

平面より構成された被写体の デジタル偏位修正写真の段階的作成

森 忠次*・宮永和幸**

写真測量は、実体観測手法によって3次元遠隔測定法としての発展を遂げているが、本論文では単写真測量分野の領域に限っている。一枚の写真から得られる被写体に諸情報、たとえば平行、直角、等長などの性質を活用して、被写体平面の偏位修正写真を作成する方法を示している。提案している方法の特徴は、得られる情報に応じて段階的に外部標定を行うこと、デジタルにした写真を活用することによって応用範囲が非常に広がること、特殊な写真測量機器を使用する必要はないことなどである。

Key Words : photogrammetry, rectification of a photograph, image processing, transformation of plane coordinates, orientation of a photograph

1. 緒 言

平面的な被写体の形態・大小関係・配置などを知りたい場合には、その平面に対して直角な方向から撮影した写真があればよい。ところが、現実には斜め方向の写真しか撮影できない場合が多い。その場合には、写真の標定要素か、写真に写し込まれた基準点座標を利用して、偏位修正を行うことになる。われわれは各種の状況（路面、水面、斜面、構造物壁面の状況、寸法、配置など）を記録するときに、アマチュアカメラを用いて撮影し、後日になって当時の写真から偏位修正写真を作ったり、被写体の形態・寸法などを知る必要の生じることがある。このようなときに偏位修正を行うのには多くの難点があった。

その第一は、内部および外部標定要素が未知であるだけでなく、基準点さえも存在しないことである。写真で確認できる点を事後に測量して座標値を求めることのも可能なきもあるが、それには時間と費用が嵩む。

第二は、従来の光学的偏位修正機を用いようとすると、内部および外部標定要素の適用範囲が比較的狭いことである。また、光学機器による投影、フィルム処理などの作業によって誤差が導入されることである。

第三は、機器が高価であって、所有している機関が少ないことである。

ところが、デジタル写真（カメラで得た像をデジタル化したもの）であれば、計算機で各種の処理ができ、その変換に誤差を伴わず、かつ制約条件もほとんど存在しない。したがって上記の第二、第三の難点は解消する。第一の難点は写真と被写体との変換関係が定められるかどうかの問題である。変換関係のすべてが明らかになら

ずとも、被写体平面に垂直な方向から写した写真が再現できさえすれば、その写真の利用価値はかなり高い。そこで、写真の内部標定要素が既知であれば、比較的容易にこのような写真の作れることを実例によって示す。

人工物の存在する場面の写真には、平行線や直交する線などの写っている場合が多い。長さが不明でも寸法比のわかっている物体が被写体平面中に存在することもある。このような情報の中から、代表的なものとして、平行・直交・等長の3条件をとりあげる。そして、内部標定要素既知の写真について、これらの指定した条件が再現できるような写真を作れば、それが被写体平面に垂直な方向から撮影した写真である。この投影関係を通常の外部標定要素で表現することにした。そのうえに、もし長さ既知の物体が写真に写っていれば、寸法の再現が可能である。基準点座標が観測してあれば、被写体を所定の座標系にもたすことができる。このような作業を段階的に実行しても、誤差はそれほど大きくならないことをも示す。

なお、被写体が幾つかの平面から構成されている場合でも、それぞれの平面についての標定要素が得られれば、展開図や偏位修正写真の作成できることを最後に示す。

内部標定要素が未知であっても、被写体平面と写真平面との間の射影変換式さえ定まれば、デジタル画像処理手法によって容易に偏位修正写真を作製できるが、本論文では、標定を幾つかの段階に分けることからこの方法を採用しないことにする。

2. 外部標定要素の段階的決定法

(1) 投影関係と外部標定の段階区分

本論文では高精度測定を念頭に置いていないので、つぎの2つの大きな仮定を設ける。①被写体はほぼ平面的な物体である。②内部標定要素は既知である。すなわち、アマチュアカメラを用いたときでも、画面距離、

* 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 兵庫県土木部

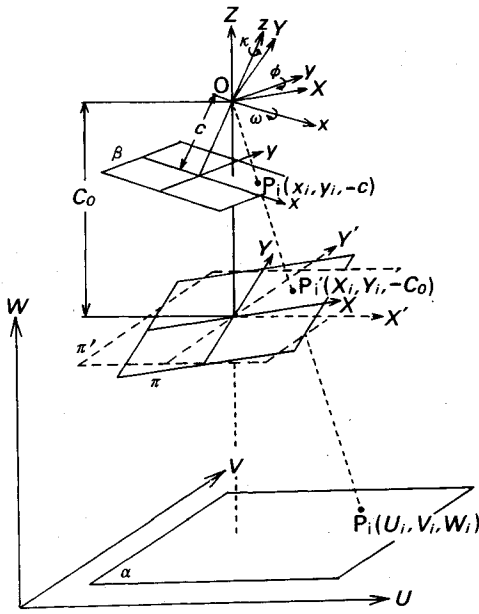


図-1

写真主点位置、像のひずみの状態などが必要な精度で与えられるものと仮定する。

図-1に示すように、平面と仮定できる被写体面 α を写真撮影し、画面 β にその像を得たとする。被写体側の座標系 UVW は、被写体平面を UV -面に選ぶ。カメラの投影中心は点 $O(U_0, V_0, W_0)$ であり、カメラ軸 (xyz -軸) は UVW -軸に関してそれぞれ ω, ϕ, κ だけ回転しているものとする。ただし、回転順は κ, ϕ, ω の順とする。写真の画面距離を c とすると、被写体面上の点 $P_i(U_i, V_i, W_i)$ は、カメラ座標系では $p_i(x_i, y_i, -c)$ に写ることになる。

一方では、内部標定要素が不明であっても、つぎの斜影変換式の係数 a_{ij} がわかれば、平面 α 上の点と β 上の点との対応関係が完全に定められる。

$$U = \frac{a_{11}x + a_{12}y + a_{13}}{a_{31}x + a_{32}y + 1}, \quad V = \frac{a_{21}x + a_{22}y + a_{23}}{a_{31}x + a_{32}y + 1} \dots\dots (1)$$

この式における座標 (x, y) は主点を原点とする必要はないが、もしレンズによる写真のひずみを補正しようとする、写真主点の位置を知っておく必要がある。この式の利用は、たとえば文献1)にみられるようにデジタル偏位修正には適しているが、つぎに述べる段階的な方法を採用するときには使い難い。ただし、比較のために後になって式(1)を使うことがある。

通例のように外部標定要素を $U_0, V_0, W_0, \omega, \phi, \kappa$ とするとき、写真面 β を被写体面 α にまで変換する過程を分解すると、つぎの3段階に分けることができる。ここでは、前述のようにカメラの回転順は κ, ϕ, ω とする。

第1段階としては、まず ω 、つぎに ϕ の順に回転を戻して、任意の投影距離 c_0 の面 π に投影する。このときの座標系 XYZ は、投影点を原点とし、 XY -面と UV -面とは平行になっているが、 Z 軸廻りに κ だけ回転しているものとする。この投影面における像は、角や寸法比などが被写体と一致するはずであるが、 κ と縮尺が不明だから、偏位修正写真と区別するために、本論文では垂直撮影写真と呼ぶことにする。

第2段階は、 κ 回転を戻して面 π' 上の像にすることである。そうすると面 π' 上の像は線の方角までが被写体と一致する。 XYZ -座標系を Z 軸の廻りに $-\kappa$ 回転させたものを $X'Y'Z'$ -座標系とする。

第3段階は、面 π' の像と被写体との間の縮尺 $1/M$ (または W_0) を確定すること、および基準点を利用して UVW -座標系に結びつけること (換言すれば U_0, V_0 も求めること) である。ただし、 U_0 および V_0 を定める必要のあることは比較的少ないので、以後は U_0 および V_0 の決定に言及することを省略することが多い。

上記3段階の変換関係は、それぞれつぎようになる。

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \frac{c_0}{Z} D_\omega D_\phi \begin{pmatrix} x \\ y \\ -c \end{pmatrix},$$

$$Z = -\sin\phi \cdot x + \cos\phi \sin\omega \cdot y - \cos\phi \cos\omega \cdot c \dots\dots (2)$$

$$\begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix} = D_\kappa \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \frac{c_0}{Z} D_\kappa D_\phi D_\omega \begin{pmatrix} x \\ y \\ -c \end{pmatrix} \dots\dots (3)$$

$$\begin{pmatrix} U - U_0 \\ V - V_0 \\ W - W_0 \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix} = M \frac{c_0}{Z} D_\kappa D_\phi D_\omega \begin{pmatrix} x \\ y \\ -c \end{pmatrix}, \dots\dots (4)$$

ここに、

$$D_\omega = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\omega & -\sin\omega \\ 0 & \sin\omega & \cos\omega \end{pmatrix},$$

$$D_\phi = \begin{pmatrix} \cos\phi & 0 & \sin\phi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\phi & 0 & \cos\phi \end{pmatrix},$$

$$D_\kappa = \begin{pmatrix} \cos\kappa & -\sin\kappa & 0 \\ \sin\kappa & \cos\kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

ところが実は、式(3)および(4)は平面の回転および拡大と平行移動にすぎない。したがってこれらをまとめてつぎの相似変換 (Helmert 変換) の形に書くこともできる。

$$\begin{pmatrix} U - U_0 \\ V - V_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} H_1 & -H_2 \\ H_2 & H_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix}, \dots\dots (5)$$

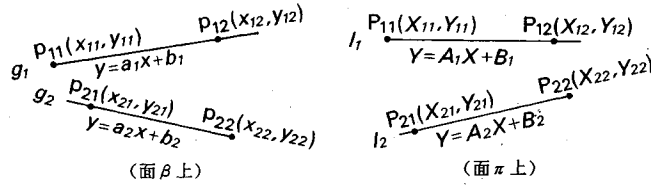


図-2

ここに、

$$H_1^2 + H_2^2 = M^2, \quad H_2/H_1 = \tan \kappa$$

トンネル断面測定に関して、鉛直に立てた2本の標尺を基準にして標定した例がある。この場合には回転順を ω , ϕ , κ とし、これらを1つずつ独立に決めることにしている²⁾。

(2) 各段階での標定方針

偏位修正写真(前記第3段階までの変換を行ったもの)を作るためには、式(4)が成立するように一度に標定要素を定めるのが常道であって、内部標定要素が既知のときでも最低限3つの基準点が必要である。内部標定要素が未知のときには、式(1)を用いても4つの基準点が必要となる。偏位修正機を用いるときには、各種の工夫がなされてはいないもの、実用上は画面距離の値や角度 ω , ϕ の大きさには限度がある³⁾。このようなことから、現地で写した写真の偏位修正を行うことが事実上不可能な場合が多い。たとえ可能なきでも、レンズによる投影および写真処理を行うので誤差の増大を伴う。

これらの難点を解消する方法はつぎのとおりである。まず第一にデジタル写真を用いることである。デジタル写真であれば、投影変換に際する誤差の導入が避けられるし、投影条件の制約も軽減される⁴⁾。第二には被写体を観察して、その中に存在する条件を利用することである。われわれは人工物を写すことが多い。写真の中には平行な線、角度既知の物体、方向既知の線、寸法関係の明らかな物体などを見出すことができる。したがって、これらの関係を有効に利用することである。

上記の関係の中で角および寸法比が再現されるのは、第1段階の終わった投影面 π においてである。すなわち面 π においては被写体面と相似な像が得られている。角・寸法比・形などが正しく再現されているから、この面の像は利用価値が大きい。したがって、面 π の像を示す写真が得られれば、目的の大半が達成されたと考えてよい。

垂直撮影写真であるための条件は、被写体平面の図形と相似の図形が再現できることである。そこで、被写体中において成立する条件の中から代表的な条件として、直線同士の平行・直交・等長の3条件のみをとりあげる。それらを垂直撮影写真において再現させるために用いる標定要素は ω と ϕ のみであって、標定計算は簡単

である。これが第1段階である。

写真に写っている2本の直線を図-2のように g_1 , g_2 で表すとき、これらが面 π において上記の条件を保つための条件式を記しておこう。

各直線上で2点 $p_{11}(x_{11}, y_{11})$, $p_{12}(x_{12}, y_{12})$ の座標を観測したとすると、つぎの条件となる。

平行条件:

$$f = (X_{11} - X_{12})(Y_{21} - Y_{22}) - (X_{21} - X_{22})(Y_{11} - Y_{12}) = 0 \quad \dots\dots\dots (6)$$

直交条件:

$$g = (X_{11} - X_{12})(X_{21} - X_{22}) + (Y_{11} - Y_{12})(Y_{21} - Y_{22}) = 0 \quad \dots\dots\dots (7)$$

等長条件:

$$h = (X_{11} - X_{12})^2 + (Y_{11} - Y_{12})^2 - (X_{21} - X_{22})^2 - (Y_{21} - Y_{22})^2 = 0 \quad \dots\dots\dots (8)$$

特殊な場合として、写真面 β 上で直線の方程式

$$y = ax + b \quad \dots\dots\dots (9)$$

の与えられることがある。このようなときに、式(2)によって直線を面 π 上に変換したとき、その方程式はつぎのようになる。

$$Y = \frac{-ac \cos \phi + b \sin \phi \cos \omega + c \sin \phi \sin \omega}{b \sin \omega - c \cos \omega} X + \frac{c_0(ac \sin \phi + b \cos \phi \cos \omega + c \cos \phi \sin \omega)}{b \sin \omega - c \cos \omega} \quad \dots\dots\dots (10)$$

したがって、写真上で2本の直線の方程式が

$$y = a_1x + b_1, \quad y = a_2x + b_2 \quad \dots\dots\dots (11)$$

という形で観測されたときには、面 π 上での平行および直交条件はつぎのようになる。

$$f = c(a_1 - a_2) \cos \phi \cos \omega - (b_1 - b_2) \sin \phi - (a_1 b_2 - b_1 a_2) \cos \phi \sin \omega = 0, \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$g = c^2 a_1 a_2 \cos^2 \phi - (c/2)(a_1 b_2 + b_1 a_2) \sin 2\phi \cos \omega - (c^2/2)(a_1 + a_2) \sin 2\phi \sin \omega - (c/2)(b_1 + b_2) \cos^2 \phi \sin 2\omega + b_1 b_2 (\sin^2 \phi \cos^2 \omega + \sin^2 \omega) + c^2 (\sin^2 \phi \sin^2 \omega + \cos^2 \omega) = 0 \quad \dots\dots\dots (13)$$

第2段階の κ を決定するためには、被写体中において、水平・鉛直・南北などというように方向の推定できる線を1つ以上見出せばよい。

第3段階における縮尺の決定には、長さ既知の物体が1つ以上あればよいことになる。

このような段階をたどれば、平面に近い被写体であれば基準点の写っていない各種の写真から少なくとも第1段階の垂直撮影写真を作ることができることが多い。したがって、被写体の形・配置・寸法比などを知ることができるので、被写体の状況を詳細に検討できることに大きな意義を有するのが通例である。過去に写した写真を利用して、被写体についての各種の情報を取得したいときには、利用できる資料の質と量とに応じて適切な成果を段階的に簡単に得ることができるのが特徴である。

資料さえ十分に整っていれば、6つの外部標定要素を同時に決定する方が、本方法のように3段階に分けるよりも、誤差の少ない結果が得られることは周知のとおりである。また地上観測値の特性を考慮して標定する方法も考えられている^{5),6)}。このような場合でも段階的な方法を採用するとすれば、その目的は、写真座標や基準点座標の観測の誤り、各種の勘違いなどの「誤り」の早期発見である。

(3) 最小二乗法の適用

第1段階の標定においては、面 π において所定の条件が成立するように未知パラメータの ω と ϕ とを決めようとするわけである。

写真面 β 上で直線 g_i 上の測点座標を観測したときには測点座標 x_{i1}, y_{i1}, \dots が誤差を伴う観測値であると考え、条件式(6)~(8)を満足するように最小二乗法を適用する。そのためには式(2)を式(6)~(8)に代入するから、これらの条件式は $x_{i1}, y_{i1}, \dots, \omega$ および ϕ に関して非線形である。一方、直線の方程式を用いるときには、 a_i, b_i, \dots を誤差を伴う観測値として取り扱うことになる。このときの条件式はすでに式(12)および(13)に示したとおりである。

そこで、一般的な表記法によって最小二乗法の適用法を示しておく。観測値、その最確値および残差ベクトルをそれぞれ l, x および v で表わし、未知パラメータ、その近似値および補正ベクトルをそれぞれ z, \bar{z} および δz と記すことにする。そうすると、

$$x = l - v, \quad z = \bar{z} + \delta z \dots \dots \dots (14)$$

と書くことができる。条件式を l および \bar{z} のまわりにテイラー展開すれば、 A, B および W を定数として、つぎの形の線形条件式 ϕ が得られる。

$$\phi = Av + Bz + W = 0 \dots \dots \dots (15)$$

観測値 l の重み行列を P で表し、未定係数ベクトル λ を導入すると、最小二乗法は次式を満足する v を求めることに帰着する。

$$v^T P v - 2\lambda^T \phi = \min. \dots \dots \dots (16)$$

測点座標を観測して条件式(6)~(8)を用いるとき

には、1つの直線ごとに2点の座標値が利用される。ところが1つの点の座標が多く条件式に共通に利用されてもよい。また直交条件や等長条件においては、2直線の交点を利用すれば、交点座標は1つの条件式中で共用されていることになる。

最小二乗法を適用するときには、観測値の重みを指定しなければならない。測点座標の観測値を用いるときには、特殊な観測をしない限りは観測座標の重みはすべて等しいと仮定すればよい。

特殊な場合として、もし直線の方程式の係数を観測値として利用するときには、係数 a と b とは単位の異なる量であるからそれらの重みのつけ方についての考察が必要となる。 a と b とを直線上の2点の座標観測値から算出した場合には、 a と b とに与える重みが複雑になる。ゆえに、このような方法を適用しない方が無難であるが、後に比較例を提示するので、このような場合の重みを算出しておく。

1つの直線上の2点の座標観測値(l_{x1}, l_{y1})および(l_{x2}, l_{y2})を用いて式(9)の形の方程式を作ると係数はつぎのようになる。したがって、 a, b の重みは複雑な値となる。

$$a = \frac{l_{y1} - l_{y2}}{l_{x1} - l_{x2}}, \quad b = \frac{l_{x1}l_{y2} - l_{x2}l_{y1}}{l_{x1} - l_{x2}} \dots \dots \dots (17)$$

座標観測値の標準誤差が σ (一定値)であると仮定し、上式を座標に関する線形の式に直し、 a, b の分散を推定してみた。 a, b の分散共分散行列を Σ と書くと、次のようになる。

$$\Sigma = Q\sigma^2 = \begin{pmatrix} 2 & -l_{x1} - l_{x2} \\ -l_{x1} - l_{x2} & l_{x1}^2 + l_{x2}^2 \end{pmatrix} \frac{(l_{x1} - l_{x2})^2 + (l_{y1} - l_{y2})^2}{(l_{x1} - l_{x2})^4} \sigma^2 \dots \dots \dots (18)$$

もし1つの直線について2点のみを用い、かつ2点間の距離を一定値 s_0 とした場合は、次の形となる。

$$\Sigma = \begin{pmatrix} 2 & -l_{x1} - l_{x2} \\ -l_{x1} - l_{x2} & l_{x1}^2 + l_{x2}^2 \end{pmatrix} (1 + a^2) \frac{2\sigma^2}{s_0^2} \dots \dots \dots (19)$$

第2段階の標定を単独に行うのは、寸法の判明している物体が存在しないけれども、水平線、鉛直線、南北直線道路などが写っているときに限られるだろう。寸法既知のものがあれば、 κ 以外に縮尺 $1/M$ (または W_0)を同時に決定して第3段階を完了すればよい。

第2段階と完全な第3段階とを同時に行うのは相似変換(Helmert変換)をすることである。したがって、最小限2点の座標がわかれば偏位修正写真を作ることができる。これらいずれの場合でも余剰の観測や条件を用いて、最小二乗法を適用するのがよい。

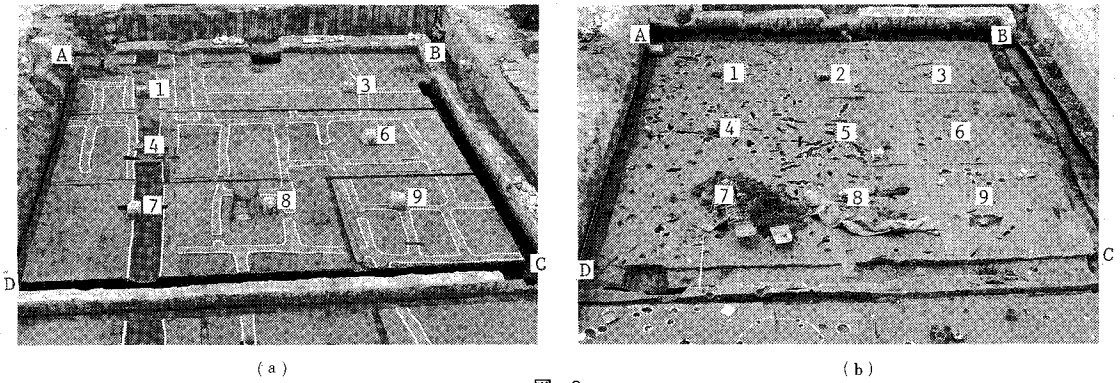


図-3

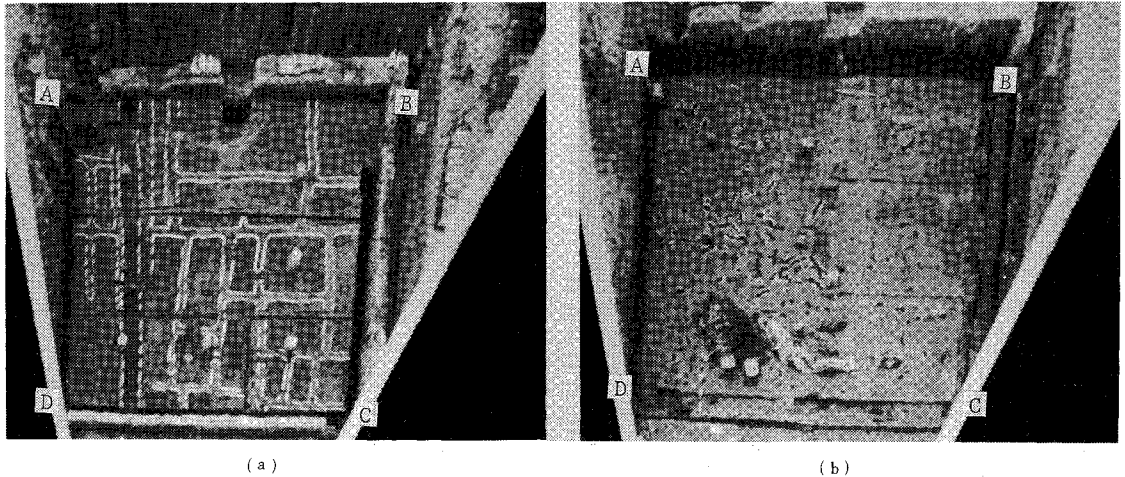


図-4

3. 遺跡調査写真の偏位修正

図-3は弥生時代後期の水田跡発掘現場の異なる2時期における写真である。使用カメラは $f=50\text{ mm}$ のレンズをつけた 35 mm 版のカメラであって、隣接建物の高さ約 20 m の箇所から斜めに撮影した。表面は水平に近く、 5 m 間隔の格子状に基準点が設けられている。それらを番号1~9で示した。

写真座標観測にはネガフィルムを直接コンパレータで測ればよいが、このような特殊な機械を所有していない場合を想定して、つぎのような方法を探った。通常の仕様で写真の引き伸ばしを外注し、約11倍の拡大写真を作り、基準点の座標は物差しで測った。原フィルムにおける主点は画面の中央、画面距離は 50 mm と仮定した。

(1) 基準点を利用した偏位修正写真の作製

この写真には幸いにして基準点が配置されているので、それらの点の写真座標を観測することにした。ただし、それらの点の座標は不明であって、単に格子状に点が配置されているにすぎないと考えて第1段階の標定を行った。各種の条件を利用できるが、いずれの結果も類

表-1 遺跡写真の標定 (約11倍拡大写真使用)

写 真		a	b
第1段階	ω [rad]	1.01603	0.95314
	ϕ [rad]	-0.03964	-0.07181
	σ_o [mm] *)	0.60	0.62
第2段階	κ [rad]	-0.11993	-0.07147
	M	30.167	32.901
	σ_o [mm] **)	103	59

*) 11倍引伸写真上での観測値の標準誤差

**) 被写体上での観測値の標準誤差

似していた。ここではつぎの4条件を用いた結果を示すことにする。

$$\overline{P_1P_7} // \overline{P_3P_9}, \overline{P_1P_3} // \overline{P_7P_9}, \overline{P_7P_9} \perp \overline{P_9P_3}, \overline{P_7P_9} = \overline{P_9P_3}$$

.....(20)

観測値の重みは1であるとして最小二乗法を適用した結果、表1の上欄に示す値を得た。標準誤差の大きさをもとのフィルム面上の値に直すと、それぞれ $0.60\text{ mm}/11=0.055\text{ mm}$, $0.62\text{ mm}/11=0.056\text{ mm}$ となる。

図-3の写真で CCD カメラで撮影してデジタル写

表一 基準点へ当てはめたときの誤差 (被写体座標系, 単位 mm)

点	相似変換後の誤差								射影変換後の誤差			
	基準点を用いたとき				外周線を用いたとき				(基準点を用いたとき)			
	写真 a		写真 b		写真 a		写真 b		写真 a		写真 b	
	U	V	U	V	U	V	U	V	U	V	U	V
1	-11	-68	20	14	121	62	64	-163	0	0	0	0
2	-	-	44	48	-	-	147	52	-	-	19	60
3	-73	-21	-48	-111	-78	220	13	77	0	0	0	0
4	-20	273	-6	-48	102	210	6	-184	-20	335	14	-44
5	-	-	18	42	-	-	-142	41	-	-	3	69
6	-14	-58	32	126	-118	-21	48	256	-24	-61	118	197
7	10	-105	-43	-58	125	-252	-164	-150	0	0	0	0
8	59	3	10	18	3	-112	156	15	21	70	7	-65
9	50	-25	-27	-31	-155	-107	-142	55	0	0	0	0
σ	123		73		196		182		-		-	

σ : 距離の誤差

真にした。使用カメラは、線配列素子を持ったもので、画素数 2,000 × 3,000、画素寸法 13 μm、画面距離 46.060 mm、白黒画像のものである。性能の詳細は文献 4) を参照されたい。記録されたデジタル写真を表一のように得られた外部標定要素を用いて、式(2)によって座標変換を行って垂直撮影写真に直したものが図一4である。この写真によって表面の物体の配置や寸法関係などをよく観察することができる。発掘部分の右上隅 B が少し鋭角になっているような様子も推定できる。

第 2 および第 3 段階の標定を同時に実施した。すなわち式(5)の相似変換を行った。第 1 段階で使用した基準点は P₁, P₃, P₇, P₉ の 4 点のみである。そのために、相似変換を行う場合に、第 1 段階で得られた座標の最確値を用いて、これら 4 点のみを地上観測値に当てはめることができる。しかしここでは、基準点全部について、写真座標観測値を地上観測値に当てはめるように、相似変換を行った。

相似変換の結果は表一の下欄に書き加えた。測点座標の当てはめ誤差 (地上観測値 - 計算値) を表一2の左欄に示す。写真 (a) における P₄、写真 (b) における P₃, P₆ などは誤差が大きい。このような誤差は単なる写真測量の誤差を表しているのではなくて、基準点の標高の不揃いおよび平面位置のずれなどの複合したものである。

この例においては、式(20)で用いた 4 つの基準点を利用して第 1 段階の標定を行った。ところが、これらの 4 点の被写体座標値を用いることにより、式(1)の射影変換関係を求めることができる。得られた変換式によって基準点座標を算出し、参考のために誤差を求めた結果を表一2の右欄に示した。この場合でも、さきに指摘した諸点の座標誤差は大きいことがわかる。

ここでは、2 種類の標定法の特徴がわかるように、単純な例を提示した。これらの例からそれぞれの標定法の適否や精度を論ずるには至らないし、またそれが目的ではない。

(2) 写真上に推定した直線の利用

遺跡写真に基準点が全く写っていない場合を想定して話を進めてみよう。写真を観察して、地上においては平行あるいは直交していると推定する線を探したり、寸法が等しいと想定される物体を探し出して、それらの条件を再現するような形で垂直撮影写真を作成せざるを得ないであろう。

図一3の発掘部分の外周線を 11 倍引伸写真上で推定して描き、それらの 4 本の線の交点として 4 隅の点 A, B, C, D を写真上に定め、これらの座標を観測した。そしてこれら 4 点で作られる四辺形が被写体では長方形であると仮定して、つぎの 4 つの条件を用いて第 1 段階の標定を行った。

$$\overline{AD} \parallel \overline{BC}, \overline{AB} \parallel \overline{DC}, \overline{DC} \perp \overline{CB}, \overline{DC} = \overline{BC} \dots\dots (21)$$

これらの結果を先の標定結果と比較するために、相似変換によって基準点に当てはめた。得られた基準点残差は表一2の中央に記したとおりである。当然のことながら今回の方が残差が大きい。偏位修正写真の提示を省略するが、基準点残差を見ると、今回の偏位修正写真では $\angle P_1 P_3 P_9$ が鈍角になったことがわかる。3.(1)における第 1 段階標定において基準点の作る $\angle P_1 P_3 P_9$ を直角にすれば右上隅 B が鋭角になっていたことと対応している。このようにして、推定した条件を再現した垂直写真の作れることがわかる。ただし、誤差の大小やその現れ方などは、利用した条件の正しさと適当さの程度に支配されることになる。

4. 建物壁面写真の偏位修正

建物壁面の垂直写真を撮影することが困難なために、ほぼ平面に近い建物壁面については、斜め方向から写した写真を偏位修正することが多い。本節では、建物壁面の偏位修正を行ったときの誤差と、1 枚の写真に写っている 2 つの壁面を展開した写真の作成例を示すことにする。使用したカメラは前節で示したのと同じ CCD カメラである。この場合にはレンズによる像のひずみ⁹⁾を

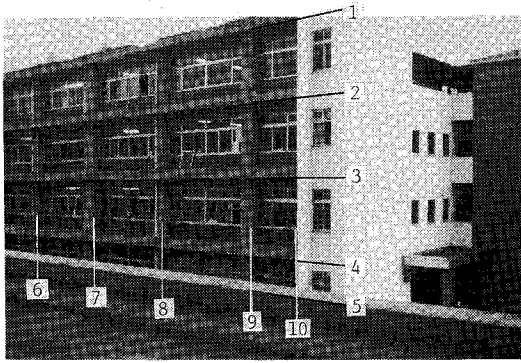


図-5

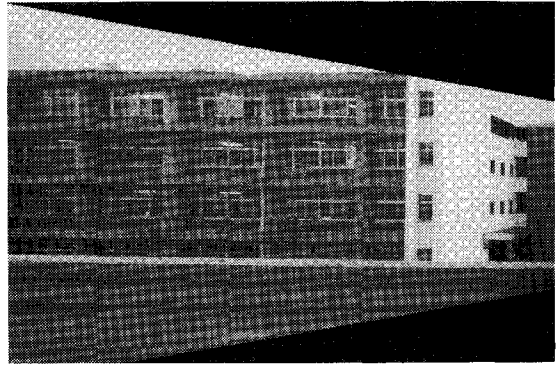


図-6

表-3 直線の方程式の係数

No	a (mm/mm)	b (mm)
①	0.211326	11.814
②	0.109010	6.100
③	0.006819	0.363
④	-0.096409	-5.413
⑤	-0.142306	-8.018
⑥	397.158	6826.81
⑦	291.678	3824.42
⑧	347.984	2805.90
⑨	400.777	681.87
⑩	745.383	-1170.19

表-4 使用条件と第1段階の標定結果

記号	直線方程式の係数利用						点の座標利用	
	(A1)	(A2)	(B1)	(B2)	(C1)	(C2)	(D1)	(D2)
条件	①//④	①//⑤	①⊥⑥	①⊥⑥	①//③	①//④	①//④	①⊥⑥
	⑥//⑨	⑥//⑩	④⊥⑤	⑤⊥⑥	②//④	②//⑤	⑥//⑩	①⊥⑩
	④⊥⑨	⑤⊥⑨	④⊥⑨	⑤⊥⑩	⑥//⑨	⑥//⑩	⑧//⑩	④⊥⑥
ω [rad]	0.002131	0.004073	0.002130	0.004071	0.002117	0.004071	0.004009	0.004008
ϕ [rad]	0.691417	0.688336	0.691334	0.687449	0.688122	0.687779	0.688347	0.688380
σ_0	0.003616	0.001909	0.003615	0.000363	0.000104	0.000485	0.0052mm	0.0060mm

σ_0 : 重み1の観測の標準誤差

補正した。

(1) 建物壁面の偏位修正写真とその誤差

図-5は、4階建ての建物を、約18m離れた箇所から斜めに写したデジタル写真のハードコピーである。この建物には多数の基準点を設けてあるので検定場として利用できる⁴⁾。第1段階の標定を行うために、軒および柱の線を利用することにし、それらの線名を図-5のように定める。線5は対象壁面から離れた別棟の線であるが、平行線として利用してみた。画面右半分には利用できる線がほとんどなかった。

第1段階の標定を行うために、今回はディスプレイに表示した画像上で観測した直線上の諸点の座標値から方程式(9)の係数を求め、条件式(12)および(13)を利用することにした。ただし係数a, bの重みはいずれも1と仮定して最小二乗法を実施した。理由はつぎのとおりである。

①線の方程式を用いる実験を行うこと。②ディスプレイ上で直線を見出し、その線上の代表的な点を指定するという作業は、人によって判断に差が大きいこと。③画像の縦および横の拡大率を自由に変更してディスプレイに表示できるので、直線の方向に対して直角な方向に拡大した画像を用いて直線上の点の座標を測れば、直線勾配を精度良く推定できる。したがってこの方法を採用してみることにした。④式(18)で示されるように、係数aおよびbの重みは、測り方およびaの大きさ自身によ

てかなり変動させる必要がある。このような重みの与え方を常に実行することは困難であると推定して、すべての重みが等しいと仮定したときにもほぼ適切な解が得られるかどうかを確かめること。

10本の線の方程式の係数を表-3に示す。これらの線の中から3組ずつ選んだ条件式を6種類作って標定に使用した。これらの条件式を表-4に示す。表-4には第1段階の標定結果も示した。線5を条件式に組み入れたものは ω が少し大きい値となったが、全般的には利用した線や条件の種類が異なっても標定結果に大きな差を生じていない。図-6は表-4の平均値($\omega=0.003099$ rad, $\phi=0.689073$ rad)を用いて変換した垂直写真である。

方程式の係数a, bを用いなくても、直線上の点の座標観測値を用いればもちろん標定が可能である。この結果も示そう。直線上の点としては各線の交点を選んだ。そして表-4の右欄に記したような2種類の条件を採用し、条件式(6)および(7)を用いて標定した。その結果も表-4に併記した。直線方程式の係数を用いた場合とほぼ同じ結果となっている。

建物に配置されている基準点は、壁面に配置されているものと、壁面から約80cm突出した軒に設置されているものがある。したがって、それぞれの面について、第2および第3段階の標定(相似変換)を行った。使用した基準点の概要は図-7のとおりである。

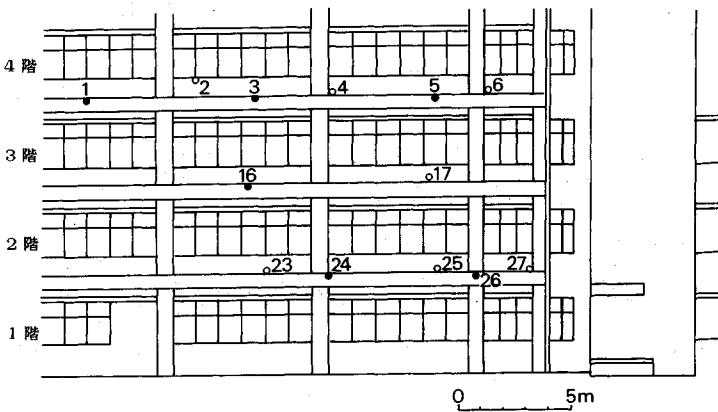


図-7

表-5 基準点への当てはめ誤差 [単位 mm]

記号	B 1		B 2	
	v_x	v_y	v_x	v_y
軒配置の点				
1	-4.6	0.9	-18.9	-0.7
3	5.6	0.4	12.1	-7.9
5	-5.1	4.6	8.7	-11.0
16	6.7	-1.0	4.4	1.1
24	1.8	-1.6	-2.8	9.6
26	-4.2	-3.3	-3.5	9.0
σ_0	4.8		11.3	
σ	5.5		12.8	
壁配置の点				
2	4.6	3.1	-5.8	-2.4
4	-6.1	4.1	-0.3	-5.1
6	-10.1	2.5	1.4	-11.3
17	4.6	-2.8	10.2	-2.9
23	2.8	2.4	-12.4	8.8
25	4.5	-7.0	5.2	2.9
27	-0.3	-2.4	1.7	10.0
σ_0	5.6		8.2	
σ	6.6		9.8	

表-6 使用条件と標定結果

記号	北壁面			西壁面		
	NA	NB	NC	WA	WB	WC
条件	$B6, D6 = B4, D4$ $B4, D4 = B2, D2$ $B2, D2 = B0, D0$ $B6, B0 = B6, D0$ $B6, D0 = B6, B0$	$B6, D6 \perp D6, D0$ $D6, B6 \perp B6, B0$ $B6, B0 \perp B0, D0$ $B4, D4 \perp D6, D0$ $B2, D2 \perp D6, D0$	$B6, D6 // B4, D4$ $B4, D4 // B2, D2$ $B2, D2 // B0, D0$ $B6, B0 // D6, D0$ $B6, D6 \perp D6, D0$	$D6, F6 = D4, F4$ $D4, F4 = D2, F2$ $D2, F2 = D0, F0$ $D6, D0 = F6, F0$ $D6, F0 = F6, D0$	$D0, D6 \perp D6, F6$ $D6, F6 \perp F6, F0$ $F6, F0 \perp F0, D0$ $D6, D0 \perp D4, F4$ $D6, D0 \perp D2, F2$	$D6, F6 // D4, F4$ $D4, F4 // D2, F2$ $D2, F2 // D0, F0$ $D6, D0 // F6, F0$ $D6, D0 \perp D6, F6$
ω [rad]	0.221511	0.221428	0.221425	0.241988	0.241814	0.241805
ϕ [rad]	0.850363	0.850565	0.850571	-0.712418	-0.712028	-0.712047
σ_0 [μ m]	12.9	10.1	10.1	12.9	9.1	9.1
κ [rad]	-	-0.003083	-	-	-0.003482	-

表-4の各種の標定の中から、相似変換の結果を基準点残差の最小のものと最大のものについて示したものが表-5である。 σ_0 は観測の標準誤差であり、基準点と推定点との距離誤差を σ で示した。これらの値は論文4)の2~3倍くらいである。

(2) 建物2壁面の展開写真の作成

図-8は別な建物を約44m離れた箇所から写したものであって、左が北面、右が西面である。この写真には水平または鉛直と推定できる線が多数写っているので、それぞれの線には図に記した記号をつけた。線の交点の名称としては、たとえば、線Bと線2との交点をB2とした。

この場合は交点の座標観測値を利用し、第1段階の標定には5個の条件を用いることにした。表-6には採用した3種類の条件と、標定結果を示した。どの条件を用いてもほぼ同様な結果を得ている。

この写真においては、両壁面の交線Dが鉛直であるという条件で各面ごとに回転 κ を求め、D0, D6の長さが両壁面で一致するようにして、両壁面の寸法を合わせることができる。条件NBとWBの場合を例にとると、第2段階の垂直撮影写真の κ は表-6の下欄に示したとおりであり、線分D0, D6の比は西面/北面=1.2256で

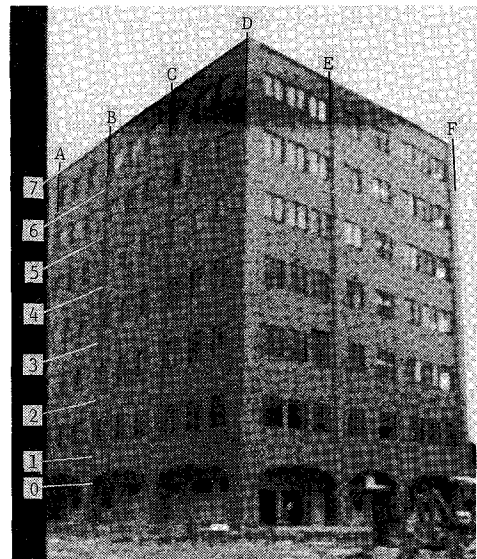


図-8

あった。このような資料によって、両平面の交線を共有する垂直撮影写真(展開写真)を作ったものが図-9である。

表-6のNBとWBについては、両壁面に対する写

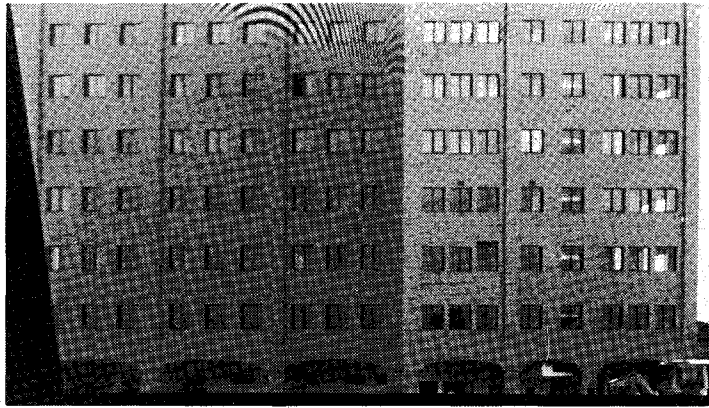


図-9

表-7 精度の比較

標 定	遺 跡 写 真	4 階 建 物 写 真	7 階 建 物 写 真
第 1 段 階 標 定	1/890~1/920	1/7,700~1/8,900	1/3,600~1/5,100
相 似 変 換	1/360~1/620	1/2,100~1/4,900	-

真の撮影方向が与えられているから、この値を利用して両壁面の交角を算出することができる。計算結果は1.56259 rad (89.530°) となった。すなわち、直角と0.00820 rad (0.470°) だけ差が生じた。

なお、カメラの回転順を κ , ω , ϕ とし、壁面に対して $\kappa=\omega=0$ としたときの写真を作れば、いわゆるあおりのない写真が得られることになる。

提案した方法の実験結果をいろいろな観点から考察してみても、使用資料の良否に応じて、それ相応の妥当な結果が得られた。これらの諸例からわかるように、与えられた資料の特徴に応じて、柔軟かつ適切な処理が可能である。

5. 結 語

現地調査においても、実験観測においても、われわれは写真撮影をすることが非常に多い。ところが後になってそれらの写真から各種の状況把握を望んだり、寸法計測値を得たい場合が生じる。このようなときには実体写真測量の手法の適用が完全に可能であれば申し分のないことである。それが困難な場合でも、現地の状況および利用し得る条件の量と質とに応じて、平面と仮定できる部分についてはそれ相応の成果の得られることを示した。被写体上で利用できる条件が見出せないときに、もしも2箇所から写した写真があれば、第1段階の標定が可能であることは示されている⁷⁾。また、その写真の実体観測ができれば、相互標定を実行することによって実体モデルに対する写真の傾きが定まるから、第1段階の標定が可能である。

写真測量における精度については、本論文では、第1段階の標定においては、写真面における標準誤差 σ_0 と

画面距離 c との比で精度をあらわすことにする。また、相似変換によって基準点に当てはめるときには、被写体面における σ_0 と斜め撮影距離との比で精度を表現することにする。ここで斜め写真の撮影距離とは、写真主点の被写体側対応点と投影レンズとの間の距離である。3~4節の資料をとりまとめれば表-7が得られる。

精度を示すこれらの数値は、外部標定法による誤差を表現しているのではなく、地上測量、被写体の平面性、推定条件、写真座標観測、内部標定要素などの誤差が複雑にからみ合った結果であると考えられるべきである。第1段階標定の誤差よりも相似変換による当てはめ誤差の方が大きくなる原因の1つは、推定した条件が正しくなく、算出された ω と ϕ とが正しくないためであると考えられる。好条件に恵まれるほど精度は向上し、1/5,000以上の精度に達した例も示した。

現地撮影に使用するカメラとしては、従来のフィルム方式よりも電子スチールカメラと称されているものの方が後続の処理に誤差を伴うことが少ない。ところが分解能がよく(画素数が多く)、レンズの投影ひずみが小さく、直接デジタル記録が取得できるという電子スチールカメラは、現在では大量生産されていないようである。このカメラが普及すれば精度が向上するが、フィルム記録された像を用いても、これをデジタル化することによって、かなりの精度を持って柔軟な処理を行うことが可能である。本論文で示した方法は、各方面(たとえば、構造物壁面、遺跡、水面、路面などの計測・調査など)に応用することができる。

画像処理は岡山大学総合情報処理センターの画像処理サブシステムを利用した。遺跡の計測や平面図の資料は同埋蔵文化財調査研究センターより得たものであり、遺

跡に関する計算は藤木明氏（当時学生，現日本工営株）の協力を得たものであることを記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 小桜義隆・鳥居邦夫・高田孝次：CCD カメラを利用した平面形状の計測システムとその応用，土木学会論文集，第 435 号／IV-15，pp. 89～94，1991.
- 2) Kollenprat, D. und Schuhr, P. : Photogrammetrische Bestimmung von Tunnelprofilen mit speziellen Einzelaufnahmen, Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, 96 Jg., Heft 7, S. 281～290, 1989.
- 3) 佐々波清夫：数値標定法によるファセット法，写真測量とリモートセンシング，Vol. 25, No. 3, pp. 24～28, 1986.
- 4) 森忠次・広金幹生：線配列 CCD カメラを用いた座標測定法と精度，土木学会論文集，第 407 号／IV-11, pp. 37～45, 1989.
- 5) 近津博文・村井俊治：写真測量と地上測量とを結合した誤差調整手法の開発（その 1）／（その 2），生産研究，Vol. 36, No. 9, pp. 16～18／No. 10, pp. 14～16, 1986.
- 6) 近津博文・春日屋伸昌・村井俊治：地上測量の観測条件を結合した写真測量の誤差調整，写真測量とリモートセンシング，Vol. 26, No. 3, pp. 4～20, 1987.
- 7) Kager, H., Kraus, K. und Novak, K. : Entzerrung ohne Paßpunkte, Bildmessung und Luftbildwesen, 53 Jg., Heft 2, S. 43～53, 1985.

(1992. 6. 4 受付)

STEPWISE RECTIFYING A SINGLE DIGITAL PHOTOGRAPH OF PLANE OBJECTS

Chuji MORO and Kazuyuki MIYANAGA

We take many photographs in our construction sites. After that, we often want to know the relative sizes, shapes and configurations of photographed objects by use of the single photograph only. It can be realized by rectifying the photograph if the objects are on a plane and sufficient control points exist. On the contrary, the rectifying problem under insufficient conditions are treated in this paper. The photographed objects are, usually, artificial structures and contain many useful informations for orientation, such as parallel or perpendicular lines and bodies with equal length. We use these informations and determine orientation parameters of the single photograph, stepwise. ω and ϕ are determined at first, and then κ , and the scale and position of the photograph at last. The photograph rectified by ω and ϕ rotation is useful for understanding the object as to shapes, configurations, etc. Moreover, there is no limitation in ω and ϕ rectification if the photograph is a digital image. The proposed method can be applied to various photographs and provides us with useful informations on the objects.