未知でも計測可能であれば, 利用範囲や利便性が格段に広がると考えられる. 例えば, ネットワーク上で公開されている定点カメラで内部パラメータが未知であり, キャリブレーションや棒の移動など, 現地での作業が不可能な場合, 既存手法でこのような映像から形状復元することは出来ない. 一方, これらパラメータが未知でも形状復元可能であれば, 屋外で棒を動かす代わりに, 太陽の動きによる影の移動を一定時間撮影することで, 3次元形状を復元することができる.

そこで, 我々は, 光源の位置が分からず, カメラのキャリブレーションも行われていないシーンの画像から, 直線状物体の影を用いて形状復元する手法を提案する. 実際には, 我々の方法はさらに一般性が高く, 遮蔽物である直線状の物体の位置や, 光源の位置は, 各フレームで異なってもよく, 計測時には遮蔽物と光源を自由に動かしてよい.

2. 影からの形状復元

点群が同じ平面上にあるとき, それらは共面であるという. 平面上にテクスチャが無い場合でも, 平面の縁の点は共面である(図1左). このように平面構造物で構成されるシーン中には多くの共面性がある. 我々はこのように, 画像上で実際に観測される共面性を explicit な共面性と呼ぶ. また, このような共面性を持つ点の集合を, 以降 explicit 共面な点集合であると記述する.

一方で, 空間中には普段は陽には見えないが, ある特定な条件下において観測可能となる共面性が無数に存在している. 例えば, ラインレーザの光線で物体を照らした軌跡は共面な点の集合である. こうした共面性は, 通常は目に見えず, 光線があたったときのみ観測されるものである. 我々はこれを, implicit な共面性と呼ぶことにする. また, 本論文では, このようにして検出された共面な点群は implicit 共面であるといい, implicit 共面な点群をカメラで観測することで得られる曲線を implicit 共

面な曲線と呼ぶことにする. explicit な共面性が一般に物体の物理的なエッジ部分やテクスチャ領域など限られた部分でのみ観測されるのに対して, implicit な共面性は自由な曲面を含む物体表面の任意の部分で観測可能であるという特徴がある.

ところで, ラインレーザの照射と同様に, 直線物の影からも implicit な共面性の情報が得られる. 影は, 光のあるシーンにおいては常に存在するため, 影による implicit な共面性は特殊な装置を用いることなく, あらゆるシーンで観測可能である. 例えば晴天の屋外に直線状の縁を持つ建物が建っていれば, その影のエッジ上の点集合は implicit 共面である(図1右).

Sugihara [5] は, 線面に描かれた多面体を解釈するために, 多面体の1面を囲む線分が全て同一平面上にあること(共面性)を用いて, それらの平面の間に成り立つ関係式を導いた. これは, 少なくとも4自由度の解を持つ線型方程式である. この式は, 照度差ステレオ法と組み合わせた多面体の形状復元 [6] や, 折り紙解析 [7], 騙し絵の解析 [8], などの多くの研究に利用された. ところが, これら過去の研究は全て, 多面体シーンの解析に限定されたものであった. 最近, 上記関係式を implicit な共面性に適用することで曲面を含むシーンの再構成が可能であることが示された [9]. ところがこの手法は, レーザ平面の直交する特殊なレーザ装置を必要とし, また, カメラの内部パラメータが既知であるなど, 実際に利用するには制限の多い手法であった.

そこで, 本研究では, 直線状の棒に点光源をあてて出来る影からなる implicit な共面性と, シーン中の平面として観測される explicit な共面性を用いて, 形状を復元する手法を提案する. ここで共面性条件のみから得られる解は少なくとも4個の自由度を持つため [5] ユークリッドな形状を得るためには, 残る自由度を解消する必要がある(これを本論文ではユークリッド復元と呼ぶ). ユークリッド復元を行うには, 共面性以外の条件を使う必要がある. 多くの条件下において, 直線状の物体の影や, シーン中の平面からは, 共面性以外の情報が得られる. このような情報の例を図2(a)を用いて説明する.

(1) 地面が平面 π_0 であり, 直線状の物体 λ が地面と垂直に立っている場合を考える. それぞれの影に対応する平面を, π_1, π_2 とすると, $\lambda \perp \pi_0$ より, $\pi_0 \perp \pi_1, \pi_0 \perp \pi_2$ が成り立つ.

(2) 図で写った直方体 B の側面を, π_3, π_4, π_5 とする. B が直方体であるという情報があれば, π_3, π_4, π_5 は互いに直交する. また, B が地面に接していれば, π_3 と π_0 は並行である.

上記のような情報から得られる方程式から, 残された自由度に対応する変数を決定し, ユークリッド復元を実現できる. さらに十分な情報があれば, カメラパラメータも同時に推定することが出来る.

2.1 アルゴリズムの概要

提案手法の基本的な方針は, シーンから多くの共面な曲線群および領域群を取得し, それらの交点群から得られる多数の拘束

式を、連立方程式として数値的に解くことである。共面性の拘束式を方程式としたとき、方程式系の解は4自由度を持つため、ユークリッド解を得るためには、これにメトリック拘束を加える必要がある。以下に、アルゴリズムの概要を示し、次節で詳細を述べる。

(1) 共面性の抽出

影が投影されたシーンを固定カメラで連続撮影し、画像系列を得る。この系列の各画像から直線的な遮蔽物の影のエッジを検出することで、implicit な共面性を持つ曲線群を抽出することが出来る。また、シーンに平面領域があれば、それらの領域からサンプリングされた点は、explicit な共面性を持つ点集合とすることができる。また、以下2, 3の処理では、計算を効率的に行うために、幾つかの代表的なフレームを選択し、そこで抽出された、共面性を持つ曲線のみを用いるものとする。

(2) 共面性からの形状復元 (shape from coplanarity)

共面性の情報から多数の拘束式を得ることができる。これらの拘束式から得られる線形連立方程式を数値的に解くことで4自由度の解が得られる。この解の自由度は射影変換の部分群で表すことができる。本論文では、この解を射影解と呼ぶ。

(3) メトリックな条件によるユークリッド復元

シーン内に、直交性や平行性を持った構造物が写っていることがある。それら直交性や平行性などのメトリックな条件からは、共面性とは別の拘束式が得られるため、これを非線形解法により解くことで、射影解をユークリッド解にアップグレードすることが出来る。

(4) 密な形状復元

ここまでの2, 3の処理は、効率的な計算のため少ないフレームを用いた形状復元であったため、既に復元された3次元点を用いて、全ての画像列の共面な曲線の3次元復元を行うことで、シーンの密な形状復元を実現する。

3. 実 装

3.1 データの獲得

シーン中の共面性を、投影された影の境界を検出することで行う。密な形状復元を行うために、連続して撮影された画像系列から、影領域のエッジを抽出する。

影領域をシーン中から完全に自動抽出することは容易ではない。しかし、影の検出は長く研究されており、それら多くの手法を利用することが出来る [10], [11]。今回は対象が定点カメラにおける動画であることから、時空間解析を用いることで安定した影の検出を行うことができる。以下に処理の手順を述べる。

- (1) 定点カメラの映像を一定時間間隔でキャプチャし、フレーム間差分により背景領域の除去を行う。
- (2) 得られた画像列を積層し、時空間画像を作成する
- (3) 時空間画像に対して、領域拡張法によるセグメンテーションを3次元空間に適用し領域分割を行う (理想的には、これら領域は、「影」と「影以外」のボリュームからなる)

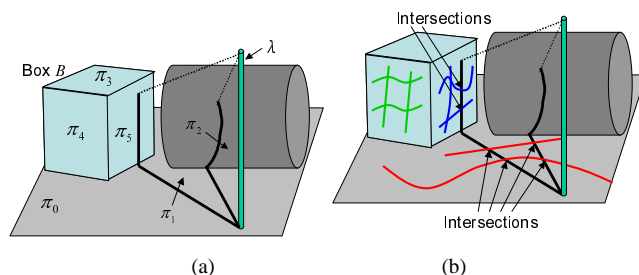


図2 (a) 共面情報とメトリックな拘束の例: $\lambda \perp \pi_0$ ならば $\pi_0 \perp \pi_1, \pi_0 \perp \pi_2$, B が直方体で π_0 の上にあるならば, $\pi_3 \perp \pi_4, \pi_4 \perp \pi_5, \pi_3 \perp \pi_5, \pi_3 \parallel \pi_0$ となる. (b) 平面上に描かれた Explicit 共面を表す直線と影として観測される Implicit 共面上の曲線とその交点
Fig.2 (a) Examples of metric constraints in a scene: $\pi_0 \perp \pi_1$ and $\pi_0 \perp \pi_2$ if $\lambda \perp \pi_0$. $\pi_3 \perp \pi_4, \pi_4 \perp \pi_5, \pi_3 \perp \pi_5$, and $\pi_3 \parallel \pi_0$ if box B is rectangular and on π_0 . (b) detection of intersections between planes in a scene and coplaner curves observed as shadow edges.

(4) 分割された領域中には、ノイズなどの影響により「影」以外の領域が多数含まれるため、閾値以下の領域を削除した後、影にあたる領域をインタラクティブに選択する

(5) その領域を各フレームに再分割し、各フレーム上でエッジを抽出する

上記手法により得られた、影の境界が通る平面 (以下このような平面を影平面と呼ぶ) と対象物体との交わりが、implicit 共面な曲線群として検出される。

また、シーン中に平面がある場合、この平面に対応する領域上の全ての点は、共面である。実際には、領域上の全ての点を抽出する必要は無く、図2(b)のように、その平面を通る implicit 共面な曲線と交点を持つように、その領域上に手動で直線や曲線を適当に設定すれば良い。

得られた交点は、それぞれ、複数の平面上にある。こうして得られた交点集合の共面性情報を用いて、次節で述べる手法により3次元復元及び自己校正を実現する。

3.2 射影復元

影平面およびシーン中の平面集合を考え、 j 番目の平面を π_j とする。カメラ座標系において、平面 π_j を以下の方程式で表す。

$$a_j x + b_j y + c_j z + 1 = 0 \quad (1)$$

複数の平面上に属する点の集合を考え、その i 番目の要素を ξ_i とする。 ξ_i の画像平面上での位置を (u_i, v_i) とする。 π_j と π_k 交点 ξ_i の透視投影が、画像平面上の点 (u_i, v_i) であるとする。カメラパラメータを、焦点距離を f 、画素の一边の長さを p として、 $\alpha = p/f$ で表し、 $a_j^* = \alpha a_j, b_j^* = \alpha b_j$, とすると、 ξ_i へのカメラ座標系での視線方向は、 $(\alpha u_i, \alpha v_i, -1)$ である。これより、

$$a_j(-\alpha u_i z_i) + b_j(-\alpha v_i z_i) + c_j(z_i) + 1 = 0 \quad (2)$$

である。ただし z_i は、 ξ_i の z 座標である。この式の両辺を z_i で割り、さらに $t_i = 1/z_i, a_j^* = \alpha a_j, b_j^* = \alpha b_j$, で置き換えると、

$$-u_i a_j^* - v_i b_j^* + c_j + t_i = 0 \quad (3)$$

が得られる。 ξ_i は π_k 上の点でもあるので、

$$-u_i a_k^* - v_i b_k^* + c_k + t_i = 0 \quad (4)$$

である。式 (3) と式 (4) から t_i を消去すると、交点における、

$$-u_i a_j^* + u_i a_k^* - v_i b_j^* + v_i b_k^* + c_j - c_k = 0 \quad (5)$$

という $a_j^*, b_j^*, c_j, a_k^*, b_k^*, c_k$ を変数とする連立線形斉次方程式が得られる。ここで、交点の数を M 、平面の数を N とすると、上記の連立方程式は $M \times 3N$ の係数行列 \mathbf{L} と、 $3N$ 次元の解ベクトル $\mathbf{x} = (a_0^*, b_0^*, c_0, a_1^*, b_1^*, c_1, \dots)^\top$ を用いて

$$\mathbf{L}\mathbf{x} = \mathbf{0} \quad (6)$$

と表すことができる。この問題を数値的に解くために、特異値分解を用いることができる。 \mathbf{L} の特異値分解を $\mathbf{L} = \mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^\top$ とする。ここで、 \mathbf{U} は M 次、 \mathbf{V} は $3N$ 次の直交行列であり、 $\mathbf{\Sigma}$ は $3N * M$ 行列で、 \mathbf{L} の i 番目の大きさの特異値を λ_i で表すとき、 $\Sigma_{i,i} = \lambda_i, \Sigma_{i,j} = 0$ (ただし、 $i \neq j$) である。文献 [9] より $\text{Rank}(\mathbf{L}) = 3N - 4$ であることが分かっているため、

$$\begin{aligned} \Sigma_{i,i} &\neq 0 (i \leq 3N - 4) \\ \Sigma_{i,i} &= 0 (i > 3N - 4) \end{aligned} \quad (7)$$

であり、これを式 (6) に代入すると、

$$\mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^\top \mathbf{x} = \mathbf{0} \quad (8)$$

であることと、 $\mathbf{\Sigma}$ の形から、

$$\mathbf{V}^\top \mathbf{x} = (0 \ 0 \ \dots \ 0 \ f_1 \ f_2 \ f_3 \ f_4)^\top \quad (9)$$

が得られる。ただし、 f_1, \dots, f_4 は、4 個の自由な変数である。これより解 \mathbf{x} は、

$$\begin{aligned} \mathbf{f} &= (0 \ 0 \ \dots \ 0 \ f_1 \ f_2 \ f_3 \ f_4)^\top, \\ \mathbf{x} &= \mathbf{V}\mathbf{f} \end{aligned} \quad (10)$$

となる。これは、平面のパラメータ空間の中の、4 次元部分空間である。射影復元解の自由度が 4 であることは、解にスケールリングの 1 自由度があることと、すべてが同一の平面であるという、3 自由度を持った自明な解が存在することに対応している。実際の問題では誤差のために条件 (7) が完全には成り立たない。その場合でも、上の解は、方程式 $\mathbf{L}\mathbf{x} = \mathbf{0}$ について、 $\max_{\mathbf{x} \in V} (\|\mathbf{L}\mathbf{x}\| / \|\mathbf{x}\|)$ を最小化するような 4 次元部分空間 V になるので、解法はそのままよい。

3.3 ユークリッド復元

前節で得られた射影復元は、 f_1, \dots, f_4 による 4 自由度を持つ。これにはスケールリングの自由度が含まれる。また、未知の内部パラメータ α が復元解に含まれる。これらの自由度は共面性の条件のみでは解消できない。ただし、問題を適用する応用例によっては、追加の制約条件があり、それによって与えられる独

立した拘束数分だけ解の自由度を解消することが出来る。

例として、平面 π_s と平面 π_t の直交性が既知情報として与えられているとする。平面 π_s の単位法線ベクトルを、変数ベクトル \mathbf{f} の関数として、 $\mathbf{n}_s(\mathbf{f}, \alpha) = N((a_s(\mathbf{f}, \alpha) \ b_s(\mathbf{f}, \alpha) - 1)^\top)$ とおく。ただし $N()$ は、ベクトルの正規化を表すとする。すると、直交性の条件は次のように記述できる。

$$\{(\mathbf{n}_s(\mathbf{f}))^\top \{\mathbf{n}_t(\mathbf{f})\} = 0 \quad (11)$$

上記のような非線形な拘束式を解くための方法としては、 \mathbf{f} に関する非線形最適化を利用する。本研究では、非線形最適化を、Levenberg-Marquardt 法を用いて実装した。非線形最適化を実行する場合、初期値の決定の仕方が問題になる。本報告の実験では、適当な平面パラメータから、線形方程式の解ベクトル \mathbf{x}_f を作成し、これから $\mathbf{f}_f = \mathbf{V}^\top \mathbf{x}_f$ とし、 \mathbf{f}_f の最後の 4 個の要素を f_1, \dots, f_4 の初期値とすることで自由変数を決定した。これは、平面パラメータ \mathbf{x} の空間 ($3N$ 次元) から、線形方程式の解空間 (4 次元) に対し、 \mathbf{x}_f と \mathbf{f}_f のユークリッド距離が最小になるように射影を行うことに相当する。この方法により、任意の平面パラメータの組み合わせから、共面性の条件の満たされた平面パラメータを得ることが出来る。

3.4 密な形状復元

さらに、この再構成結果をもとにして、画像系列の全ての画像における 3 次元復元を行うことで密な形状復元を実現できる。以下に処理の手順を述べる。まず、既に推定された影平面について、対応する implicit 共面な曲線上の全ての点を 3 次元復元する。次に、時空間画像におけるセグメンテーションにより、画像系列全ての画像について影による implicit 共面な曲線 (以下影曲線と呼ぶ) が求まっていることから、それらの曲線と既に 3 次元復元された曲線との交点を複数検出する。こうして得られた複数の 3 次元点を主成分分析により平面近似することで影平面を推定できる。影平面が得られればその曲線上の全ての点の 3 次元点を復元できる。これを繰り返すことで、全ての影曲線の形状復元が実現できる。

4. 実 験

本報告で述べた手法を実装し、その有効性を確かめるための実験を、CG により生成したデータと、実データについて行った。この時、スケールリングの自由度を残したユークリッド復元を実現するためのメトリックな拘束として、シーン中にある既知の情報を用いた。これは大きく、(1) 直方体の角などにある直角成分と、(2) 影が 1 つの棒から投影されている時に、対応する全ての影平面がその棒で交わる、という 2 つである。

4.1 シミュレーションデータ

図 3(a),(b) に CG でデータを生成したときのデータを示す。このデータは、平面状の床の上にパニーの形状データと鉛直なボールの 3 つのオブジェクトが置いてあるシーンとなっている。こ

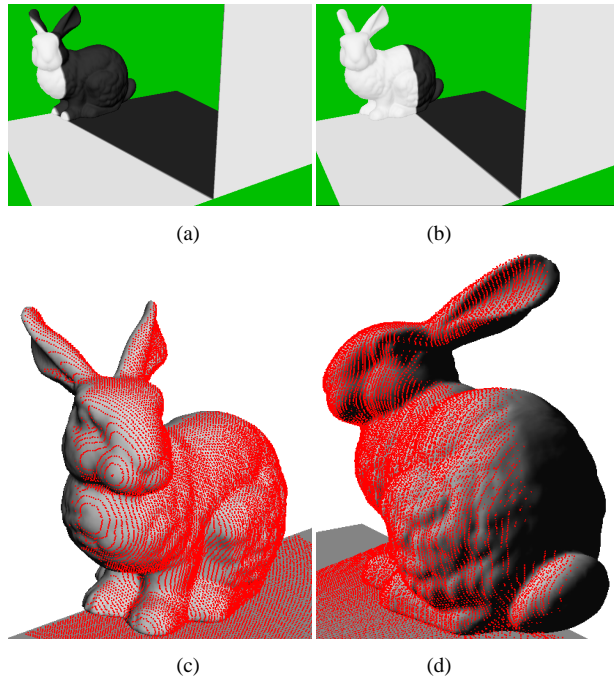


図3 シミュレーションデータによる復元:(a)(b)入力画像(c)(d)復元結果(赤い点群)。シェーディングされたモデルは正解形状
 Fig. 3 Reconstruction of simulation data:(a)(b) original images with shadows and (c)(d) reconstruction results. In the results, the shaded surfaces are ground truth and the red points are reconstructed points.

のシーンの手前側で光源が動くことで、シーンの奥の方向に向かって出来ている影が動く。

この影による曲線を検出して拘束式を作る。160枚の画像が使用され、160個の影平面と床面とが復元の対象となった。影平面の非線形最適化の初期値を、光源が手前側の左右どちらに存在しているかということから与えた。この例では、影平面については全て右側の光源から生成されるので、 $z = x - 1.0$ という初期値を与え、床面の初期値は $z = -y - 1.0$ とした。

これらの条件の下で、ユークリッド復元を行った。3.3節で述べたように、この問題設定ではスケージングの自由度は解消不能なので、4自由度からのアップグレードは3変数の非線形最適化問題として解を求めることを行った。ユークリッド復元のための拘束としては、ボールが床面と垂直であることから、影平面のうちの2個についての床面との直交条件と、床面の角の一つの直交性を用いた。再構成結果を正解と比較するために、正解位置を利用して、カメラからの平均距離が正解に等しくなるようにスケージングを施した。結果として得た曲線と、正解形状にシェーディングを施したものを図3(c)(d)に示す。復元結果は正解形状に非常に近く、ほぼ正しい形状が復元された。

4.2 実シーン(屋内)

次に、室内で、光源としてプロジェクタを用いて、実際のシーンについて実験を行った。カメラの内部パラメータは未知である。計測手順として、まず、対象物体にビデオカメラを向け、光源であるプロジェクタおよび、影を作る棒状の物体をそれぞれ自由に動かしながら、対象物体に出来る影を撮影し、画像系

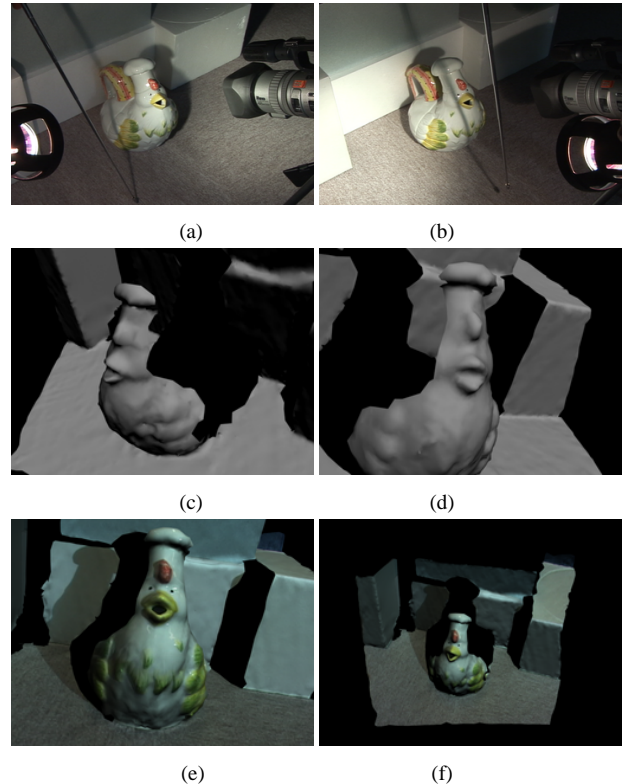


図4 室内における形状復元:(a)(b)入力画像、(c)(d)復元されたモデル(シェーディング表示)、(e)(f)テクスチャマップされた復元モデル。
 Fig. 4 Reconstruction of an indoor real scene: (a)(b) the capturing scenes, (c)(d) the shaded reconstructed model, and (e)(f) the textured reconstructed model.

列を得た。続いて、この画像系列から、適当な画像を複数枚選択し、それらの画像上で影が作る曲線を検出し、それら曲線どうしの交点から提案手法により3次元再構成を行った。

実験では、7枚の画像を選択し、シーンの3次元復元を行った。復元に用いた対象物体、入力画像と検出された曲線、再構成結果を図4(a)~(f)に示す。密な形状がテクスチャつきで正しく復元できていることが分かる。3D photographyとは異なり、光源も影を作る棒も自由に動かしても正しく形状復元できており、これは提案手法の大きなアドバンテージである。

さらに、提案手法の精度を検証するため、図5に示される箱と円筒状の物体を、提案手法および空間コード化法[12]の2つの手法で計測し、空間コード化法による形状を正解とし比較を行った。図5(a)および(b)に提案手法による計測シーンを、(c)(d)に計測結果を示す。また、(e)(f)に、提案手法により復元された結果(シェーディング表示)に、正解形状(ワイヤフレーム表示)を重ねて示した。提案手法はスケージングが不定のため、正解形状との比較にあたり、平均の深さ値が一致するようにスケージングを施した。図5(e)(f)より、提案手法による復元結果は正解形状に対して少しずれが見られるものの正しく形状復元できていることが分かる。また、RMS誤差は、平均デプス値を1として 1.80×10^{-2} であった。

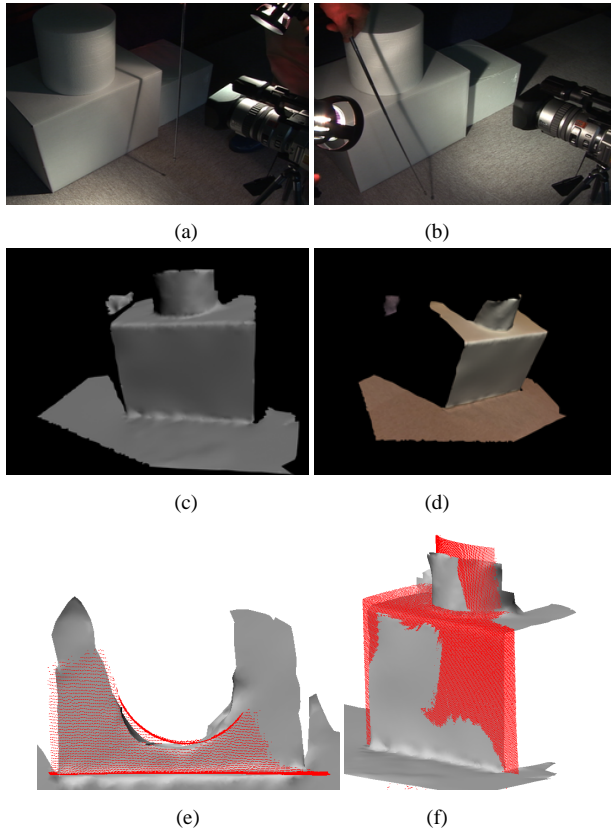


図5 屋内シーンによる形状復元結果及び正解形状との比較：(a)(b)撮影画像，(c)(d)復元されたモデル，(e)(f)推定結果（シェーディングモデル）および正解形状（赤のワイヤフレーム）。

Fig.5 Reconstruction and evaluation of an indoor real scene: (a)(b) the capturing scenes. (c)(d) the reconstructed model, and (e)(f) the reconstructed model displayed with the ground truth data (shaded model: reconstructed model, red points: ground truth).

4.3 実シーン（屋外）

最後に、屋外に設置された内部パラメータ未知な定点カメラによる映像からの形状復元を行った。これは、屋外に設置された定点カメラから転送されてくる画像を一定時間取り込み、そのシーンに写っている影から提案手法により形状復元を行うものである。シーン内には、共面性を持たない多くの影も存在しており、完全な影の自動抽出は困難ではあるが、提案した時空間画像処理手法により、共面性を持つ影のみを簡単な操作でインタラクティブに抽出することが出来る。用いたシーン画像の例と、再構成結果を図6(a)~(e)に示す。影抽出段階で細かいディテールを削除してしまうため、滑らかな形状となっているが、提案手法により、定点カメラに写ったシーンが正しく形状復元できていることが分かる。

5. 結 論

本論文では、光源の位置が固定されておらず未知であり、またカメラが未校正な場合であっても、シーン内に写る直線物体の影を複数用いて、形状復元する手法を提案した。これは、過去の線画研究において、平面同士の交線から、共面の性質を利用して多面体の形状解析の手法として提案されたものを、一般の

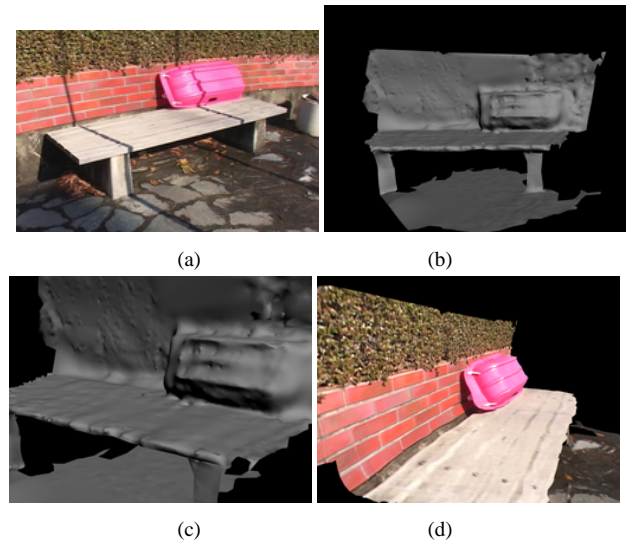


図6 屋外シーンにおける形状復元結果：(a)撮影画像例，(b)(c)復元結果 (d)テクスチャマップされた復元モデル。

Fig.6 Results of outdoor scene:(a) Captured images from a fixed camera, (b)(c) the shaded and (d) the textured reconstructed scene.

曲面に拡張した手法となっている。その際、共面性のみによる復元では4自由度の射影解しか得られないため、これにメトリックな拘束を加えユークリッド解にアップグレードし、同時にカメラの内部パラメータの推定を実現する。また、影領域をシーンから安定して抽出するための時空間画像解析手法もあわせて提案した。提案手法を実装し、シミュレーションおよび実画像を用いて実験を行ったところ、正しく密な形状復元ができた。

文 献

- [1] M. Hatzitheodorou and J. Kender: "An optimal algorithm for the derivation of shape from shadows", CVPR, pp. 486-491 (1988).
- [2] M. Daum and G. Dudek: "On 3-d surface reconstruction using shape from shadows", CVPR, pp. 461-468 (1998).
- [3] J. Y. Bouguet and P. Perona: "3D photography on your desk", ICCV, pp. 129-149 (1998).
- [4] J.-Y. Bouguet, M. Weber and P. Perona: "What do planar shadows tell about scene geometry?", CVPR, **01**, pp. 514-520 (1999).
- [5] K. Sugihara: "An algebraic approach to shape-from-image problems", Artificial Intelligence, **23**, pp. 59-95 (1984).
- [6] I. Shimshoni and J. Ponce: "Recovering the shape of polyhedra using line-drawing analysis and complex reflectance models", CVIU, **65**, 2, pp. 296-310 (1997).
- [7] P. Parodi: "The complexity of understanding line drawings of origami scenes", IJCV, **18**, 2, pp. 139-170 (1996).
- [8] K. Sugihara: "Three-dimensional realization of anomalous pictures—an application of picture interpretation theory to toy design.", Pattern Recognition, **30**, 7, pp. 1061-1067 (1997).
- [9] 古川, 川崎: "共面性とメトリックな制約を用いた3次元再構成", CVIM-156, pp. 85-92 (2006).
- [10] C. Jiang and M. O. Ward: "Shadow segmentation and classification in a constrained environment", CVGIP: Image Underst., **59**, 2, pp. 213-225 (1994).
- [11] E. Salvador, A. Cavallaro and T. Ebrahimi: "Cast shadow segmentation using invariant color features", Comput. Vis. Image Underst., **95**, 2, pp. 238-259 (2004).
- [12] K. Sato and S. Inokuchi: "Range-imaging system utilizing nematic liquid crystal mask", Proc. of FirstICCV, pp. 657-661 (1987).