

# 共面性条件による3次元復元とbas-relief変換について

古川 亮<sup>1,a)</sup> 川崎 洋<sup>†1,b)</sup> 佐川 立昌<sup>†2,c)</sup>

**概要:** カメラで観測された3次元点の間に、多数の共面性の拘束が成り立つとき、どれだけ多数の共面性条件を利用して、シーン全体には自由度が残る。この自由度はgeneralized perspective bas-relief(GPBR)変換によるものであり、未校正光源によるshape-from-shadow手法におけるシーンと同じ形式の自由度でもある。GPBR変換は、直感的には理解しにくい変換であるが、シーンの双対空間を考えると、元の空間に働くGPBR変換は、双対空間では並進及びスケールングとなり、より理解しやすい。本稿では、このような観点から、幾つかの問題設定についてのGPBR変換の自由度が、双対空間においてどのような変換になるかについて説明し、これを解の自由度の考察や解消に利用する方法を述べる。

**キーワード:** 共面性による復元, generalized perspective bas-relief 変換, 双対空間

## 3D reconstruction from coplanarity constraints and bas-relief transformations

**Abstract:** When multiple coplanarity constraints exist in a scene observed by a camera, there remains 4 degrees of freedom in the scene that preserves all the coplanarity constraints. The freedom of the solutions is based on generalized perspective bas-relief(GPBR) transformations, which are also known as the ambiguity of shape-from-shadow method using uncalibrated light sources. Although GPBR transformations are not intuitive transformations, their dual transformations that work in the dual space are translations and scaling, which are more intuitive. In this paper, we explain the ambiguity of GPBR transformations of some problems from the dual space. For some problems, the discussion is used to explain geometrical meanings of ambiguity of the solutions, and to solve the ambiguity.

**Keywords:** Reconstruction by coplanarity, generalized perspective bas-relief transformation, dual space

### 1. はじめに

3次元復元において、画像から得られる手がかりとして、共面性を利用する方法がある。共面性とは、ある点の集合が同一平面上にあることを指す。このような手がかりは、例えば、シーン中に平面がある場合や、ラインレーザ、格子パターンなど、直線状のパターンをアクティブ計測において投影した場合などに得られる。

共面性から3次元計測を行う研究の例としては、多面体図形の解析 [5]、ラインレーザによる形状計測 [1]、影を利用した形状計測 [3]、格子パターンや平行パターンによる形状計測 [2], [9] などが挙げられる。

これらの3次元復元において、手掛かりを共面性のみに限定する場合、得られる解はgeneralized perspective bas-relief(GPBR)変換の自由度を含む [1], [3]。GPBR変換は、4自由度の射影変換であり、これをカメラ座標系で表されたシーンに適用しても、全ての点が視線に沿って動くため画像面に射影されるシーンは変化しない。GPBR変換の自由度は、いわゆる「不可能図形」と錯覚するような図形の作成などに利用される場合がある [5]。また、光源と形状を同時に変換した場合、cast-shadowが観測される位置が変化しないため、未校正のshape-from-shadowにおける形状

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

<sup>†1</sup> 現在、鹿児島大学  
Presently with Kagoshima University

<sup>†2</sup> 現在、産業技術総合研究所  
Presently with National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

a) ryo-f@hiroshima-cu.ac.jp

b) kawasaki@ibe.kagoshima-u.ac.jp

c) ryusuke.sagawa@aist.go.jp

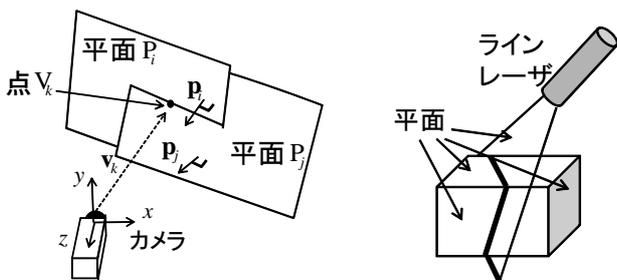


図 1 平面と共有点:(左) 記号の説明,(右) シーン中の平面の例.  
 Fig. 1 Planes and points:(left) explanation of symbols, (right) examples of planes in a scenes.

不定性 [4] としても知られる.\*1

我々は、ラインレーザまたは影による形状計測 [1], [3], [8] や格子パターンによる形状計測 [7] において、共面性を利用した解法を提案した。これらの手法では、共面性を利用してシーン中の点を共有する平面に関する線型方程式を作成し、その解空間（一意解ではなく、自由度のある線形空間となる）を求めた。そのうち、さらに直交性などを利用して、一意な解を求める、という 2 段階の手法をとった。

これらの研究において、共面性のみから得られた解にどのような自由度が残るのかは、GPBR 変換そのものが直観的とは言えないこともあり、理解しにくい。しかし、対象シーン  $s$  について、その射影的な双対  $s^*$  を考えると、シーン  $s$  に対する GPBR 変換は、双対シーン  $s^*$  に対する並進変換およびスケーリング変換となり、直観的にイメージしやすいものとなる。

本稿では、共面性を利用した 3 次元復元において残る変形自由度が、双対シーン  $s^*$  における幾何学的問題としてどのように理解されるのかを述べる。さらに、双対空間で GPBR 変換を考察することを、復元の自由度の解消や、自由度の考察に役立てられる例を挙げる。

## 2. 共面性を利用した形状復元

3 次元空間中に 1 台のピンホールカメラがあり、シーンを観測しているとする。カメラは校正済みであるとする。図 1(左) に示すように、原点を含まない 2 個の平面  $P_i$  と  $P_j$  があり、それらの平面の共有点  $V_k$  が観測されるとする。この時、平面はシーン中の実在の平面でも、ラインレーザ等によって掃引される平面であってもよい(図 1(右))。

平面  $P_i$  は、原点を含まない場合、3 次元パラメータベクトル  $p_i$  を利用して、

$$p_i \cdot x + 1 = 0 \quad (1)$$

と表すことができる。ここで、 $x$  は  $P_i$  上の任意の点  $X$  の

\*1 GPBR 変換と類似した変換として、平行投影を仮定したときに未校正光源による照度差ステレオ法で生じる曖昧性を表現する generalized bas-relief (GBR) 変換 ([6] 等) があるが、これらの変換は厳密には異なる。GPBR 変換では、一般に cast-shadow の見えは保存されるが、shading による輝度見えは保存されない。

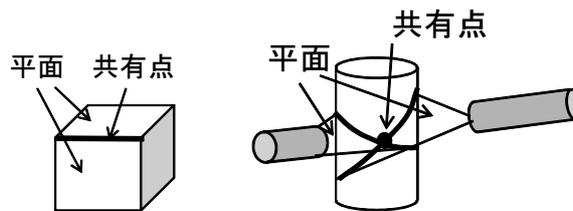


図 2 平面と複数平面で共有される点の例。  
 Fig. 2 Examples of planes and points shared by multiple planes.

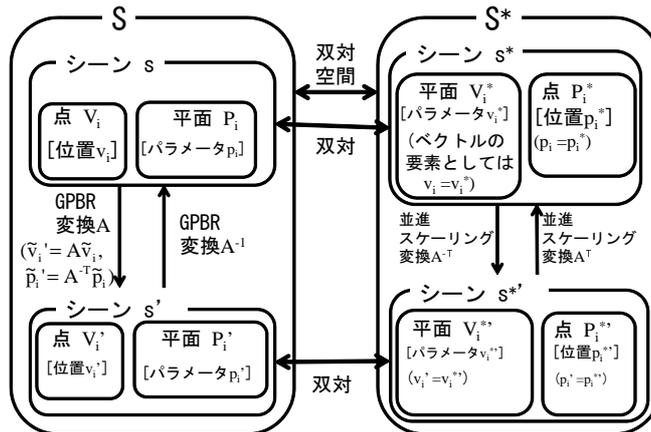


図 3 平面、点とその双対および GPBR 変換の関係  
 Fig. 3 Relationships between planes, points, their duals and GPBR-transformations

位置ベクトルである。また、パラメータベクトル  $p_i$  は、平面  $P_i$  から原点に向かう法線ベクトルであり、かつ原点と  $P_i$  の距離を  $d (> 0)$  とした時、 $|p_i| = 1/d$  となるようなベクトルである。

点  $V_k$  の位置ベクトルを  $v_k$  と置く。カメラが校正済みであることから、 $v_k$  と平行な方向ベクトル  $\hat{v}_k$  が観測結果から得られる。この時、

$$v_k \cdot (p_i - p_j) = \hat{v}_k \cdot (p_i - p_j) = 0 \quad (2)$$

が成立する [1]。ただし  $\cdot$  は内積を表す。式 (2) は、 $p_i, p_j$  に関する線型拘束式である。これを本稿では共面性条件と呼ぶ。共面性条件は、シーン中の平面の集合  $P = \{P_1, P_2, \dots, P_N\}$  と、それらが共有する点の集合  $V = \{V_1, V_2, \dots, V_M\}$  で表される。

このような条件は、例えば多面体を観測した場合、多面体の辺および頂点の観測結果から得られる。また、平面  $P_i$  がラインレーザによって掃引される平面である場合、照射されたシーンを複数回観測した場合に、それらの点の交点の観測結果から得られる(図 2)。

本研究では、このような平面、点と、それらの双対および GPBR 変換について考察する。これらの関係を図 3 に示す。

射影空間  $S$  中に、シーン  $s$  があり、 $s$  中の点を  $V_k$  で表し

たとき、その4次元ベクトルによる表現を

$$\tilde{\mathbf{v}}_k \sim \begin{pmatrix} \mathbf{v}_k \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

とする．同じく、シーン中の平面  $P_i$  を射影空間で表したとき、その4次元ベクトルによる表現を

$$\tilde{\mathbf{p}}_i \sim \begin{pmatrix} \mathbf{p}_i \\ 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

とする．

4個のパラメータ  $\alpha, \beta, \gamma, \delta$  で表される行列

$$A(\alpha, \beta, \gamma, \delta) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \alpha & \beta & \gamma & \delta \end{pmatrix} \quad (5)$$

を考える．ただし  $\delta \neq 0$  とする．この時、GPBR 変換は、 $A(\alpha, \beta, \gamma, \delta)$  による射影変換

$$\tilde{\mathbf{v}}'_k \sim A(\alpha, \beta, \gamma, \delta) \tilde{\mathbf{v}}_k \quad (6)$$

として表される．この時、同じ空間の平面  $P_i$  は、行列

$$\{A(\alpha, \beta, \gamma, \delta)\}^{-T} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -\alpha/\delta \\ 0 & 1 & 0 & -\beta/\delta \\ 0 & 0 & 1 & -\gamma/\delta \\ 0 & 0 & 0 & 1/\delta \end{pmatrix} \quad (7)$$

により、

$$\tilde{\mathbf{p}}'_i \sim \{A(\alpha, \beta, \gamma, \delta)\}^{-T} \tilde{\mathbf{p}}_i \quad (8)$$

の変換を受ける．

GPBR 変換は、射影変換であるので、平面と点の包含関係を変化させない．よって、変換後も共面性条件は保存され、

$$\hat{\mathbf{v}}'_k \cdot (\mathbf{p}'_i - \mathbf{p}'_j) = 0 \quad (9)$$

となる．

$V_k$  の正規化カメラへの射影は、正規化カメラへの射影行列

$$C = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad (10)$$

を利用して  $C\tilde{\mathbf{v}}'_k$  で表されるが、容易にわかるように、

$$C\tilde{\mathbf{v}}'_k \sim CA(\alpha, \beta, \gamma, \delta)\tilde{\mathbf{v}}_k = C\tilde{\mathbf{v}}_k \quad (11)$$

であるので、GPBR 変換では観測される点の位置は不変である．つまり、点  $V_k$  の観測結果と、 $V_k$  を GPBR 変換した  $V'_k$  の観測結果は同じであり、 $\hat{\mathbf{v}}_k \sim \hat{\mathbf{v}}'_k$  である．これと

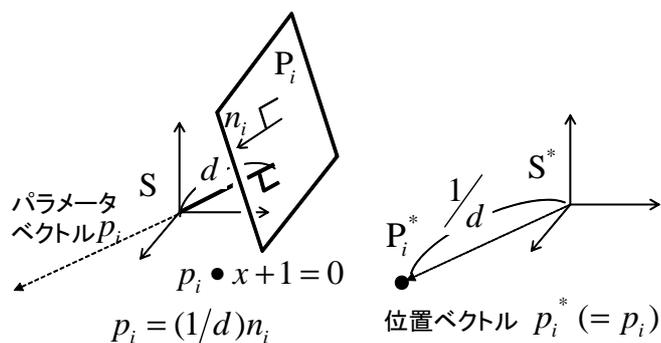


図4 平面(左)とその双対(右)．

Fig. 4 A plane (left) and its dual(right).

式(9)より、式(2)が成立する時、

$$\hat{\mathbf{v}}_k \cdot (\mathbf{p}'_i - \mathbf{p}'_j) = 0 \quad (12)$$

も成立する．これは、対象シーン  $s$  を GPBR 変換したシーン  $s'$  は、元のシーンと同じ共面性条件を満たすことを意味する．つまり、共面性条件のみから解を得ようとすると、GPBR 変換で互いに交換可能な無限の解が存在し、一意の解は得られない．

### 3. 双対空間と GPBR 変換

前節に続いて図3を参照して説明する．シーン  $s$  が存在する空間を  $S$  とし、その双対空間を  $S^*$  とする．この時、平面  $P_i$  の双対は  $S^*$  中の点  $P_i^*$  であり、 $P_i, P_i^*$  の位置ベクトルは、斉次座標として  $\tilde{\mathbf{p}}_i \sim \tilde{\mathbf{p}}_i$  であり、3次元ベクトルとして  $\mathbf{p}_i^* = \mathbf{p}_i$  となる(厳密には  $\mathbf{p}_i$  と  $\mathbf{p}_i^*$  は異なる空間のベクトルであるが、ベクトルの要素としては  $\mathbf{p}_i^* = \mathbf{p}_i$  となる)．また、点  $V_i$  の双対は平面  $V_i^*$  であり、そのパラメータベクトルは、 $\mathbf{v}_i^* = \mathbf{v}_i$  ( $\tilde{\mathbf{v}}_i^* \sim \tilde{\mathbf{v}}_i$ ) である．さらに、 $S$  において平面  $P_i$  が点  $V_k$  を含むとき、 $S^*$  において点  $P_i^*$  は平面  $V_k^*$  に含まれる． $P_i^*$  と  $V_k^*$  の集合を、双対シーン  $s^*$  とする．

$S$  における平面  $P_i$  と、 $S^*$  における点  $P_i^*$  の関係を図4に示す．平面  $P_i$  の法線ベクトル  $\mathbf{n}_i$  を、平面から見て原点方向を向き、長さ1となるようにとる．この時、 $S$  の原点と平面  $P_i$  の距離を  $d$  とすると、平面  $P_i$  のパラメータベクトル  $\mathbf{p}_i$  は  $(1/d)\mathbf{n}_i$  に等しい．また、点  $P_i^*$  の位置ベクトル  $\mathbf{p}_i^*$  の要素は、 $\mathbf{p}_i$  と等しい．

空間  $S$  における  $A(\alpha, \beta, \gamma, \delta)$  による GPBR 変換は、 $S^*$  においては  $\{A(\alpha, \beta, \gamma, \delta)\}^{-T}$  による変換とみなせる．式(7)より、これは、並進移動による変換と、スケーリング変換を合わせたものとみなせる．つまり、GPBR 変換の自由度は、双対空間においては点  $P_i^*$  の並進移動と、スケーリングであるとみなせる．

$S$  における共面性条件(式(2))を、双対空間  $S^*$  に置き換えてみる．2個の点  $P_i^*, P_j^*$  が存在し、これらの点を結ぶ直線方向ベクトルが、ベクトル  $\mathbf{v}_k$  と直交する．図1(左)

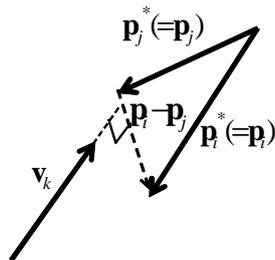


図 5 双対空間における共面性条件.

Fig. 5 Coplanarity constraints in the dual space.

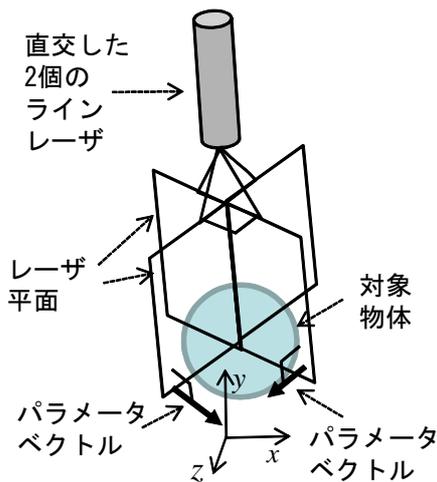


図 6 直交する 2 個のラインレーザによる形状計測.

Fig. 6 Shape measurement using two perpendicular line-lasers.

のシーンを双対空間に置き換えたときの概念図を図 5 に示す。このような条件が成立するシーンでは、 $p_i^*$ ,  $p_j^*$  に対して同じ並進ベクトル  $T^*$  を加えても、あるいは  $p_i^*$ ,  $p_j^*$  に同じスカラー値をかけても同じ条件が成立する。これらのことから、並進移動とスケーリングによる自由度が説明できる。

#### 4. 平面レーザによる復元の場合

前節で述べた、双対空間  $S^*$  における平面集合の振る舞いは、共面性を利用して 3 次元復元を行う際に、初期解の設定などに役立てることができる。以下にその例を述べる。

文献 [1], [8] に記述された平面レーザによる復元では、以下のような手順を踏む。利用するレーザ投光機は図 6 に示すようなものであり、2 個のレーザ光で掃引される平面は、 $S$  において直交する。これらのレーザ光で対象シーンを照射し、照射された曲線を観測する。照射された曲線上の点は、各平面に含まれる。

投光器を動かしながら  $K$  回の撮影を行う場合、 $2K$  個の平面がシーン  $s$  に含まれる。得られた曲線を重ねて得られる交点は、それらの平面が共通に含む点となる。これらの平面と点を  $P, V$  とし、まず共面性条件 (式 (2)) から線型方程式によって 3 次元復元を行う。この時線型方程式の解

は GPBR 変換の 4 自由度を含む。この自由度は、 $K$  組の平面が満たす直交性を利用して最適化によって解消する。

上記の自由度と最後の最適化を  $S^*$  で考えてみる。共面性条件から連立方程式を作成し、それを解くと、解として点  $p_1^*$ ,  $p_2^*$ ,  $\dots$ ,  $p_{2K}^*$  が得られる。これらの点を並進とスケーリングで変換しても、共面性条件は保存される。この問題では、スケーリングの自由度は原理的に解消できないので、直交性による最適化は、これらの点を並進移動しながら、 $p_1^* \perp p_2^*$ ,  $p_3^* \perp p_4^*$ ,  $\dots$  を成立させる問題になる。

ここで、 $S$  上の平面  $P_i$  の、「典型的な位置」について考える。カメラは、対象となる物体を撮影し、レーザの反射を観測する必要がある。また、観測された曲線から、レーザ照射位置の復元を行うためには、レーザの掃引する平面  $P_i$  は、カメラのレンズ中心 (つまり原点) から、離れている必要がある。(  $P_i$  が原点を含む場合、 $P_i$  は方程式の縮退の原因となるため、解を得るための方程式から除かれる。) また、投光器は 2 個の直交する平面を生じるため、それらの両方の曲線が観測され、かつ両方の平面が原点から距離を持つような配置は、かなりの程度限定される。このことから、平面  $P_i$  には、「典型的な位置」が存在する。

このような「典型的な位置」を図 7(左) に示す。この時、それぞれの平面の法線ベクトルは、 $z$  軸とは  $45^\circ$  に近い角度を取る。また、これらの平面が、対象物体を通過することから、対象物体がカメラの正面で  $D$  の距離にある場合、平面と原点との距離は、約  $D/\sqrt{2}$  となる。典型的な位置にある平面  $P_i$  の双対となる点  $P_i^*$  は、 $S^*$  において、位置ベクトルと  $z$  軸との角度が約  $45^\circ$ 、原点からの距離が  $\sqrt{2}/D$  の位置にある。このような点は、図 7(右) に示すようなドーナツ状の領域に存在する。実際、 $S^*$  において真の解は、このドーナツ状の領域に分布する点の集合となることが多い。図 8 に実際の計測例を、図 9 にこの計測で得られた点  $P_i^*$  の分布を示す。図中の円周が前述の典型的な平面の存在位置であり、点は  $P_i^*$  である。図において、円周から大きく離れた  $P_i^*$  も存在する。しかし、GPBR 変換の自由度によって、 $P_i^*$  には任意の並進が適用されうることを考慮すると  $P_i^*$  は大まかには円周の周りに存在することがわかる。

線型方程式を解いた段階では、点集合  $P^*$  は求めたい位置から並進移動された位置にある。また、スケーリングも固定する必要がある。そこで、 $x^*y^*$  座標における標準偏差を正規化することでスケーリングを設定し、その重心位置を  $z$  軸上の点  $(0, 0, 1/D)$  に動かすことで、真の解の良い近似が得られる。これは、線型方程式を解いた後で、直交性による非線形最適化を行う際の初期値として利用できる。筆者らは、平面レーザによる復元 [1], [8] の実験の際、このような初期値設定法を利用することで、ランダムな初期値を利用するよりも安定した推定結果が得られることを確認した。

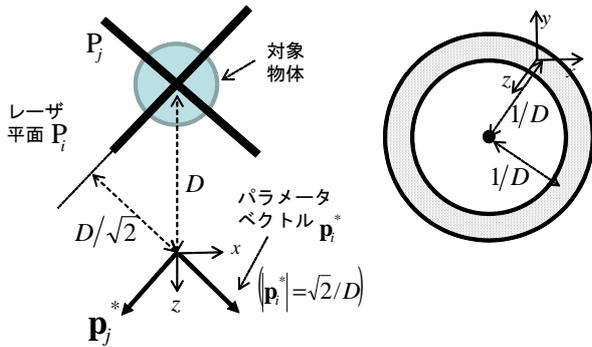


図 7 直交ラインレーザ投光器の典型位置 (左) と、レーザ平面の双対点の典型位置 (右)。

Fig. 7 A typical position of the projector with perpendicular line-lasers and typical positions of the dual points of the laser planes.

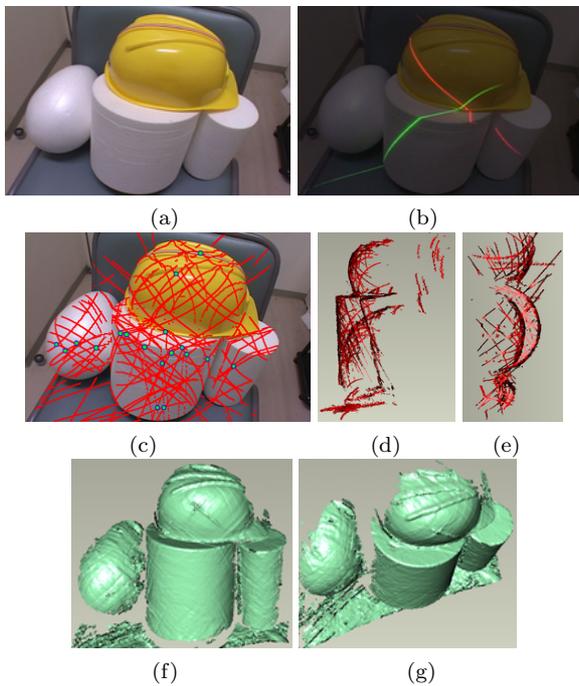


図 8 実シーンの計測結果 (文献 [1] より引用)。

Fig. 8 Result of real scene reconstruction(cited from paper [1]).

## 5. 格子パターンの投影による復元の場合

双対空間  $S^*$  における考察の別の例として、格子パターンによる形状復元 [2] における自由度の意味の考察を行う。この復元においては、プロジェクタから格子パターンを投影して、画像一枚のみから復元を行う (図 10(左))。この時、格子パターンを構成する各直線パターンは、それぞれ一つの平面を掃引する (図 10(右))。縦の直線 (縦パターン) に対応する平面は、図のようにある一つの直線を共有する平面のペンシルとなる。この拘束によって、GPBR 変換の自由度が変化する。

GPBR 変換の自由度を  $S^*$  で考察する。  $S$  中でのペンシルの双対は、  $S^*$  中で直線となることが知られている。  $S$  に

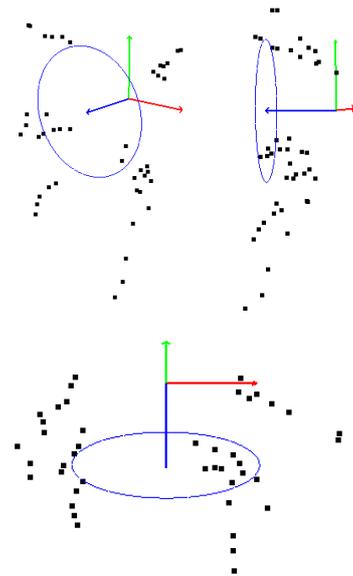


図 9 直交ラインレーザでの実計測における平面パラメータベクトルの配置。

Fig. 9 Plane parameter vectors of real measurement using vertical line lasers.

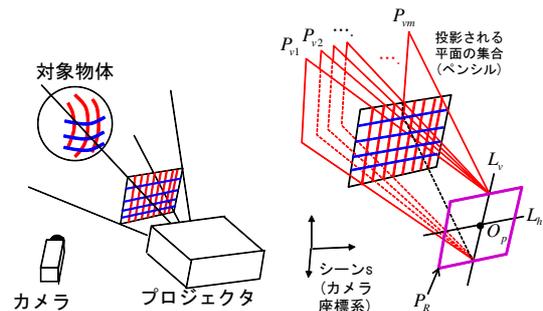


図 10 格子パターン投影による形状計測:(左) システム構成, (右) 格子の線が掃引するパターン平面。

Fig. 10 Shape measurement using a grid pattern: (left) a system configuration, (right) pattern planes that are swept by lines of the grid pattern.

における縦パターンのペンシルの双対を、  $S^*$  における縦パターン双対直線と呼ぶことにする。一つのプロジェクタから格子パターンを投影する場合、縦パターンのペンシルと横パターンのペンシルは、プロジェクタの光学中心を含む平面  $P_R$  を共有する (図 10(右))。このことから、双対シーン  $S^*$  においては、2 個の双対直線 (縦パターン双対直線と横パターン双対直線) が、  $P_R$  の双対点  $P_R^*$  (位置ベクトル  $p_R^*$ ) で交わる (図 11)。

文献 [2] では、格子パターンで投影された曲線を観測し、それらの曲線の交点から共面性条件に関する線型方程式を作成して解く。図 12(左) に、格子パターンの交点と、それを共有する平面を、図 12(右) に、共面性条件を双対空間中に図示したものを示す。線型方程式から得られる解には、1 次元の自由度が残る。

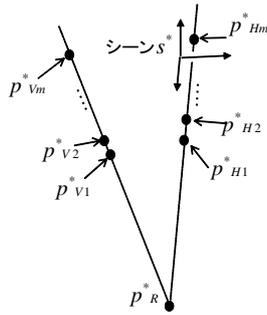


図 11 格子パターンが生成するパターン平面の双対空間中での配置.  
**Fig. 11** Positions of the pattern planes generated by a grid pattern in dual space.

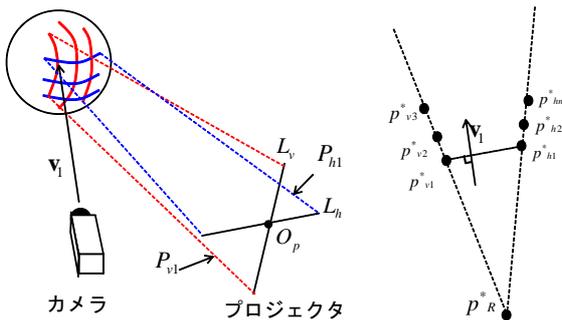


図 12 格子パターンの交点から得られる条件:(左) 平面と交点の関係, (右) 双対空間における条件.

**Fig. 12** Constraints from an intersection of the grid pattern:(left) relationships between planes and an intersection, (right) constraints in the dual space.

これは、 $S^*$  においては以下のように考えられる。方程式の解は、パターン双対直線に含まれる点の集合  $V^*$  である。プロジェクタとカメラの位置が既知であることから、2 個のパターン双対直線も既知であり、固定されている。 $V^*$  が既知の直線に含まれるという拘束があるため、 $S^*$  における並進とスケーリングの自由度が大きく減る。2 本のパターン双対直線は  $P_R^*$  で交わるが、これらの直線を不変にするような並進スケーリング変換は、 $P_R^*$  を中心としたスケーリングのみである (図 13)。これが、文献 [2] における共面性条件の自由度が 1 となる理由である。

図 12(左) のように、縦、横の格子の交点の観測位置が  $v_1$  で表される場合、縦パターン平面  $P_{v1}$  と横パターン平面  $P_{h1}$  の関係は、 $S^*$  では図 12(右) の  $p_{v1}^*, p_{h1}^*$  のように表される。これより、 $p_{v1}^*$  が決まると、 $p_{h1}^*$  も一意に決まることがわかる。この関係より、交点を共有するパターンの平面が一つでも決まると、交点による連結を通じてすべての平面が決まる。ただし、既に述べたように、この関係は  $P_R^*$  を中心としたスケーリングについて不変であり、この自由度は共面性条件のみでは解消できない。

プロジェクタで投影される平面の位置は既知であるため、 $S^*$  においては解候補はパターン双対直線上のすべての点ではなく、直線上の有限の点となる。よって、1 自由度

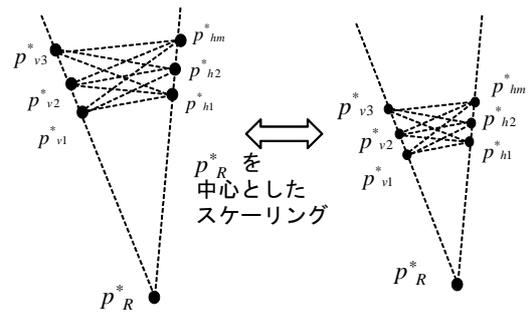


図 13 格子パターンの交点から得られる平面配置の解の自由度.  
**Fig. 13** Freedom of the solution of the locations of the pattern planes obtained from the intersections of the grid pattern.

を適当に定めて得られた任意の解について、スケーリングの自由度を変更しながら有限の解候補と比較することで、残った 1 自由度を解消することができる。

通常のプロジェクタでは、投影する画像の画角の小ささから、解候補の集合は、 $P_R^*$  からはかなり離れた場所に存在する。このため、 $P_R^*$  を中心としたスケーリングは、解候補の位置ではパターン双対直線に沿った平行移動に近くなる。このことから、解候補がほぼ等間隔で並んでいる状況では、誤ったスケーリングパラメータでも解候補との近いマッチングが得られる場合が多く、解の精度が低下する。文献 [2] では、これを防ぐために、格子の間隔の一様性を乱している。

格子パターンによる形状計測は、一つの画像から形状が得られるため、高速撮影などに向いている。実データでの計測例を図 14 に引用する。

## 6. 2 組の平行線パターンの投影による復元の場合

前節の格子パターンの例では、共面性条件の解  $V^*$  が、 $P_R^*$  で交わる 2 直線に含まれることから、自由度が 1 に減ることが幾何学的に説明できた。

ここで、もう一つの興味は、自由度を 0 にすることができるのか、ということであろう。実際、縦パターン双対直線と横パターン双対直線が交わらなければ、これらを同時に不変に保つ並進スケーリング変換は存在しない。これは、プロジェクタを 2 台用いて、それぞれで平行線パターンを投影する場合に相当する。図 15(左) にこのようなシステムの構成を、同図 (右) に双対空間での解の配置を示す。我々は、このような幾何学的な考察から、複数プロジェクタを利用した場合には共面性条件のみから一意解が得られると考え、実際にそれが可能であることを文献 [9] で報告した。

ただし、文献 [9] では、共面性条件のみから一意解を得ようとすると、特に計測対象の面積が小さいときに誤差が大きいことも報告されている。これは、共面性条件を保存

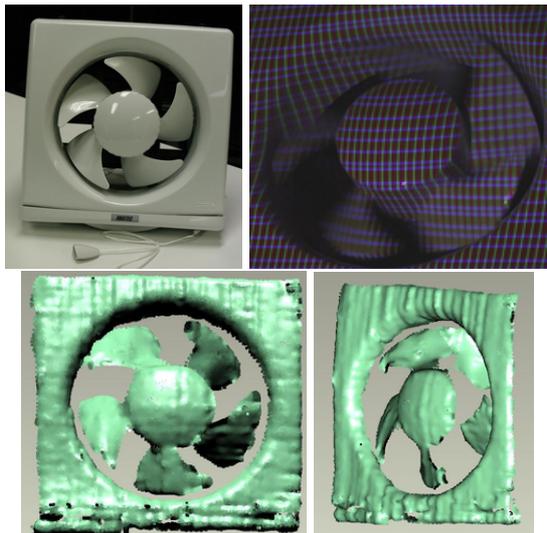


図 14 格子パターンによる実データの計測例:(左上) 対象物体, (右上) 元画像, (下行) 計測結果 (文献 [2] より引用) .

Fig. 14 Shape reconstruction results of real data using grid projection: (top left)target object,(top right) source image, (bottom row)estimated shape(cited from paper[2]).

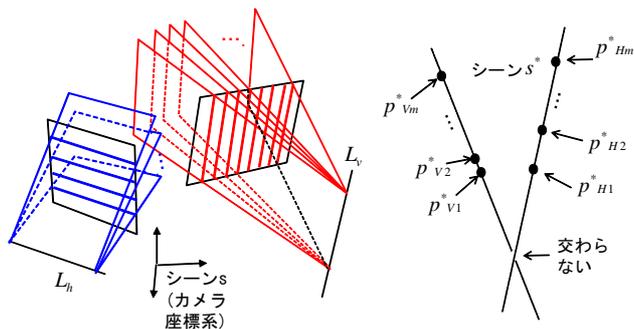


図 15 2 プロジェクタで平行パターンを投影する形状復元:(左) システム構成, (右) 双対空間での解の配置 .

Fig. 15 Shape reconstruction by projecting parallel patterns from two projectors:(left) system configuration, (right) solutions in the dual space.

しながらの図 16 のような解の変形が, 厳密な幾何学では起こらないものの, 誤差を許容すると変形可能な解が存在しうするため, 解の不安定性につながっていると考えられる .

前節と本節では, 格子パターンや平行線パターンの投影を利用した形状復元問題において, GPBR 変換の自由度の考察に双対空間を利用した . 双対空間では, GPBR 変換の自由度は並進スケーリング変換になるため, 幾何学的考察を行いやすい . このことから, 文献 [2] の手法において 1 自由度が残ることの意味と, 文献 [9] の手法において自由度が残らないことを幾何学的に示した .

## 7. おわりに

本稿では, 共面性条件を利用した 3 次元復元において生じる, GPBR 変換の不定性について考察した . 特に, GPBR

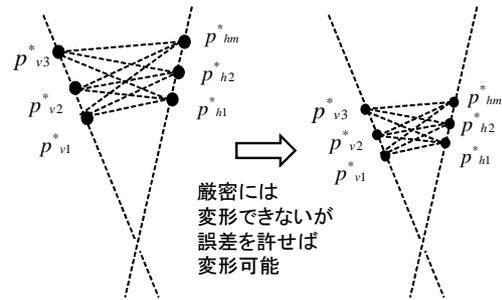


図 16 2 プロジェクタでの解の自由度 .

Fig. 16 Freedom of solutions with 2 projectors.

変換が働く空間の双対空間に働く変換が, 並進及びスケーリング変換であることに着目し, このことから共面性条件から得られた解を最適化する際の初期値を生成する方法を述べた . また, 同様の考察を格子パターンを利用した復元に適用することで, 交点のみから得られる解の自由度について, 幾何学的な理解が得られることを述べた .

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) ICT イノベーション創出型研究開発 (101710002), 文部科学省科学研究費補助金 (21200002) および内閣府・最先端・次世代研究開発支援プログラム (LR030) の助成を受けた . ここに記して謝意を表す .

## 参考文献

- [1] Furukawa, R. and Kawasaki, H.: Laser range scanner based on self-calibration techniques using coplanarities and metric constraints, *Comput. Vis. Image Underst.*, Vol. 113, No. 11, pp. 1118–1129 (2009).
- [2] Furukawa, R., Kawasaki, H., Sagawa, R. and Yagi, Y.: Shape from grid pattern based on coplanarity constraints for one-shot scanning, *IPSSJ Transaction on Computer Vision and Applications*, Vol. 1, pp. 139–157 (2009).
- [3] Kawasaki, H. and Furukawa, R.: Shape Reconstruction and Camera Self-Calibration Using Cast Shadows and Scene Geometries, *Int. J. Comput. Vision*, Vol. 83, No. 2, pp. 135–148 (2009).
- [4] Kriegman, D. 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).
- [5] 杉原厚吉: 立体イリュージョンの数理, 共立出版 (2006).
- [6] 岡部孝弘, 佐藤洋一: 近接点光源は未較正照度差ステレオにおける形状復元の不定性を解決するか?, 情報処理学会研究報告. CVIM, Vol. 2007, No. 1, pp. 153–160 (2007-01-11).
- [7] 大田雄也, 佐川立昌, 古川亮, 川崎洋, 八木康史, 浅田尚紀: Belief-Propagation による高密度なグリッドパターン検出及びデブルーイン系列を用いた高速動物体のロバストな三次元計測手法, 電子情報通信学会論文誌 D, Vol. J93-D, No. 8, pp. 1544–1554 (2010).
- [8] 川崎 洋, 古川 亮: 複数レーザ平面の自己校正による 3 次元再構成, 電子情報通信学会論文誌, D-II Vol. J90-D, No. 8, pp. 1848–1857 (2007).
- [9] 古川 亮, 川崎 洋, 佐川立昌, 阪下和弘, 大田雄也, 頭師陵太, 八木康史, 浅田尚紀: 複数プロジェクタを用いた線形解法によるワンショットアクティブ形状計測, 情報処理学会論文誌, Vol. 52, No. 5, pp. 1923–1938 (2011).