

線配列 CCD カメラを用いた座標測定法と精度

METHOD AND ACCURACY OF STEREOSCOPIC MEASUREMENT USING A CAMERA WITH LINEAR ARRAY CCD SENSOR

森 忠次*・広金幹生**

By Chuji MORI and Mikio HIROKANE

A camera with a solid state device has several advantages in engineering photogrammetric measurements. Capability of precise and reliable metric measurement is also one of the good properties of this camera. Measuring properties of a CCD camera with a fairly high resolution, such as 2000×3000 pixels, are investigated. The image of 2000×3000 pixels is produced from scanning a image plane by a linear array sensor. This scanning mechanism leads positional instability of the sensor. The random error of a position of a pixel is $\pm 2.6 \mu\text{m}$ (± 0.2 pixel pitch). In spite of the fairly large error, the interior orientation elements can be determined precisely. Therefore object coordinates can also be measured with a good accuracy because any kinds of errors seldom occur in a digital data processing. Another merit is to be able to do stereoscopic measurement of a pair of strongly convergent photos.

Keywords: CCD camera, digital photogrammetry, stereometric measurement, accuracy, image processing

1. 緒 言

固体撮像デバイスを用いたカメラを用いれば、在来の用途とは異なった新しい分野への応用展開が可能となる。その中で注目されているのは、自動化と即時化であって、ハードとソフトの両面において鋭意研究が進められている^{1)~6)}。固体撮像デバイスによる記録の長所は、前記以外に、保存性の良いこと、本論文で示すように計測工程が少なく正確な測定の行えること、確認の容易な点であれば現在の画像処理装置を用いて三次元座標測定のできること、収束撮影写真でも実体観測のできることなどである。短所といえば、高分解能のものが現在では作られていないということである。たとえば、画面寸法 $230 \times 230 \text{ mm}$ の空中写真を $10 \mu\text{m}$ 間隔の画素で置き換えようとする、画素数 530×10^6 の面配列となる。データ処理の面から考えても、これだけ多量の画像データ（カラーの場合には上記の3倍になる）を取り扱うのは大仕事である。

以上の状況のもとで、本論文では CCD カメラによる計測の方法、システム構成、測量精度の実例と特徴とい

う、利用面のすべてに関連する最も基本的な事項を明らかにした。その内容は次のとおりである。

① コントラストのよい円形ターゲットであれば、通常の注意でもって、像面での座標観測誤差を ± 0.05 pixel ($0.65 \mu\text{m}$) 程度にできるから、高精度の測量が可能である。

② 使用した CCD カメラは、高分解能ではあるが線配列センサによって像面の走査記録をとる形式であるため、画素の位置にばらつきが生じるが、その大きさは $\pm 3 \mu\text{m}$ 以下であった。したがって、アマチュアカメラであるにもかかわらず、従来の測量用カメラを用いたときに近い程度の誤差に収めることができた。

③ 測量誤差は、機器の性能以外に、観測および処理に関する諸条件に影響されるから、なるべく通常の注意のもとで実行される程度の条件下における観測例を挙げ、実施条件も明記するように心掛けた。

④ CCD カメラ以外の使用機器は、パーソナルコンピュータと大型計算機と結んだ画像処理システムである。ただし、パーソナルコンピュータシステムのみで実行可能なことが多い。このように、一般に普及している機器で精密観測の行えることに大きな特徴がある。なお、本システムによる観測法と地形図作成システムとを直結した機器システムは、まだ市販されていない。

* 正会員 工博 岡山大学教授 工学部土木工学科
(〒700 岡山市津島中3丁目)

** 正会員 工修 岡山県土木部 (〒700 岡山市内山下)

Table 1 Technical data of a camera
PIC 2350 A.

Sensor	Charge-coupled device, linearly arrayed
pixel pitch	13 μ m
Array size	2 000 pixels
Image size	2 000 \times 3 000 pixels (28 \times 39 mm)
Lens	SEKOR C 45 mm/2.8 N

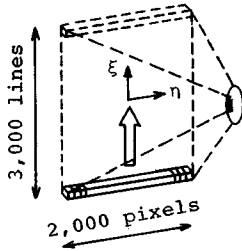


Fig. 1 Camera with a linear array sensor.

⑤ 座標測定誤差はほぼカメラの性能によって支配され、処理速度、便利さ、利用範囲などは計算機と画像処理システムに依存する。使用したシステムでは、1シーンの白黒画像撮影に約6秒の時間が必要である。

2. 機器およびシステム

(1) 撮影および処理システム

使用カメラは、池上通信機(株)製のPIC 2350 Aであって、仕様の概要はTable 1のとおりである。2000画素を1列に配置したセンサを、カメラの結像面内で移動させて3000ラインの走査を行い、その結果 6×10^6 画素のデジタル画像記録を得る仕組みになっている(Fig. 1)。

撮影および記録のための機器構成をFig. 2およびFig. 3に示す。Fig. 2の左半分は、撮影場所の監視、基本的な撮影動作およびデジタル記録を行う部分であって、メーカーの標準市販品である。Fig. 2の右半分は、パーソナルコンピュータ(16ビット)を用いて全体の制御を行うとともに、6MBバッファメモリに記録されたデータの転送・処理などを行うために付加した部分である。座標測定や画像処理にパーソナルコンピュータを活用することは可能であるが、岡山大学の汎用大型計算機システム(ACOS 1000)にオフラインでデータを転送し、付属の画像処理システムを利用している。

(2) 写真座標の測定法と誤差

Fig. 4は、写真測量の工程中で計測誤差の導入される箇所と機器とを、記録のためにフィルムを用いた場合と

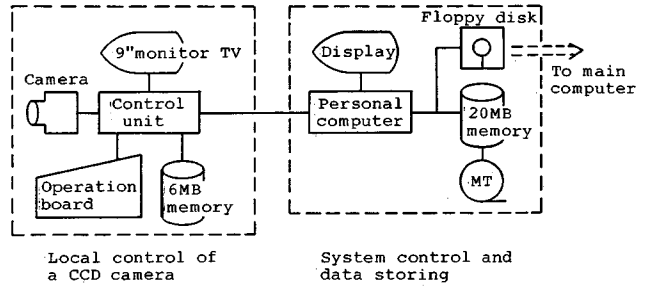


Fig. 2 Configuration of image acquisition system.

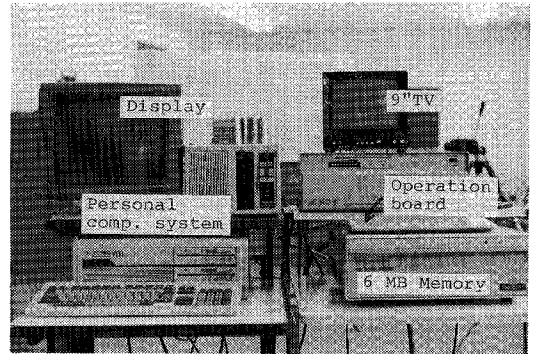


Fig. 3 Monitoring and recording instruments.

(a) Film

(b) Solid state device

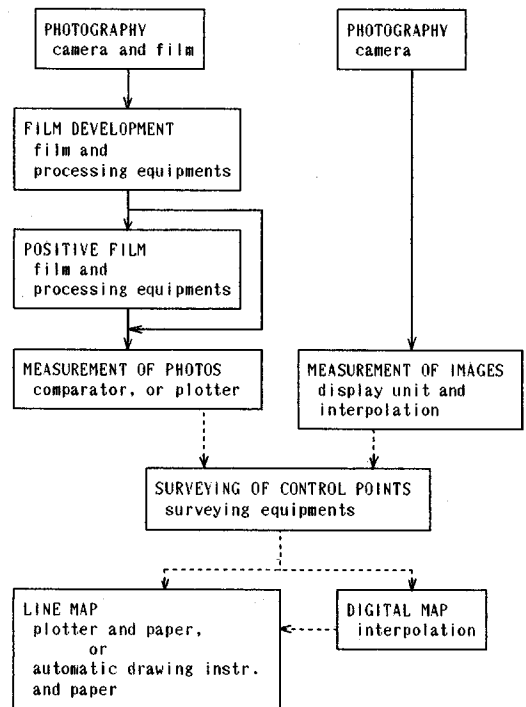


Fig. 4 Flow chart of measurements and sources of errors.

CCD を用いた場合とについて比較したものである。明らかに後者の場合の方が誤差の入る機会が少なく、地上測量を除くと、撮影と座標測定の場合のみで誤差が導入されるに過ぎない。そこでまず、ターゲットの座標観測を行うときの正確さと精密さを調べることにした。

ターゲットは Fig. 5(a) のような円形とした。この形の利点は、肉眼観測と自動認識とのいずれの場合においても、方向性がなく、中心が発見しやすく、かつ観測誤差の小さいことである。中心円の直径 d は、カメラの像面において約 $32 \mu\text{m}$ (2.5 pixel pitch) の大きさになるようにした。

得られた像からターゲットの中心座標を観測するために、像を 10 倍に拡大してディスプレイ装置のスクリーンに表示し、肉眼観察によって円の中心をカーソルで指定した。画像拡大のために用いる内挿法としては、キュービックコンボリューション法を用いるのがよいが、バイリニア法を用いた結果と比較して誤差の大きさに少ししか差がなかったため、簡単のために後者を用いることにしている。使用しているスクリーンの画素間隔が 0.5 mm であるから、直径 2.5 pixel の円がスクリーン上では 12.5 mm の円として表示され、その中心を探すことになる。その状況を Fig. 6 に示す。

実験結果は Table 2 の第 1 行に示すとおり、標準誤差は $\pm 0.65 \mu\text{m}$ (0.05 pixel pitch) であって、この計測は円の中心のライン・コラムの番号を指定しているだけであるから、系統誤差が入らないという特徴がある。他の実験でもほぼ同様な結果が得られていて¹⁾、きわめて正確な測量の可能性のあることがわかる。

ターゲットの形を変えると観測の標準誤差は変化する。例として Fig. 5(b) の矢印先端を観測したときの誤差を示すと、Table 2 の第 2 行のように増加した。

(3) 結像面走査に伴う誤差

線配列センサが像面を走査するときにセンサの移動が

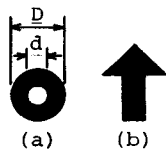


Fig. 5 Targets.

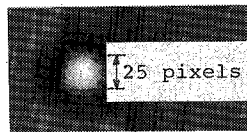


Fig. 6 Image of a target.

Table 2 Standard errors of positioning of targets.

Type of target	Standard error
Circle	$\pm 0.65 \mu\text{m}$ ($\pm 0.05 \text{ pixel}$)
Arrow	$\pm 1.18 \mu\text{m}$ ($\pm 0.09 \text{ pixel}$)
Circle ¹⁾	$\pm 0.78 \mu\text{m}$ ($\pm 0.06 \text{ pixel}$)

1) measured by rectified images

Table 3 Unstability of pixel position caused by a scan on a image plane.

(μm)

Date of test	Oct. 1986		Oct. 1987		σ_n	
Standard error	σ_ξ	σ_η	σ_ξ	σ_η		
Attitude of camera	I	1.7	1.5	4.3	1.7	2.6
	II	1.5	1.9	4.8	0.7	

不安定であれば、画素のライン・コラム番号が同じであっても座標値が一定しないという欠陥が生じる。走査型ではこの欠陥を除くことができず、座標値のばらつきが位置測定誤差に直接の影響を及ぼすから、次の調査を行った。

既述の円形ターゲットを多数配置し、カメラを固定してこれらのターゲットを 4 回撮影し、各ターゲットの座標観測値のばらつきの大きさとその場所による違いの有無を調べた。この観測は 1 年を経て再度実行し、いずれの時期においてもカメラの姿勢を 2 種類変えて観測した。場所的な差は認められなかったため、全点の平均値を求めると、Table 3 の結果となった。Table 中の σ_M は全実験の二乗平均である。

この表の意味は、像面における任意の点の座標観測値には表記の標準誤差を含むということである。この表の値は製作者の仕様を満足するものであって、当初から予想されていたものである。換言すれば、座標誤差を Table 2 のように $\pm 0.65 \mu\text{m}$ に収め得る可能性があるにもかかわらず、走査機構のために座標観測誤差が $\pm 2.6 \mu\text{m}$ に増加するということである。ちなみに、フィルムを用いた写真測量においては、Fig. 4 に示したように各所で誤差が入るので、測量用カメラを用いた場合でもこれ以上の誤差の生じるのが通例である。以上によって、Table 3 に示す誤差であれば十分精密な測量が行えると推定されるので、以下のような測定実験を行った。

3. カメラの内部標定要素の決定

カメラを精密測量用として用いるためには、内部標定要素を正しく定めることが重要である。この節では、そのために必要な検定場、標定要素選定法、得られた結果などを記述する。

(1) カメラ検定場

a) 検定場 I (中距離検定場)

4 階建の建物の壁面に円形ターゲット約 40 個をほぼ均等に配置し、隣の建物の屋上の 3 点 A, B, C からそれらを撮影した (Fig. 7)。距離は 18~32 m である。撮影点およびターゲットの位置は、トランシットと鋼巻尺を用いて観測した。ターゲットの座標調整の結果によれば、各点の座標の標準誤差の二乗平均は $\sigma_A = \pm 1.6$,

$\sigma_y = \pm 0.5$, $\sigma_z = \pm 2.6$ (単位: mm) であった。誤差が少し大きいので、精密にカメラを検定しようとするとき、この検定場を使うのには少し無理がある。

b) 検定場Ⅱ (近距離検定場)

室内の壁面に12個のターゲットを配置し、Fig. 8のように壁面から約3.9 mの距離に5つの撮影点を定めた。さらに直方体や円柱状の物体をも同時に撮影して、それらの物体の実体観測を行えるようにした。ターゲットの座標観測誤差は、 $\sigma_x \div \sigma_y \div \sigma_z \div \pm 0.25$ mm程度と推定され、この場合も検定場自身の精度が少し悪い。

(2) 内部標定要素の選定

内部標定要素を規定するパラメーターは、カメラの特徴をよく表現したものであって、個数が少なく、かつ互いに独立性の強いものを選ばなければならない。ここでは、カメラの特性とパラメーターの数値とを明確に対応

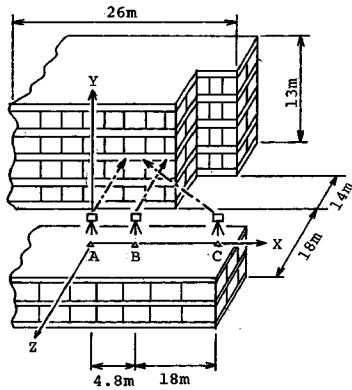


Fig. 7 Test field I.

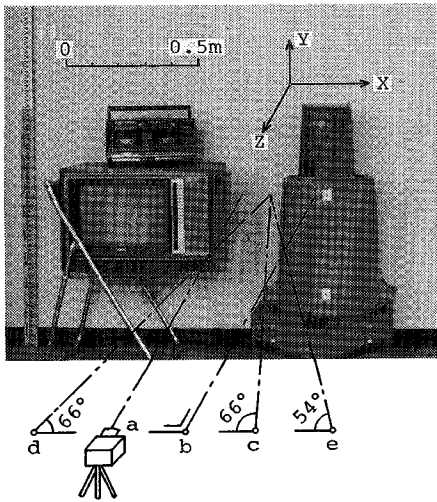


Fig. 8 Test field II.

させることを目的として、次のような方針でパラメーターを選んだ。

まず、被写体と写真との間の中心投影関係を表現する式、すなわち、物体の位置 (X, Y, Z) 、投影点 (X_0, Y_0, Z_0) および写真座標 (ξ, η) との間の共線関係を示す次式が成立しなければならない (記号については、Fig. 10を参照)。

$$\begin{aligned} \xi - \Delta\xi &= -c \frac{l_1(X-X_0) + m_1(Y-Y_0) + n_1(Z-Z_0)}{l_3(X-X_0) + m_3(Y-Y_0) + n_3(Z-Z_0)} \\ \eta - \Delta\eta &= -c \frac{l_2(X-X_0) + m_2(Y-Y_0) + n_2(Z-Z_0)}{l_3(X-X_0) + m_3(Y-Y_0) + n_3(Z-Z_0)} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 l, m, n は撮影方向の方向余弦、 c は画面距離、 $\Delta\xi$ および $\Delta\eta$ はカメラの特性による像のひずみである。像のひずみとしては、次の形のものを取りあげることにした。

$$\begin{aligned} \Delta\xi &= \xi_0 + \frac{\bar{\xi}}{c} \Delta c + \bar{\eta} \alpha + \left(-\frac{\bar{\xi}^2}{c} \theta_1 + \bar{\xi} \bar{\eta} \theta_3 \right) \\ &\quad + (\bar{\xi} \bar{r}^2 A_1 + \bar{\xi} \bar{r}^4 A_2) + (3 \bar{\xi}^2 + \bar{\eta}^2) B_1 + 2 \bar{\xi} \bar{\eta} B_2 \\ \Delta\eta &= \eta_0 + \frac{\bar{\eta}}{c} \Delta c - \bar{\eta} \lambda - \bar{\xi} \left(c + \frac{\bar{\eta}^2}{c} \right) \theta_1 \\ &\quad + (\bar{\eta} \bar{r}^2 A_1 + \bar{\eta} \bar{r}^4 A_2) + [2 \bar{\xi} \bar{\eta} B_1 + (\bar{\xi}^2 + 3 \bar{\eta}^2) B_2] \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (2)$$

上式中の記号の意味を次に記す。

ξ_0, η_0 : 主点位置

Δc : 画面距離の補正

α : ξ 軸と η 軸との非直交性の影響

λ : ξ 方向を基準とした η 方向の寸法倍率の差

θ_1 : センサの ξ 軸方向移動に伴う ξ 軸まわりのセンサの回転 (Fig. 9(a))

θ_3 : センサの ξ 軸方向移動に伴う ξ 軸まわりのセンサの回転 (Fig. 9(b))

A_1, A_2 : レンズの radial distortion の影響

B_1, B_2 : レンズの decentering の影響

$$\bar{\xi} = \xi - \Delta\xi_0, \quad \bar{\eta} = \eta - \Delta\eta_0$$

$$\bar{r}^2 = \bar{\xi}^2 + \bar{\eta}^2$$

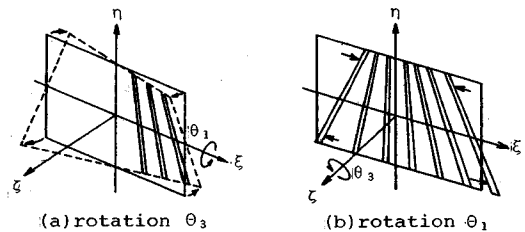


Fig. 9 Movement of a linear sensor.

(3) 内部標定要素の推定値

検定場 I に配置したターゲットを基準点とし、その座標値 (X, Y, Z) と写真上での像の座標観測値 (ξ, η) とを用いて、式 (1) および (2) が成立するようにパラメーターを決めればよい。この場合に、最小二乗法を適用し、観測値 ξ, η の重みは等しいと仮定し、式 (1) の残差二乗和が最小となるようにした。

実行に際しては、外部標定要素 X_0, Y_0, Z_0 が内部標定要素 x_0, y_0, c と強い相関があるため、 X_0, Y_0, Z_0 をできるかぎり正しく測量して既知数とした。カメラの撮影方向の指定は、方向余弦の代わりに 3 軸のまわりの回転 ω, φ, α を用いることにし、この外部標定要素を正しく観測するのが困難であったので、未知量に加えた。一方、未知量の個数を減ずるために $A_2=0$ と仮定した。なお、A, B, C の各写真に含まれる基準点数は、それぞれ 34, 26, 31 であった。このようにして、検定場 I で写した 3 種の写真から 13 個のパラメーターを求めた。その中で内部標定要素のみを示したのが Table 4 である。

Table 4 のパラメーターの中で像のひずみに小さい影響 (ほぼ $10 \mu\text{m}$ 以下) しか与えないものとして、 $\lambda, \theta_1, \theta_2, B_1, B_2$ を除き、新しく A_2 を加えて、あらためて 9 個のパラメーターを用いて標定した結果を Table 5 に示した。得られた内部標定要素は比較的安定していて、写真座標観測誤差 σ_0 も Table 3 に示した $\pm 2.6 \mu\text{m}$ にほぼ近い値である。したがって、検定値としては、3 種の写真で得られた値の平均 (A_1, A_2 は平均的な曲線形を与

えるもの) として、無限遠の撮影の場合には、Table 5 の右欄に記した値を用いることにした。

4. 三次元座標測量の誤差

本節では、Table 5 に記した検定値を用い、やや精密ないしは通常の測量で実施される程度の方法および注意のもとで発生する誤差の様子を示す。

(1) 単写真標定値を用いたときの座標測量誤差

各写真ごとに単写真の外部標定を行っておけば、2 枚以上の写真を用いて被写体の三次元座標を決定できるから、このような測量を行った例を記す。

実際に行われる測量の場合に近いように、標定点は 8 点の場合と 5 点の場合というように小数に限定して使用し、内部標定要素は Table 5 の検定値を用いて外部標定を行ってみた。結果の一例として、写真 A の場合のみを Table 6 に示した。表中の σ_0 は写真座標観測誤差を意味する。3 種の写真の外部標定の結果を用いて、4 つの写真の組合せ、A-B, B-C, A-C, A-B-C に対して解析的に実体モデルを作り、三次元座標を再現してみた。座標誤差を調べるためには、次に記す個数の点を用いて、既知の地上座標値と写真測量座標値との差を算出し、そのばらつきを求めた。

標定基準点 8 個のとき：15 点 (標定基準点中より 5 点とそれ以外の既知点 10 点を選んだ)

標定基準点 5 個のとき：13 点 (標定基準点中より 3 点とそれ以外の既知点 10 点を選んだ)

写真測量による被写体座標再現の誤差は Table 7 のと

Table 4 Ten interior orientation parameters obtained by different images.

Image	A	B	C
$x_0 \times 10^3 (\text{mm})$	-1240	-1293	-1280
$y_0 \times 10^3 (\text{mm})$	86	39	124
$c \times 10^3 (\text{mm})$	46190	46226	46209
$\alpha \times 10^6 (\text{rad})$	-1336	-6782	-5791
$\lambda \times 10^6$	2	170	-55
$\theta_1 \times 10^6 (\text{rad} \cdot \text{mm}^{-1})$	65	-47	20
$\theta_2 \times 10^6 (\text{rad} \cdot \text{mm}^{-1})$	13	-6	27
$A_1 \times 10^6 (\text{mm}^{-2})$	-34.0	-38.7	-36.6
A_2	-	-	-
$B_1 \times 10^6 (\text{mm}^{-1})$	1	-14	4
$B_2 \times 10^6 (\text{mm}^{-1})$	9	7	3

Table 5 Six interior orientation parameters determined by use of test field I.

Image	A	B	C	Calib. Value
$\xi_0 \times 10^6 (\text{mm})$	-1221 \pm 13	-1215 \pm 24	1240 \pm 27	-1225
$\eta_0 \times 10^6 (\text{mm})$	24 \pm 13	-10 \pm 28	-4 \pm 26	3
$c \times 10^3 (\text{mm})$	46225 \pm 9	46260 \pm 21	46220 \pm 7	46235
$\alpha \times 10^6$	-4490 \pm 87	-4562 \pm 132	-4659 \pm 117	-4570
$A_1 \times 10^6 (\text{mm}^{-2})$	-41.2 \pm 1.5	-51.2 \pm 6.3	-43.0 \pm 2.3	-45.1
$A_2 \times 10^6 (\text{mm}^{-2})$	13.9 \pm 2.7	33.9 \pm 19.6	16.5 \pm 5.7	23.7
$\sigma_0 (\mu\text{m})$	± 3.1	± 3.7	± 2.7	-

Table 6 Exterior orientation elements of a photo A.

No. of control pts.	8	5
$X_0 (\text{mm})$	-13.3 \pm 2.0	-12.7 \pm 4.4
$Y_0 (\text{mm})$	783.2 \pm 2.9	782.1 \pm 5.6
$Z_0 (\text{mm})$	-32.7 \pm 1.4	-32.5 \pm 3.0
$\omega \times 10^6 (\text{rad})$	-4485 \pm 132	-4441 \pm 247
$\phi \times 10^6 (\text{rad})$	133100 \pm 82	133124 \pm 162
$\kappa \times 10^6 (\text{rad})$	1547 \pm 84	1512 \pm 173
$\sigma_0 (\mu\text{m})$	± 2.3	± 3.3

Table 7 Errors in reconstructed objects made by photos which have been individually resected.

No. of control pts.	8				5				
	Model	$\frac{B}{Z}$	σ_x	σ_y	σ_z	σ_z/Z (0/00)	σ_x	σ_y	σ_z
A-B	0.19	2.1	1.7	6.4	0.22	0.8	2.3	5.8	0.22
B-C	0.72	2.6	1.4	4.0	0.15	0.5	1.7	5.3	0.21
A-C	0.91	1.6	1.3	3.4	0.12	0.6	1.7	4.4	0.18
A-B-C	-	1.8	1.4	3.2	0.12	2.1	1.6	4.3	0.17

おりである。表中の σ_z/Z は、 $|(Z \text{ の座標差})/Z|$ の平均値を意味する。この値は精度を代表するものであって、基線比 B/Z にほぼ反比例するのが通例である。したがって、モデル A-B について得られたような良い値はめったに得られないものであると考えるべきである。アマチュアカメラにフィルムを用いて測った例と比較すると、Table 6 および 7 の誤差は相当小さい⁸⁾。

(2) 相互標定と対地標定を行ったときの誤差

1 対の写真の相互標定を行った後に対地標定を行うという方法は、従来からよく実施されていたので、この方法を用いた例を示すことにする。

相互標定は、Fig. 10 に示すモデル座標系において左写真を固定し、投影点 O_1, O_2 および写真上の像 p', p'' が同一平面内にあるという条件

$$\begin{vmatrix} B_x & x_p' & x_p'' \\ B_y & y_p' & y_p'' \\ B_z & z_p' & z_p'' \end{vmatrix} = 0 \dots\dots\dots (3)$$

を満足しかつ写真座標の残差二乗和を最小にすることによって実行した。

対地標定は、写真から求めた座標と地上測量の座標との差の二乗和が最小となることによって実現させたが、このときの各座標の重みの比は、 $p_x : p_y : p_z = 1 : 1 : (B/z)^2$ とした。

a) 検定場 I における例

11 個の相互標定点を用いて 2 枚の写真から実体モデルを作り、その中の 6 個の点を標定基準点を利用して対地標定を行った。誤差を評価するためには、相互標定に用いた 11 点全部において地上測量の座標と写真測量の座標との差を求めた。

相互標定の結果の一部を Table 8 に示す。Table 9 は同じモデルについて得られた対地標定の結果である。この表の値は、Table 6 の値と一致すべきものであって、

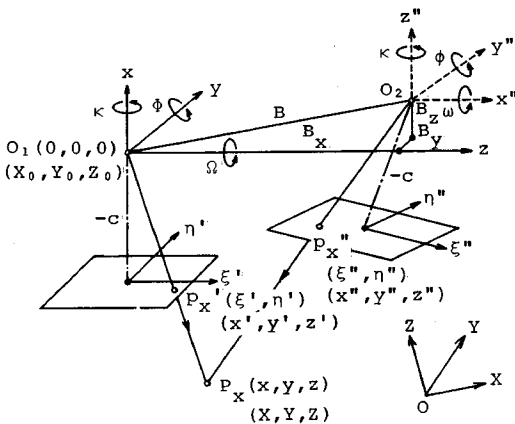


Fig. 10 Coordinates and orientation.

Table 8 Relative orientation elements.

Model	A-B	A-C
$B_y/B_x \times 10^6$	-1752 ± 673	7998 ± 146
$B_z/B_x \times 10^6$	16999 ± 398	134745 ± 250
$\omega \times 10^6$ (rad)	542 ± 144	-369 ± 128
$\phi \times 10^6$ (rad)	6450 ± 490	687992 ± 233
$\kappa \times 10^6$ (rad)	262 ± 117	3136 ± 71
σ_o (μm)	1.6	0.8

Table 9 Absolute orientation elements.

Model	A-B	A-C
X_o (mm)	-18.8 ± 7.4	-10.6 ± 3.7
Y_o (mm)	780 ± 8.2	774.8 ± 4.6
Z_o (mm)	-28.6 ± 6.4	-25.6 ± 3.3
$\Omega \times 10^6$ (rad)	-4305 ± 376	-4108 ± 208
$\phi \times 10^6$ (rad)	132929 ± 293	133249 ± 145
$\kappa \times 10^6$ (rad)	1309 ± 385	1037 ± 189
σ_{ox} (mm)	5.3	2.1

Table 10 Errors in reconstructed objects made by the double image orientation (Test field I).

Model	B/Z	σ_x	σ_y	σ_z	σ_z/Z
		(mm)			(0/00)
A-B	0.19	2.7	3.2	11.7	0.37
B-C	0.72	2.1	2.0	4.9	0.15
A-C	0.91	3.5	3.2	4.1	0.13

両者を比較すれば良い精度で標定のできていることがわかる。

前記の 11 点について、写真測量によって求めた座標値の誤差の二乗平均を計算したものが Table 10 である。これらの値は予想される程度の大きさである。たとえば、標定に誤差がないと仮定したとき、各点の x 視差観測誤差 σ_p によって生ずる誤差の主要は次式で推定できるだろう。

$$\frac{\sigma_z}{Z} = \frac{Z}{B} \frac{1}{c} \sigma_p \dots\dots\dots (4)^9)$$

そうすると、たとえば $\sigma_p = \pm 3 \mu\text{m}$ と仮定したとき、点の位置を認識することのみによって生ずる誤差が、モデル A-B, B-C, A-C のそれぞれにおいて、0.35, 0.09, 0.07 (単位: %) となる。

b) 検定場 II における例

検定場 II の場合には少し近距離となるので、レンズの繰出し量に応じて画面距離を変えずることとし、それ以外の内部標定要素は既述の検定値を用いることにした。

Fig. 7 に示した撮影点で写した写真から 4 組の実体写真対 a-b, b-c, b-e, a-e を選び出し、前の場合と同様に、相互標定点としてはターゲットを配置した 11~12

Table 11 Errors in reconstructed objects made by the double image orientation (Test field II).

Model	$\frac{B}{Z}$	$\sigma_0^{(1)}$ (μm)	$\sigma_{0a}^{(2)}$ (mm)	σ_x	σ_y	σ_z	σ_z/Z (0/00)	σ_{z^*}/Z^2 (0/00)
a-b	0.26	2.5	0.4	0.29	0.41	0.52	0.12	0.17
b-c	0.26	1.7	0.5	0.25	0.25	0.77	0.16	0.29
b-e	0.51	1.7	0.3	0.21	0.24	0.44	0.09	0.24
a-e	0.77	1.4	0.3	0.20	0.34	0.30	0.07	-

- 1) σ_0 : An observation error of image coordinates in the relative orientation
- 2) σ_{0a} : An observation error of object coordinates in the absolute orientation
- 3) σ_{z^*} : Depth error produced from an observation of rectified images

点を用い、対地標定のための基準点はそこから6点を選んだ。前の場合と同様にして、各モデルごとに相互標定に用いた全点の座標誤差を算出した結果を総括したものが Table 11 である。

Table 11 において σ_z がかなり小さいのは理由がある。ターゲットの Z 座標の観測が困難であったので、Z 座標を未知と仮定し、すべての写真を用いてバンドル法を用いてターゲットの Z 座標を算出し、その値を正しい値として採用した。したがってこの場合の σ_z は、モデルの違いによる Z 座標の差というような量である。換言すれば、内部的な条件のみによって生じた誤差と考えるべきものである。他の表に示されている σ_z は、地上測量による誤差、内部標定要素の違いによる誤差、センサの移動による誤差などが含まれた結果として現われたものである。

通常の地形図作成のための空中写真測量においては、広角レンズを用いた場合に $B/Z=0.6$ くらいであって、このときの基準点座標の測量精度は $\sigma_z/Z=0.1\%$ 程度である。したがって、以上に示した数値を通覧すれば、測量用カメラにフィルムを用いた場合と同程度の精度が得られるものと考えてよいことになる。

なお、寸法 20 m の物体を全部写そうとすると、普通は距離 20 m 以上離れて写真を撮影しなければならない。そうすると、文献 6) が目標としているように、20 m 程度の長さに対して $\pm 0.5\text{ mm}$ 以内の誤差に収めることは、本論文の CCD カメラを用いる以上は無理であると考えなければならない。

5. 画像処理および実体観測に際する誤差

実体写真測量の長所は、被写体上の任意の箇所の三次元座標を非接触で求められることである。ところが観測精度を向上させようとするれば基線比 B/Z を大きくしなければならず、そのためには収束撮影にしなければならず、その結果は実体視が困難となる。実体視を容易ならしめるためには偏位修正写真を作らなければならないが¹⁰⁾、これをアナログ方式で実行しようとするれば写真にひずみ加わるので、精密測量では実施されなかった。ところが、デジタル処理によれば画像の質をほとんど低下させることなく偏位修正画像を作ることができ

Table 12 Five rotation angles in the relative orientations.

(10^{-6} rad)

Model	a-b	b-c	b-e
ϕ_1	18098	33493	32137
κ_1	583	10120	7524
ω_2	-686	-1839	-2442
ϕ_2	21142	436087	638117
κ_2	2361	12504	11311

る。このときに通常の内挿では平均化が行われるので、像にわずかばかりのぼけが生じることと、ごく小さい位置ずれが起こるにすぎない。本節では、基本的なデジタル処理を行った例について、誤差の現われ方を示すことにする。なお、偏位修正画像は、自動ステレオマッチングにも有効に利用されるものである¹¹⁾。

(1) 偏位修正画像によるターゲット座標観測誤差

検定場 II の各写真について、4. (2) b) で求めた相互標定要素から換算して、直角撮影からの角度ずれを算出したものが Table 12 である。この表の値を用いてデジタル偏位修正した画像を 6 枚 (3 モデル) 作成し、各画像について既述の方法でターゲット中心の座標観測誤差を求めたものが Table 2 の最下欄の値である。画像の内挿 (バイリニア法) によって少し誤差の増大していることがわかる。参考のために、こうして求めたターゲットの画像座標を用いて、あらためて被写体座標を算出したときの座標精度 σ_z/Z を Table 11 の最右欄に記しておいた。

(2) 任意の点の実体観測誤差

被写体上の任意の点 (ターゲットで明示していない点) の三次元座標を測定しようとする、実体視することによって、1 対の写真に写っている対応点を見出す必要がある。これをディスプレイ装置のスクリーン上で実行する場合でも、従来から行われている各種の人工実体視の方法を応用できる¹²⁾。著者らは、カラー画像にも適用できることと、現有の装置そのまま基本的な性質を調べることができることから、1 つのスクリーン上に左右の画像を分離して表示し、これを反射式実体鏡によって観察することにした¹³⁾。

偏位修正画像を 2 倍に拡大し、スクリーン上に表示し

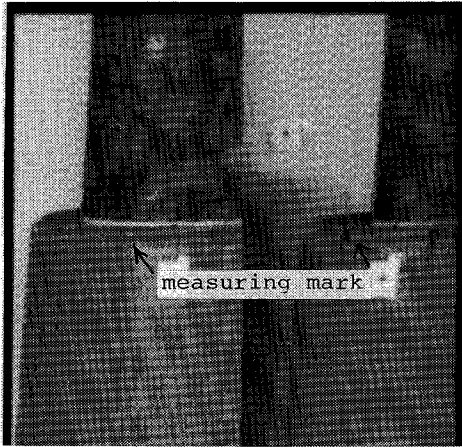


Fig. 11 Stereogram on a screen of a display (Model b-e, $\times 2$).

た実体画像を Fig. 11 に示しておく。画像中には左右の測標がみられるが、ジョイスティックで動かせる測標は1個にすぎないので、まず左画像を眺めて測りたい箇所をジョイスティックで指定してその箇所に赤色の測標を固定し（被写体は白黒画像である）、その後にもう一つの測標をジョイスティックを用いて動かし、右画像上の対応点を実体観測しながら測標で指定できるようにした。こうして、次の2種類の箇所について観測誤差の状況を調べた（Fig. 8 参照）。

(i) 標尺の目盛の角（実体視しなくても対応点のわかる例）

(ii) テレビジョンの縁および円柱状物体の任意の箇所（Fig. 11 参照、実体視をしなければ対応点の見出せない例）

スクリーンへの表示倍率および実体鏡での観察倍率をともに1倍とした場合について、右測標による対応点座標指定のばらつきの程度を示したのが Table 13 の数字である。明らかに (i) の点よりも (ii) の点の方が誤差が大きい。すなわち、実体視の感覚のみに頼った観測では点の位置を指し示すときのばらつきが大きくなる。ただし、Table 13 の値が Table 2 の値に比べて約10倍だから、実体視のときの誤差は約10倍であるという意味ではなく、表示倍率の違いが大きい影響を与えているのである。スクリーン上で ± 0.85 pixel pitch の誤差が像面において $\pm 11 \mu\text{m}$ の誤差となることを意味するのであって、スクリーンへの表示倍率を大きくすれば誤差が小さくなる。ただし、画像倍率を大きくすれば像がぼけるので、その像を鮮明に実体視しようとするれば縮小観察しなければならない。なお、画素数が 500×500 程度の通常のディスプレイを用いるときには、高倍率でスクリーンに像を表示すれば、画素数が少ないために被写体

のわずかな部分しかみられないので、物体の立体感を得ることが難しい。

以上の事情を考慮して、表示および観察の倍率を変えて測定してみた。その結果によれば、観測の容易さと精度向上の両面から考えて、表示倍率は4~6倍、観察倍率は $1/3 \sim 1/5$ くらいが適当であることがわかった。このような測定法を用いて、被写体中での観測しやすい点（物体の角、表面に描かれた図形など）と観測しにくい点（テクスチャの少ない表面など）とに分けて座標測定を行ってみた。以前と同様に、右測標の x 座標のばらつきの例を示すと、Table 14 のとおりであり、条件のよい観測点であれば、標準誤差を $\pm 3 \mu\text{m}$ 程度まで減ずることが可能である。

これらの事実を要約すれば次のとおりである。Fig. 2 のシステムでは不便な点はあるが実体観測は可能であり、通常のディスプレイを用いても実体観測誤差を $\pm 3 \sim 10 \mu\text{m}$ 程度にすることができる。この種の誤差の大きさは、表示倍率と観察倍率の選び方によって変わるものであって、誤差を減少させるためには画素数の多いディスプレイを装備する必要がある。

6. 結 言

写真測量が真に有効に利用されるためには、①結果が速やかに判明すること、②精密な実体測定のできること、③地形図の描けること、④座標の数値記録の得られること、⑤機器が安価で汎用性のあること、などが重要である。ところがフィルム記録であれば、①は不可能、②は収束写真の利用が不可能に近い、③には少し訓練を受けた者が必要、⑤は実現していない、というのが現状であ

Table 13 Standard errors in finding a corresponding point by a stereoscopic measurement (digital magnification for displaying $\times 1$, optical magnification for observing $\times 1$).

Type of points	Graduation of a staff			Random selection		
	a-b	b-c	b-e	a-b	b-c	b-e
$\sigma_x (\mu\text{m})$	9.7	10.6	4.7	11.0	11.7	10.2
$\sigma_y (\mu\text{m})$	7.5	6.1	3.4	7.0	9.4	6.3

Table 14 Example of standard errors in finding a corresponding points by a stereoscopic measurement (μm).

Condition of points	Magnification for observing	Magnification for displaying	
		$\times 4$	$\times 6$
distinct and clear	$\times 1/3$ $\times 1/5$	4.6 3.9	2.9 3.4
indistinct and obscure	$\times 1/3$ $\times 1/5$	8.7 8.3	8.6 9.8

る。したがって、ある程度の心得のある者が写真撮影を行い、機器一式を備えた機関で、少し時間をかけて測定しなければならない。

本論文では、上記の②と⑤とについて実験した結果、次のような結論が得られた。

(1) CCD カメラを用いれば撮影後に導入される誤差がきわめて小さいので、明示された点であれば、写真上での座標観測誤差を $\pm 1 \mu\text{m}$ 以下にすることができる。したがって、フィルムを用いるよりも高精度の測量が可能である。ただし、分解能の良い(画素数の多い)カメラはまだ作られていない。

(2) 使用したカメラは線配列センサによる走査型であったが、写真上で $\pm 3 \mu\text{m}$ 以下の座標誤差にとどまった。この誤差は現在の測量用カメラの誤差と同程度のものである。

(3) 収束写真その他の特殊な位置関係の実体写真でも、デジタル処理によって偏位修正画像を作れば、ディスプレイのスクリーン上で実体観測が可能であり、かつ誤差の導入も極力防止できる。

(4) スクリーン上において実体観測を行うときの誤差は、表示方法、観測方法などによって異なる。通常のディスプレイを用いるのであれば、5倍拡大表示、1/5縮小観察くらいにするのがよく、好条件の観測点であれば、実体観測誤差(x 視差の誤差)を $\pm 3 \mu\text{m}$ くらいにすることができる。

(5) 被写体の三次元座標を求めるだけの目的であれば、共同利用の汎用計算機と付属の画像処理システムを用いて、十分精密な測量ができる。パーソナルコンピュータを活用してもよい。

デジタル画像データ取得に対して大いに期待されているのは、精度だけでなく、最初に述べたように自動化と即時化である。既存のCAD、CAMシステムと結ぶこともできるのも当然である。ところが、現在では、ディスプレイ装置に描画装置を接続させて図化機と同様な機能を与えた機械がまだ市販されていない。しかしながら、画像処理システムがあれば、収束写真の実体写真測量が実行でき、かつ高精度が保証されるから、実験計測、工業計測、施工測量などに、本文で示した方法が有効に利用されるものと思う。

参 考 文 献

- 1) Gruen, A. W. : Real Time Photogrammetry at the Digit-

- al Photogrammetric Station of ETH Zurich, The Canadian Surveyor, Vol. 41, No. 2, pp. 181~199, 1987.
- 2) Haggrén, H. and Leikas, E. : Mapvision : The Photogrammetric Machine Vision System, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 53, No. 8, pp. 1103~1118, Aug. 1987.
- 3) El-Hakim, S.F. : Real Time Image Metrology with CCD Cameras, *ibid.*, Vol. 52, No. 11, pp. 1757~1766, Nov. 1986.
- 4) Alberz, J. : Digitale Bildverarbeitung in der Nahphotogrammetrie—Neue Möglichkeiten und Aufgaben, Bildmessung und Luftbildwesen, Bd. 54, S. 34~45, Feb. 1986.
- 5) Rütger, H. and Parkin, N. : The Development of a PC-based Near-Real Time Photogrammetric System PHOENICS, Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 27, Part B 8, pp. V 105~V 116, July 1988.
- 6) 小椋義隆・鳥居邦夫・高田孝次, 長谷川鑑一 : 鋼構造の完成検査法に関する一提案, 土木学会論文集, No. 361, pp. 79~85, Sep. 1985.
- 7) Gustafson, P. C. : The Application of Real-Time and Near Real-Time Photogrammetry in Industry : A Test of Accuracy, Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 27, Part B 10, pp. V 198~V 205, July, 1988.
- 8) 村井俊治・奥田 勉・中村秀至 : 非測定用カメラを用いた解析的写真測量に関する研究, 東京大学生産技術研究所報告, Vol. 29, No. 6, pp. 195~209, July 1981.
- 9) 森 忠次 : 測量学 (2), p. 140, 丸善, 1981.
- 10) 森 忠次・小野博史・広金幹生 : CCDカメラの幾何特性と利用例, 土木学会第42回年次学術講演会講演概要集, 第4部, pp. 16~17, Sep. 1987.
- 11) 森 忠次・服部 進・内田 修 : 面積相関法による空中写真のステレオマッチングの改善, 土木学会論文集, No. 359, pp. 61~70, July 1985.
- 12) Gagan, D. J. and Dowman, I. J. : Design and Implementation of a Digital Photogrammetric System, Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 26, Part 2, pp. 100~109, 1986.
- 13) Mori, C. and Hirokane, M. : Digital Image Processing and Stereoscopic Measurement of a Convergent Pair of Images, *ibid.*, Vol. 27, Part B 8, pp. V 1~V 10, July, 1988.

(1988. 8. 31・受付)