

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

川崎 洋[†] 古川 亮^{††} 中村 泰明^{††}

[†] 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 広島県広島市安佐南区大塚西 3-4-1

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

あらまし 自己校正はコンピュータビジョンにおける重要な研究課題であり、ステレオカメラを中心に盛んに研究が行われてきた。ところが、光切断法などのようなアクティブビジョンシステムにおける自己校正に関する研究はこれまで非常に少なかった。本論文では、光切断法におけるレーザ平面位置の自己校正について検討する。これは、固定カメラで撮影した画像系列で観測される複数のレーザ反射の曲線位置のみを用いて、各レーザ平面を推定する問題である。この問題における拘束式は、観測された曲線間の交点から得られる。本論文において、相対的な位置関係が既知の2本のラインレーザを用いる場合には、この問題を解くことが可能であることが示される。最適化を用いてこの問題を解くには、目的関数の極小値の多さが問題となる。我々は近似された問題を Gröbner 基底を用いて解くことで、最適化のための初期解を得る方法を提案する。この初期解を用いれば、非線形最適化により高い精度で3次元復元が可能である。

キーワード 自己校正, 光切断法, 3次元計測

3D scene reconstruction method by self-calibrating multiple laser planes

Minimum configuration of active 3D scanning system

Hiroshi KAWASAKI[†], Ryo FURUKAWA^{††}, and Yasuaki NAKAMURA^{††}

[†] Saitama University, 255 Shimo-ohkubo, Sakura-ku, Saitama, 338-8570 Japan

^{††} Hiroshima City University, Faculty of information sciences

3-4-1, Ozuka-higashi, Asaminami-ku, Hiroshima, 731-3194 Japan

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

Abstract Self-calibration is one of the most important topic for Computer Vision. However, in the case of the light sectioning method, little research has been conducted. In this paper, we study the problem of self-calibration for the light sectioning method, which can be defined as the estimation of multiple laser planes from the curves of laser reflections observed from a sequence of images. The constraints of the problem can be obtained from the observed intersection points between the curves. We show that, if two line lasers are fixed with a known angle, this problem can be solved. To solve this problem using optimization, local minimas of the target function are serious problems. Thus, we propose a method to estimate an initial solution by solving an approximated problem using Gröbner bases. The initial solution can be refined by nonlinear optimization to obtain the final result.

Key words Self-calibration, light-sectioning method, 3D shape measurement

1. 序 論

カメラパラメータを、既知形状などを用いずに、観測データそのものから得る手法は、カメラの自己校正と呼ばれる。例えば、ステレオカメラの外部パラメータを、対応点の情報から自

己校正で求める方法は、その実用性から多くの研究がなされてきた。それらの研究成果は、Faugerasらの著書[1]に詳しくまとめられている。

アクティブビジョンにおける自己校正も同様に定義できる。例えば、光切断法を用いたレンジファインダを作成する場合、

カメラとレーザ平面との相対位置の校正を行う必要がある．そのための方法として，形状既知の対象を計測する手法や，レーザ平面に対して固定された位置にあるマーカを計測する手法などが挙げられるが，これらは陽な校正手法である．ここで形状未知の任意物体を用いて平面パラメータの推定と形状復元を同時に行う方法が，光切断法における自己校正にあたる．ところが，このような光切断法における自己校正についての研究はこれまでほとんど行われてこなかった．

その理由の1つとして，レーザ平面の自己校正が難しい問題であり，単独カメラとラインレーザ一個という典型的なシステム構成では，平面位置を推定するための十分な拘束が得られないことが挙げられる(2.2.1節参照)．これは，ステレオカメラの自己校正問題が，対応点情報のみから解けることと対照的である．

この問題を克服するための一つの方法は，複数のレーザ平面を観測することでより多くの拘束式を得ることである．このために，2種類の方法が考えられる．片方は一つのレーザプロジェクタに複数のラインレーザを搭載する方法で，もう一つはレーザプロジェクタを動かしながら複数の画像を撮影する方法である．どちらの方法でも，レーザ平面で照射された位置の軌跡である画像上の曲線のなす交点から平面パラメータの拘束式が得られる．十分な数の拘束式が得られるなら，自己校正問題が解ける可能性がある．

本論文では，固定カメラで撮影された単一あるいは複数の画像から，多数のレーザ平面の自己校正問題を解く方法について述べる．この問題は，多数の未知変数を含む連立多項式方程式として定式化される．我々は，幾つかのシステム構成において，この問題を解くことが可能であることを示し，実際に数値解を求める手順を述べる．本手法は代数的な方法により求められた初期解を，非線形最適化によって改良するものであり，事前知識なしに解を求めることが出来る．

さらに，我々は，提案された自己校正方法を用いて，自己校正可能な3次元計測システムを提案する．このシステムの特徴として，(1) 単一カメラと，2個のラインレーザを搭載するレーザプロジェクタのみからなり，可搬性が高いこと，(2) レーザプロジェクタは自己校正されるので，ユーザが自由にプロジェクタを動かすことが出来ること，(3) 解を求めるために，プロジェクタ位置やシーンに関する事前知識を必要としないことが挙げられる．

以下，関連研究について述べる．光切断法における校正の研究は，ハンドスイープ方式の光切断法に関連して行われたものが多い[2]~[5]．例えば，Wooら[6]は，立方体のフレームのカメラの視界内に置き，ラインレーザで照射されたフレーム上の点を観測することで，陽な校正を実現した．古川ら[7]は，LEDマーカをラインレーザに固定することで校正を行った．これらの研究は実時間で校正を行うが，自己校正は実現されておらず，既知形状やマーカを対象シーンと同時に撮影する必要がある．日浦ら[8]は，補助的な平行スリット光源を，ハンドスイープされるラインレーザと組み合わせる手法を提案した．この手法は自己校正に近いが，固定された平行スリット光源を用

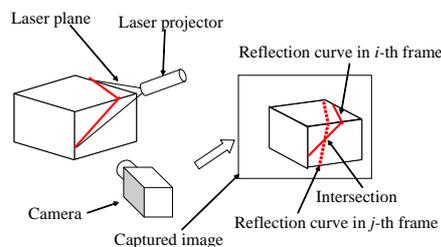


図1 システム構成.

Fig. 1 Configuration of the system.

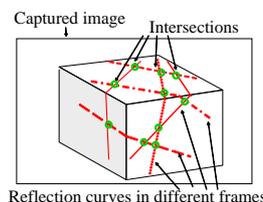


図2 反射曲線の交点.

Fig. 2 Intersections of the reflection curves.

意する必要がある点で，本論文の手法と異なる．

2. レーザ平面の自己校正

2.1 問題設定

本研究のアクティブビジョンシステムは，固定カメラとラインレーザを搭載したレーザプロジェクタから成る(図1)．カメラの内部パラメータは既知であると仮定する．プロジェクタから投射された光は，シーンの表面で反射し，カメラによって画像上の曲線として観測される．以下，本論文ではこれらの曲線を「反射曲線」と呼ぶ．

シーン形状のスキャンは，レーザプロジェクタを手動，あるいは機械的に振りながら，画像系列を取得することで行なわれる．プロジェクタが動くに従い反射曲線が画像上で移動するため，画像系列から複数の反射曲線が得られる．これらの反射曲線の集合から投射されるレーザ平面の位置を推定することが，解決すべき問題である．各レーザ平面の位置が得られれば，三角測量の原理によってシーンの3次元形状が得られる．

ここでは，全ての反射曲線を一つの画像座標上に描いた時の交点に着目する(図2)．各交点はシーンの表面上の一点に対応する．また，この3次元点は，対応する交点を通る反射曲線を作り出すレーザ平面上にある．従って，以下のようにして連立方程式が得られる．

z 軸に対して平行でない平面は，平面のパラメータを a, b, c として， $ax + by + z + c = 0$ と表される．インデックス i, j で表される2個のレーザ平面と，シーンの表面とが交点を持つと仮定し，その点の，正規化カメラにおけるスクリーン座標が $(u_{i,j}, v_{i,j})$ であるとする．この点の深さを $t_{i,j}$ とすると，その3次元座標 $(u_{i,j}t_{i,j}, v_{i,j}t_{i,j}, -t_{i,j})$ は，レーザ平面 i および j を通る．ただし，カメラ前方を z 座標の負の方向とする．平面 i のパラメータを a_i, b_i, c_i と記述すると，

$$\begin{aligned} a_i(u_{i,j}t_{i,j}) + b_i(v_{i,j}t_{i,j}) - t_{i,j} + c_i &= 0, \\ a_j(u_{i,j}t_{i,j}) + b_j(v_{i,j}t_{i,j}) - t_{i,j} + c_j &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

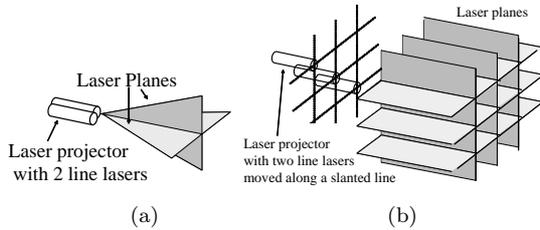


図3 2個のラインレーザを使ったプロジェクタ:(a) プロジェクタの構成, (b) プロジェクタの移動によるグリッドパターンの形成.
Fig. 3 A laser projector with two line lasers: (a) the configuration of the projector, (b) the grid pattern formed by moving the projector.

である．これらの方程式は，各交点から得られる．

反射曲線の数が n ，それらの交点の数を m とすると，未知変数の数は $3n + m$ ，拘束式の数は $2m$ である．変数の数が拘束式の数を上回る場合には，方程式の解の数が有限にならず，問題を解くことが出来ないため， $3n + m \leq 2m$ (つまり $3n \leq m$) が，この問題が有限個の解を持つための必要条件である．

単一のラインレーザを照射する代わりに，互いに位置関係を固定された複数のラインレーザを利用すると，平面間にさらに制約条件を導入できる．例えば，互いの角度が既知角度 θ になるように配置されたレーザ平面 2 個を投射するレーザプロジェクタを考える．2 個のレーザ平面は，異なる色のレーザを使うなどの方法で互いに区別可能とする．このとき，一枚の画像からは，2 個のレーザ平面それぞれに対応する反射曲線が観測される． N 枚の画像からは $2N$ 個の反射曲線の集合が得られる．この反射曲線集合の拘束式は，単一のラインレーザと同じように得られる．さらに，1 枚の画像上で観測される 2 個のレーザ平面のインデックスを i, j とすると，これらが角度 θ で交わることから，

$$a_i a_j + b_i b_j + 1 = \sqrt{a_i^2 + b_i^2 + 1} \sqrt{a_j^2 + b_j^2 + 1} \cos \theta \quad (2)$$

という方程式が得られる．装置に配置するレーザ平面を M 個に増やし，これらの間の角度を既知とすると， ${}_M C_2$ 個の拘束式が得られる．特に θ が直角の場合には，式 (2) の右辺が 0 となり，2 次の多項式方程式となる．

問題の条件によっては，本質的にスケールリングが決定できない場合がある．この場合，解の不定性を避けるために，例えば，

$$t_{0,0} = 1 \quad (3)$$

として， $t_{0,0}$ の深さを仮に決めれば良い．

2.2 システム構成の例

2.1 節で述べた問題設定においては，複数のラインレーザの組み合わせにより様々なシステムが考えられるが，その構成により大きく 2 種類に分けることができる．一方は，レーザプロジェクタを動かしながら対象シーンを複数回撮影する方法であり，複数の画像を重ねることで反射曲線の交点を得て，これから方程式を作成する手法である．もう一つは，レーザプロジェクタに，多数のラインレーザを配置することで，単画像から自己校正を行う構成である．以下それぞれについて説明する．

2.2.1 連続画像からの自己校正

連続画像からの自己校正を行う場合，2 枚以上のレーザ平面

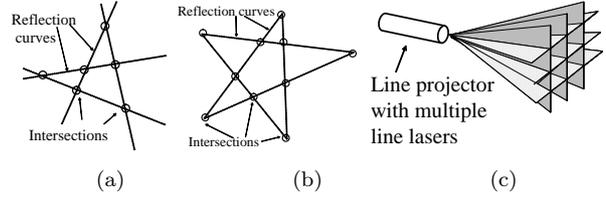


図4 複数のラインレーザによるレーザプロジェクタの構成.
Fig. 4 Configurations of laser projectors with multiple line lasers.

を，相対角度が特定の値に固定されるようにプロジェクタに取り付ける必要がある．その理由は，1 個のレーザ平面のみから成るプロジェクタを用いると，スケールリングを固定した場合であっても，連立方程式の解が不定となり，有限個の解が得られなくなるからである．このことは，この構成における自己校正の一つの解から，無限に別の解を生成できることから示すことができる^(注1)．

そこで，2.1 節で述べたような，直交する 2 個のレーザ平面から成るプロジェクタ (図 3 (a)) を使用する場合を考える．この構成で，図 3 (b) に示すように，レーザプロジェクタを斜め方向に動かしながら 5 回の計測を行うことで， 5×5 の格子状のパターンと，25 個の交点を得られたとする．すると，レーザ平面は 10 個であり，未知変数は $3(\text{平面を表すパラメータ数}) \times 10 + 25(\text{各交点の深さ}) = 55$ 個である．スケールリングの不定性を避けるため，式 (3) を補うと，方程式の数は，各交点において二つの拘束式 (1) と (2) を持つことより 25×2 個と直交性 (2) による拘束式 5 個を含めて 56 個になる．よって，この連立方程式は有限個の解を持ち，実際に解くことができる．数値解法の詳細は，3. 節で述べる．

2.2.2 単一画像からの自己校正

プロジェクタに 4 個以上のラインレーザを取り付け，多くの交点が一度に観測される場合，構成によっては，一度の計測から，自己校正を行うことが可能である．

例えば，4 個のラインレーザを既知の角度でプロジェクタに取り付け，図 4(a) に示すように，1 つの画像から 6 個の交点を得るとする．この時，2.1 節の議論から，未知変数の数は， $3 \times 4 + 6 = 18$ である．このとき，拘束条件は 18 個 (交点による式: $6 \times 2 = 12$ 個，既知角度による式: ${}_4 C_2 = 6$ 個) 得られ，単画像から自己校正を行うことが可能である．5 個のレーザを配置すれば (図 4(b))，さらに多くの拘束条件が得られ，解の精度が増す．多くのラインレーザをプロジェクタに取り付ける場合，平行あるいは一点を通るように平面を配置し，図 4 (c) に示すような格子を構成する方法が実用的である．平行なレーザ平面で格子を構成した場合，平面間の長さの情報から，再構成

(注1): 証明の概略: この問題の解を，画像のインデックス i と画像 i に対応する平面 A_i の組の集合 $\{(i, A_i) | i = 1, \dots, N\}$ (N は画像数) で表す．まず，平面 A と，画像平面上に平行な平面 $z = \alpha$ との交線を $K_{A,\alpha}$, $K_{A,\alpha}$ を画像平面上に投影した直線を $L_{A,\alpha}$ と表すとすると，ある平面 A が与えられたとき， $K_{A,-1}$ と $K_{B,-1}$ が一致し， $L_{A,-2}$ と $L_{B,\beta}$ ($\beta = -2 \wedge \beta = -1$) が一致するような平面 B が存在する．このような平面を，写像 l_β によって $l_\beta(A) = B$ と表す．この時， $\{(i, l_\beta(A_i)) | i = 1, \dots, N\}$ も解となる．これは，2 平面 A_i, A_j の交線と， $l_\beta(A_i), l_\beta(A_j)$ の交線とが，画像平面上で一致するためである．よって，一つの解が存在すれば， β を変えることで無限の解を生成できる．

された3次元シーンのスケールも確定可能である。

このような、一画像からの自己校正では、各平面のパラメータを推定するより、最大6自由度のプロジェクタの位置を推定の方が問題を単純化できる。このような定式化を行った場合、その問題は、2個のカメラによるステレオビジョンシステムにおける、2画像からの自己外部校正に近いものとなる[9]。

3. 十字パターンの投射によるレンジファインダ

3.1 システム構成

我々は、前節で述べた構成例の中から、直交する2平面を投射する場合について、自己校正の解法を提案する。

実際のスキャン方法は以下の通りである。まず、プロジェクタを動かしながら連続画像を取得し、それらの画像から5個の画像を選択する。この時、これらの画像から得られる5個の十字状のパターンで、格子が形成されるようにする。次に、正射影投射を仮定した近似の元に、この観測結果から線形解法により初期解を計算する(3.2節)。得られた初期解を、非線形最適化によって改良することで、レーザ平面の自己校正結果が得られる(3.4節)。最後に全てのレーザ平面を用いて3次元復元する。

3.2 問題の近似

まず、3.1節で定義した問題を、正射影投射の仮定によって近似する。これにより、自己校正問題が、55の未知変数を持つ、51個の線形方程式と、5個の2次方程式で記述される。この方程式系は、線形方程式を解くことで、5変数の2次方程式5個に変換できる。変換された連立2次方程式を、Gröbner基底を用いて解くことができる。得られた方程式は、近似された問題の解であるが、得られた解を初期解として非線形最適化を行うことで、元の問題の解を得ることができる。

問題を解くのに正射影近似を用いた理由は、元の問題は多数の(55個の)2次方程式を含むため、そのままではGröbner基底による解法を適用するのが困難なためである。正射影を仮定した近似によって、元の問題のほとんどの拘束式が線型式になり、最終的には5個の5変数連立2次方程式へと変換される。このように、近似によって規模の問題を大幅に縮小することで、Gröbner基底による解法が可能となる。

ここで、 i 番目の画像における、縦方向の平面のパラメータを、 $(a_{v,i}, b_{v,i}, c_{v,i})$ とする。同じ画像における横方向の平面のパラメータを $(a_{h,i}, b_{h,i}, c_{h,i})$ とする。反射曲線の交点を、縦方向の平面と横方向の平面との交点に限定することで、各交点を、その交点を構成する縦方向および横方向の平面の番号で指定することが出来る。 i 番目の画像の縦方向の反射曲線と、 j 番目の画像の横方向の反射曲線との交点を、交点 (i, j) と記述する。交点 (i, j) の深さ(カメラ座標での z 成分の絶対値)を $t_{i,j}$ とし、交点 (i, j) の画像上での正規化カメラにおける座標値を $(u_{i,j}, v_{i,j})$ とする。式(1)から、以下の連立方程式が得られる。

$$\begin{aligned} a_{v,i}(u_{i,j}t_{i,j}) + b_{v,i}(v_{i,j}t_{i,j}) - t_{i,j} + c_{v,i} &= 0, \\ a_{h,j}(u_{i,j}t_{i,j}) + b_{h,j}(v_{i,j}t_{i,j}) - t_{i,j} + c_{h,j} &= 0, \end{aligned} \quad (4)$$

ただし $1 \leq i, j \leq 5$ である。式(2)およびレーザ平面の直交性

から

$$a_{v,i}a_{h,i} + b_{v,i}b_{h,i} + 1 = 0 \quad (5)$$

が得られる。ただし $1 \leq i \leq 5$ である。

ここで、カメラの投射が、正射影であることを仮定する。既に述べたように、2枚のレーザ平面によるシステム構成では、対象物体のスケールは決定できないので、仮に対象物体までの距離を1に近い値であるとする。 $t_{i,j}$ の変位が十分に小さく、かつ全ての $t_{i,j}$ が1に近い(つまり、正射影投射の仮定が適用できる)場合、方程式(4)より

$$\begin{aligned} a_{v,i}(u_{i,j}) + b_{v,i}(v_{i,j}) - t_{i,j} + c_{v,i} &= 0, \\ a_{h,j}(u_{i,j}) + b_{h,j}(v_{i,j}) - t_{i,j} + c_{h,j} &= 0 \end{aligned} \quad (6)$$

の式が得られる。ただし、 $1 \leq i, j \leq 5$ 。元の方程式は2次式であるが、(6)の方程式は線形である($u_{i,j}$ と $v_{i,j}$ は定数である)。交点は25個あるので、同様な形式の50個の方程式が得られる。

直交条件から得られる式(5)は、正射影を仮定しても線形化できないので、そのまま用いる。また、スケールリングの不定性を避けるため、式(3)を連立方程式に加える。

3.3 数値解法

前節の近似で得られた式の中で、線形方程式は51個ある。これらの式を、行列表示で、 $Mx = b$ と表す。ただし M は式(6)の係数を成分とする 51×55 行列、 x は $a_{v,i}, b_{v,i}, a_{h,i}, b_{h,i}, t_{i,j}$ を成分とする55次元ベクトル、 b は一つの成分が1(式(3)のため)であり、残りの成分が0であるような51次元ベクトルである。

この線形方程式はunder-constrainedである。係数行列に特異値分解(SVD)を適用することで、この線形方程式を近似的に満たすような x の5次元線形空間を構成することが出来る。この手順を以下に示す。 M にSVDを適用すると、 $U\Sigma Vx = b$ となる。ただし U は 51×51 の直交行列、 V は 55×55 直交行列である。ここで、 V の上側の50行から成る部分行列を V_1 、 V の下側の5行から成る部分行列を V_2 、 U の左上の 50×50 の部分行列を U_1 とする。 M のランクが50あるいは51であると仮定すると、線形方程式の近似解の解空間は以下の式で表される。

$$x = V_1^t \Sigma^{-1} U_1^t b + V_2^t f. \quad (7)$$

ただし、 $f = (f_0, f_1, f_2, f_3, f_4)$ は任意の実5次元ベクトルである。行列 M が50以上のランクを持つという仮定は、4.節で実験的に検証される。

式(5)の左辺の要素 $a_{v,i}, b_{v,i}, a_{h,i}, b_{h,i}$ を式(7)に代入すると f_0, f_1, f_2, f_3, f_4 を未知変数とした5個の式から成る連立2次方程式が得られる。この連立方程式の数値解をGröbner基底を用いて解く。Gröbner基底を利用して、多項式方程式の組の数値解を得る方法は、文献[10],[11]に述べられている。この解法によって、複数组の $(f_0, f_1, f_2, f_3, f_4)$ の複数解が得られる。これらの解から、実解に近いものを選ぶ。通常、このような解は複数存在するが、これらの中から最適な x を、以下の手法で選択する。

3.4 非線形最適化による解の改善

前節で求められた数値解は、近似された問題の解である。よっ

て、非線形最適化によって解の改善を行うことで、得られた解から元の問題の解を求める。最適化の目的関数として、式 (6)、(5)、(3) の等式の自乗誤差の和を用いることもできる。しかし、式 (6) は、誤差を含む観測値を利用するので「soft な」(満たされなくてもよい) 制約であるのに対し、式 (5) は「hard な」(満たされなければならない) 制約とするべきである。また、最適化における目的関数は、バンドルアジャストメントと同じように、スクリーン座標における誤差を最小化するのが望ましい。よって、本論文では別のアプローチを取る。

目的関数のパラメータとしては、二個の平面を投影するプロジェクタのポーズを使う。このようなプロジェクタのポーズの自由度は 5 である。実際のパラメータとしては、ロール、ピッチ、ヨーで表された回転パラメータと、二個の平面の原点からの距離を用いる。この表現において、式 (5) は必ず成立する。

i 番目の画像の縦方向の平面と、 j 番目の画像の横方向の平面の交線を求め、この 3 次元直線をカメラのスクリーンに投影する。投影された直線を $l_{i,j}$ と表すと、 $l_{i,j}$ は観測された交点 (i, j) を通るはずである。よって、交点 (i, j) と $l_{i,j}$ のスクリーン上での距離の自乗和を、すべての i, j についてとる。この定式化では、深さ $l_{i,j}$ は目的関数のパラメータでなく、推定されたポーズの値から計算される。計算方法としては、交点 (i, j) に最も近い $l_{i,j}$ 上の点を 3 次元点に変換したとき、その深さを $t_{i,j}$ とする。実際には、スケールを固定するために、式 (3) の誤差の自乗を上記の和に加えたものを目的関数とする。目的関数の最小化は Levenberg-Marquardt 法によって行う。

4. 実験

3. 節で述べた自己校正手法の有効性を確かめるために、シミュレーションおよび実際の機材を用いた実験を行った。

シミュレーション用のデータは、2 種類用意した。一つは、式 (4) と式 (5) を 10^{-16} の精度で満たすように、数値的に合成されたデータである。もう一つは、CG レンダラによって生成されたデータである。CG レンダラを利用することで、任意の形状のポリゴンメッシュについて入力データを作成することが出来る。実際の機材によるデータは、十字パターンを投影するプロジェクタを作成し、データを取得した。

4.1 数値的な合成データ

数値的な合成データの作成は、以下の手順で行った。同じような方向を向いたプロジェクタのポーズを、5 個、乱数を用いて生成した。それらのポーズから、深さを乱数で決めながら、25 個の交点を作成した。それらの 3 次元点の範囲は、 x 座標が -0.098 から 0.048 まで、 y 座標が -0.102 から 0.066 まで、 z 座標が -1.029 から 0.970 までであった。これらの点は、正射影投影と、透視投影の両方の方法で、カメラのスクリーン座標に投影された。投影された 2 次元座標を、 $(u_{i,j}^*, v_{i,j}^*)$ (正射影投影) と $(u_{i,j}, v_{i,j})$ (透視投影) と表記する。

問題を連立方程式として解く場合、方程式の Jacobian はフルランクになる必要がある。そうでない場合、その方程式は無限個の解を持つ可能性がある。方程式の解の数が有限であることを確かめるために Jacobian の特異値を調べた。式 (3)、(4)、

(5) から、Jacobian をシンボリックな計算により求め、得られた結果に数値的な合成データを代入した。得られた Jacobian の特異値を Mathematica によって求めた結果、最大特異値は 2.80 最小特異値は 2.89×10^{-4} であった^(注2)。合成データの精度が 10^{-16} 程度あることを考慮すると、最小特異値は 0 より十分に大きく、この行列はフルランクであると言ってよい (逆に、平面の一つがカメラ中心を通るようにしてランク落ちを発生させた場合、最小特異値は 10^{-15} 程度になった)。このことより、一般に、十字パターンの投影からえられるデータからの自己校正問題は、有限個の解を持つと言える。

3.3 節で、M のランクを 50 または 51 であると仮定することを述べた。数値的な合成データから M の成分の値を求め、その特異値を倍精度浮動小数点値で求めたところ、最大特異値は 2.65 で、50 番目および 51 番目の特異値は 1.91×10^{-3} と 1.85×10^{-4} であった。特異値は、LAPACK 数値計算ライブラリ [12] で求めた。数値の精度が 10^{-16} 程度であることを考えると、51 番目の特異値は 0 より十分に大きく、M のランクは 51 であり、ランクが 50 以上であるという仮定が確かめられた。

次に、3.3 節で述べた数値解法を、数値的合成データに適用し、平面および交点の深さを推定した。自己校正手法のためスケールングの倍率は決められないので、 $t_{0,0}$ の正解値を用いて同一のスケールで比較できるようにした。

正射影投影によって作成された観測データでは、推定結果は、元のデータと一致するはずである。実際、 $(u_{i,j}^*, v_{i,j}^*)$ から推定されたデータでは、 $t_{i,j}$ ($1 \leq i, j \leq 5$) の RMS (root of mean squared) 誤差は 4.70×10^{-6} であり、非常に小さくなった。よって、数値解法は正しく動作したと言える。これに対し、 $(u_{i,j}, v_{i,j})$ から推定されたデータでは、3.2 節で述べた正射影の仮定により、結果が正解とずれている。その差を、図 5(a),(d) に示す。

次に、3.4 節で述べた解の改善について実験を行った。透視投影による座標 $(u_{i,j}, v_{i,j})$ から得られた解について、これを初期値として非線形最適化を行った。図 5 (b),(e) にその結果を示す。結果では、少し誤差が残っているが、最適化によって結果が改善され、正しい値の近くに収束したことがわかる。

我々は、ノイズを含んだデータに対しても、非線形最適化による解の改善実験を行った。数値的に合成されたデータの $u_{i,j}$ および $v_{i,j}$ に対し、-0.001 以上 0.001 以下の一様乱数を加えることで、10 組のデータを作成した。結果を図 5(c),(f) に示す。一定の範囲内で正しく解が求まっていることがわかる。

4.2 CG 生成されたデータ

次に、提案した自己校正手法を、CG で生成されたデータに対して適用した。図 6 に、立方体と平面で構成されたシーンでの実行例を示す。同図 (a) は、カメラから観測された全パターンである。この画像の視野角は、縦方向に 10 度であり、白と黒のパターンの境目が、観測された反射曲線の位置を表す。×印のついた交点は、対応するレーザ平面が直交する交点を表す。

(注2): これらの特異値は、小数点以下 15 程度まで有効と考えられるが、本論文では 3 桁のみ表示している。

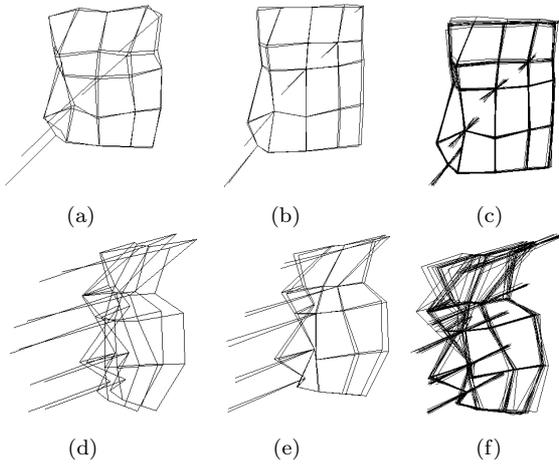


図 5 数値的合成データによる実験結果: (a),(d) 近似された問題の解と真の解, (b),(e) 改善された解と真の解, (c),(f) 誤差を含むデータから得られた解 (改善後). (5 個の格子点に引かれた線はその点からプロジェクタへの方向を表す.)

Fig. 5 The results of the numerically generated data. (a),(d) The solution of the approximated problem (shown with the true values), (b),(e) the refined solution (shown with the true values), (c),(f) the refined solutions with noised data. (The lines drawn from five of the grid points show the directions from the points to the projector.)

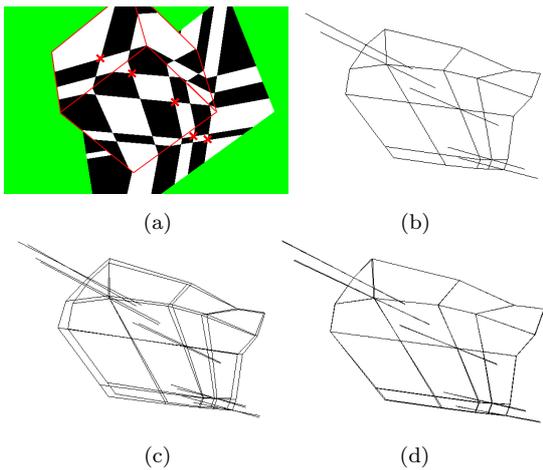


図 6 CG で生成されたデータの結果: (a) 観測されたパターン, (b) 格子の 3 次元形状, (c) 近似された問題の解と真の解, (d) 改善された解と真の解.

Fig. 6 The results of the data generated by CG: (a) the detected pattern, (b) the true 3D shape of the grid, (c) the result of the approximated problem (with the true shape), and (d) the result of the refined solution (with the true shape).

図 6 (b) は、シーン中の格子の実際の形状を 3 次元でワイアフレーム表示したものである。同図 (c) は近似された問題の解を表したもので、(d) は解の改善結果を表したものである。(c)(d)の結果は、実際の形状を同時に表示してある。この例では、非線形最適化が非常にうまく働き、改善された解と実際の形状がほとんど同じ位置になっている。

4.3 実データ

我々は、直交する 2 つのラインレーザと、1 台のビデオカメラからなる計測システムを実際に試作し実験を行った。計測手

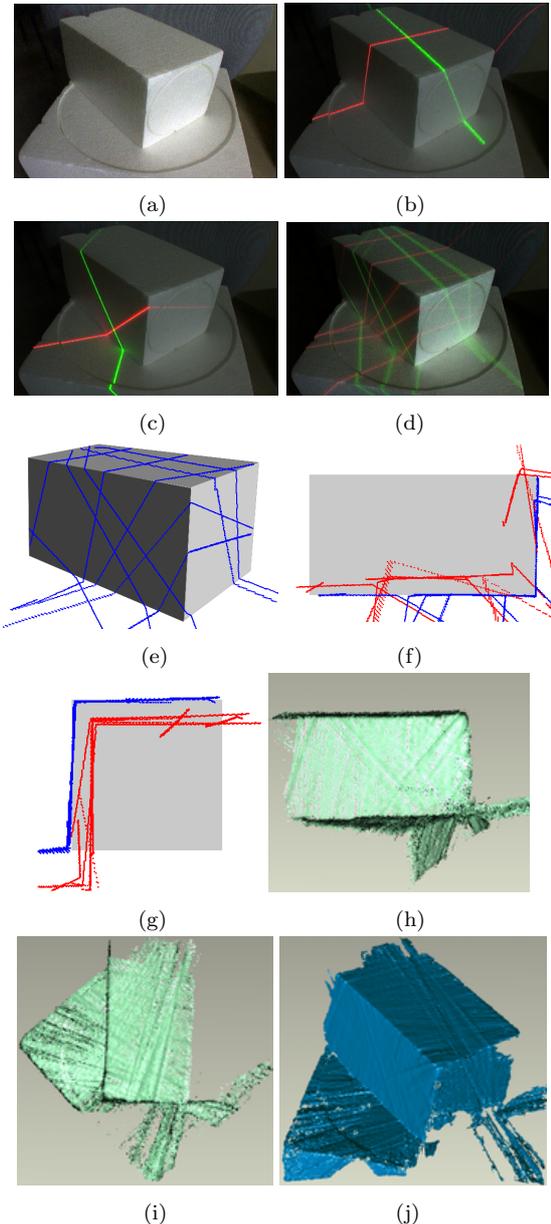


図 7 実データの結果: (a) 対象物体, (b)(c) 入力画像例, (d) 5 個の入力画像 (重ね合わせたもの) (e) 改良された解 (透視投影), (f)(g) 初期解 (赤線) および改良された解 (青線), 灰色の直方体は、見やすさのため追加したもの (f: 上方から, g: 側方から), (h)-(j) 全画像の反射曲線の再構成結果 (h: 前方から, i: 上方から, j: 斜め上方から).

Fig. 7 Results of the real data: (a) actual object, (b) and (c) sample input images, (d) accumulated image of 5 inputs (e) the refined solution (perspective view), (f)(g) the initial solution (red lines) and the refined solution (blue lines) shown with the rectangular solid (f: top view, g: side view), (h) and (j) the reconstructed points of the reflection curves of all of the images.

順としては、まず、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 5 個の画像を選択し、それらの画像上で反射曲線を検出した。画像の選択においては、3.3 節の行列 M 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

らないように考慮した。5枚の画像間における反射曲線の交点から、提案手法によりレーザプロジェクタ位置の初期推定値を求め、さらに非線形最適化により解の改良を行った。図7に結果を示す。図7(a)に対象物体の写真を、図7(b)(c)に選択された入力画像の例を、図7(d)に選択された5個の入力画像を重ねた画像を、図7(e)に改良された解を、図7(f)(g)に初期解と改良された解を同時に示してある。図7(f)(g)の結果から、再構成結果において、直方体の辺の直交性や、各面の平面性などが、高い精度で再現されていることがわかる。

さらに、上記改良された解から、画像系列の全ての画像における3次元復元を以下の要領で行った。まず、既に推定された5つのレーザ平面について反射曲線上の点の3次元復元を行う。次に、画像系列の全ての画像におけるレーザ平面の推定を、それぞれの反射曲線と既に3次元推定された反射曲線との交点を用いて、平面近似により行う。こうして推定されたレーザ平面を用いて、全ての反射曲線上の点の3次元復元が実現できる。この結果を図7(h)-(j)に示す。これらの結果においては、5枚の入力画像の反射曲線から構成される格子状パターンの内部の領域で復元結果の精度が高く、その他の領域で精度が低くなる傾向が見られた。これは、格子状パターンの内部においては、実質的に形状が補間されるのに対し、その外部においては形状の補外になるため、精度が低くなったためと考えられる。

上記の実験では5枚の画像から復元を行ったが、さらに多数の画像を用いて解の改良を行うと、精度の高い3次元再構成が可能である。別の形状のシーン(紙をサインカーブ状に成型したもの、図8(a))について、9個の初期解からの解の改良と、改良された解からの全画像の平面推定の実験を行った。ここでの初期解は、プロジェクタに取り付けられたLEDマーカーを用いて求めた。入力画像の例を図8(b)に、入力画像とプロジェクタ位置の初期解を用いて得られた改良された解を図8(c)-(f)に、全反射曲線の再構成結果を図8(g)に示す。図8(g)の結果から、高い精度で3次元形状復元できていることが分かる。

5. 結 論

本論文では、光切断法における複数のレーザ平面の自己校正手法を提案した。提案手法は以下の通りである。最初に、複数のラインレーザを投影するプロジェクタを動かしながら、固定カメラで計測した画像列を得る。次に、画像列から、投影されたレーザによる反射曲線の交点位置を検出する。最後に、それらの交点から導かれる連立方程式を解く。

実際に解を求めることが可能な最少構成である2個のレーザ平面を利用するシステムについて、Gröbner基底による初期解の推定と、非線形最適化による解の改良を行う方法を提案した。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。

文 献

- [1] O. Faugeras.: "Three-Dimensional Computer Vision - A Geometric Viewpoint", Artificial intelligence. M.I.T. Press Cambridge, MA (1993).
- [2] J. Y. Bouguet and P. Perona: "3D photography on your

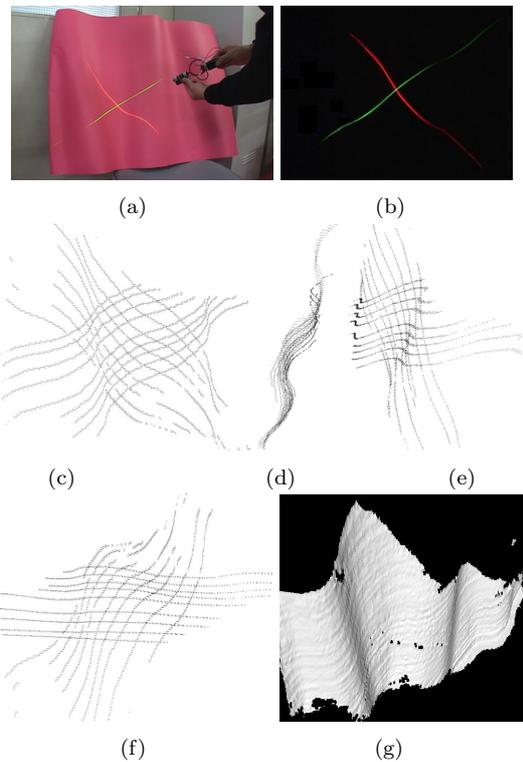


図8 9個の入力画像からの解の改良: (a) 測定シーンと測定状況, (b) 入力画像例, (c)-(f) 入力画像のみの再構成結果, (g) 全画像の再構成結果.

Fig. 8 The refined solution using nine input images: (a) the target object and capturing scene, (b) an example of the input images, (c)-(f) the reconstructed scene for the input images, (g) the reconstructed scene for all of the images,

- desk", Int. Conf. Computer Vision, pp. 129-149 (1998).
- [3] R. B. Fisher, A. P. Ashbrook, C. Robertson and N. Werghi: "A low-cost range finder using a visually located, structured light source", Second Int. Conf. on 3DIM, pp. 24-33 (1999).
- [4] P. Hebert: "A self-referenced hand-held range sensor", Int. Conf. on 3DIM2001, pp. 5-12 (2001).
- [5] K. H. Strobl, W. Sepp, E. Wahl, T. Bodenmueller, M. Suppa, J. F. Seara, and G. Hirzinger: "The dlr multisensory hand-guided device: The laser stripe profiler", ICRA2004, pp. 1927-1932 (2004).
- [6] 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).
- [7] R. Furukawa and H. Kawasaki: "Interactive shape acquisition using marker attached laser projector", Int. Conf. on 3DIM2003, pp. 491-498 (2003).
- [8] 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).
- [9] H. Kawasaki and R. Furukawa: "Uncalibrated multiple image stereo system with arbitrarily movable camera and projector for wide range scanning", Int. Conf. on 3DIM2005, pp. 302-309 (2005).
- [10] D. A. Cox, J. B. Little and D. O'Shea: "Using Algebraic Geometry", Vol. 185 of Graduate Texts in Mathematics, Springer-Verlag, NY (1998). 499 pages.
- [11] H. Stewenius: "Grobner Basis Methods for Minimal Problems in Computer Vision", PhD thesis, Lund Institute of Technology (2005).
- [12] lapack@cs.utk.edu: "Lapack — linear algebra package", <http://www.netlib.org/lapack/>.