

法政大学工学部 正会員 ○大 嶋 太 市
芝浦工業大学 正会員 中 沢 重 夫

1. まえがき

写真測量の利用面は航空機の上からカメラを下向けて撮影した航空写真を使っておこなうのが大部分でこの方法が写真測定の主流を占めているが、地上の2ヶ所から特別の地上測定用のカメラを使ってステレオ写真を撮影して精密測定をおこなう地上写真測量の技術があるがこれが非常に広い応用範囲をもっていて最近の測定技術の話題の1つとなっている。

この方法はカメラ点を固定できることとカメラと被写体との関係を自由にまた一定のきまつた条件のもとでセッティングできる点で非常に特徴をもっており、航空写真ではできないような種々な測定を精密にすることができる。また手を触れることのできない文化財のようなもので複雑なものであるとか、短時間で測らなければならないもの、また動いている物体の現象の測定ができる点では、測定技術としてきわめてユニークな方法であるといえることができる。

最近では近接撮影のできる特殊なステレオ・カメラの開発によって、従来の遠距離の物体を対象とした計測から比較的近距离の物体の計測に新しい技術が開発され、この近接精密写真測量による測定が脚光を浴びてきた。さらにミクロな物体を測定する顕微鏡実体写真測量や電子顕微鏡写真測量の撮影方法も開発され、線写真測量と共に医学界や金属学界ではこの計測方法を利用して、脳細胞や腎臓内の血管の状態をしらべたり、金属表面の細い凹凸を計測することに利用して貴重な資料を提供している。

ここではその近距離精密写真測量の基礎的な考え方、実際の技術の方法さらに解析の方法や結果の検討を事例にもとづいて検討した結果を述べるものである。

2. 実体地上写真測量の基礎理論

近距離精密写真測量の方法で、写真より空間における物体の位置を求める方法として (1)図解法 (2)機械法 (3)解析法の3つの方法がある。これらは実際の測定作業に当っては単独または組合された方法で実際に取入れられている。

図解法は写真測量の初期に発達したもので、戦后日本でも精密図化機のなかった場合に、さかんに使われたが精度の点では限界があるので、今日では学校の実習以外ではほとんどつかわれていない。図化機を使って図化測定をおこなう機械法は撮影時の被写体の状態をある縮小した状態で機械に再現して実体視しながら測定していくもので、機械自体の性能と調整の程度とオペレーター自身の観測技術の熟練度や慎重さが影響するが少し熟練すれば速くて正確度の高い測定方法で測定結果がすぐ図になって出てくる便利さがある。また必要に応じて測定点の三次元座標を図化機より直接タイプライターで打出しそのテープを計算機と直結して計算解析もできるので今日の写真測量の主流をなしている。解析法は乾板の上の被写体の像の座標値を、コンパレーターで測定し、計算で物体の空間位置を求める方法で乾板上の点測定だけが結果を支配するので点測定の精度をあげれば割合高い精度で測定することも可能になる。しかし実際には乾板の圧定度やレンズのデストーション、焦点距離、乾板上の座標測定精度などが微妙に影響する。測定の処理を数値化しておこなうことができるので計算機を使って高次の方程式を処理することによって厳密解も可能で諸種の補正計算もできる。

2-1 撮影の方法

地上写真測量の場合には、図-1(a~c)に示すように直角撮影、偏角撮影、収れん撮影の3通りの撮影方法がある。(a)は普通に最も多く使われる方法で、(b)は撮影基線に対してある角度だけ左右にふって平行撮影をおこ

なうもので (C) はたがいにカメラの光軸を交叉させて撮影する方法で、撮影基線長を長くしたと同じ結果になり精度をあげることができる。

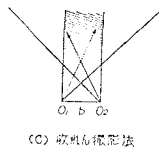
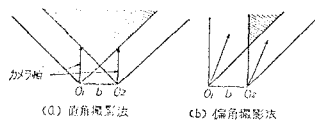


図-1

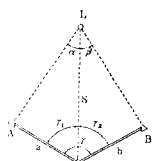


図-2

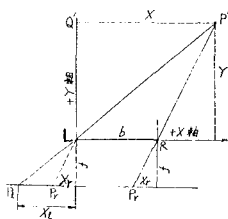


図-3

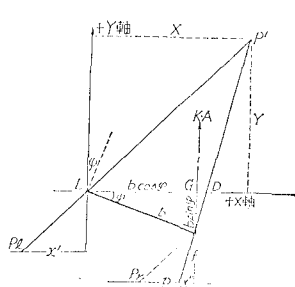


図-4

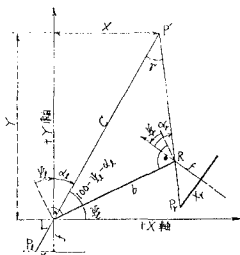


図-5

2-2 基本式

(a) 簡単な後方交会法

写真の中に少くとも3点の地上座標値のわかった点があれば後方交会法の簡単な式でレンズの節点の座標値をきめ、他の写真上の点は前方交会法で決定できる。

L: カメラ点 A, B, C: 基準点

$$\tan \frac{1}{2}(A-B) = \tan \frac{1}{2}(A+B) \cdot \tan(\alpha - 45^\circ) \quad (1)$$

$$\text{ただし } \tan \alpha = \frac{b \sin \alpha}{a \sin \alpha}$$

$$\frac{1}{2}(A+B) = 180^\circ - \frac{1}{2}(\alpha + \beta + \gamma) \quad (2)$$

(1)式と(2)式よりL, A, Bを求めP点の座標値を計算する同時に撮影方向もわかる。

撮影位置、方向のわかった2ヶ所より撮影した写真をもとにして前方交会法で測定をおこなうのが普通におこなわれる撮影方式の計算方式にはつぎの3つの場合がある。

(b) 直角水平撮影

図-3に示すように基線bの両端LとRで基線に対して直交して撮影をおこなう場合で、カメラ軸が水平であるので横指標線は水平になる。基線の長さbは被写体までの距離の1/20ぐらゐに選ばれる。

撮影点Lを原点にして、垂直方向にZ軸、撮影基線方向をX軸、L点でのカメラ軸方向をY軸に選ぶと任意点P'の空間座標値は次式で計算することができる。

$$Y = \frac{bf}{x_l - x_r} = \frac{bf}{a} \quad (3) \quad X = Y \cdot \frac{x_l}{f} \quad (4) \quad Z = Y \cdot \frac{z_l}{f} \quad (5)$$

aは水平視差、 x_l, x_r, z_l は乾板上でコンパレーターで測定した長さ、bは基線長、fはカメラの焦点距離である。

(c) 偏角水平撮影

$$\text{図-4で } Y = \frac{f}{\overline{PL}} \quad \overline{PL} = \overline{LG} + \overline{GP} = b \cos \varphi + b \sin \varphi \cdot \frac{x_r}{f}$$

$$Y = \frac{b}{a} (f \cos \varphi \pm x_r \sin \varphi) \quad (6)$$

φ は撮影の偏角値を示し括弧内の一は右偏角に使う。

$$X = Y \frac{x_l}{f} \quad (7) \quad Z = Y \cdot \frac{z_l}{f} \quad (8)$$

(d) 收れん水平撮影

図-5に示すように座標系をとれば

$$\frac{c}{b} = \frac{\sin(100^\circ + \varphi_r + \alpha_r)}{\sin \varphi} = \frac{\cos(\varphi_r + \alpha_r)}{\sin(\varphi_r - \varphi_r + \alpha_r - \alpha_r)}$$

$$C = \frac{Y}{\cos \alpha_r} \quad Y = b \frac{\cos(\varphi_r + \alpha_r) \cos \alpha_r}{\sin(\varphi_r - \varphi_r + \alpha_r - \alpha_r)} \quad (9)$$

$$X = Y \frac{x_l}{f} \quad (10) \quad Z = Y \frac{z_l}{f} \quad (11)$$

(e) 解析地上写真測量の原理

図-6に示すように右手系直交座標系XYZを考え、左カメラおよび右カメラ位置の座標をそれぞれ $O_1(X_{01}, Y_{01}, Z_{01})$, $O_2(X_{02}, Y_{02}, Z_{02})$ とする。このとき空間内の対象P(X, Y, Z)が左写真、右写真にそれぞれ $P_1(X_1, Y_1, Z_1)$, $P_2(X_2, Y_2, Z_2)$ に撮影され

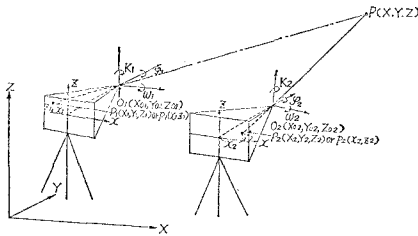


図-6 解析地上写真測量の原理

ているものとする。この P_1, P_2 はそれぞれのそれぞれの写真座標系 $x_1 y_1 z_1$ でそれぞれ $p_1(x_1, f, z_1), p_2(x_2, f, z_2)$ と表わす。このとき XYZ 座標系と $x_1 y_1 z_1$ 座標系の間の関係式はつぎようになる。すなわち $x_1 y_1 z_1$ 座標系を Y 軸, X 軸, Z 軸のまわりに φ, ω, χ の順に回転させると XYZ 座標系になるという考え方で

$$\begin{pmatrix} X_1 - X_{01} \\ Y_1 - Y_{01} \\ Z_1 - Z_{01} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos k_1 & \sin k_1 & 0 \\ -\sin k_1 & \cos k_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega_1 & \sin \omega_1 \\ 0 & -\sin \omega_1 & \cos \omega_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \varphi_1 & 0 & -\sin \varphi_1 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \varphi_1 & 0 & \cos \varphi_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ f \\ z_1 \end{pmatrix} \quad (12)$$

$$\begin{pmatrix} X_2 - X_{02} \\ Y_2 - Y_{02} \\ Z_2 - Z_{02} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos k_2 & \sin k_2 & 0 \\ -\sin k_2 & \cos k_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega_2 & \sin \omega_2 \\ 0 & -\sin \omega_2 & \cos \omega_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \varphi_2 & 0 & -\sin \varphi_2 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \varphi_2 & 0 & \cos \varphi_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_2 \\ f \\ z_2 \end{pmatrix} \quad (13)$$

ここで f は焦点距離を表わす。

光線 $O_1 P, P, O_2 P_2$ は一直線上にあるから次の関係式がなりたつ。

すなわち

$$\frac{X - X_{01}}{X_1 - X_{01}} = \frac{Y - Y_{01}}{Y_1 - Y_{01}} = \frac{Z - Z_{01}}{Z_1 - Z_{01}} = t_1 \quad (14)$$

$$\frac{X - X_{02}}{X_2 - X_{02}} = \frac{Y - Y_{02}}{Y_2 - Y_{02}} = \frac{Z - Z_{02}}{Z_2 - Z_{02}} = t_2 \quad (15)$$

ここで t_1, t_2 はそれぞれ点 P の左写真, 右写真の写真倍率を表わしている。

(14), (15) 式を変形すると

$$X = X_{01} + t_1(X_1 - X_{01}) = X_{02} + t_2(X_2 - X_{02}) \quad (16)$$

$$Y = Y_{01} + t_1(Y_1 - Y_{01}) = Y_{02} + t_2(Y_2 - Y_{02}) \quad (17)$$

$$Z = Z_{01} + t_1(Z_1 - Z_{01}) = Z_{02} + t_2(Z_2 - Z_{02}) \quad (18)$$

この上式は光線 $O_1 P, P$ と $O_2 P_2$ が点 P で交合していることを示している。

(16), (17), (18) 式に(12), (13) 式を代入すると点 P の空間位置を決定する一般方程式が求まる。

解析地上写真測量の方法とは、写真座標 (x, z) 、基準点座標 (X, Y, Z) を与えてカメラ位置 $O_i(X_{0i}, Y_{0i}, Z_{0i})$ $i = 1, 2, \dots$ および撮影方向角 $(k_i, \varphi_i, \omega_i)$ $i = 1, 2, \dots$ を求め(16), (17), (18) 式によって写真上の任意の像 $p_1(x_1, z_1), p_2(x_2, z_2)$ に対応する空間座標 $P(X, Y, Z)$ を求める問題である。

3 地上写真測量用器材

地上写真測量をおこなうためにはまず撮影するカメラが必要である。

地上測量用カメラには三脚上に一個のカメラを固定した単一型と二個のカメラをある一定距離をはなした固定したステレオ型とがある。

表-1 単一型写真測量用カメラ

メーカー	Wild (スイス)	Zenit (西ドイツ)	Zeiss (西ドイツ)	Zeiss Jena (東ドイツ)	Askania (ロシア)	Galileo (イタリア)	Galileo (イタリア)	その他 (日本)
名 称	P30/直接測量	C30/直接測量	10MK地上カメラ	写真機19/1318	アスカニア地上写真機	地上写真機	地上写真機	地上写真機
焦点距離	165 mm	150 mm	60 mm	150 mm	200 mm または 100 mm	215 mm	155 mm	165 mm
シャッター (2倍)	1/500~1/8 f/15	1/500~1/8 f/15	1/400~1/8 f/15	1/400~1/8 f/15	1/75~1/8 f/15	1/150~1/25 f/15	1/500~1/8 f/15	1/500~1/8 f/15
像径の大きさ	10×15 cm	13×18 cm	8×10 cm または 9×12 cm	13×18 cm	18×18 cm	23×23 cm	10×15 cm	11.9×16.4 cm (36×54 mm)
カメラの可能な方位方向の傾斜	-7°~-14° -21°~-28° +7°	水平面より上下 35 mm 間隙にレンズが動く	水平, ±30° ±70°, ±100° 傾斜	レンズを 5 mm 範囲で上下 30 mm 自由に動かす	制限なし	制限なし	+25°~-30° 任意の角度	+8°~+16°, 0° -8°, -15°, -20°
カメラの可能な方位方向の傾斜	制限なし	真角撮影 斜角撮影 垂直撮影	真角撮影	斜角撮影 斜角撮影左右 35° 二側面可変	制限なし	制限なし	制限なし	制限なし
使用材料	乾板	乾板	乾板	乾板	乾板	フィルム	乾板	乾板

地上写真測量用カメラで撮影した写真像を図化するのに、航空写真用図化機の Z 軸 (高さの方向) が地上写真用図化機の Y 軸 (奥行方向) に航空写真用図化機の Y 軸 (地上主点基準線に対して直角方向) が地上写真用図化機で

表-2 ステレオカメラ比較表

[illegible]

三軸（高さの方向）に切りかえる装置をもっていることが必要である。1級図化機はこのような切換装置をもっているが、最近では、図化機の各メーカーが応用写真測量の分野に着目して2級図化機でも航空・地上の両方の写真測量に使うことのできる機種の開発がこなわれて市場にでている。

表-3 地上写真図化機テクニカルデータ

	Zeiss (西独)	Wild (スイス)	Galico (イタリア)	Zeiss Jena (東独)	Zeiss Jena (東独)	遊機舎 (日本)	旭光社 (日本)	日本光学 (日本)	
機 名	Terragraph	A40 Autograph	Verestat, Drawing Inst.	Topocart. B	地学写真ステレオ図化機 Technocart	地学写真図化機 ST-65	ファビールド A 40	エコノフッター TR-2	
投影距離	50~65mm	54~100mm	95~110mm	50~215mm	最小 40×40mm から 最大 230×230mm まで	最小 40×40mm から 最大 230×230mm まで	59~70mm	54~100mm	56~68mm
有効視野	80×100mm	80×80mm	80×110mm				80×80mm	80×80mm	80×80mm
撮影角									
底版の大きさ	90×120mm	90×126mm	90×120mm	最小 40×40mm から 最大 230×230mm まで	最小 40×40mm から 最大 230×230mm まで	86×120mm	90×124mm	90×120mm 以下	
縮小率	×6	×6	×8	×6	×6	×6	×6	×6	
視窓	15mm	27mm	14mm	40mm	20mm	25mm	27mm	27mm	
糸網径	焦点 0.1mm	T型 0.2×0.3mm		直径 0.06mm	直径 0.06mm	直径 0.04, 0.06, 0.68mm (3種類)	T型 0.2×0.3mm		
基座	bX by bz	0~50mm 0~40mm by' ±25mm bz'' ±15mm	0~120mm	0~230mm ±20mm ±15mm	0~240mm ±20mm ±15mm	0~40mm ±15mm ±15mm	0~40mm by' ±25mm bz'' ±15mm	0~40mm	
座高	X Y Z	±250mm 60~610mm — ±150mm~300mm	±175mm~350mm 400~(500 f) — 290mm	±240mm ±240mm 70~330mm	-240~+240mm ±240mm 70~330mm	-200~+240mm 55~500mm -150~+150mm	±175mm~350mm 40~(500 f) ±15mm~300mm	400mm 70~500mm 310mm	
露出板	SAC —	840×700mm	700×700mm	600~690mm	600×600mm	800×500mm	700×700mm		
投影変換	±30 μ, ±70 μ				φ = ±5 μ, ±15 μ; κ = 130 μ				
測尺	南東比 1:1, 1:1.6, 1:2 1:2.5, 1:4	1:1, 1:2, 2:5	1:1	0.20, 0.25, 0.32, 0.45, 5.0, 0.50, 0.64, 0.80, 1.00, 1.6, 1.25, 1.6, 2.0, 2.5, 3.2, 4.0, 5.0, 6.4, 8.0, 10.0, 12.5, 16, 20, 25, 32, 4.0, 5.0, 6.0, 80, 100, 120mm	0.20, 0.25, 0.32, 0.45, 5.0, 4.0, 3.2, 2.5, 2.0, 0.50, 0.64, 0.80, 1.00, 1.6, 1.25, 1.0, 0.8, 0.64, 0.5, 0.4, 0.32, 0.25, 0.20, 0.16	1:1, 1:2, 2:5, 2:1, 5:2	1:1, 1:2, 2:5	1:1, 1:2	
描写機	EZ 2 1,300×1,200mm	800×1,000mm				800×800mm または 900×1,200mm	800×1,000mm		
大 き さ	床置垂直面 78×120 cm	床置垂直面 228×160 cm オートグラフ 109×109×154 cm 描写機 102×94×76 cm オートグラフ 356 kg 描写機 100 kg	床置垂直面 140×130 cm 高さ 153 cm	240×150 cm 縦深機 152×98 ×130 cm 描写機 90×90×80 cm	縦深機 152×98×130 cm 描写機 90×90×80 cm	床置垂直面 228×160 cm オートグラフ 109×109×154 cm 描写機 102×94×76 cm オートグラフ 356 kg 描写機 100 kg	1,585×1,090 ×1,225mm		
重 さ	336 kg		200 kg						
価 格	1,339万円	1,300万円	500万円	1,100万円	約 300万円	約 800万円	550万円	約 880万円	

4 近距離精密写真測量の実例と解析結果について

ここでは上記の近距離精密写真測量を実際に適用した具体的な2~3の測定例についてスライドで説明し、そのシステムと測定解析の内容と結果について説明する。

参考文献

1. 大嶋太市: 近接地上測量による土木構造物の測定への利用法 (1) 農業土木学会誌 June 1971
2. 大嶋太市: 近接地上測量による土木構造物の測定への利用法 (2) 農業土木学会誌 Sep 1971
3. 大嶋太市: 写真情報とその利用 (1) 日本写真学会誌 第36巻 1号 (昭和48年)
4. 大嶋太市: 写真情報とその利用 (2) 日本写真学会誌 第36巻 2号 (昭和48年)
5. 大嶋太市: 写真測量の応用 建設大学校 研修テキスト (昭和42年度)
6. Recent Development of Industrial photogrammetry in Japan: by Dr TAICHI Oshima, Invited paper, International Society for Photogrammetry, 1976, Helsinki