

規則的なパターンの投影像と カメラの前進移動による三次元計測法

Methods for Measuring Surface Structures Using
Projected Regular Patterns and an Advancing Camera

馮開華* 杉原原吉 杉江昇

Kai-hua FENG, Kokichi SUGIHARA, and Noboru SUGIE

(名古屋大学, 工学部)

Faculty of Engineering, Nagoya University.

The paper briefly summarizes the three methods proposed by the authors for obtaining surface structure from projected texture: (1) use of one source of parallel light, (2) use of two point sources of light, and (3) use of three point sources of light. Furthermore, a new method, (4) use of movement of a camera, is proposed and some results of computer simulation are reported. The new method is advantageous over the previous methods in reliability, accuracy, and resolution.

1. はじめに

近年知能ロボットの研究が非常にさかんな勢いで行なわれている。ロボットが外界を認識するには、面の法線や距離などの三次元情報の測定が不可欠のものであろう。すでに多くの手法が提案されているが、⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾それらは単眼視と多眼視の二種類に大別することができる。

単眼視の場合、対象物体表面の濃度分布やテクスチャ模様などにより、面の法線の算出と形状の再構成が可能であるが、いずれも表面上の性質をあらかじめ知っていなければならず、しかも、多数の点の距離を直接測定することは未解決であるといえよう⁽¹⁾。

多眼視の場合、例えば両眼立体視法およびその変形である光切断法では、距離の測定ができるが、いずれも三角測量の原理に基づくものであり、処理の時間がかかるという欠点をもつ。

以上の問題を解決するために、我々は規則的なパターンの投影像を利用した方法を提案してきた⁽⁵⁾⁻⁽⁷⁾。本稿では、今までに提案した3種の方法をまとめ、さらにカメラの前進移動を利用した第4の方法を提案する。

第4の方法はカメラの前進移動と画像上でのパターンの歪みを利用して、表面上の各点での三次元位置と法線を測定するものである。前進移動を用いたのは、左、右へカメラが移動する場合より対応決定処理が簡単になるからである。さらに、大域的情報を利用した少数回の繰り返し修正をすることによって、表面上の全体の各点でよい結果を求めることができる。

2. 手法1—平行投光による法線抽出法

第1の手法の考え方を図1に示す。すなわち平面上にのっている多数の円形パターンをパターン面と垂直な方向 m に沿って物体表面へ平行投影して、未知表面上に多数のパターンを生成させる。そして、それらを方向 l に

* 中国南京大学情報物理学部より客員研究員。

沿って画像面へ正射影する。したがって、画像面に多数の楕円パターンがえられる。かつ、それらの楕円はそれぞれ未知表面の各点での傾きと対応している。この情報を法線抽出の手がかりとする。

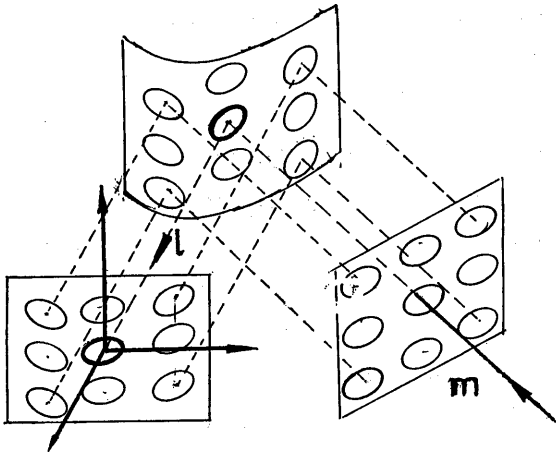


図 1 平行投光法

物体表面の、平面とみなしてさしつかえない微小面素の一つSPを考える。その法線を $\mathbf{n} = (a, b, c)$ とし、画像面上において、対応している投影パターンから図2に示すとおり画像面におけるパターンのパラメータR, S, Tが測定されたとする。具体的解析を省略して、結果だけを示すと、次の式が成り立つ。

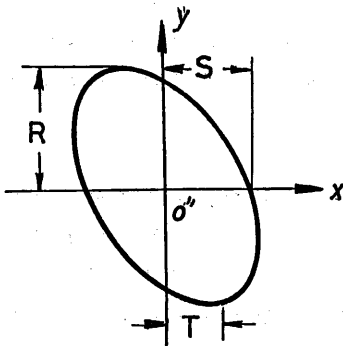


図 2 楕円の特徴パラメータ

$$\begin{aligned} a &= \frac{R - S \cos \phi}{\sqrt{R^2 + S^2 + T^2 - 2RS \cos \phi}} \\ b &= \frac{T}{\sqrt{R^2 + S^2 + T^2 - 2RS \cos \phi}} \\ c &= \frac{S \sin \phi}{\sqrt{R^2 + S^2 + T^2 - 2RS \cos \phi}} \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 ϕ は照射方向 \mathbf{m} と正射影方向 (Z 軸) \mathbf{l} とのなす角度である。つまり、

$$\phi = \arccos \left(\frac{(\mathbf{l} \cdot \mathbf{m})}{|\mathbf{l}| \cdot |\mathbf{m}|} \right) \quad (2)$$

すなわち、 ϕ が既知のとき、画像面におけるパターンのパラメータ R, S, T が観測されると、面の法線が求められる。図3は計算機シミュレーションの一例である。 $a = \sin 8^\circ$, $b = \sin 15^\circ$ の傾いた平面に対して $\phi = 25^\circ$ で平行投影して生成した画像面と抽出した各点での法線である。

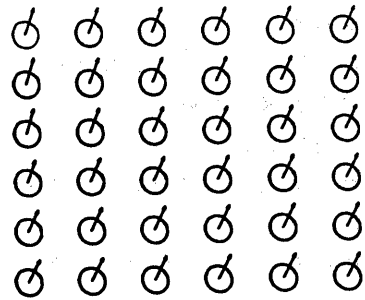


図 3 手法1の結果

パターンが小さければ、R, S, T を直接計測する誤差が大きくなり、法線の計測精度が悪くなるので、かわりに楕円の方程式

$$A X^2 + B X Y + C Y^2 = 1 \quad (3)$$

の係数 A, B, C をパラメータとして採用する。R, S, T と A, B, C との間には次の関係がある。

$$\begin{aligned}
 R &= \frac{2\sqrt{A}}{\sqrt{4AC - B^2}} \\
 S &= \frac{1}{\sqrt{A}} \\
 T &= \frac{B}{\sqrt{A(4AC - B^2)}}
 \end{aligned}
 \quad (4)$$

画像面上におけるパターンの輪郭上の数十ドットのデータより最小二乗法で求めると、A、B、Cの推定誤差を小さくすることができる。

要するに、本手法では次の式がえられる。

$$\begin{aligned}
 n &= F(A, B, C, l, m) \\
 &= F(A, B, C, \phi)
 \end{aligned}
 \quad (5)$$

3. 手法2—中心投影による法線推定法

3.1 手法1の問題点

手法1では、すべての照射方向 m を平行とみなして計算しているが、実際には、平行光線を作るのはむずかしい。点光源から照射した法線は放射状のものであり、面の傾きが同じでも画像面上における各パターンの形は違わずである。点光源で照射したパターンを平行光線とみなして、それに手法1を適用すると、得られた画像面上の各パターンと法線ベクトルは図4のようになる。

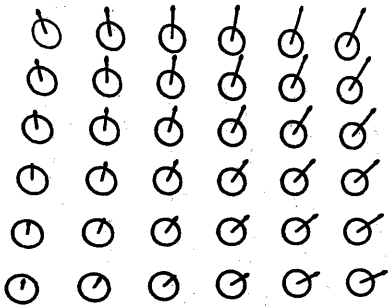


図4 点光源から照射の影響

一方、未知表面から画像面への射影は、表面が非常に離れたところにある場合以外は中心射影とみなすべきである。これを平行射影とみなして計算すると、すべての照射方向が平行であっても、画像の中心から離れるにつれて、誤差がますます大きくなる(図5参照)。

したがって、正確に法線を求めるためにはパターンの投影も画像の撮影も中心射影とみなすのが実用的である。

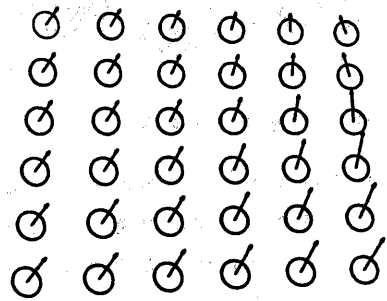


図5 画像面へ中心射影の影響

3.2 円錐光束の採用とその生成方法

計算を簡単にするためには、どの方向に対しても、空間面素の法線ベクトル、パターンの歪み、照射の方向の間の対応関係が(1)(2)のような式で表せることが望ましい。そこで球面に多数の円形の穴をあけ、その球の中心に点光源を置くと、多数の円錐光束が放射状に出るであろう。実際には、このような球面を作らなくても、これと等価な光源を図6のようにスライドフィルムに多数の楕円パターンを配置することによって、実現できる。ただし、これらの楕円はスライドプロジェクタのレンズの中心からみると、すべて円に見えるようなものである。

3.3 法線の推定と三次元位置の算出

前に述べたように、 l と m が未知の場合、式(5)を直接採用することができない。し

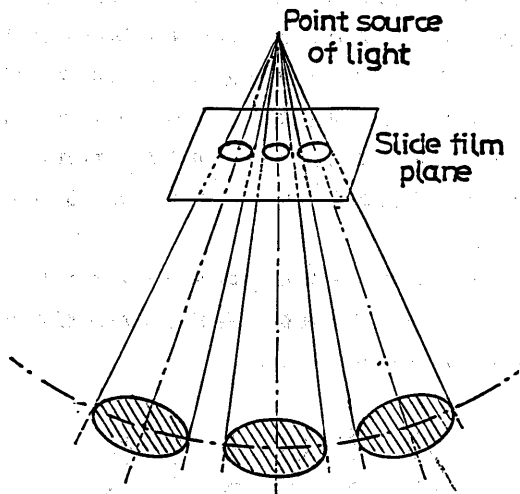


図6 円錐光束の生成

かし、図7のように一つのパターンに注目すると、 l は画像面の中心位置より求められ、しかも、 l と m の間に拘束関係が存在する。したがって、面素の奥行きを $\lambda = -Z/f$ の関数とみなすと、 λ の各値に対しては、光源からの照射方向 m も決まる。すなわち、

$$\begin{aligned} \lambda &= -Z/f \\ m_1 &= m_1(\lambda, l_1) \\ l_1 &= l_1(I, J, f) \\ n_1 &= F_1(A, B, C, I_1, m_1) \\ &= F_1(\lambda) \end{aligned} \quad (6)$$

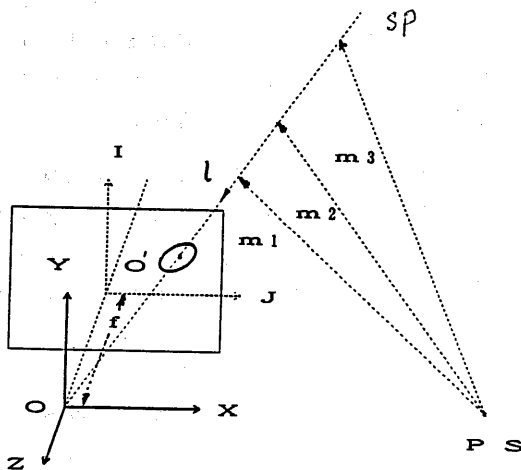


図7 l と m と λ との拘束関係

となり、法線ベクトルを求める式にある自由度が λ の一つだけとなる。これを $n_1(\lambda)$ とおこう。ここで、 I, J は画像面上のパターンの中心位置で、 f はカメラの焦点距離である。

この1自由度を除くために、位置が変わった第2の光源を用いて、同一のカメラで画像2を撮ると、この画像上の同じ点に対して、面素の法線ベクトルを表すもう一つの関数 $n_2(\lambda)$ がえられる。面素が実際に存在するところでは

$$n_1(\lambda) = n_2(\lambda) \quad (7)$$

となるはずであるので、 λ を変化させながら、その2枚の画像からそれぞれに $n_1(\lambda)$ と $n_2(\lambda)$ を計算し、(7)式を満たす λ を探すことによって、正解 λ_c を推定することができる。 λ_c が推定されると、式

(6)よりその面素の三次元位置も求められる。手法1のシミュレーション例で用いたものと同じ平面に対して本手法を適用した結果は図8に示すとおりである。(a)、(b)はそれぞれカメラの左、右においた光源から

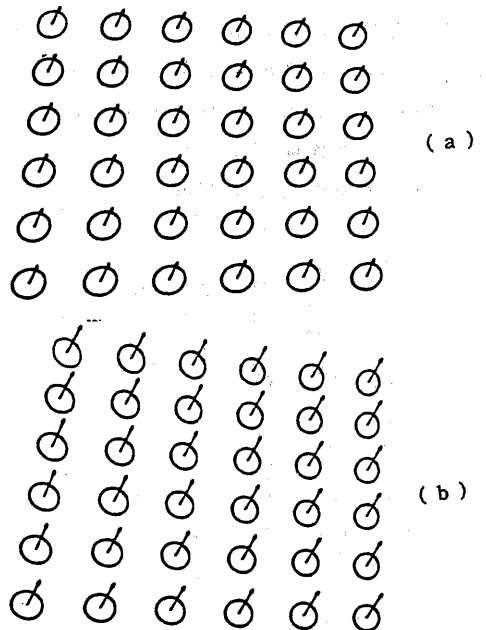


図8 手法2の結果

照射して得られる画像であり、矢印は推定した法線ベクトルである。

なお、上の解析では、二枚の画像においてパターンを中心は同じ位置にあるとみなした。実際には、画像1のあるパターン中心に対して、画像2ではそれとまったく同じ位置にパターン中心がくるわけではない。中心が異なる場合には、画像2においてパターンを補間しなければならない。ここでは注目している点のまわりの三つのパターンをもとにして重みづけ平均をとることによって補間する。ただし、重みとしては、注目している点から各パターンを中心までの距離の逆数の比を用いた。

計算機のシミュレーションによって本推定法が有効であることがわかった。

4. 手法3—投影光源の三角形配置法

手法2の基本的考えは、法線の推定である。しかし、法線を推定する方程式(7)が λ に関して非線形であるため、解の一意性が保証されず、間違っただけの結果をもたらす可能性がある。そのような例を図9に示す。図9(a)は一つ面素の例で、(7)式を満たす λ は二つある。実際には、 λ_2 が正解で、 λ_1 は間違っただけの解である。図9(b)は球面に対して推定した結果で、 P_1 と P_2 の付近で間違っただけの結果が出た。これを解決するために第3の光源を追加して、第3の画像を撮って、その三枚の画像を総合的に処理することによって解の一意性を達成する。

計測精度を高めることと実用上の便宜のために、図10のように一つの光源を A_0 からカメラの光軸 OZ まわりに二回 120° 回転させて B_0 と C_0 に移すことによって、正三角形に配置された光源を作る。

本手法の処理の流れは図11に示すとおりである。図9の例に使ったデータと同じものに対して、本手法により処理して、解の一意性が達成されている。

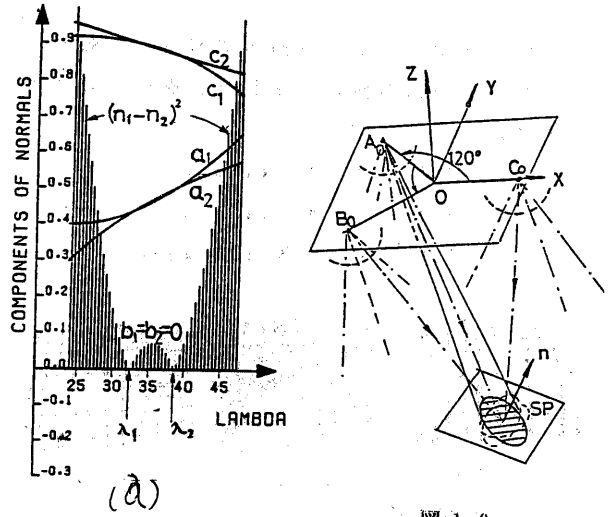


図10

光源の三角形配置法

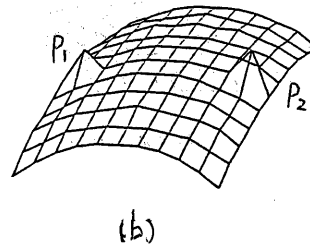


図9 二つの解がある例

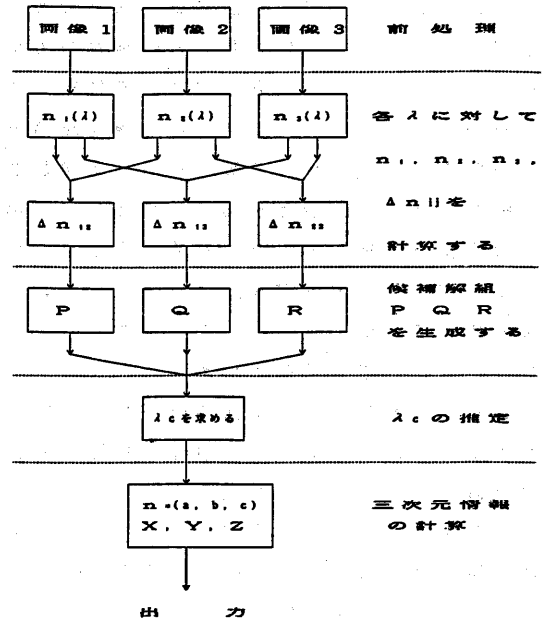


図11 手法3の処理の流れ

図13は本手法を多面体に適用した例で、その三つの面の傾きはそれぞれ次のとおりである。

- (-0.544, 0.544, 0.677)
- (0.544, 0.544, 0.677)
- (0.000, -0.544, 0.839)

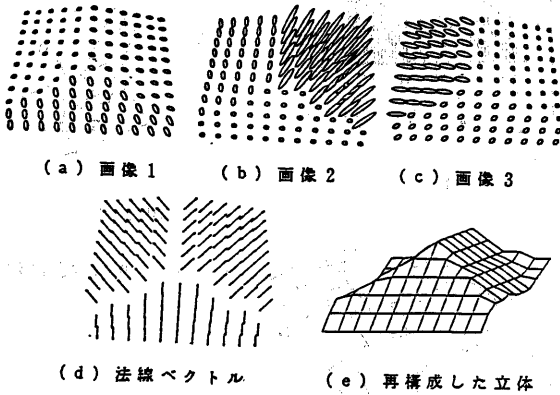


図13 多面体の例

5. 手法4—カメラの前進移動法

5.1 手法2, 3の問題点

上に述べたように、手法3は手法2の改良案である。それらはいずれも法線推定の方法を用いたもので、いつもまず λc を推定し、それから λc をもとに三次元座標値を求める。推定方程式(7)の非線形性のため複数の解が存在する可能性がある。手法3では第三の光源を利用して、その可能性を小さくするが、完全に一意性が達成されるか否かは未解決であるといえよう。しかも画像が三枚になった分だけ処理時間も増える。

さらに面素の奥行きは法線推定によって求める結果であるので、法線誤差と多数の光源の位置誤差による影響が大きい。

したがって、次に考え方をかえて、まず最初に奥行きを求める手法を検討する。

5.2 システム構成と奥行き算出

図14に示しているシステムではSPは物

体表面上の注目されている一つ面素、PSは円錐光束の光源、Oはカメラのレンズの中心、XYZ座標系はOを原点とし、カメラの光軸を-Zの方向とする座標系、JI座標系は原点O'がZ軸上にあり、Oとは距離fだけ離れ、XY平面と平行なものである。ここでfはカメラの焦点距離である。

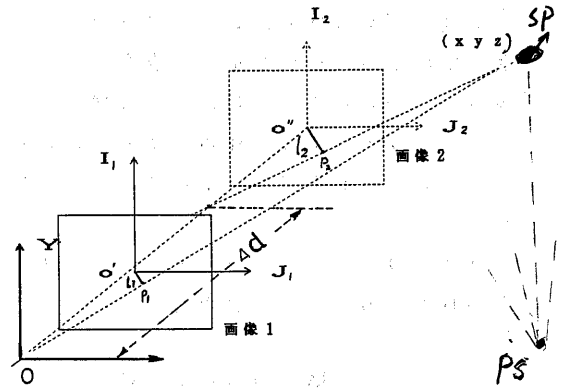


図14 手法4の計測システム

まず、前の各方法と同じように、原点Oにおいたカメラで一枚目の画像を撮る。これを画像1とおこう。

次に、カメラをまっすぐ前方に Δd だけ移動させて、画像2を撮る。

光源PSの位置は動かないので、カメラの前進移動によって、画像中のパターン中心の位置は画像平面の中心を通る直線上を移動する。(図15(a), (b)参照)

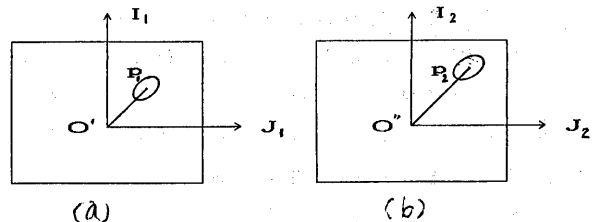


図15 パターン中心位置の変化

これを対応決定の手掛かりとする。対応が求まると注目されている面素の奥行き Z は次の式より得られる。

$$Z = \frac{l_2 \Delta d}{(l_2 - l_1)} \quad (8)$$

ここでは、 l_1 、 l_2 はパターンを中心位置から画像の中心までの距離である。

Z が決められると、式(6)により、注目されている面素 SP のすべての三次元情報も決められる。

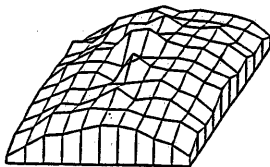
以上は本手法の簡単な原理であるが、実用上は、パラメータの計測法、多数パターンの対応決定法、計測誤差を減らす方法などを考えなければならない。

5.3 計測の誤差と結果の修正

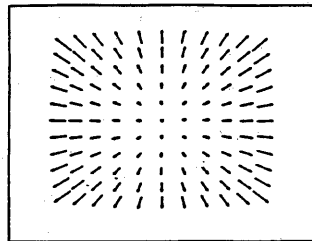
本手法は画像の周辺部では、計測精度がよい。式(8)によると、画像の真中では、

$l_1 = l_2 = 0$ となり、情報が何もない。また画像中の中心付近では量子化誤差のため、計測誤差が大きい。

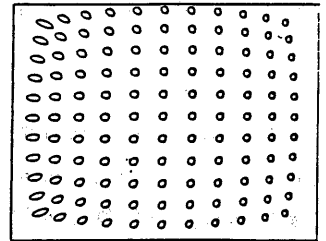
一方、我々の経験によると、光源の位置誤差、量子化誤差、楕円方程式の係数 A 、 B 、 C の推定誤差などの影響は法線にはあまり大きな影響はないが、奥行きには大きな影響を与える⁽⁶⁾。したがって、面がなめらかであるという仮定の下では、周辺でえられた Z と各点で得られた法線ベクトルを利用して、中心付近の値を修正することができる。



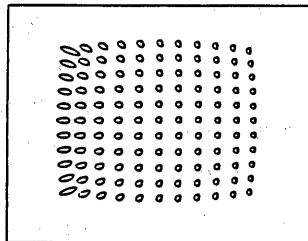
(c)



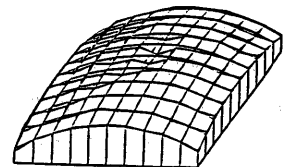
(d)



(b)



(a)



(e)

Z と各点で得られた法線ベクトルを利用して、中心付近の値を修正することができる。

5.4 対応決定処理

本手法は両眼立体視に属する。多数のパターンを利用する場合、対応を決定することは一般にはむずかしい。しかし、カメラがまっすぐ前方へ移動するため、各パターン中心の位置およびそこから画像中心までの距離の大小にもとづいて番号つけることによって、対応決定処理をかなり簡単にすることができる。

5.5 計算機シミュレーション

(1) 球面の例

半径が80 cm、カメラから中心までの距離が2.7 mの球面にカメラの右側80 cm離れたところにおいた光源からパターンを投影したとき得られる画像、およびカメラを前方へ30 cm移動して得られる画像を想定してシミュレーションを行った。計算機で作成した二枚の画像は図16の(a)、(b)に

図16 手法4による結果1：球面の例

示すとおりで、(c) は真中の点 ($l_1 = l_2 = 0$) を避けて直接得られた奥行きで、(d)

は本手法で得られた各点での法線で、(e) は一回だけで修正して求めた結果である。

(2) 多面体の例

前方 2 m のところに置かれたことを想定した多面体に対して本手法で再構成した形状を図 17 に示す。

シミュレーションの結果によると、光源位置の誤差、画像量子化の誤差、および楕円の方程式の推定誤差などの影響は手法 2, 3 より小さいことがわかった。

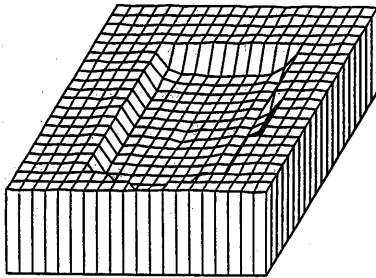


図 17 手法 4 による結果 2 : 多面体の例

6. おわりに

本稿で報告した立体計測の諸手法はすべて規則的パターンの投影像を利用したもので、対象物体表面の性質が未知でも計測できる、法線方向と距離情報が同時に得られるなどの特徴をもつ。カメラの前進移動法は筆者らがすでに発表してきた法線推定法とは、少々異なる手法であり、次の利点をもっている。

(1) 奥行き z は、法線方程式 (8) により求められるので、複数解が存在する心配が解消され、解の一意性を保証することができる。

(2) 普通の両眼立体視より対応決定処理が簡単で、単眼視の法線推定法と比べて処理時間が少ない。

(3) 一つの光源を使うため、光源の位置誤差の影響が小さく、計測装置が簡単になる。

(4) 画像の中心部以外のところではパターンを補間する必要がないので、分解能を向上させることができる。

(5) 計算機シミュレーションの結果より、楕円の方程式の推定誤差と光学系誤差による影響も小さくなることがわかった。

本稿では規則的なパターン投影像を利用した諸手法を述べたが、主に計算機シミュレーションのものである。実画像を用いた実験でこれらの手法の動作を確認することが、次の課題である。

参考文献

- 1) 白井良明：距離情報の検出と処理，bit 増刊，ロボット，臨時増刊，pp. 711-724 (昭51-07)。
- 2) 杉原厚吉：サーベイ：画像を利用した立体計測諸手法，情報コンピュータビジョン研究 33-4，(1984)。
- 3) 池内克史：単眼視による2次元画像からの三次元情報の再構成，情報処理，24，12 pp. 1421-1428 (昭58-12)。
- 4) 谷内田正彦：多重画像を利用したシーンの理解，情報処理，24，12，pp. 1429-1436 (昭58-12)。
- 5) 馮，杉原，杉江：円錐光束を利用した三次元情報抽出法，東海電気連大論文集，455，(昭和59)。
- 6) 杉原，馮，岡崎，杉江：規則的パターンの投影像を利用した立体計測法，第15回画像工学コンファレンス論文集，8-2，1984。
- 7) 馮，杉原，杉江：円錐光束光源の正三角形配置による立体計測法，情報処理学会第30回全国大会論文集，6M-5，1985。
- 8) 馮，杉原，杉江：多数の円錐光束を利用した三次元情報抽出法，信学論文誌 (投稿中)。