

共面性とメトリックな制約を用いた3次元再構成

古川 亮

川崎 洋

広島市立大学 情報科学部 情報メディア工学科

埼玉大学 工学部情報システム工学科

要 旨

本報告では、一つのカメラから観測された一群の点について、それらの間に成り立つ共面性 (coplanarity) を用いてシーンを再構成する方法を提案する。共面性の情報は、多面体からなるシーンの解析に利用できるが、形状について何の仮定もないシーンであっても、ラインレーザプロジェクタなどのデバイスを利用することで、共面性の情報を得ることができる。シーンの共面性情報からは連立線型方程式が得られ、4以上の次元を持った解空間が得られる。この解空間において、面の直交性などのメトリックな制約条件を利用すると、シーンのユークリッド復元を行うことができる。直交性などの条件は、ラインレーザプロジェクタの構成の仕方によって容易に得ることができる。本手法の正当性を、CG生成されたデータと実データの3次元復元の実験を行うことで示す。

3D reconstruction based on coplanarities and metric constraints

Ryo Furukawa

Hiroshi Kawasaki

Faculty of information sciences, Hiroshima City University Faculty of engineering, Saitama University

Abstract

In this report, a novel 3D reconstruction method based on coplanarities, which are obtained for a set of points observed from a single camera, is proposed. Information of coplanarities can be acquired not only from scenes composed of polyhedrons, but also from genral scenes lit by line laser projectors. Linear equations can be obtained from coplanarities and the solution is a linear space of 4 or more dimensions. By enforcing metric constraints such as orthogonality of planes to the solution space, we can obtain Euclidean reconstruction. Such constraints can be easily acquired by devising a configuration of line laser projectors. Validity of our method are shown by experiments on CG-generated scenes and a real scene.

1 序論

複数の点が同一平面上にある場合、それらの点は共面である (coplanar) といい、このような性質を共面性 (coplanarity) という。このような共面性は、カメラなどで観測された3次元シーン等においても、しばしば観測される。例えば、多面体で構成された3次元形状が観測された時、その一つの面上にある頂点は共面である。

単眼カメラで観測されたシーン上のある点が、異なる複数の平面上にある場合、それらの平面のパラ

メータについての制約条件が存在する。これを用いて、点の集合と、それらの点の共面性の情報から、各点が含まれる平面パラメータの関係について連立方程式を作成すると、4以上の次元を持つ線形解空間を得ることができる。しかし、自然画像において観測される共面性は、平面で構成されたシーンについて観測されるのみであること、また、通常の画像から得られる共面性では、得られる条件の数は多くなく、小さな次元の解空間を得ることが難しいことなどから、線画の代数的理解や、限定されたシーンについての3次元復元への応用があるのみであった

[1].

ラインレーザをシーンに照射し、そのレーザ反射をカメラで観測した場合、レーザ反射が観測された点はすべて共面である。さらに、ラインレーザを動かしながら、複数の画像を得ることで、非常に多くの共面性の情報を容易に得ることができる。このことから、ラインレーザを照射しながら共面性情報を集めることで、平面性などの制約のない一般のシーンにおいて3次元復元を行うことが出来る可能性がある。本報告では、このようにして獲得された複数の共面性の条件から、3次元復元問題について4自由度の解空間を獲得し、さらにこの解に、平面の直交性、平行性といったメトリックな条件（本報告では、角度、距離など、ユークリッド空間において意味のある条件をこう呼ぶことにする）を追加することで、ユークリッド復元を実現する手法を提案する。例えば、2本のレーザ平面を直交するように取り付けるなどしてレーザプロジェクタを構成すれば、スケーリングの自由度を除いた3次元復元が可能となる。

過去に同様なシステム構成で3次元復元を実現する手法が筆者らにより提案されている[2]。しかし、そこで提案された手法は、透視投影を正射影で近似し、近似された問題を解くという手順を含むため、方程式の解が不安定になる場合があり、また、ラインレーザの照射の仕方や、レーザ平面同士の角度などの関係も、単一のパターンを仮定しているため柔軟性が無く、実用上の問題が大きかった。

今回提案する手法では共面性情報からの自由度を残した(典型的には4自由度)再構成と、メトリックな制約条件の充足の2段階で解く方法であるため、ラインレーザの照射の仕方の制限が少なくなり、任意の組み合わせの照射パターンから制約条件を作成することができる。また、問題を解くために近似を利用しないので、近似による解の不安定性も無い。さらに、メトリックな制約条件として、直交性だけでなく、平行条件などを利用することも容易である。

本報告に関連する研究を挙げる。すでに述べたとおり、単眼視による3次元復元や、線画理解に関する研究には、共面性の条件を利用するものが多い[1][3]。これらの研究は、平面からなるシーンのみを対象としたものである。アクティブビジョンにおいて、3次元再構成を行う研究の例としては、Wooらや[4]、古川ら[5]が挙げられる。これらの研究は、対象空間か、プロジェクタに固定された空間に、機知

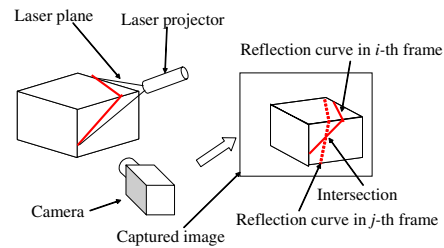


図 1: アクティブビジョンによる共面性の取得.

のフレームやマーカを配置し、それによってレーザ平面の位置推定を行う。ラインレーザの反射のみによって3次元復元を行った例としては、日浦ら[6]の研究がある。この研究は、固定された平行スリット光源を用意する必要がある点で、本報告の手法と異なるが、平行性と、平面同士の距離の仮定を制約条件とすることで、彼らの問題を本報告の手法で解くことが可能だと思われる。

2 共面性からの再構成

2.1 問題設定

校正されたピンホールカメラと、シーンがあるとする。シーンは複数の点からなり、それらの点はカメラから観測可能であるが、深さは未知となる。ここで、シーン中の複数の点が、同一平面上に存在すること(共面性)が、観測から得られるとする。このような情報は、ラインレーザを照射した反射位置を観測することで得ることができる。この時のシステムの概要を図1に示す。カメラで観測されたラインレーザの反射点は、すべて同一平面上にある。この時、ラインレーザを動かしながら、複数の画像を取ることで、非常に多くの共面性に関する情報を得ることができる。

以下に、問題の定式化について述べる。ピンホールカメラを中心とし、カメラから見て右側を x 軸、上方を y 軸、後方を z 軸方向とするカメラ座標系を考える。シーン中の点が、カメラ座標系で $\mathbf{p}_i = (x_i, y_i, z_i)^\top, 1 \leq i \leq N$ であるとする。 i は点のインデックスを、 N は点の数を表す。 $\mathbf{p}_i$ を、カメラのスクリーンに投影したとき、スクリーン上での2次元位置を $\mathbf{q}_i = (u_i, v_i)^\top$ とする。 $\mathbf{q}_i$ は、3次元射影空間 $\mathbb{P}^3$ から2次元射影空間 $\mathbb{P}^2$ への射影変換を

表す 3 行 4 列の射影行列 $\mathbf{P}$ を用いて,

$$\tilde{\mathbf{q}}_i = \mathbf{P}\tilde{\mathbf{p}}_i \quad (1)$$

の式で計算される. ただし, $\tilde{\mathbf{p}}$ は, 点 $\mathbf{p}$ を同次座標で表したベクトルである.

シーン中の複数の点に共面性をあらわすために, 同一平面上にある点のインデックスの集合を考え, さらにそれらの集合を Π とあらわす. 例えば, $\Pi = \{\{1, 2, 3\}, \{1, 4, 5, 6\}, \dots\}$ である場合, $\mathbf{p}_0, \mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2$ が同一平面上にあり, $\mathbf{p}_0, \mathbf{p}_3, \mathbf{p}_5$ が別の平面上にあることがわかる. 集合 Π の各要素 (これも集合である) にインデックスをつけ, インデックス $j (1 \leq j \leq M)$ であらわされる集合を Π_j で表すとする. さらに集合 Π_j の要素にもインデックス k をつけ, その要素を $\Pi_{j,k}$ で表すとする. 上記の例の場合, $\Pi_{1,1} = 1, \Pi_{1,2} = 2, \Pi_{1,3} = 3, \Pi_{2,1} = 1, \Pi_{2,2} = 4, \Pi_{2,3} = 5, \Pi_{2,4} = 6$ となる. 集合 Π_j に含まれる点の一つの平面上にあるので, この平面を π_j であらわす.

上記の条件で, 共面性からの 3 次元再構成 (Shape reconstruction from coplanarity, 以下, SRC) は, 以下のように定式化される.

SRC $\mathbf{q}_0 = (u_0, v_0)^\top, \dots, \mathbf{q}_N = (u_N, v_N)^\top$ と, 共面性の条件を表す集合

$$\begin{aligned} \Pi = & \{ \{ \Pi_{1,1}, \dots, \Pi_{1,|\Pi_1|} \}, \\ & \{ \Pi_{2,1}, \dots, \Pi_{2,|\Pi_2|} \}, \\ & \dots, \\ & \{ \Pi_{|\Pi|,1}, \dots, \Pi_{|\Pi|,|\Pi_{|\Pi|}|} \} \} \end{aligned} \quad (2)$$

と, カメラを表す射影行列 $\mathbf{P}$ が与えられるとする. このとき, $\tilde{\mathbf{q}}_i = \mathbf{P}\tilde{\mathbf{p}}_i$ であり, $1 \leq j \leq |\Pi|$ の範囲の j の値それぞれについて, $\mathbf{p}_{\Pi_{j,1}}, \dots, \mathbf{p}_{\Pi_{j,|\Pi_j|}}$ が同一平面上にあるような $\mathbf{p}_0, \dots, \mathbf{p}_N$ を求めよ.

さらに, 与えられるスクリーン座標 $\mathbf{q}_0 = (u_0, v_0)^\top, \dots, \mathbf{q}_N = (u_N, v_N)^\top$ について, 以下の仮定をおく.

複数の共面性の仮定 任意の 3 次元点 $\mathbf{p}_i$ について, $i \in \Pi_l, i \in \Pi_m (l \neq m)$ である. つまり, $\mathbf{p}_i$ は, 少なくとも 2 個以上の平面に含まれる.

非共線性の仮定 任意の j について, スクリーン座標の集合 $\{\mathbf{q}_{\Pi_{j,1}}, \dots, \mathbf{q}_{\Pi_{j,|\Pi_j|}}\}$ は, 同一直線状にはない.

4 点以上の共面性の仮定 任意の j について, $|\Pi_j| \geq 4$. つまり, 3 点以下の点の共面性は, 共面性の条件に含めない.

“複数の共面性の仮定” を置くのは, 1 平面にのみ含まれる点は, 3 次元再構成の情報にならないためである. 図 1 のシステムでは, これは, 点集合として, 複数のレーザ反射曲線の画像面での交点のみを考えることにあたる. “非共線性の仮定” も同様に, $\{\mathbf{q}_{\Pi_{j,1}}, \dots, \mathbf{q}_{\Pi_{j,|\Pi_j|}}\}$ がスクリーン上で共線性を持つ場合, 3 次元再構成の情報にならないことから除外した. 非共線性の仮定より, 任意の j について平面 π_j は原点を通らない. “4 点以上の共面性の仮定” は, 任意の 3 点は共面性を持つため, 3 点の共面性は条件としての意味を持たないことによる.

2.2 カメラの射影行列の分解

カメラによる射影を表す行列 $\mathbf{P}$ は, 正規化カメラの場合,

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

と表される. このとき,

$$\mathbf{Q} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

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

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & -1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{pmatrix} \quad (6)$$

という表記を用いると,

$$\mathbf{P} = \mathbf{Q}\mathbf{R}_{\alpha,\beta,\gamma,\delta}\mathbf{S} \quad (7)$$

と分解することができる ($\alpha, \beta, \gamma, \delta$ は任意). $\mathbf{Q}$ は正射影投影を表す行列である. $\mathbf{S}$ は, 図 2 に表されるように, 透視投影における視錐体の領域を, 画

像面に平行な面を持つ直方体の領域に変換するような 3 次元 Homography である。この変換は、原点を z 軸方向の無限遠点に移動するため、この変換と正射影投影の組み合わせは透視投影と等価になる。また、 $\mathbf{R}_{\alpha,\beta,\gamma,\delta}$ は、 z 座標のみを変化させるような 3 次元 Homography である。よって、透視投影カメラによる射影 $\mathbf{P}$ は、 $\mathbf{S}$ による 3 次元 Homography と、 $\mathbf{R}_{\alpha,\beta,\gamma,\delta}$ による z 座標の変換と、正射影投影の組み合わせとみなせることがわかる。

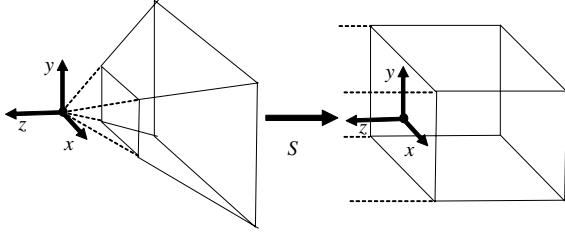


図 2: 透視投影から正射影投影への変換。

2.3 問題の変換と解の自由度

前節で述べた射影行列 $\mathbf{P}$ の分解を用いると、SRC の条件である $\tilde{\mathbf{q}}_i = \mathbf{P}\tilde{\mathbf{p}}_i$ は、 $\tilde{\mathbf{q}}_i = \mathbf{Q}\mathbf{R}_{\alpha,\beta,\gamma,\delta}\mathbf{S}\tilde{\mathbf{p}}_i$ となる。ここで、 $\mathbf{S}\tilde{\mathbf{p}}_i$ を $\tilde{\mathbf{r}}_i$ で置き換えた問題を、“正射影による SRC” (SRC with orthogonal projection, 以下 SRCO と記す) と呼ぶことにする。

SRCO SRC と同じ条件を仮定する。 $\tilde{\mathbf{q}}_i = \mathbf{P}\mathbf{S}^{-1}\tilde{\mathbf{r}}_i = \mathbf{Q}\mathbf{R}_{\alpha,\beta,\gamma,\delta}\tilde{\mathbf{r}}_i$ であり、かつ、 $1 \leq j \leq |\Pi|$ の範囲の j の値それぞれについて、 $\mathbf{r}_{\Pi_{j,1}}, \dots, \mathbf{r}_{\Pi_{j,|\Pi_j|}}$ が同一平面上にあるような $\mathbf{r}_0, \dots, \mathbf{r}_N$ を求めよ。

この問題の名前に“正射影による”とあるのは、行列 $\mathbf{Q}\mathbf{R}_{\alpha,\beta,\gamma,\delta}$ による射影が、 $\mathbf{R}_{\alpha,\beta,\gamma,\delta}$ による z 座標の変換と $\mathbf{Q}$ による正射影との合成変換とみなせることによる。 $\mathbf{p}_0, \dots, \mathbf{p}_N$ が SRC の解ならば、 $\mathbf{r}_0 = \mathbf{S}\tilde{\mathbf{p}}_0, \dots, \mathbf{r}_N = \mathbf{S}\tilde{\mathbf{p}}_N$ は SRCO の解である。

SRC, SRCO の解は、4 以上の自由度を持つ。これは、 $\mathbf{r}_0, \dots, \mathbf{r}_N$ が、SRCO の解とすると、任意の実数 $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$ について、 $\mathbf{R}_{\theta_1,\theta_2,\theta_3,\theta_4}\mathbf{r}_0, \dots, \mathbf{R}_{\theta_1,\theta_2,\theta_3,\theta_4}\mathbf{r}_N$ も解であることによる。

2.4 解法

本節では、SRCO の解法について述べる。

$\tilde{\mathbf{q}}_i = \mathbf{Q}\mathbf{R}_{\alpha,\beta,\gamma,\delta}\tilde{\mathbf{r}}_i$ という条件から、 $\mathbf{r}_i$ の第一要素と第二要素はそれぞれ u_i, v_i に等しいことがわかる。よって、 z_i を変数として、 $\mathbf{r}_i = (u_i v_i z_i)^\top$ とおく。

Π_j は平面 π_j 上に存在する点のインデックスの集合である。平面 π_j を、方程式

$$z = a_j x + b_j y + c_j \quad (8)$$

で表す。 z 軸に平行な平面は、この表記では表せないが、非共線性の仮定は、SRCO において、任意の j について平面 π_j が z 軸に平行でないことを表すので、上記の方程式は一般性を失わない。このとき、共面性の条件は、以下のように表現できる。

$$\bigwedge_{1 \leq j \leq |\Pi|} \bigwedge_{1 \leq k \leq |\Pi_j|} (z_{\Pi_{j,k}} = a_j u_{\Pi_{j,k}} + b_j v_{\Pi_{j,k}} + c_j) \quad (9)$$

この条件は、 $z_i, a_j, b_j, c_j, 1 \leq i \leq M, 1 \leq j \leq |\Pi|$ を変数とする、連立斉次 1 次方程式である。

上記の連立方程式は、 z_i を変数に含むが、点の数 M は、面の数 $|\Pi|$ に比べて非常に大きくなることがあり、 z_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。例えば、実験で用いた、図 4(a) のデータでは、面の数が 40 であるのに対し、点の数は 613 にもなる。変数の数が多くなると、連立方程式を数値計算で解く場合の計算量が増え、誤差も大きくなる。よって、 z_i を方程式から消去し、 a_j, b_j, c_j のみの方程式にすることが望ましい。複数の共面性の仮定より、任意の 3 次元点 $\mathbf{p}_i$ について、 $i \in \Pi_j, i \in \Pi_l, (j \neq l)$ であるので、 $i = \Pi_{j,k} = \Pi_{l,m}$ として、方程式

$$z_{\Pi_{j,k}} = a_j u_{\Pi_{j,k}} + b_j v_{\Pi_{j,k}} + c_j \quad (10)$$

と

$$z_{\Pi_{l,m}} = a_l u_{\Pi_{l,m}} + b_l v_{\Pi_{l,m}} + c_l \quad (11)$$

の両辺の差から、

$$(a_j - a_l)u_{\Pi_{j,k}} + (b_j - b_l)v_{\Pi_{j,k}} + (c_j - c_l) = 0 \quad (12)$$

が得られる。これにより、 a_j, b_j, c_j のみを変数とする連立斉次方程式を得ることができる。

得られた連立方程式の係数行列を $\mathbf{L}$ とする. $\mathbf{L}$ の列の数は $(3|\Pi|)$ である. 行の数は, z_i の消去の仕方に依存するが, 仮にすべての点が 2 個の面の上にある (この仮定は, 平面 $\pi_j (1 \leq j \leq |\Pi|)$ が一般の位置にある場合には成立する), それぞれの面の方程式の差をとって z_i を消去したとすると, 行の数は点の数に一致し, M 行となる. 以後, $\mathbf{L}$ を M 行 $(3|\Pi|)$ 列として議論を行う.

SRC 問題の解は 4 以上の自由度を持つ. シーンの平面の数に対して, 十分な数の点があり (つまり $M > 3|\Pi|$), かつ平面 $\pi_j (1 \leq j \leq |\Pi|)$ が一般の位置にあるならば, $\mathbf{L}$ のランクを $\text{Rank}(\mathbf{L})$ として $\text{Rank}(\mathbf{L}) = 3|\Pi| - 4$ である. このとき SRC あるいは SRCO は, 4 自由度の解を持つ.

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 $(3|\Pi|)$ 次の直交行列であり, $\mathbf{\Sigma}$ は M 行 $(3|\Pi|)$ 列行列で, $\mathbf{L}$ 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. $\text{Rank}(\mathbf{L}) = 3|\Pi| - 4$ から,

$$\begin{aligned} \Sigma_{i,i} &\neq 0 (i \leq 3|\Pi| - 4 \text{ の場合}) \\ \Sigma_{i,i} &= 0 (i > 3|\Pi| - 4 \text{ の場合}) \end{aligned} \quad (13)$$

方程式の解ベクトルを $\mathbf{x}$ とすると $\mathbf{L}\mathbf{x} = \mathbf{0}$ である.

$$\mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^\top \mathbf{x} = \mathbf{0} \quad (14)$$

であることと, $\mathbf{\Sigma}$ の形から,

$$\mathbf{V}^\top \mathbf{x} = (0 \ 0 \ \cdots \ 0 \ f_1 \ f_2 \ f_3 \ f_4)^\top \quad (15)$$

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,

$$\begin{aligned} \mathbf{f} &= (0 \ 0 \ \cdots \ 0 \ f_1 \ f_2 \ f_3 \ f_4)^\top, \\ \mathbf{x} &= \mathbf{V}\mathbf{f} \end{aligned} \quad (16)$$

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.

実際の問題では誤差のために条件 (13) 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, $\max_{\mathbf{x} \in \mathbf{S}} (\|\mathbf{L}\mathbf{x}\| / \|\mathbf{x}\|)$ を最小化するような 4 次元部分空間 $\mathbf{S}$ になるので, 解法はそのままよい. ただし, 共面性の条件が少ない場合や, 平面の配置に特殊性がある場合など, 5 個以上の特異値が 0 に近い時には, 上記の解は不安定になる. このような場合, 解空間として 5 次元以

上の線形空間を採用することも考えられる. これらのことから, 4 次元の解空間を利用する場合において, 4 番目に小さい特異値と 5 番目に小さい特異値の比 $\lambda_{|\Pi|-5} / \lambda_{|\Pi|-4}$ は解の不安定性の指標となりえる. この値が 1 に近い場合, 解が不安定である可能性がある.

2.5 メトリックな拘束によるユークリッド復元

前節で得られた SRC の解は, $f_1, \dots, f_4$ による 4 自由度を持つ. こ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, それによって解の自由度の一部, あるいはすべてを解消できる場合がある.

例として, ラインレーザを投射して共面性条件を得る場合を考える. この時, ラインレーザを 2 個, レーザ平面が直交するようにプロジェクタに取り付けたとする. このプロジェクタによってシーン中の共面な点を得た場合, 同時に取得された 2 個のレーザ平面の直交性を制約条件として利用できる.

平面 π_s と平面 π_t が直交する場合を考える. SRCO 問題における平面 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, $\mathbf{n}_s(\mathbf{f}) = N((a_s(\mathbf{f}) \ b_s(\mathbf{f}) - 1)^\top)$ とおく. ただし $N()$ は, ベクトルの正規化を表すとする. この平面の法線ベクトルは, 対応する SRC 問題において, $\mathbf{S}^{-1}\mathbf{n}_s(\mathbf{f})$ であるので, 直交性の条件は,

$$\{(\mathbf{n}_s(\mathbf{f}))^\top \mathbf{S}^{-\top} \mathbf{S}^{-1} \{\mathbf{n}_t(\mathbf{f})\} = 0 \quad (17)$$

と記述できる.

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ことが考えられる. 別の方法としては, この式を $f_1, \dots, f_4$ の多項式方程式として, Grobner 基底を用いて解く方法 [2] も有効であると考えられる. 非線形最適化を利用する方法の利点としては, 目的関数の構成の仕方に自由度が大きく, さまざまな種類の拘束条件を扱いのに都合がよいこと, また, 多数の拘束条件に対応しやすいことが挙げられる. ただし, 場合によっては最適化の過程で, 目的関数の極小値に収束してしまう可能性がある. Grobner 基底を用いて解く方法は, すべての可能な解を同時に得られるという利点があるが, 方程式は多項式でなければならず,

また、あまり多くの変数や、高次元の多項式を扱うことは難しい、という欠点がある。本報告の実験では、非線形最適化を利用したユークリッド復元を実装している。

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 $\mathbf{x}_I$ を作成し、これから $\mathbf{f}_I = \mathbf{V}^\top \mathbf{x}_I$ とし、 $\mathbf{f}_I$ 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 (3| Π |次元) から、線形方程式の解空間 (4次元) に対し、 $\mathbf{x}_I$ と $\mathbf{f}_I$ 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。

互いに直交するような平面の集合を、平面のインデックスの対の集合 $V = \{(s_i, t_i) | 1 \leq i \leq L\}$ で表すとする。この時非線形最適化の目的関数としては、

$$F(\mathbf{f}) = \sum_{(s,t) \in V} [\{\mathbf{n}_s(\mathbf{f})\}^\top \mathbf{S}^{-\top} \mathbf{S}^{-1} \{\mathbf{n}_t(\mathbf{f})\}]^2 \quad (18)$$

とすればよい。直交性の条件だけでは、解のスケールリングの自由度は解消できず、実質 3 変数の最適化となる。よって、 $\mathbf{f}$ の 4 個の自由変数の一つを固定し、残りの 3 変数について非線形最適化を行う。

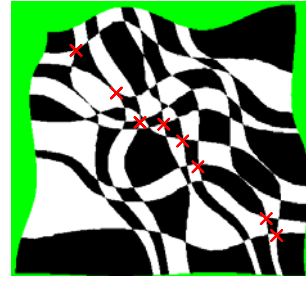
同様に、2 個のラインレーザを平行にプロジェクタに取り付けたとすると、平面の平行性を条件に加えることが出来る。平行な平面のインデックスの対を集合 $W = \{(s_i, t_i) | 1 \leq i \leq L\}$ で表すと、目的関数としては、

$$F(\mathbf{f}) = \sum_{(s,t) \in W} [\{\mathbf{S}^{-1}(\mathbf{n}_s(\mathbf{f}))\} \times \{\mathbf{S}^{-1}(\mathbf{n}_t(\mathbf{f}))\}]^2 \quad (19)$$

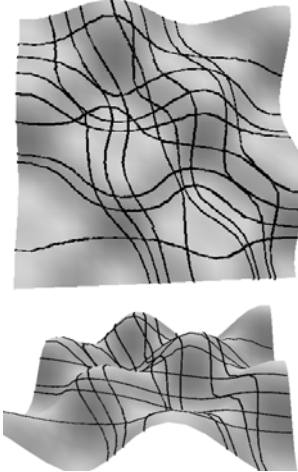
などが考えられる。この場合、さらにラインレーザ間の距離が既知である場合には、スケールリングの自由度も解消でき、完全なユークリッド復元が可能である。

3 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、2.5 節の例で挙げたような、



(a) 曲面 $z = (\sin x)(\sin y)$: 入力画像.



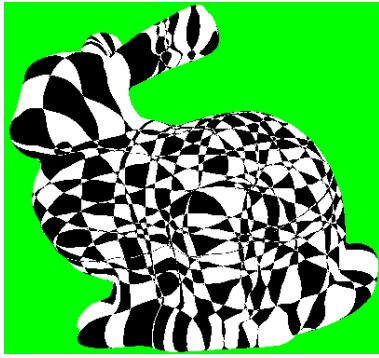
(b) シェーディング付正解形状と復元結果 (曲線).

図 3: 曲面 $z = (\sin x)(\sin y)$ による実験.

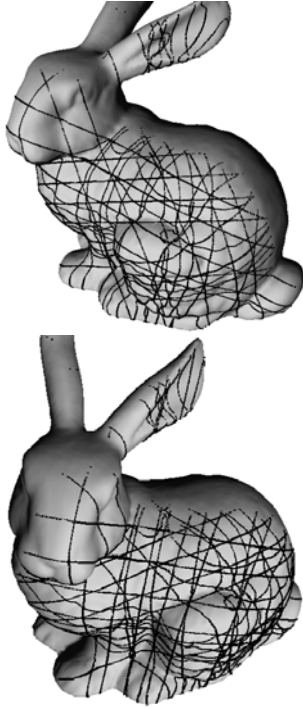
直交する 2 個のラインレーザから成るプロジェクタを利用することを想定した。メトリックな拘束を解くために、前節で述べた非線形最適化に基づく方法を、Levenberg-Marquardt 法を用いて実装した。

3.1 CG 生成されたデータによる実験

図 3(a) に CG でデータを生成したときのデータを示す。このデータの形状は、 $z = (\sin x)(\sin y)$ で表現される曲面である。このような曲面に、さまざまな角度からレーザプロジェクタを投影したときのレーザ平面と形状の交わる曲線を計算した。図における格子状の模様において、格子の境界はこのような曲線を表す。これらの境界の交点の画像面での位置が、入力 $\mathbf{q}_0 = (u_0, v_0)^\top, \dots, \mathbf{q}_N = (u_N, v_N)^\top$ として用いられた。レーザプロジェクタの投影は 8 回行われ、16 個のレーザ平面が存在する。また、×印でマークされた交点においては、空間を区切る平面が直交する。非線形最適化の初期値を与えるため、プロジェクタの方向について、右上、右下、左上、



(a) バニー:入力画像.



(b) シェーディング付正解形状と復元結果 (曲線).

図 4: バニーによる CG 実験.

左下のどちらから照射したか、という情報のみ与えた。この例では、左上から4回、右下から4回、レーザ照射を行うようにした。これにより、例えば、右上から照射したとき、横方向のレーザ平面として、 $z = 0x + 1y - 1$ という初期平面を与えた。自由変数 $f_1, \dots, f_4$ の初期値は、2.5 節に記述した方法で作成した。

これらの条件の下で、ユークリッド復元が行なわれた。2.5 節で述べたように、この問題設定ではスケールリングの自由度は解消不能なので、ユークリッド復元を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。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リングを施した。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(b) 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、より一般的な曲面として、バニーの形状データにレーザプロジェクタを投影したときの反射曲線を計算した。図 4(a) に反射曲線の画像を示す。この例において、レーザは20回投影された。プロジェクタの方向は、5回ずつ、右上、左上、右下、左下から照射するようにした。レーザ平面数は40、交点数は613になった。図 4(b) に復元結果と正解形状を示す。このデータにおいても、復元結果としてほぼ正しい形状が得られた。

3.2 実データによる実験

次に、直交する2つのラインレーザからなるプロジェクタと、ビデオカメラを用いて、実際のシーンについて実験を行った。計測手順としては、まず、直方体の形状を持った対象物体にビデオカメラを向け、2つのラインレーザを十字状に組み合わせたパターンを投影しながらこれを撮影し、画像系列を得た。続いて、この画像系列から、適当な画像を複数枚選択し、それらの画像上で反射曲線およびその交点を検出し、提案手法により各反射曲線の3次元再構成を行った。画像の選択においては、線型方程式のランク落ち等の弊害を避けるため、レーザ平面がカメラ中心にあまり近くならないよう考慮した。

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 5(a)~(f) に示す。入力画像7枚を用いた再構成結果においては、直方体の辺の直交性や、各面の平面性などが、よく再現されていることが分かる。さらに、この再構成結果をもとにして、他の全てのフレームについて、レーザ平面の推定および3次元復元を行った。これは、そのフレームと推定された再構成結果の共通点を検出し、これを主成分分析によって平面近似することで行った。結果を図 5(g) に示す。密な形状が正しく復元できていることが分かる。

本実験では、7枚の画像(14平面)について再構成を行い、その結果から密な再構成を行ったが、比較のために、5枚の画像(10平面)について同様の処理を行った例を図 5(h) に示す。図 5(h) においては、中心付近でうまく3次元復元が出来ずに多くのノイ

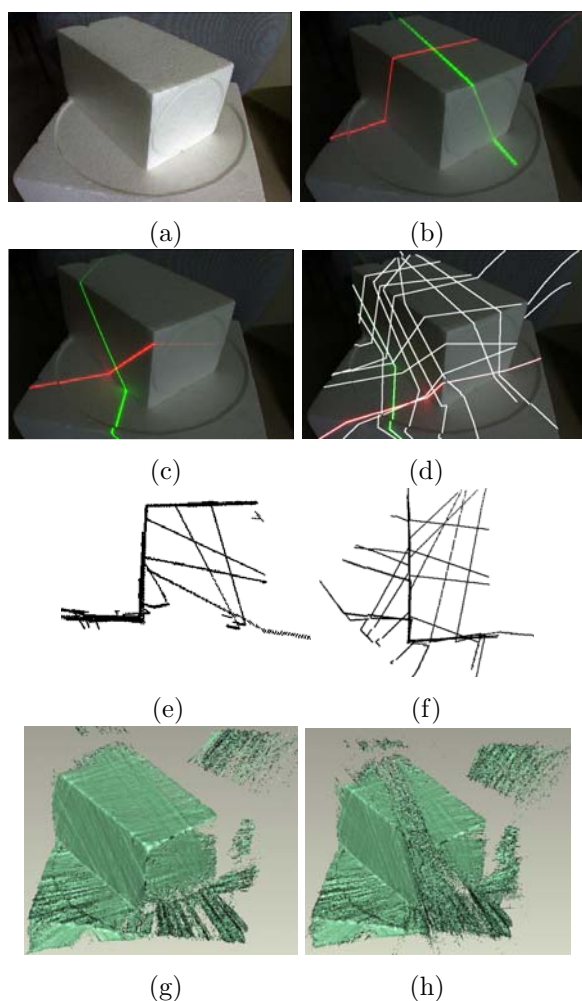


図 5: 実データの入力画像: (a) 対象物体, (b)(c) 入力画像例, (d) すべての検出された曲線 (e) 再構成結果 (上方視点), (f) 再構成結果 (側方視点), (g) 密な再構成 (7 画像の再構成結果から), (h) 密な再構成 (5 画像の再構成結果から)。

ズが発生していることが分かる。このことより、多くの画像を利用することで、再構成結果のノイズの低減に役立っていることが確認できる。我々の以前の研究 [2] では、5 枚の画像を利用することを前提としていたのに対し、本手法はその制約がなく、精度の良い 3 次元再構成を実現できた。これは本手法の大きな利点と言える。

4 結論

本報告では、シーン中の点群の共面性と、それらの面の平行性、直交性等のメトリックな制約条件を

利用することで、3 次元復元を行う手法を述べた。共面性の制約を表現する線型方程式は、4 次元の解空間を持つ。メトリックな制約条件は、その空間中での方程式として定式化できるので、これを非線形最適化などの手法により解くことで、シーンを再構成することができる。

こうした共面性を持つ点の集合は、アクティブビジョンの手法を利用することで、一般のシーンにおいて容易に取得できる。本報告では、2 個のラインレーザを搭載したプロジェクタを対象シーンに照射し、複数回カメラで撮影することで共面性の条件を抽出する方法を示した。また、メトリックな制約条件としては、2 個のラインレーザが直交することを利用した。

この手法を、シミュレーションによる合成データと、実システムによる実際のデータに適用したところ、正しく 3 次元復元を行うことができ、本手法の有効性を確認することが出来た。

本報告の手法は、プロジェクタなどを利用せずに撮影した、多面体のシーンの解析においても、十分な数の交点と、直交性や平行性などの条件がある場合には、そのまま適用できる可能性がある。今後の課題として、そのような手法による単画像からの 3 次元復元も考えられる。

参考文献

- [1] 杉原: “多面体線画の代数的解析法”, 電子通信学会論文誌, **62D**, 3, pp. 201–208 (1979).
- [2] 川崎, 古川, 中村: “ラインレーザの自己校正による 3 次元復元手法, アクティブ 3 次元計測における最小構成システムについての提案”, MIRU 2006, pp. OS4A–3 (2006).
- [3] M. Wilczkowiak, E. Boyer and P. Sturm: “Camera calibration and 3d reconstruction from single images using parallelepipeds”, Proceedings of the 8th International Conference on Computer Vision, Vancouver, Canada, Vol. 1, IEEE Computer Society Press, pp. 142–148 (2001).
- [4] C. W. Chu, S. Hwang and S. K. Jung: “Calibration-free approach to 3D reconstruction using light stripe projections on a cube frame”, Third Int. Conf. on 3DIM, pp. 13–19 (2001).
- [5] R. Furukawa and H. Kawasaki: “Interactive shape acquisition using marker attached laser projector”, Int. Conf. on 3DIM2003, pp. 491–498 (2003).
- [6] 日向, 佐藤: “ハンドスイープされたスリット輝線の幾何拘束に基づく三次元復元”, MIRU 2005, pp. IS3–132 (2005).