ステレオ写真による等高線の自動作画[†]

出口 光一郎*・森 下 巖*

Automatic Contours Generation from Stereopaired Photographs

Koichiro DEGUCHI* and Iwao MORISHITA*

This paper describes an experimental system for generating contour lines automatically from stereopaired photographs. The system consists of a pair of projectors, a 32×32 integrated photodiode array mounted on an XY-recorder and a small computer PDP-12 with 8 K-word core memory. Contour lines are generated directly from a pair of optically projected images, not by evaluating elevations over the entire field.

The XY-recorder is placed vertically on the floor and on its recording plane a pair of stereo images is projected alternatively from the left and right projectors. The image pair reconstructs a virtual relief, and contour lines associated with an elevation value are obtained by cutting the relief by recording plane. The photodiode array is mounted just on the pen position to detect a pair of image segments; one is a $3.2 \times 3.2 \text{ mm}^2$ area of the left projector image and the other is that of the right projector image. The computer compares the segments and controls the movement of the detector. At each step of the generation process the detector is moved to such a position that the pair images become most alike. The trajectory of the detector movement is recorded by the pen; generating a contour line.

1. ま え が き

本論文では、一対のステレオ写真より被写体の等高線を自動的に作画する新しい方式のシステムについて報告する。地図の作製は、現在一定の間隔において航空機から地上を撮影したステレオ写真を用いて行われているが、そのさいもっとも労力を要するのは等高線の作画である。そのため、計算機を用いて等高線作画を自動化しようとする研究が種々行われてきた^{1)~4)}。

従来の方式においては、一対の写真を計算機内に画像データとして取込んだ上で、対応する点を探索して各点の高さの計算を行い、その結果をもとに等高線を描いていた。この方式によると、(1)全画像データを記憶しなければならないため非常に大きな記憶容量をもつ計算機が必要となり、(2)画面上の全点について最も計算時間のかかる対応点の探索と高度の計算を行っているため、長時間の計算を必要とする欠点があった。等高線を描くのにには画面上の全点の高度を計算する必要はないのである。

本論文で報告する方式では、一対のステレオ写真を平行に置いた2台のプロジェクタから重なり合いをもたせて前方の空間に投影することにより、高さの情報を再現する。微小な画像検出器——光電素子を2次元的に配列した集積回路——をXY記録計のペン部に取り付け、プロジェクタからの投影像を検出する。チョップバにより交互に投影されるプロジェクタからの画像を検出しつつ、最もよく二つの画像の一致する曲線に沿って画像検出器を動かし、同時に等高線を描いていく。

この方式によれば、対応点を探索するためには、一対の微小画像データを計算機内に記憶して計算すればよく、対応点探索アルゴリズムも簡単になり、また、ある高度の等高線上的についてのみ対応点を探しているため、全体としての計算量も少なくてすむ。探索アルゴリズムに従来の方式とほぼ同程度のプログラムを用いたとしても、全画像データを記憶する必要がないので、小記憶容量の小型計算機でシステムが構成できる。

このような方式の実現できるのは、2次元配列光電素子群を小さな面積に集積化した回路が開発されたためである。

2. 原 理

Fig. 1(a)に示したように、対象に向けて平行に置いた2台のカメラを用いてステレオ写真を撮影したとする。ただし、 l はカメラの焦点距離、 d は両カメラ

[†] 第13回計測自動制御学会学術講演会で発表(昭49・8)

* 東京大学工学部 東京都文京区本郷7-3-1

* Faculty of Engineering, University of Tokyo, Bunkyo-ku, Tokyo

(Received May 7, 1975)

の間隔である。

その一対のフィルムを用いて、Fig. 1(b)に示すように、2 台の平行に置いた焦点距離の等しいプロジェクタから投影する。対象空間内に一点 P_0 を考え、その座標を (x_0, y_0, z_0) とする。この点 P_0 の像は、プロジェクタの前方空間内の一点

$$X_0 = \frac{D}{d} x_0, \quad Y_0 = \frac{D}{d} y_0, \quad Z_0 = \frac{DL}{dl} z_0 \quad (1)$$

において一致する。ただし、 L はプロジェクタの焦点距離、 D はプロジェクタの間隔である。したがって、両プロジェクタからの投影像の一致する点を結んでいけば、 X, Y 方向には D/d 倍、 Z 方向には DL/dl 倍された対象表面がプロジェクタの前方空間に再現する。

プロジェクタ前方 $Z=Z_0$ なる平面にスクリーンを置く。このスクリーン上では、 z_0 に相当する高さの等高線上にある対象表面上の点の投影像のみが一致する。したがって、このスクリーン上で左右プロジェクタからの投影像の一致する点を結んでいけば、 $z=z_0$ の等高線が描ける。

この方式を機械化する場合、ただ一点の光強度から左右投影像の一致を判定させることはできない。そこで、微小平面 ΔE をスクリーンとしてプロジェクタ前方 Z_0 の距離に置くことを考える。対象表面上の点 $P_0(x_0, y_0, z_0)$ の近傍の微小平面の方向余弦を (n_x, n_y, n_z) とすると、 ΔE が点 (X_0, Y_0, Z_0) にあり、その方向余弦が、

$$N_x = \frac{n_x}{n}, \quad N_y = \frac{n_y}{n}, \quad N_z = \frac{Ln_z}{ln} \quad (2)$$

ただし、 $n^2 = 1 + (L^2/l^2 - 1)n_z^2$ のとき、 ΔE 上の左右プロジェクタからの投影パターンが完全に一致する。したがって、 $Z=Z_0$ 平面内において、 ΔE の方向を調整しながら左右の投影パターンが完全に一致する点を求めていけば、等高線が描けることになる。装置を簡単にするために、微小スクリーン ΔE の方向を、

$$N_x = 0, \quad N_y = 0, \quad N_z = -1$$

に固定すると、両プロジェクタからの投影パターンは完全には一致しないが、対象表面の方向が $(0, 0, -1)$ に近い場合は、よい精度での一致の判定が期待できる。

投影パターンの検出器としては、光電素子を微小面積に高密度で 2 次元的に配列したものを用いる。左のプロジェクタから投影したとき、および、右のプロジェクタから投影したときの検出器の第 (i, j) 番目の光

Fig. 1

電素子の出力信号をそれぞれ S_{ij}^L, S_{ij}^R とすると、左右投影パターンの一致の程度は評価関数

$$J = \sum_i \sum_j (S_{ij}^L - S_{ij}^R)^2 \quad (3)$$

の値によって判定できる。等高線上の点に検出器があるときはこの J の値が極小となる。 J の小さい点を検出器がたどっていくことで、等高線が描ける。

検出器を等高線に沿って移動させるアルゴリズムは以下ようになる。これまで等高線に沿って点 O にまで進んできたとする。等高線は連続であるので、 O の近傍に必ず等高線上の点がある。 O の前方の微小距離の点で、この等高線の延長線上の点を探せばよい。例えば、Fig. 2 に示すように、進んで来た方向を前方に一定距離延長した点 a およびその両側 45° の方向に延長した点 b, c に検出器を動かす。

その 3 点で J の値を算出し、その三つの値のうちで最小値をとる点を新たに等高線上の点とし、その点に検出器を動かす。同時に、点 O とこのようにして定めた点とを線分直線を XY 記録計で描く。

3. 解 析

前節で述べたシステムのパラメータの選定について考察する。

$Z=Z_0$ 平面上に投影される画像を (X, Y) 座標に対する光強度分布として、左側のプロジェクタからの画像を $f_L(X, Y)$ 、右側からの画像を $f_R(X, Y)$ と表わす。検出器の幅を W とすると、検出器の中心が (X_c, Y_c) にあるときは、この画像の

$$\Delta S: \begin{aligned} X_c - \frac{1}{2}W &\leq X \leq X_c + \frac{1}{2}W \\ Y_c - \frac{1}{2}W &\leq Y \leq Y_c + \frac{1}{2}W \end{aligned} \quad (4)$$

の部分を取って比較するわけである。このときの画像の一致判定用評価関数 J の値を $J(X_c, Y_c)$ で表わすと、

$$\begin{aligned} J(X_c, Y_c) &= \sum_i \sum_j (S_{ij}^L - S_{ij}^R)^2 \\ &\approx \iint_{AS} (f_L(X, Y) - f_R(X, Y))^2 dXdY \\ &= \iint_{AS} f_L^2(X, Y) dXdY \\ &\quad + \iint_{AS} f_R^2(X, Y) dXdY \\ &\quad - 2 \iint_{AS} f_L(X, Y) f_R(X, Y) dXdY \end{aligned} \quad (5)$$

となり、第1項、第2項は一定であるとする、 J の極小となる点を探すことは、第3項の極大となる点を探すことに相当している。この極大点を精度よく求めるには D, L, W の値をどのように定めればよいかを考える。

まず、 $f_L(X, Y)$ と $f_R(X, Y)$ との関係を述べる。 $P(X_0, Y_0, Z_0)$ が $Z=Z_0$ 平面对応する等高線上の点であるとする。このような点では f_L と f_R の値は一致しているが、この等高線からはずれた点では両画像は X 方向にずれている。すなわち、Fig. 3 に示すよ

Fig. 2 Illustrating of the algorithm for determining the next sensor position

Fig. 3 Illustrating of the relation between a parallax difference and a height difference

うに、実際には $Z=Z_0+\Delta Z$ 平面上の点 $Q(X_0+\Delta X, Y_0, Z_0+\Delta Z)$ でその像が一致すべき点の両プロジェクタからの像は、この平面内では X 方向にずれた点にそれぞれ投影される。したがって、 f_L は f_R を X 方向に伸縮したものになっており、

$$f_R(X_0+U, Y) = f_L(X_0+\gamma U, Y) \quad (6)$$

の関係がある。ここで、 γ はその点の高さの等高線からのずれ、すなわち、 ΔZ の関数であるが、点 P のまわりでは対象表面は平面であり、この平面の方向余弦を、(2)式で導いたように定めると、

$$\gamma = \frac{N_z Z_0 + N_x X_0}{N_z Z_0 + N_x X_0 - N_x D} \quad (7)$$

である。

(6)式を用いると(5)式の第3項は、

$$\begin{aligned} &\iint_{-(1/2)W}^{(1/2)W} f_L(X_c+U, V) f_L(X_c+(1-\gamma)(X_0-X_c) \\ &\quad + \gamma U, V) dU dV \end{aligned} \quad (8)$$

となり、これは、 f_L とその伸縮画像との相互相関関数であり、 $N_x \neq 0$ のときは $X_c=X_0$ でピークをもつので、(5)式より $X_c=X_0$ が検出できる。しかし、そのピークの鋭さは f_L の自己相関関数のピークの鋭さより小さくなり、その程度は γ の値が1からはずれるほど大きい⁵⁾。

(1),(2)式を(7)式に代入すると、

$$\gamma = \frac{n_z z_0 + n_x x_0}{n_z z_0 + n_x x_0 - n_x d}$$

したがって、 γ は D, L の値によらない。すなわち、 XY 平面上の各点での $J(X, Y)$ の値を考えると、 $Z=Z_0$ に相当する高さの等高線に沿って $J(X, Y)$ の「谷」ができていくことになる。その「谷」の鋭さは、対象表面のパターンおよび傾斜、撮影条件によって決る。

さらに、実際には積分の範囲が有限であることから、相関関数のばらつきにあたる雑音がこれに加わった形になっていると予想される。 W を大きくとることで、この雑音は小さくおさえられるが、積分範囲を大きくとると、伸縮の影響が大きくなって、相関関数(8)式の極大点の鋭さをなまらすことになる。

一般の場合に W の最適値を計算するのは困難であるが、ピッチ p の周期的なパターンを対象とする場合には、 X_0 にある検出器上への左右プロジェクタの投影像が p の程度以下のずれとなるよう W の値を選定すればよい。すなわち、

$$|1-\gamma| W \frac{d}{D} \leq p$$

より、

$$W \leq \frac{1}{|1-\gamma|} \frac{D}{d} p \quad (9)$$

4. 実験システム

Fig. 4 に実験システムの構成図を示す。検出器には、3.2 mm 平方に 0.1 mm 間隔で $32 \times 32 = 1024$ 個のフォトダイオードを並べた 1 チップ IC (Reticon 社製, RA 32×32 A 型) を用いた。これを XY 記録計のペン位置に取付けた (Fig. 5 参照)。

検出器からはアナログ量で各フォトダイオードの受光量が出力される。これを AD 変換器を通して小型計算機 PDP-12 (記憶容量 8K 語) に取込む。ステレオ写真は、プロジェクタによって検出器の取付けてある XY 記録計面上に約 30~50 cm 程度の大きさで投影する。チョッパにより左右の投影像が交互に検出器に投影される。検出器はその投影像のうち、3.2 mm 平方を切り取って検出しつつ、計算機からの制御で XY 平面上を平行移動する。プロジェクタは焦点距離 130 mm の同形のものを 2 台用い、平行度が確保でき、仰角、回転角、高さが調節できる台に取付けた。両プロジェクタの間隔は 14 cm から 40 cm まで可変で、両プロジェクタの光量は電源電圧によって微調整した。

5. 実験結果

5.1 評価関数の測定

検出器を動かして XY 平面をラスタ走査し、XY 平面上の各点において評価関数 $J(X, Y)$ がどのような値をとるかを調べた。フィルムとしては、不規則な細かいパターンが描かれた平板をカメラ前方に Fig. 6 に示したように配置して撮影したものをを用いた。この場合、等高線は直線となる。

測定結果を Fig. 7(a), (b) に示す。X 方向に検出器を 0.7 mm の刻みで動かして J の値を 55~65 点で測定した。図の X 方向の目盛りは測定点の番号を示す。Y 方向の走査線の間隔は 4 mm とした ((b) では c と k の間は 4 cm である)。計算機の 1 語は 2 進 12 桁で、算出した J の値が 2 語長を越してオーバーフローとなった場合は破線で示してある。斜めの細い破線は実際に等高線の存在する場所を示す。(a) はパターンの比較的「あいまい」ものに対する測定であり、(b) は「細かい」ものに対する測定である。

この結果から、等高線上で $J(X, Y)$ は逆三角形の「谷」をもっており、検出器の大きさに対してパターンがあいまい場合はなだらかに、細かい場合は鋭くなること、またこれに「雑音」が乗った形となっているこ

Fig. 4
Schematic
diagram
of the
automatic
contour
generation
line
system

Fig. 5
Photograph
of the IC
sensor and
preamplifier
mounted
on a
XY-recorder

とが確かめられた。

Fig. 8 は、この測定のさいに検出器が検出した左右プロジェクタからの投影パターンをブラウン管上にディスプレイしたものである。(a) は検出器が等高線上にある場合で、両画像はほとんど一致している。(b) は検出器が等高線からわずかにはずれた位置にあるときのもので、両画像はわずかにずれている。

5.2 等高線の自動作図

2. で示したアルゴリズムを用いて、等高線の自動作図の実験を行った。検出器は最初は手動により等高線上の一点に置いた。アルゴリズム中で、新たに等高線上の点を探すため J を算出する 3 点の間隔は、そこでの検出器の被う面が互いに重なり合いをもつよう 1.5

Fig. 6 Illustrating of the camera and object position

Fig. 7 Plots of the criterion function $J(X, Y)$ obtained by raster scanning

(b)

(left)

(right)

(a) detector is on a contour line

(left)

(right)

(b) detector is slightly off a contour line

Fig. 8 Displays of the output of the 32×32 photodiode arrays

Fig. 9 Laboratory model used to test the system

mm とした。必要とした計算機の記憶容量は、データの記憶に 3 K 語、プログラムに約 3 K 語であった。また、 J の計算のための時間は約 0.1 秒であった。

対象としては、Fig. 9 に示すモデルを用いた。このモデルは、直径 28 cm の半球で、カメラ面との距離は 85 cm とした。得られた等高線が Fig. 10(a) である。2 本の等高線の高度差は約 1 cm である。また、この Fig. 10(a) の内側の等高線を得たさいに、参考のため図中の a, b, c の矢印で示した方向の直線に沿って記前の Fig. 7 と同様に $J(X, Y)$ の様子を調べたものが Fig. 10(b) である。

6. 結 論

小型計算機と光電素子マトリクスを用いて、ステレオ実体写真から等高線を自動作画する方式を提案した。本方式では、検出器を移動させて等高線を追跡しているため、従来の方式に比べて作画に時間を要するが、計算機の記憶容量は非常に小さくてすむ。試作装置では簡単な光学系を使用した。本方式では光学系の精度が作画精度に直接影響を与えるため、実用機とするには高精度の光学系を使用しなければならない。また、本実験では等高線ごとの最初の一点を手動で設定したが、等高線作画を全自動化するには、これを自動化するプログラムの開発が必要である。

Fig. 10

(a) contour lines generated by the system
(b) plots of the criterion function $J(X, Y)$ obtained by raster scanning

参 考 文 献

- 1) C.L. Hobrough: Automation in Photogrammetric Instruments, Photogrammetric Engr. **31**, 595/603 (1965)
- 2) J.V. Sharp: Data Processing Using Photogram-

- metric Instruments, Photogrammetric Engrg. **31**, 223/239 (1965)
- 3) S. Bertram: Automation of Stereocompilation, Photogrammetric Engrg. **34**, 950/952 (1968)
- 4) 森, 木戸出, 麻田: 航空写真図形の処理, 第4回画像コ
ンファレンス論文集, 29/32 (1973)
- 5) M.J. Lahart: Optical Area Correlation with Magnification and Rotation, J.O.S.A., **60**, 319/325 (1970)

論文集広告募集のお知らせ

論文集は会員外購読を含め現在約2,500部発行しております。最近の諸物価、人件費等の高騰により、組版代、印刷代、製本代、紙代等の費用がかさみ論文集の発行が大変苦しい状況であります。

つきましては、論文集刊行費の一助とするために、昭和50年度(Vol. 11, No. 1)より表紙Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、に賛助会員、出版社の広告を掲載することに致しましたので何卒関係各位のご協力をお願い申し上げます。なお、ご希望のかたは学会事務局へお申し出下さい。