

## 共面性情報および幾何学的条件を用いた 影からの3次元形状復元

古川 亮<sup>†1</sup> 川崎 洋<sup>†2</sup>

シーンの形状復元に影を使う手法が、これまでに提案されて来た。影は、光のあるシーンにおいてつねに存在するため、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、直線状のエッジを含む物体から対象シーンの表面に影が投影されると、エッジによって作られる影の境界線（以下影曲線）上の点は、エッジと光源を含む単一の平面上にある（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。しかし、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ため、適用可能なシーンに限られており、これまで実際に利用されることはあまりなかった。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、利用範囲が広がりその利便性も増す。そこで、本論文では、影曲線を含む平面と、シーン中の平面の集合について、平面間に成り立つ関係式を導き、連立方程式として解くことで、内部パラメータが未知、あるいは既知の平面（参照平面）がない場合でも形状復元を実現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が復元されることを示す。

### Shape Reconstruction of Scene Surfaces from Cast Shadows Using Coplanarity Information and Geometric Constraints

RYO FURUKAWA<sup>†1</sup> and HIROSHI KAWASAKI<sup>†2</sup>

To date, various techniques for scene shape reconstruction using shadows have been proposed. Shadows have the advantage that they can be used in outdoor and various other scenes without using special devices, since they exist wherever light is present. When an object with a straight edge casts a shadow on a scene, the points on the shadow boundary (shadow curve) are on a single plane that includes the light source and the edge (i.e. the points are coplaner). Previous shape reconstruction techniques that use such shadow boundaries require calibration of camera parameters, knowledge of light source position, and

a reference plane. Since their application ranges are limited, such techniques have not been widely used. Hence, a technique capable of realizing reconstruction even when some of the values are unknown would be applicable to various scenes. This paper realizes such a technique. This technique reconstructs a 3D shape by solving the simultaneous equations of planer regions in the scene and the planes that include shadow curves. We conducted an experiment using simulated and real images to verify the correct shape reconstruction by the proposed technique.

#### 1. はじめに

シーンの形状復元に影を使う手法は、これまで多く提案されて来た<sup>1),2)</sup>。影を使うことの利点として、影は光源があればつねに存在するため、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あげられる。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1つである。

最近、直線状のエッジを持つ物体から対象シーンに投影される影を用いた効率的な形状復元手法が提案されている<sup>3),4)</sup>。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タ、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参照平面の設置など、多くの準備や専門知識を必要とするため、実際には利用することが難しかった。

もし、これらのパラメータが未知でも形状復元が可能な手法であれば、利用範囲や利便性が大きく広がると考えられる。たとえば、ネットワーク上で公開されている内部パラメータ未知の定点カメラにより撮影される映像では、現地でのキャリブレーション処理（内部パラメータ、光源位置、基準平面の測定）が不可能なため、既存手法では形状復元することができないのに対し、キャリブレーションが不要であれば、棒を動かす代わりに太陽の動きによる自然な影の移動を利用して、3次元形状を復元することができる。

そこで、我々は、光源位置、カメラの内部パラメータが未知であり、既知の平面もない

<sup>†1</sup> 広島市立大学  
Hiroshima City University

<sup>†2</sup> 埼玉大学  
Saitama University

シーンの画像から、物体の直線状のエッジにより生成される影を用いて形状復元を行う手法を提案する。本論文では、遮蔽物と光源のうちの少なくとも一方は空間中を動いているものと仮定する。これは、遮蔽物と光源が両方動いている場合も含む。カメラモデルとしては、レンズ歪みのない、最大5パラメータ（焦点距離、アスペクト比、スキュー、画像中心の2次元座標）のカメラを仮定する。

## 2. 影からの形状復元

3次元シーンには、様々な形で、平面が現れる。たとえば、図1(a)のように、平面、円柱、直方体を組み合わせた3次元シーンがあるとすると、図においてハッチングで表された表面(A~E)はそれぞれ平面状の領域であり、各領域は単一の平面に含まれる。

また、1つの点光源によってシーンが照らされているとき、光源から見て手前の物体（前景物体）は背後の物体（背景物体）に影を落とす。光源を通り前景物体に接する直線全体がなす曲面は、背景物体表面との交線としてこの影の境界を生成する。特に、図1(b), (c)のように、前景物体が直線状のエッジ（以下「直線状エッジ」）を持つ場合、この曲面は平面となる。本論文では、これを「影境界生成平面」と呼び、またこのとき生成された影の境界を「影曲線」と称する。図1(b)は、前景物体が対象シーンとは別にある場合の例であり、図1(c)は、対象シーンの一部の物体が前景物体になっている場合の例である。

点の集合が同一平面上にあるとき、それらは「共面である」という。上の例であげた、3次元シーン中の平面は、画像計測において、「共面な点集合の像」として観測されることが多い。たとえば、図1(a)のシーンにおいて、A~Eの各領域は、3次元シーン中の共面な点集合である。以下、このような3次元点集合を、シーン中の「平面領域」と呼ぶ。シーンを撮影した画像上の「平面領域の像」は2次元領域となる。また、図1(b), (c)のシーンを撮影した画像上の「影曲線の像」は2次元曲線である（「影曲線」は3次元曲線）。平面領域の像と、影曲線の像は、どちらも共面な点集合の像である。

図1(a)の例のように、シーン中の平面領域によって生じる共面性を、すぐ後に述べるimplicitな共面性と対照させて「explicitな共面性」と呼び、このような共面性を持つ点の集合を、「explicit共面な」点集合であると記述する。平面領域は、explicit共面な点集合である。また、explicit共面な点集合は単一の平面に含まれる。この平面を「explicitな平面」と呼ぶことにする。平面領域は、explicitな平面の一部であるが、平面領域とexplicitな平面を区別する必要がない場合、これらを同一視する場合もある。

これに対し、図1(b), (c)の例であげた共面性は、シーンに光を照射して影が生成された

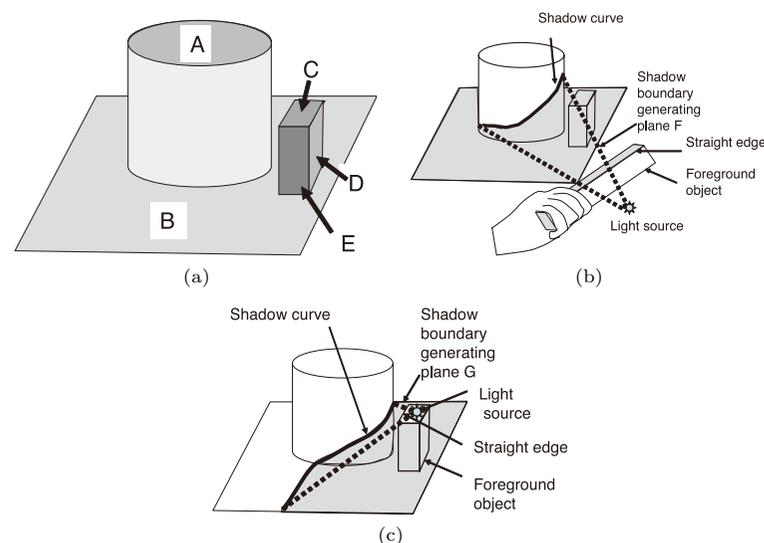


図1 3次元シーン中に観測される平面の例：(a) シーン中の平面領域、(b), (c) 影曲線  
Fig.1 Planes in the scene: (a) Planer regions. (b) and (c) Shadow curves.

ときに初めて観測される。このことから、これを「implicitな共面性」と呼び、さらに、影曲線などとして観測された共面な点群は、「implicit共面な」点群ということにする。また、影曲線を構成する点集合はimplicit共面であるが、このとき影曲線そのものもimplicit共面であるということにする。また、implicit共面な点集合は単一の平面に含まれる。この平面を「implicitな平面」と呼ぶ。影境界生成平面はimplicitな平面でもある。explicitな共面性は、シーン中の平面領域についてのみ観測される。これに対して、implicitな共面性は、シーンの表面が曲面である場合あるいは不連続を含む場合であっても観測可能である。

Sugihara<sup>5)</sup>は、線画に描かれた多面体を解釈するために、多面体の1面を囲む線分の共面性を用いて、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形方程式である。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<sup>6)</sup>や、折り紙解析<sup>7)</sup>、騙し絵の解析<sup>8)</sup>などの研究に利用された。ところが、これら過去の研究はすべて、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<sup>9)</sup>。ところがこの手法は、2個のラインレーザ装置が、照射されるレーザが通過する

2枚の平面が直交するように取り付けられた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ことが必要であるなど、実際に利用するには制限が多い手法であった。

そこで、本研究では、影曲線として観測される implicit な共面性と、平面領域として観測される 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、カメラパラメータが既知である場合であっても、少なくとも4個の自由度を持つことが知られているため<sup>5),9)</sup>、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。本論文では、これをユークリッド復元と呼ぶ。複数画像の対応点からの復元におけるユークリッド復元とは異なり、本論文におけるユークリッド復元は、カメラのすべての内部パラメータが既知である場合にも必要である。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。多くのシーンにおいて、explicit あるいは implicit な平面には、共面性以外にも幾何学的な関係が成り立つ。このようなシーンの例を図2(a)を用いて説明する。

- (1) 地面 (explicit な平面) が  $\pi_0$  であり、 $\pi_0$  と垂直な直線状エッジ  $\lambda$  を持つ前景物体が存在する場合を考える。異なる光源位置で影を投影しながらこのシーンを2回撮影し、それぞれの光源位置での影境界生成平面 (implicit な平面) を  $\pi_1, \pi_2$  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) 図の直方体  $B$  の側面を、 $\pi_3, \pi_4, \pi_5$  とする (すべて explicit な平面である)。 $B$  が直方体であるという情報があれば、 $\pi_3, \pi_4, \pi_5$  は互いに直交する。また、 $B$  が地面に接していれば、 $\pi_3$  と  $\pi_0$  は平行である。

上記のような情報から得られる方程式を使って、共面性条件から得られる解に残された自由度を解消することで、ユークリッド復元を実現することができる。また、カメラパラメータが未知である場合には、解の不定性には、上記の4自由度のほかにカメラパラメータによる自由度も加わる。この場合にも、十分な数の独立な情報があれば、カメラパラメータを同時に推定することができる。本論文では、上記の4自由度の解消とカメラパラメータの推定を同時に行う処理もユークリッド復元と呼ぶことにする。以降ではこのようなユークリッド復元に利用可能な条件をメトリック拘束と呼ぶものとする。

### 2.1 アルゴリズムの概要

まず本研究の3次元復元手法における前提条件を述べる。これは、以下のとおりである。

- 静止したシーンが、単一の固定カメラから撮影される。カメラの内部パラメータは、既知の場合も、未知の場合もある。ただし、レンズ歪みは考慮しないものとする。

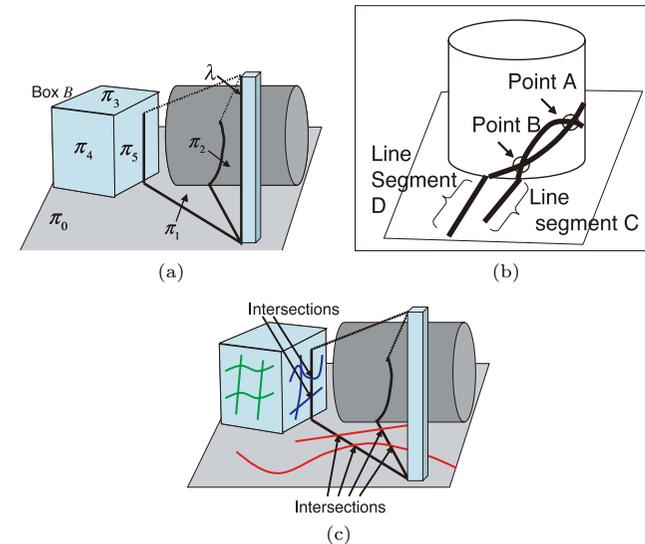


図2 (a) 共面情報とメトリックな拘束の例:  $\lambda \perp \pi_0$  ならば  $\pi_0 \perp \pi_1, \pi_0 \perp \pi_2$ ,  $B$  が直方体で  $\pi_0$  の上にあるならば、 $\pi_3 \perp \pi_4, \pi_4 \perp \pi_5, \pi_3 \perp \pi_5, \pi_3 \parallel \pi_0$  となる。(b) 平面の共有点の例: 点  $A, B$  は2枚の implicit な平面の共有点であり、線分  $C, D$  は explicit な平面と implicit な平面の共有点である。(c) 平面領域と影曲線の共有点の検出

Fig. 2 (a) Examples of metric constraints in the 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 is on  $\pi_0$ . (b) Examples of shared points between planes: Each of points  $A$  and  $B$  is a shared point between two implicit planes. Each of line segments  $C$  and  $D$  is a set of shared points between an implicit plane and an explicit plane. (c) Detection of shared points between planer regions and shadow curves.

- 撮影された画像には、影曲線や、平面領域が写っている。
- 影曲線を生じさせるための直線状エッジを持つ前景物体は、図1(b)のようにシーンの外部にある物体である場合も、図1(c)のようにシーンに含まれる静止した物体である場合もある。
- 画像の撮影は、投影される影曲線が異なるように撮影条件 (光源と前景物体の位置) を変えながら、複数回行う。
- シーン中の平面領域を、explicit な平面として復元に利用する場合、その平面領域の画像上での像が既知であるとする。たとえば、図2(a)の例においては、平面領域  $\pi_0, \pi_3, \pi_4, \pi_5$  の像 (それぞれ2次元領域) が既知とする。

- シーン中には、いくつかの幾何学的な既知情報があり、それらは implicit あるいは explicit な平面によって記述することが可能であるとす。こうした情報の例としては、たとえば、上記の平面どうしの直交性や、平行性などがある。

本論文では、上記の前提条件の下で、implicit あるいは explicit な平面を満たす制約条件から、それらの平面位置を推定し、3次元復元を行う。このために、まず画像からそれらの平面の共有点の像を複数抽出する。共有点は、図2(b)の点A, Bのように、影曲線どうしの交点である場合も、同図の線分C, Dのように、影曲線と平面領域とで共有される線分である場合もある。それらの像から得られる拘束条件を、平面のパラメータを変数とする連立方程式として数値的に解く。この連立方程式の解は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て解の自由度を解消する必要がある。各平面の解が求められると、シーン中の影曲線の3次元形状が、光切断法と同様な方法で求められる。また、平面領域の形状は、これを含む explicit な平面から容易に求められる。以下に、アルゴリズムの概要を示し、次章で詳細を述べる。

#### (1) 共面な点集合の像の抽出

太陽などの自然な動きや、手動での光源や前景物体の移動などにより、影曲線が動くシーンを固定カメラで撮影して連続画像を得る。この連続画像の各フレームから影曲線の像を抽出する。また、シーンに平面領域がある場合には、その像である2次元領域(前提により既知である)から点の集合をサンプリングし、explicit 共面な点集合の像として利用する。以下、形状復元を行ううえでは、implicit 共面な点集合(影曲線)の像と、explicit 共面な点集合(平面領域からサンプリングされた点集合)の像を特に区別せず、共面性情報として利用する。また、以下(2),(3)の処理では、計算を効率的に行うために、いくつかの代表的なフレームを選択し、そこで抽出された、曲線および領域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)

シーンの画像から、2枚以上の explicit または implicit な平面の共有点の像を抽出する。共有点の位置から、その点を共有する平面に関する拘束式を得ることができる。十分な数の拘束式があり、さらに平面の配置の特殊性などによる退化がなければ、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4パラメータ部分群で表すことができる。本論文では、この解を4自由度射影解と呼ぶことにする。

#### (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、4自由度射影解の自由度を解消し、ユークリッド解を得ることができる。

#### (4) 密な形状復元

影境界生成平面のユークリッド解から影曲線の3次元位置が求められる。シーンに曲面形状が含まれる場合、形状を密に復元するためには、連続画像から獲得された多数の影曲線を復元する必要がある。ここまでの(2),(3)の処理は、効率的な計算を行うために、サンプリングされた少数のフレームを用いた形状復元である。このため、必要に応じて、連続画像のすべてのフレームから影曲線を抽出し、この曲線の3次元復元を、ここまでの処理で復元された影曲線や平面領域を用いて行う。これにより、多数の影曲線による密な形状復元を効率的に実現することができる。

### 3. アルゴリズムの詳細

#### 3.1 データの獲得

シーンの画像から影曲線の像を検出する。密な形状復元を行うためには、多くの影曲線を復元するため、連続画像から多数の影曲線を抽出する。

影曲線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できる<sup>10),11)</sup>。本論文での処理対象は、固定カメラで撮影された連続画像であることから、時空間解析を用いることで安定した影検出を行うことができる。以下に処理の手順を述べる。また、実際の画像を用いた処理の様子を図3に示す。

- (1) 連続画像にフレーム間差分または背景差分を適用し、おおまかに影領域とそれ以外の部分に分離を行う(図3(右上))。
- (2) 得られた分離後の画像列を時間軸方向に積層し、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(これら領域は、おおまかに「影」と「影以外」のボリュームからなる)。
- (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、閾値以下の大きさの領域を削除した後、直線状エッジを含む前景物体の影にあたる領域をインタラクティブに選択する(図3(左下))。

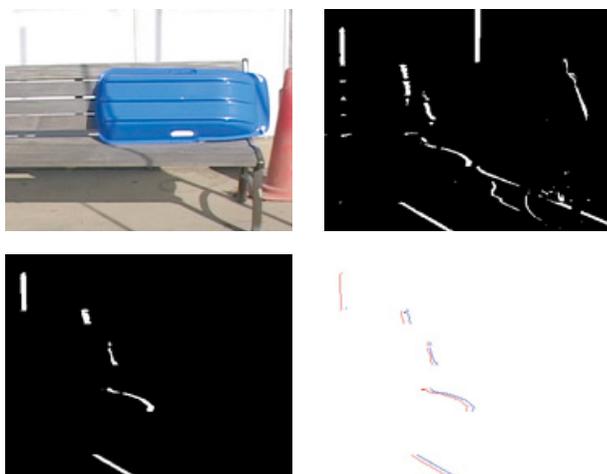


図3 時空間解析による影の検出例:(左上)入力画像。(右上)フレーム間差分による影領域の検出結果。(左下)時空間解析によりインタラクティブに選択された影領域。(右下)抽出した影領域からのエッジ抽出結果

Fig. 3 Example of shadow extraction using spatio-temporal analysis: (Upper left) Input image. (Upper right) Shadow region extracted by inter-frame subtraction. (Lower left) Shadow region selected by spatio-temporal analysis. (Lower right) Extracted edges of the selected shadow region.

- (5) 選択した領域を各フレームに再分割し、各フレーム上で領域のエッジを抽出する(図3(右下))。抽出されたエッジが影曲線である。

上記手順により、画像上の影曲線の集合を得ることができる。次節で、影曲線の交点を利用した、シーンの形状復元について説明する。

シーン中の平面領域に影曲線が投影されている場合、この領域の内部にある影曲線は、implicit な平面と explicit な平面の共有点として、形状復元に利用可能である。実際には、平面領域と影曲線の交わり(線分となる)をすべて抽出する必要はなく、これらの線分からサンプリングを行えばよい。本論文では、サンプリングを行うための簡単な方法として、図2(c)のように、画像内の平面領域の像(2次元領域)の内部に、影曲線の像と交点を持つように、手動で直線や曲線を設定している。これにより、implicit な平面と explicit な平面の共有点の像の抽出を、画像上の曲線の交点の抽出に帰着できる。

### 3.2 4 自由度射影解の復元

本節では、前節で得られた、平面どうしの共有点の像の位置から得られる拘束条件を用い

て、平面位置を射影的な自由度を除いて求める方法を述べる。

Implicit あるいは explicit な平面の集合を考え、 $j$  番目の平面を  $\pi_j$  とする。ただし、これらの平面は、カメラの光学中心を含まないと仮定する。カメラ座標系を、カメラの光学中心が原点、レンズの光軸が  $z$  軸になるようにとる。以下、特に言及しない限り、3次元座標の座標系としてこのカメラ座標系を用いる。平面  $\pi_j$  は以下の方程式で表される。

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

また、上記の平面のうち2枚以上に含まれる点が複数観測されるものとし、その  $i$  番目の点を  $\xi_i$  とする。 $\xi_i$  が  $\pi_j$  と  $\pi_k$  の交線上の点であり、 $\xi_i$  がカメラによって投影された像が、画像平面上の点  $\mathbf{u}_i = [u_i, v_i]^T$  であるとする。 $\xi_i$  の座標を  $\mathbf{x}_i = [x_i, y_i, z_i]^T$ 、透視投影カメラの内部パラメータを表す上三角行列を  $\mathbf{K}$ 、さらに  $\tilde{\mathbf{u}}_i$  を  $\tilde{\mathbf{u}}_i \equiv [\mathbf{u}_i^T, 1]^T$  で定義すると、点  $\xi_i$  のカメラによる投影は

$$z_i \begin{bmatrix} \mathbf{u}_i \\ 1 \end{bmatrix} = z_i \tilde{\mathbf{u}}_i = \mathbf{K} \mathbf{x}_i \quad (2)$$

と表される。平面パラメータのベクトルを  $\mathbf{a}_j = [a_j, b_j, c_j]^T$  とすると、式(1)より

$$\mathbf{a}_j^T \mathbf{x}_i + 1 = z_i \mathbf{a}_j^T \mathbf{K}^{-1} \tilde{\mathbf{u}}_i + 1 = z_i \mathbf{a}_j^{*T} \tilde{\mathbf{u}}_i + 1 = 0, \quad (3)$$

ただし  $\mathbf{a}_j^{*T} \equiv \mathbf{a}_j^T \mathbf{K}^{-1}$  である。このようにして、カメラの内部パラメータを平面パラメータに組み入れた  $\mathbf{a}_j^*$  を新しいパラメータベクトルと見なすことができる。以下、本節では、 $\mathbf{a}_j^*$  を求める方法を述べる。 $1/z_i = t_i$  とすると、

$$\mathbf{a}_j^{*T} \tilde{\mathbf{u}}_i + t_i = 0 \quad (4)$$

である。さらに、 $\xi_i$  は  $\pi_k$  上の点でもあるので、

$$\mathbf{a}_k^{*T} \tilde{\mathbf{u}}_i + t_i = 0 \quad (5)$$

も成立する。

方程式(5)は、共有点の奥行きに依存する変数  $t_i$  を含むが、共有点の数は、それらを含む平面の数に比べて非常に大きくなることもあり、このとき  $t_i$  を変数として利用することは変数の数の大幅な増加につながる。変数の数が増えると、連立方程式を数値計算で解く場合の計算量が増えるので、 $t_i$  を方程式から消去し、 $\mathbf{a}_j^*$ 、 $\mathbf{a}_k^*$  のみの方程式にする。式(4)と式(5)から  $t_i$  を消去すると、各共有点において、

$$\tilde{\mathbf{u}}_i^T \mathbf{a}_j^* - \tilde{\mathbf{u}}_i^T \mathbf{a}_k^* = \tilde{\mathbf{u}}_i^T (\mathbf{a}_j^* - \mathbf{a}_k^*) = 0 \quad (6)$$

という  $\mathbf{a}_j^*, \mathbf{a}_k^*$  を変数とする線形方程式が得られる。式 (6) は  $\mathbf{a}_j^*, \mathbf{a}_k^*$  に関して同次であり、かつ両者の差のみが式に現れるので、 $\mathbf{a}_j^*, \mathbf{a}_k^*$  には定数倍および定ベクトルの加算分の不定性がある。すなわち、 $\mathbf{a}_j^* = s\mathbf{a}'_j, \mathbf{a}_k^* = s\mathbf{a}'_k$  が方程式 (6) の解ならば、任意のスカラー  $s$  と任意の3次元ベクトル  $\mathbf{b}$  に対して

$$\mathbf{a}_j^* = s\mathbf{a}'_j + \mathbf{b}, \mathbf{a}_k^* = s\mathbf{a}'_k + \mathbf{b} \quad (7)$$

も解となる。

ここでは、観測された点が2枚の平面に含まれる場合について述べたが、この点が3枚以上の平面に含まれる場合もある。このような場合には、上記のような2枚の平面の共有点についての制約条件が複数個得られる。もし、 $\pi_{j_1}, \pi_{j_2}, \dots, \pi_{j_P}$  の共有点が観測されている場合には、この点を、 $\pi_{j_1}$  と  $\pi_{j_2}$  の共有点として式 (6) から1つの条件式を得、さらに同じ点を  $\pi_{j_1}$  と  $\pi_{j_3}$  の共有点と見なして別の条件式を得る。これを  $\pi_{j_P}$  まで繰り返すと、 $P-1$  個の独立な条件式が得られる。

すべての共有点について式 (6) をとると連立線形方程式となる。これは共有点の数を  $M$ 、平面の数を  $N$  として、 $u_i, v_i (1 \leq i \leq M)$  によって記述される要素を持つ行列  $\mathbf{L}$  ( $M$  行  $3N$  列) と、 $3N$  次元の解ベクトル  $\mathbf{p} = [\mathbf{a}_1^T, \dots, \mathbf{a}_N^T]^T$  を用いて

$$\mathbf{L}\mathbf{p} = \mathbf{0} \quad (8)$$

と表すことができる。式 (7) の不定性は、連立方程式 (8) についても成り立つ。すなわち、 $\mathbf{p} = [s\mathbf{a}'_1^T, \dots, s\mathbf{a}'_N^T]^T$  が連立方程式 (8) の解ならば、任意のスカラー  $s$  と任意の3次元ベクトル  $\mathbf{b}$  に対して

$$\mathbf{p} = [s\mathbf{a}'_1^T + \mathbf{b}^T, s\mathbf{a}'_2^T + \mathbf{b}^T, \dots, s\mathbf{a}'_N^T + \mathbf{b}^T]^T \quad (9)$$

も解となる。よって解  $\mathbf{p}$  は、少なくとも4個の自由度を持つ。

ここで、連立方程式 (8) に、上記の4自由度以外の自由度が存在しないと仮定する。ベクトル  $[\mathbf{b}^T, \dots, \mathbf{b}^T]^T$  の加算分の不定性から、平面パラメータベクトル  $\mathbf{a}_j^*, j = 1, \dots, N$  の1つ、たとえば  $\mathbf{a}_N^*$  を自由パラメータとしても一般性を失わない。そこで、まず、 $\mathbf{a}_N^* = \mathbf{0}$  となるような特殊解を求める。このためには、 $\mathbf{p}$  の代わりに、 $3(N-1)$  次元ベクトル  $\mathbf{p}' = [\mathbf{a}_1^T, \dots, \mathbf{a}_{N-1}^T]^T$  を変数ベクトルとし、 $\mathbf{L}'$  を  $\mathbf{L}$  の左から  $3N-3$  列を抽出した部分行列として、 $\mathbf{L}'\mathbf{p}' = \mathbf{0}$  を解けばよい。この方程式の解は、定数倍の自由度のみを持つ。これを満たすベクトル  $\mathbf{p}'$  の1つを  $\mathbf{v} = [\mathbf{a}_1^T, \dots, \mathbf{a}_{N-1}^T]^T$  とすると、 $3N$  次元ベクトル

$\mathbf{p} = [\mathbf{a}_1^T, \dots, \mathbf{a}_{N-1}^T, \mathbf{0}^T]^T = [\mathbf{v}^T, \mathbf{0}^T]^T$  は連立方程式 (8) の特殊解である。同方程式の一般解  $\mathbf{p}$  は、求められた特殊解と、任意のスカラー値  $s$  および任意の3次元ベクトル  $\mathbf{b}$  を用いて、

$$\mathbf{p} = \begin{bmatrix} \mathbf{a}_1^* \\ \vdots \\ \mathbf{a}_N^* \end{bmatrix} = s \begin{bmatrix} \mathbf{v} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{b} \\ \vdots \\ \mathbf{b} \end{bmatrix} \quad (10)$$

と表すことができる。

上記の解を導くために、連立方程式 (8) の解  $\mathbf{p}$  の自由度を4と仮定した。この仮定が成立するための条件について述べる。シーン中に  $N$  枚の平面がある場合、平面のパラメータの数は  $3N$  個である。1つの共有点から1つの方程式が得られるので、解が4自由度を持つためには、 $3N-4$  個以上の共有点が必要である。ただし、この条件が満たされていても、共有点の位置関係やシーンの形状の特殊性による退化によって解の自由度が5以上になる場合がある。以下に、このような条件の例をあげる。

図4(a)の太い実線および破線が影曲線であるとし、そのうちの1つの影曲線(破線)と他の影曲線(実線)との交点(丸印)の集合が、画像上で1つの直線上にある(共線である)とする。この場合、破線の影曲線を含む影境界生成平面の位置は、他の影境界生成平面がすべて確定しても不定性を持つ。このため、全体として解の自由度は5以上となる。また、図4(b)において、実線の影曲線と破線の影曲線との交点(丸印)の集合が、画像上で共線であるとする。この場合、実線の影曲線の3次元形状がすべて確定しても、破線の影曲線の3次元形状には不定性が残る。このため、全体として解の自由度は5以上となる。

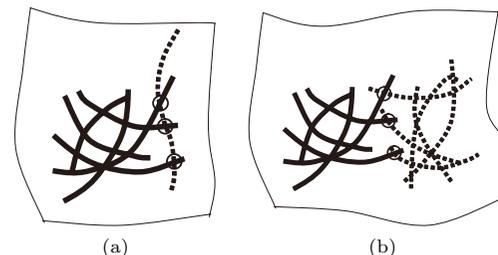


図4 解の不定性が4自由度を超える例

Fig. 4 Examples of solution having more than 4-DOF indeterminacy.

本節の最後に、式(9)における一般解  $\mathbf{p}$  の4個の自由度が、空間および平面パラメータに関する射影変換として記述できることを示す。

平面パラメータ  $\mathbf{a}_j^{*\top}$  を3次元同次座標  $[\mathbf{a}_j^{*\top} \ 1]^\top$  で表し、さらに  $4 \times 4$  行列  $\mathbf{B}(\mathbf{b}, s)$  を

$$\mathbf{B}(\mathbf{b}, s) \equiv \begin{bmatrix} s\mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \mathbf{b}^\top & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

で定義する。このとき、式(9)で表される  $\mathbf{p}$  の不定性は、行ベクトルに対する射影変換

$$[\mathbf{a}_j^{*\top} \ 1] = [\mathbf{a}_j^{\prime\top} \ 1] \mathbf{B}(\mathbf{b}, s) \quad (12)$$

として表される。

また、 $\{\mathbf{B}(\mathbf{b}, s)\}^{-1} = \mathbf{B}(-(1/s)\mathbf{b}, 1/s)$  が成り立つ。このことから、パラメータ  $\mathbf{a}_j^{*\top}$  で表される平面上の点を  $\mathbf{x} = [x, y, z]^\top$  とすると、

$$0 = [\mathbf{a}_j^{\prime\top} \ 1] \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ 1 \end{bmatrix} = \{[\mathbf{a}_j^{\prime\top} \ 1] \mathbf{B}(\mathbf{b}, s)\} \left\{ \mathbf{B}(-(1/s)\mathbf{b}, 1/s) \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ 1 \end{bmatrix} \right\} \quad (13)$$

が成り立つ。これは、平面パラメータを式(12)で変換したとき、実空間上の点  $\mathbf{x}$  は  $\mathbf{B}(-(1/s)\mathbf{b}, 1/s)$  によって射影変換されることを表す。実空間におけるこの変換は、generalized bas-relief transformation (GBR変換)<sup>12)</sup> と呼ばれる4パラメータ射影変換である。ラインレーザや直線状エッジの影を利用した3次元復元で4自由度の射影的な自由度が残ることは、文献13)などで指摘されている。

### 3.3 ユークリッド復元

前節で述べたように、 $\mathbf{a}_j^*$ ,  $j = 1, \dots, N$  についての4自由度射影解は、式(10)で表すことができる。これにはスケールリングの自由度が含まれる。また、 $\mathbf{a}_j^*$ ,  $j = 1, \dots, N$  には、未知の内部パラメータが含まれる。

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(メトリック拘束)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できる。ただし、原理的に解消できない自由度もある。たとえば、メトリック拘束として、平面性、直交性など、平面どうしの角度に関するもののみを利用し、距離に関するメトリック拘束を利用しない場合、スケールリングの自由度は解消できない。カメラの内部パラメータのうちで焦点距離のみが未知であり、スケールリングを除いたユークリッド復元を行う場合、独立したメトリック拘束が、 $4 +$  (未知の内部パラ

メータ数) - (解消しない自由度の数) =  $4 + 1 - 1 = 4$  個必要である。

#### 3.3.1 線形的な解法

メトリック拘束として、平面どうしの直交性が多数(最低9個)利用可能な場合には、以下のような線形解法によって、すべての内部パラメータを推定し、ユークリッド復元を行うことが可能である。3.2節における定義から、 $\mathbf{a}_j^{*\top} = \mathbf{a}_j^{\prime\top} \mathbf{K}^{-1}$  である。よって、ユークリッド空間における平面パラメータ  $\mathbf{a}_j^{\prime\top}$  は、あるスカラー値  $s$  とある3次元ベクトル  $\mathbf{b}$  を用いて

$$\mathbf{a}_j^{\prime\top} = \mathbf{a}_j^{*\top} \mathbf{K} = (s\mathbf{a}_j' + \mathbf{b})^\top \mathbf{K}, \quad j = 1, \dots, N \quad (14)$$

のように表される。スカラー値  $s$  は、ユークリッド空間でのスケールリングに対応するが、直交条件のみを用いた場合、原理的にスケールリングのパラメータは決定できない。よって  $s = 1$  とする。これにより、 $\pi_j$  と  $\pi_k$  が直交するという条件は、

$$\begin{aligned} \mathbf{a}_j^{\prime\top} \mathbf{a}_k &= (\mathbf{a}_j' + \mathbf{b})^\top \mathbf{K} \mathbf{K}^\top (\mathbf{a}_k' + \mathbf{b}) \\ &= [1 \ \mathbf{a}_j^{\prime\top}] \begin{bmatrix} \mathbf{b}^\top \mathbf{K} \\ \mathbf{K} \end{bmatrix} [\mathbf{K}^\top \mathbf{b} \ \mathbf{K}^\top] \begin{bmatrix} 1 \\ \mathbf{a}_k' \end{bmatrix} = [1 \ \mathbf{a}_j^{\prime\top}] \mathbf{Q} \begin{bmatrix} 1 \\ \mathbf{a}_k' \end{bmatrix} = 0 \end{aligned} \quad (15)$$

となる。ただし、 $\mathbf{Q}$  は

$$\mathbf{Q} \equiv \begin{bmatrix} \mathbf{b}^\top \mathbf{K} \\ \mathbf{K} \end{bmatrix} [\mathbf{K}^\top \mathbf{b} \ \mathbf{K}^\top] = \begin{bmatrix} \mathbf{b}^\top \mathbf{K} \mathbf{K}^\top \mathbf{b} & \mathbf{b}^\top \mathbf{K} \mathbf{K}^\top \\ \mathbf{K} \mathbf{K}^\top \mathbf{b} & \mathbf{K} \mathbf{K}^\top \end{bmatrix} \quad (16)$$

によって定義される  $4 \times 4$  の対称行列である。式(15)は、 $\mathbf{Q}$  の各要素についての線形方程式と見なせる。 $\mathbf{Q}$  が対称行列であり、 $\mathbf{Q}$  の右下の要素がつねに1であることを考慮すると、9個の要素を決定する必要がある。最低9個の独立した直交条件があれば、 $\mathbf{Q}$  を決定できる。 $\mathbf{Q}$  の右下  $3 \times 3$  行列は  $\mathbf{K} \mathbf{K}^\top$  であるから、これをCholesky分解することで  $\mathbf{K}$  を決定できる。また、 $\mathbf{K}$  を決定できれば、 $\mathbf{Q}$  の左下  $3 \times 1$  行列を  $\mathbf{q}$  として、 $\mathbf{b} = (\mathbf{K} \mathbf{K}^\top)^{-1} \mathbf{q}$  によって  $\mathbf{b}$  を決定できる。

#### 3.3.2 非線形最適化に基づいた解法

3.3.1項で述べた手法を適用するには、シーン中に最低9個の直交条件が必要である。また、必要な数の直交条件が得られたとしても、式(15)から得られる線形方程式においてこれらの条件が独立でなかったり、条件どうしの独立性が低かったりする場合も多い。そのような場合、上記の手法の数値解法は不安定になる。

実際の場面では、カメラパラメータの一部、あるいはすべてを既知としてよい場合が多い。このような場合、メトリック拘束が成立する場合に最小となるような誤差関数を定義し、それを非線形最適化によって最小化することでメトリック拘束の解を求め、ユークリッド復元を行う手法が有効である場合がある。未知の内部パラメータの組  $\Theta$  と式 (10) の  $s$  および  $\mathbf{b}$  から、 $\mathbf{a}_j$  を表すことができる。これを  $\mathbf{a}_j(\Theta, s, \mathbf{b})$  と表記する。ここで、たとえば、シーンから、直交条件の集合  $C_v$  が、直交する平面の番号対の集合  $C_v = \{(i, j) \mid (\pi_i \perp \pi_j)\}$  として得られる場合、誤差関数  $E(\mathbf{b}, \Theta)$  を、

$$\begin{aligned} E(\mathbf{b}, \Theta) &\equiv \sum_{(i,j) \in C_v} \cos^2 \theta_{i,j}(\mathbf{b}, 1, \Theta) \\ &= \sum_{(i,j) \in C_v} \{N(\mathbf{a}_i(\mathbf{b}, 1, \Theta))^\top N(\mathbf{a}_j(\mathbf{b}, 1, \Theta))\}^2 \end{aligned} \quad (17)$$

と定義する。ただし、 $\theta_{i,j}(\Theta, s, \mathbf{b})$  は、平面  $\pi_i$  と  $\pi_j$  の角度を表し、 $N()$  はベクトルの正規化を表す。 $E(\mathbf{b}, \Theta)$  の引数に  $s$  が含まれないのは、直交条件のみからはスケールが決定できないためである。これにより、 $\mathbf{b}$ 、 $\Theta$  の推定値  $\hat{\mathbf{b}}$ 、 $\hat{\Theta}$  を、非線形最適化問題

$$(\hat{\mathbf{b}}, \hat{\Theta}) = \arg \min_{(\mathbf{b}, \Theta)} E(\mathbf{b}, \Theta) \quad (18)$$

に帰着して求めることができる。

ユークリッド復元を最適化によって解くことには、いろいろな種類のメトリック拘束を、誤差関数として表現することで、比較的容易に利用可能なメトリック拘束を拡張できるという利点がある。たとえば、平面の直交性条件のほかに、平面の平行性の条件が、平行な平面の番号対の集合  $C_p = \{(i, j) \mid \pi_i \text{ と } \pi_j \text{ が平行}\}$  として得られる場合、以下のような誤差関数を定義すればよい。

$$\begin{aligned} E(\mathbf{b}, \Theta) &\equiv \sum_{(i,j) \in C_v} \cos^2 \theta_{i,j}(\mathbf{b}, 1, \Theta) + \sum_{(i,j) \in C_p} \sin^2 \theta_{i,j}(\mathbf{b}, 1, \Theta) \\ &= \sum_{(i,j) \in C_v} \{N(\mathbf{a}_i(\mathbf{b}, 1, \Theta))^\top N(\mathbf{a}_j(\mathbf{b}, 1, \Theta))\}^2 \\ &\quad + \sum_{(i,j) \in C_p} \|N(\mathbf{a}_i(\mathbf{b}, 1, \Theta)) \times N(\mathbf{a}_j(\mathbf{b}, 1, \Theta))\|^2 \end{aligned} \quad (19)$$

他の種類のメトリック拘束も、平面パラメータ  $\mathbf{a}_j$ 、 $j = 1, \dots, N$  を用いて、等式として記述可能な関係であれば、同様に利用可能である。

非線形最適化を行う方法は、様々な方法が提案されている。本研究で後に述べる実験で

は、Levenberg-Marquardt 法を用いてユークリッド復元を実装したものを利用した。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。この実験では、適当な平面パラメータの組から、式 (10) で表される解の空間 (3N 次元線形空間として表現できる) への直交射影を求め、これを初期値とする方法を用いた。

### 3.4 密な形状復元

さらに、この再構成結果をもとにして、連続画像のすべてのフレームにおける3次元復元を行うことで密な形状復元を実現できる。ただし、密な形状復元を実現するための条件として、影曲線がシーン中の対象物体上をすべて通過しておく必要がある。これは前景物体や光源を自由に動かせる環境においては厳しい条件ではないものの、そうでない場合 (たとえば遠隔カメラなどによる場合) には、直線物の影部分のみの復元となるため、あまり密な形状復元とならないことがある。

以下に実際の処理の手順を述べる。まず、すでに推定された影境界生成平面に関して、推定された平面位置を用いて、画像上で観測される影曲線上のすべての点を3次元復元する。次に、任意のフレームについて、位置が未知の影曲線と、すでに位置が推定された影曲線群の交点を、画像から複数検出する。位置が推定された影曲線から、これらの交点の3次元位置が求められる。求められた3次元点の集合を主成分分析によって平面にあてはめることで、未知の影曲線を含む平面の位置を推定できる。上記平面の位置が得られれば、対応する影曲線上のすべての点の3次元位置を復元できる。これをすべてのフレームについて繰り返すことで、すべての影曲線の形状復元が実現できる。

## 4. 実 験

本論文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。このとき、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。これには、(1) 直方体の辺の両側の平面の直交性、(2) 直方体の対向する面の直交性、(3) 床などの平面に垂直な直線状エッジによって影が投影される場合の、影境界生成平面と床の平面との直交性などが含まれる。

### 4.1 シミュレーションデータ

図 5 (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床に垂直な直線状エッジ (図 5 (a) の直線 E) という、3つのオブジェクトが置いてあるシーンとなっている。直線 E のエッジにより生じる影で、垂

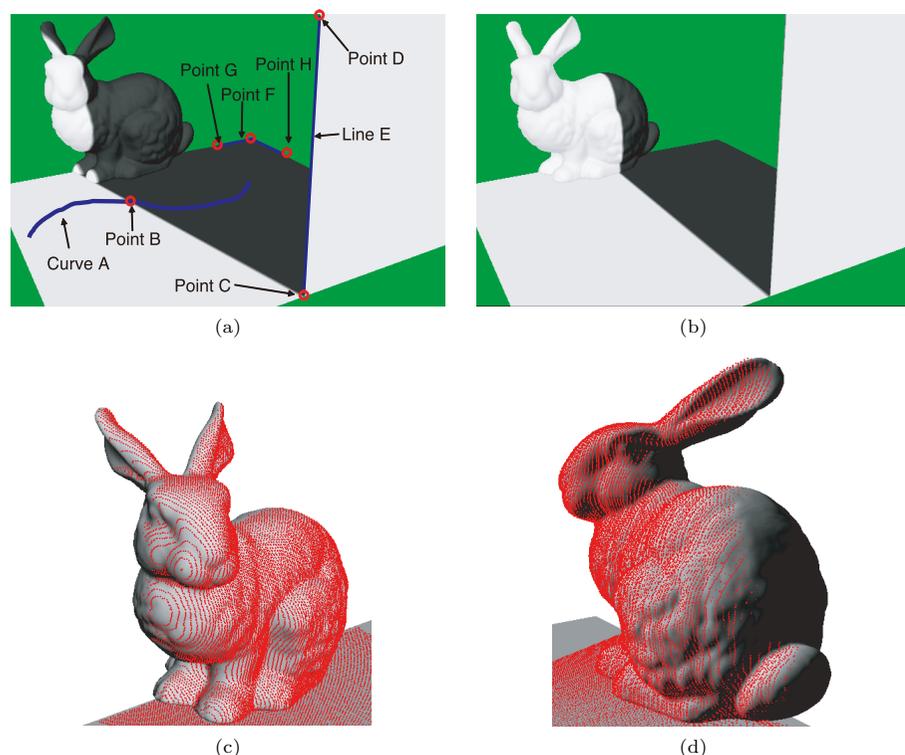


図5 シミュレーションデータによる復元（非線形最適化による方法）: (a) 入力画像．曲線 A (Curve A) は床平面と影曲線の共有点を抽出するための曲線，点 B, C, D (Points B, C, D) は平面どうしの共有点として利用された点，直線 E (Line E) は影を生じるエッジ， $\angle GFH$  はメトリック拘束の 1 つとして利用された角である．(b) 別の入力画像．(c) (d) 復元結果（赤い点群）．シェーディングされたモデルは正解形状

Fig. 5 Reconstruction of simulation data (using non-linear optimization): (a) Original image. Curve A is drawn for extracting the shared points between the floor and the shadow curves. Points B, C and D are detected on the intersections between planes. Line E is edge that generates shadow edges. Angle  $\angle GFH$  is used as a metric constraint. (b) Another original image. (c) (d) Reconstruction result. The shaded surfaces are ground truth and the red points are reconstructed results.

直なポールなどによって生じる影をシミュレートする．こ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できている影が動く．

この影による曲線を検出して拘束式を作る．光源方向を変えながら撮影を行った場合を想

定して生成された 160 枚の画像が使用され，160 枚の影境界生成平面と 1 枚の床面とを復元の対象とした．これらの影曲線どうしは，ポールの位置以外には交点を持たないが，影曲線と床（平面領域）との共有点を，床の上に引いた曲線（図 5 (a) の曲線 A）と影曲線との交点として抽出した．上記の曲線 A と，各画像における影のエッジとの交点（図 5 (a) の Point B）から，式 (6) の線形方程式が 160 個得られた．また，図 5 (a) の点 C と，同図の点 D から，線形方程式がそれぞれ 160 個および 159 個得られた．点 D から得られた条件が 1 つ少ないのは，この点が床面を含まないためである．これにより，161 枚の平面を表す  $161 \times 3 = 483$  個の平面パラメータに対して，479 個の線形方程式が得られ，解の自由度は 4 となった．

本データのユークリッド復元は，非線形最適化に基づく方法（3.3.2 項）で行った．影境界生成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，影境界生成平面についてはすべ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．直線 E が床面と垂直であることから，直線 E によって生じるすべての影境界生成平面は，床と直交する．ただし，すべての影境界生成平面は点 C と点 D を共有することから，2 枚の異なる影境界生成平面と床が直交すれば，残りの影境界生成平面も直交する．よって，影境界生成平面と床の直交性のうち，独立した条件は 2 個のみである．このことから，メトリック拘束として，影境界生成平面のうちの 2 枚についての床面との直交条件と，床面の角の 1 つ（図 5 (a) の  $\angle GFH$ ）の直交性を，3 個のメトリック拘束として用いた．床面の角の直交性を誤差関数に組み込むために， $\cos^2 \angle GFH$  を式 (18) に加えた，拡張された誤差関数を利用した． $\cos \angle GFH$  の計算は，視線と，床面を表す平面との交点として求められる点 F，点 G，点 H の 3 次元位置を利用して実装した．本実験ではメトリック拘束が 3 個しかないため，カメラの内部パラメータはすべて既知とした．これにより，4 個の自由度のうちスケール以外の 3 個を解消し，スケールを除いたユークリッド復元を行った．

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ルを施した．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 5 (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．

次に，線形的な解法（3.3.1 項）を利用して，すべての内部パラメータを求める実験を，シミュレーションで作成されたデータを用いて行った．この方法では，多くの直交条件が必要となるので，複数の直方体をシーンに配置した．また，式 (15) から得られる線形方程

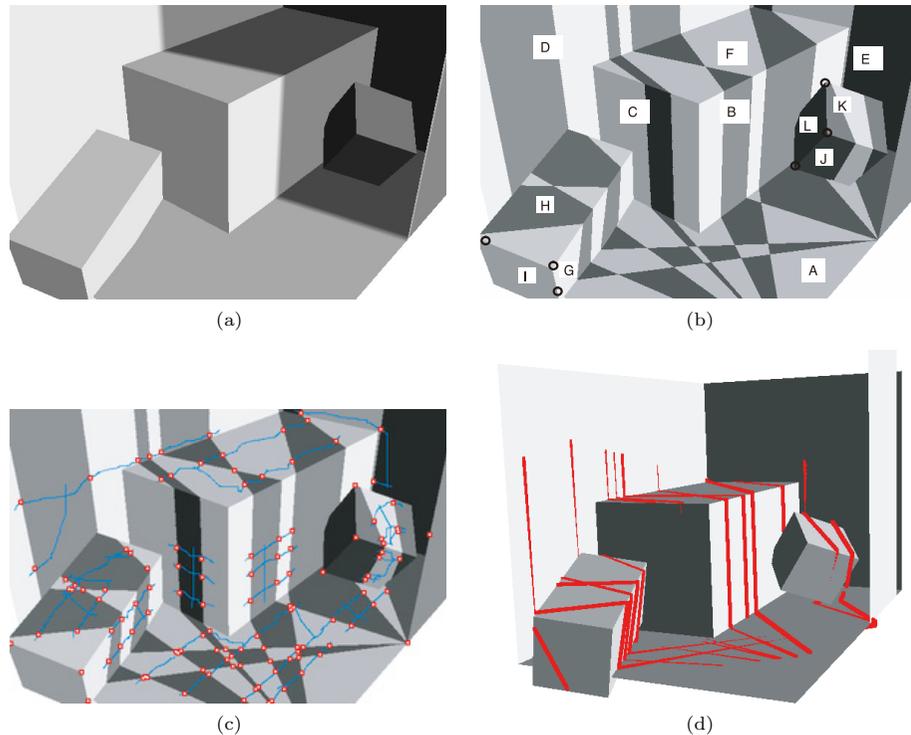


図6 シミュレーションデータによる復元(内部パラメータをすべて推定): (a) 対象シーン, (b) シーン中の影, (c) 共面性条件の記述に利用した点, (d) 復元された点  
 Fig.6 Reconstruction from simulation data (all the intrinsic parameters are estimated): (a) the target scene, (b) cast shadows in the scene, (c) points impose coplanarity constraints and (d) reconstructed points.

式どうしの独立性を高めるため、直方体の向きを調整し、異なる直方体が互いに平行な面を持つなどの特殊な配置が生じないようにした。利用する影としては、床面と垂直な棒が2本存在する場合を想定し、様々な方向からの光源についての影の位置を計算した。図6(a)に、利用したデータを示す。図6(b)の面Iには影曲線が通過していないので、復元するための共面性情報として、G-I間およびG-H間の共有点の位置(図6(b)の黒丸)を利用した。面Lについても同様である。図6(c)は、共面性条件を記述するために利用した点の位置である。メトリック拘束としては、A-B, A-C, A-D, A-E, B-C, C-D, D-E, B-F, C-F,

表1 シミュレーションデータによる内部パラメータの推定  
 Table 1 Estimation of intrinsic parameters from simulated data.

	$\alpha$	$\beta$	$u_p$	$v_p$	$\sigma$
真値	746.3	746.3	300.0	200.0	0.0
推定値	731.8	744.4	295.4	199.5	4.622

G-H, H-I, G-I, J-K, K-L, J-Lの各平面対についての直交性と、図のすべての影境界生成平面がAと直交する、という条件を用いた。図6(d)に復元結果を、表1に推定された内部パラメータを示す。これらの結果から、形状と内部パラメータが適正に求められたことが分かる。

#### 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として、焦点距離のみを未知とした。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、対象物体にできる影を撮影し、連続画像を得た。続いて、この連続画像から、適当なフレームを複数枚選択し、それらのフレーム内の影曲線を検出し、それら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。ユークリッド復元は、非線形最適化に基づく方法(3.3.2項)で行った。ユークリッド復元のためのメトリック条件としては、直方体の横面と床の間の直交性の条件4個と、右側直方体の上面と床の間の平行性の条件を利用した。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7(a)~(h)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<sup>3)</sup>とは異なり、光源も影を作る棒もそれぞれ自由に動かして形状復元できるため、固定光源の場合における影による形状欠損がなくなり、これは提案手法の大きなアドバンテージといえる。

さらに、提案手法の精度を検証するため、図8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<sup>14)</sup>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8(a)および(b)に提案手法による計測シーンを、(c)に入力画像例、(d)に共面性による復元に用いた implicit および explicit 共面な曲線とそれらの交点を、(e)、(f)に計測結果を示す。また、(g)、(h)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。提案手法はスケーリングが不定のため、正解形状との比較にあたり、奥行き(平均値)が一致するようにスケーリングを

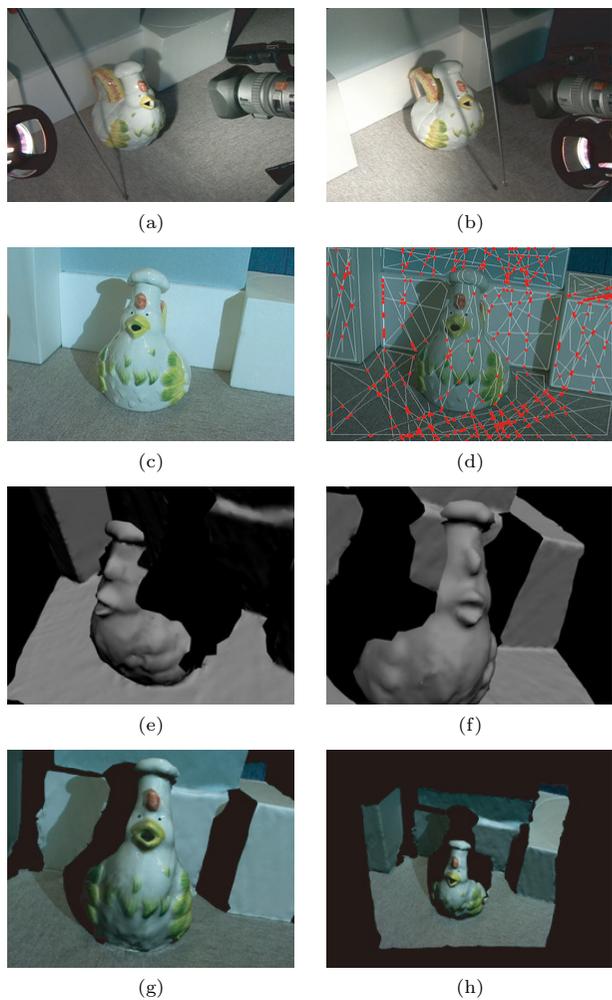


図7 室内における形状復元: (a), (b) 計測シーン (c) 入力画像, (d) 共面性による復元に用いられた implicit および explicit 共面な曲線とそれらの交点, (e), (f) 復元されたモデル (シェーディング表示), (g), (h) テクスチャマップされた復元モデル

Fig. 7 Reconstruction of an indoor scene: (a), (b) the capturing scenes, (c) input image, (d) implicit and explicit coplanar curves and their intersection points, (e), (f) the reconstructed shape with surface shading and (g), (h) the reconstructed shape with texture mapping.

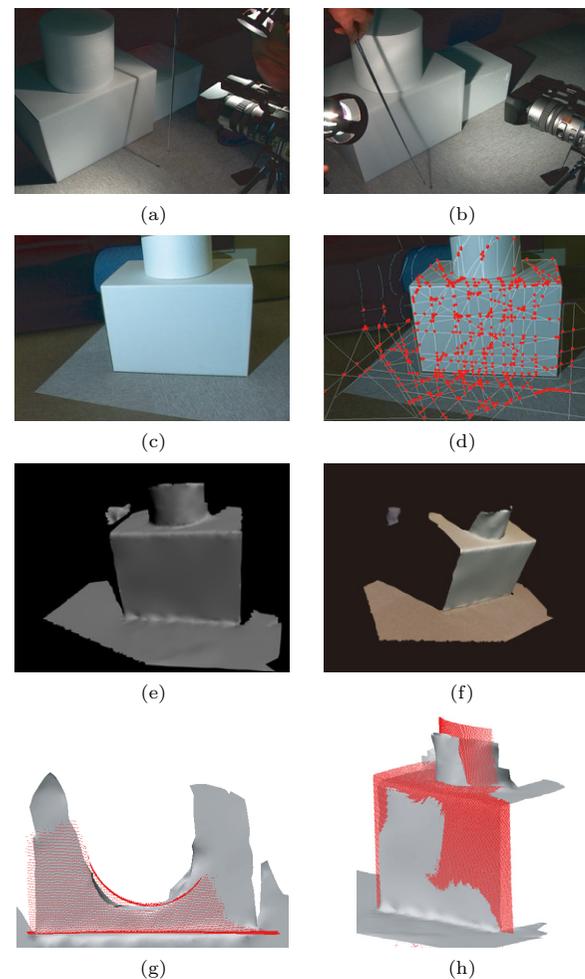


図8 屋内シーンによる形状復元結果および正解形状との比較: (a), (b) 撮影画像, (c) 入力画像, (d) 共面性による復元に用いられた implicit および explicit 共面な曲線とそれらの交点, (e), (f) 復元されたモデル, (g), (h) 推定結果 (シェーディングモデル) および正解形状 (赤のワイヤフレーム)

Fig. 8 Reconstruction and evaluation of an indoor real scene: (a), (b) the capturing scenes, (c) input image, (d) implicit and explicit coplanar curves and their intersection points, (e), (f) the reconstructed model and (g), (h) the reconstructed shape with the ground truth data (shaded model: reconstructed shape, red points: ground truth).

施した．図8(g), (h)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み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 $1.80 \times 10^{-2}$ であった．

#### 4.3 実シーン（屋外）

最後に，屋外に設置された定点カメラによる映像からの形状復元を行った．これは，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．実験で用いたデータは，晴天の午前中に太陽がまだ高くない時間に2時間かけて20秒に1フレームの間隔で撮影したものである．これは3.4節で述べた密な形状復元を実現するために，2本の直線物の影いづれかが対象シーン全体を通過するために要した時間である．カメラの内部パラメータについては，アスペクト比が1，画像中心（光学中心を通り，z軸に平行な直線と，画像平面の交点）は画像の中央にあり，スキューがないと仮定し，焦点距離のみを未知とした．また，メトリックな拘束として，ポールが床面と垂直であることから，影境界生成平面のうちの2枚についての床面との直交条件と，シーン中の床面と後ろの建物の直交性と，ベンチの座席と床との平行性の条件を用いた．これらメトリック拘束を用いて，ユークリッド復元は，非線形最適化に基づく方法(3.3.2項)で行った．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できる．用いたシーン画像の例と，再構成結果を図9(a)~(f)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，物体の直線状エッジから対象シーンに投影される影の境界線（影曲線）を複数用いて，形状を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，多角形を構成する平面どうしの関係式として提案されたものを，影曲線を含む平面（影境界生成平面）に拡張することによって，曲面を含むシーンに適用できるようにした手法といえる．その際，共面性のみによる復元では4自由度を持つ不定な解しか得られないが，これにメトリックな拘束を加えることで自由度を解消してユークリッド解を求め，同時にカメラの内部パラメータを推定する手法を提案した．また，影領域をシーンから安定して抽出するための時空

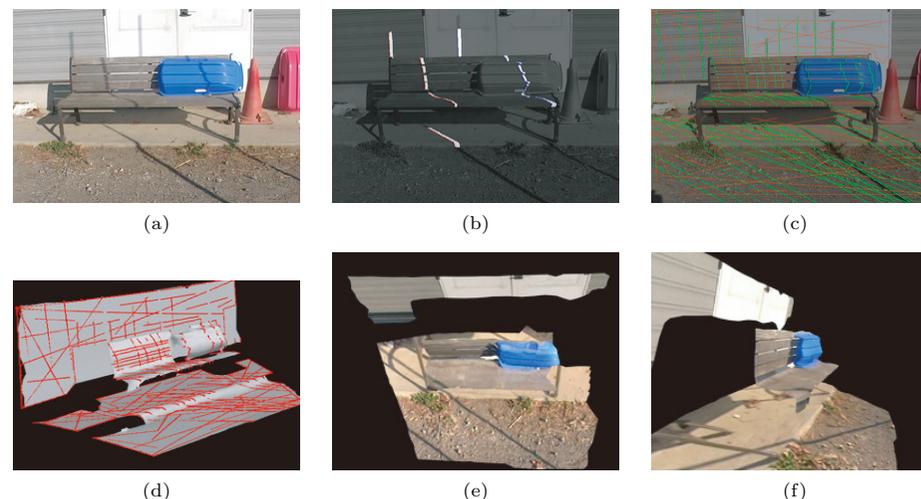


図9 屋外シーンにおける形状復元結果：(a) 撮影画像例，(b) 時空間画像解析によるセグメンテーション例，(c) 共面性による復元に用いられた implicit 共面な曲線（赤）および explicit 共面な曲線（緑），(d) 共面性による復元結果と密な形状復元結果（それぞれシェーディング，赤色曲線），(e)，(f) テクスチャマップされた復元モデル

Fig. 9 Reconstruction of an outdoor scene: (a) input image, (b) example frames showing the 3D segmentation result, (c) implicit (green) and explicit coplanar curves (red), (d) reconstructed result of coplanar curves (red) and dense 3D points with surface shading and (e), (f) the reconstructed scene with texture mapping.

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うことで，密な形状復元が可能であることが確認された．

謝辞 本研究の一部は，総務省戦略的情報通信研究開発制度（SCOPE）若手 ICT 研究者育成型研究開発（072103013）および科研費（19700098，19700157）の助成を受けて実施されたものである．ここに記して謝意を表す．

## 参 考 文 献

- 1) Hatzitheodorou, M. and Kender, J.: An optimal algorithm for the derivation of shape from shadows, *CVPR*, pp.486-491 (1988).
- 2) Daum, M. and Dudek, G.: On 3-D Surface Reconstruction Using Shape from Shadows, *CVPR*, pp.461-468 (1998).
- 3) Bouguet, J.Y. and Perona, P.: 3D Photography on Your Desk, *ICCV*, pp.129-149

- (1998).
- 4) Bouguet, J.-Y., Weber, M. and Perona, P.: What Do Planar Shadows Tell About Scene Geometry?, *CVPR*, Vol.01, pp.514–520 (1999).
  - 5) Sugihara, K.: An algebraic approach to shape-from-image problems, *Artificial Intelligence*, Vol.23, pp.59–95 (1984).
  - 6) Shimshoni, I. and Ponce, J.: Recovering the Shape of Polyhedra Using Line-Drawing Analysis and Complex Reflectance Models, *CVIU*, Vol.65, No.2, pp.296–310 (1997).
  - 7) Parodi, P.: The complexity of understanding line drawings of origami scenes, *IJCV*, Vol.18, No.2, pp.139–170 (1996).
  - 8) Sugihara, K.: Three-dimensional realization of anomalous pictures—An application of picture interpretation theory to toy design., *Pattern Recognition*, Vol.30, No.7, pp.1061–1067 (1997).
  - 9) 古川 亮, 川崎 洋: 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) Jiang, C. and Ward, M.O.: Shadow segmentation and classification in a constrained environment, *CVGIP: Image Underst.*, Vol.59, No.2, pp.213–225 (1994).
  - 11) Salvador, E., Cavallaro, A. and Ebrahimi, T.: Cast shadow segmentation using invariant color features, *Comput. Vis. Image Underst.*, Vol.95, No.2, pp.238–259 (2004).
  - 12) Kriegman, D.J. and Belhumeur, P.N.: What shadows reveal about object structure, *Journal of the Optical Society of America*, Vol.18, No.8, pp.1804–1813 (2001).
  - 13) Kawasaki, H. and Furukawa, R.: Dense 3D Reconstruction method using Coplanarities and Metric Constraints for Line Laser Scanning, *IEEE Conf. 3DIM*, pp.149–158 (2007).

- 14) Sato, K. and Inokuchi, S.: Range-imaging system utilizing nematic liquid crystal mask, *Proc. 1st ICCV*, pp.657–661 (1987).

(平成 19 年 9 月 21 日受付)

(平成 20 年 3 月 10 日採録)

(担当編集委員 植芝 俊夫)



古川 亮 (正会員)

1993 年京都大学工学部電気工学第二科卒業。1997 年奈良先端科学技術大学院大学博士後期課程修了。広島市立大学情報科学部助手を経て、現在、広島市立大学大学院情報科学研究科講師。コンピュータ・ビジョン、コンピュータ・グラフィックに関する研究に従事。博士 (工学)。



川崎 洋 (正会員)

1994 年京都大学工学部電気電子工学科卒業。2003 年東京大学大学院工学系研究科電子情報工学専攻博士課程修了。博士 (工学)。現在、埼玉大学工学部情報システム工学科准教授。主としてコンピュータ・ビジョン、コンピュータ・グラフィックに関する研究に従事。工学博士。