距離の制約条件と写真測量とを結合した標定手法に関する研究

A Study on Photogrammetric Method Combined with Constrained Condition of the Distance

近津 博文* 春日屋伸昌**
村井 俊治***

*Hirofumi CHIKATSU Nobumasa KASUGAYA
Shunji MURAI*

Abstract : The authors have developed a method of simultaneous adjustment to determine the exterior orientation parameters of a single photograph together with X,Y,Z-coordinates of unknown points using the additional distance observations obtained from the geodetic survey.

The photogrammetric method combined with constrained condition of the distance, which has been developed in this research, shows remarkable efficiency so that the control point survey becomes more easy by utilizing a known length such as the staff or tape which has to be photographed.

This paper discusses a method of simultaneous adjustment in the case that the two rulers were taken on a photograph.

1. ま え が き

単写真標定を複数写真の同時標定に拡張したバンドル法が解析写真測量の主流となりつつある。従来、単写真測量は特殊な条件または何らかの制約条件の下においてはじめて実行が可能となることから、それは実用的な3次元決定法とはならなかった。しかし、単写真は撮影時に受ける拘束が少ない等、種々の環境に対処し得る柔軟性を有する。

一方、光波測距儀の発達により距離測定は簡便にかつ高精度で実行されるようになった。従来は距離測定の成果として得られる基準点の座標を既知の値として写真測量の標定に入力してきた。しかし、距離測定の値から座標を求めるところで調整計算が介入するので、得られる座標値は直接測定値とはならない。数学的には距離の測定値と写真座標の測定値とを同時に調

整することにより合理的となる。

筆者等は上記の発想に基づき、距離の測定値と単写真標定とを組み合わせた同時調整法の開発を行ってきた。その結果、同時調整法は基準点の設置に伴う作業を簡略化できる利点のあること、また距離測定で結びつけられた測点の未知座標を単写真からでも求められることが確かめられた¹⁾²⁾。

本論文では、これらの同時調整法を有効に利用するために基準点の配置に対する類型化を行なった。その結果、同時調整法は放射型、結合型、GPS型および標尺型の4つに分類され(図-1)、基準点測量に対する種々の環境条件に柔軟に対処し得ると思われる。

なお、本論文では、これらの類型化の内、特にIVの標尺型についても述べるものとする。

2. 同時調整法の類型化

同時調整法では、測点の未知座標の第一近似値を仮定する必要上、測点を結ぶ測線は基準点と直接結合するか、あるいは基準点と結合している測点と何らかの方法で結合することが必要であり、本研究において基

* 工博 東京電機大学助手 理工学部建設工学科

** 工博 中央大学教授 理工学部土木工学科

*** 工博 東京大学教授 生産技術研究所第5部

(a) 類型 I (放射型)

(b) 類型 II (結合型)

(c) 類型 III (GPS 型)

(d) 類型 IV (標尺型)

図-1 同時調整法の類型化

本となった基準点の配置は次の2つの類型に代表された (図-1(a), (b))。

類型-I (放射型): この形は基準点の周りに多くの測点が存在するように、基準点を中央に設けた場合である。この方法は以下のような利点を持つ。

- 1) 距離測定が、非常に効率良く行なえる。
- 2) 鉛直角観測も同様であり、その結果各測点の標高の測定値が得られる。
- 3) 測点に対する距離と標高の測定値を考慮することにより2点の基準点でも同時調整法が可能となる。
- 4) 各測点に対する水平角も効率良く観測することができるため、距離に代わって水平角を考慮した同時調整法の適用が可能となる。

類型-II (結合型): この形は基準点から一度に多く

図-2 結合型の拡張

の測点に対する視準が得られない場合に対応する形である。距離測定は放射型より不便なものの、距離を考慮した場合には類型-Iと同じ利点をもつほか、

- 1) この型はIよりも広い地域に対して適用できる。
 - 2) 図-1(b)において l_i および l_j 等の測線を考慮することにより、Iよりも大きな図形の強さを得ることができる。
 - 3) 距離と高さを考慮することにより、図-2のような基準点配置にも適用できる。
- 等の利点がある。

一方、航空機や船舶のための航法援助として人工衛星を使ったGPS (Global Positioning System; 全球測位システム) が米国で開発中である。GPSが実用化されると、2点間の距離が正確に測定できる³⁾他、点の3次元座標も簡便に測定できる⁴⁾。また、精度は多少落ちるが航空機やその他の飛行体の位置もリアルタイムで測定できる⁵⁾。

したがって、GPSで測定されるデータも写真の標定に同時に取り入れることが可能であり、次の形が考えられる。

類型-III (GPS型): この形は図-1(c)のように測点同士が互いに独立であっても、2測線以上が形成されることにより距離の測定値を考慮した同時調整法の適用が可能となる。この形はGPSの持つ長所と同じ長所を有するため、

- 1) 2点間の視準を必要としない。
- 2) 観測が容易である。
- 3) 広い範囲に対しても適用できる。

等の利点がある。

ところで、同時調整法の開発における距離の測定値

は光波測距儀あるいは GPS を利用して得られる値に着目したものであった。しかし、古墳・遺跡調査等における大縮尺の写真測量あるいは近接写真測量を考えた場合、距離に対する概念はもっと身近なものとなり、手軽に簡単に利用できる標尺あるいはテープ等が考えられる。また、標尺等の様に長さの既知なものを写真と一緒に写し込むことにより、本研究の目的の一つである基準点測量の簡略化が可能になるものと思われる。

そこで、基準点数 1 の場合の同時調整法¹⁾と同じ考え方により、すなわち標尺上の一方の端を基準点 A、また他端を B とし、点 A、B を結ぶ線分を X 軸、点 A において線分 AB と直交する方向を Y 軸として、基準点 A の座標を任意に $(0, 0, 0)$ とすると、標尺がほぼ水平に置かれているならば B 点の座標は $(l, 0, \bar{0})$ となる(図-3)。また、2 本の標尺がほぼ同一平面上にあるならば、もう 1 本の標尺上の点 C、D のZ 座標の近似値はほぼ 0 となり、さらに平面座標の近似値は写真上の位置関係から算出することができる。

これらを考慮すると、図-1(d)の様に 2 本の標尺が写し込まれている形が考えられる。

類型-IV (標尺型)：この形の利点としては

- 1) 使用する機器がきわめて簡単なもので済む。
- 2) 標尺の長さから距離の値を知ることができるため、距離に関する測量を必要としない。そのため、基準点の設置に伴う作業が簡略化できる。

等である。

この形は標尺の設置状態に応じて、さらに以下の様に細分化される(図-4(a)~(d))。

Type-1 同一平面に 2 本の標尺がほぼ水平に置かれている場合。

2 本の標尺が同一平面内にほぼ水平に置かれているならば、各基準点の Z 座標の近似値には A 点の Z 座

図-3 基準点測量の簡略化

標と同じ値を設定することができる。また、標尺上の長さから距離を知ることができるため地上測量を必要としない。

Type-2 2 本の標尺はほぼ水平に置かれているが、各標尺が同一平面に存在しない場合。

2 本の標尺は同一平面内に存在しないものの、各標尺はほぼ水平であるから、B 点の Z 座標の近似値は、A 点の Z 座標と同じ値と仮定される。同様に、点 C および D の Z 座標はほぼ等しく、その近似値は C 点と A 点あるいは B 点、または D 点と A 点あるいは B 点との比高を知ることにより定められる。図-4(b)は点 BD 間の比高 (Δh_{B-D}) を測定した場合である。

Type-3 1 本の標尺だけがほぼ水平に置かれている場合。

水平に置かれた側の標尺に基準点 A を設定すると、B 点の Z 座標の近似値は A 点の Z 座標と同じ値と仮定される。一方、点 C および D の Z 座標の近似値は C 点と A 点あるいは B 点、または D 点と A 点あるいは B

図-4 標尺の設置パターン

B 点との比高を知り、さらに CD 間の比高を知ることにより仮定される。図-4(c)は最初に点 BD 間の比高を測定し、点 D の B 点に対する比高 (Δh_{B-D}) を求め、次に CD 間の比高の測定値より点 C の点 B に対する比高 (Δh_{B-D-C}) を求めた場合である。

Type-4 各標尺がそれぞれ水平に設置されていない場合。

各基準点の Z 座標の近似値は直接または間接的であっても、基準点(A)に対する比高と関連付けられる必要がある。図-4(d)は点 A → B, B → D および D → C 間の順に比高の測定を行ない、各点の A 点に対する比高を算出した場合である。

なお、図-4 中の点 C, D の X, Y 座標の値は写真上の位置関係から算出した第一近似値を表わす。

3. 距離を制約条件にした同時調整法

距離の測定値を考慮した同時調整法では、写真座標、基準点および距離に対する補正量をそれぞれ、 Δx_i , $\Delta y_i (i=1 \cdots l)$; ΔX_j , ΔY_j , $\Delta Z_j (j=1 \cdots m)$; $\Delta l_k (k=1 \cdots n)$ とすると、各補正量は最小二乗法に従って次の重み付関数 G_0 を最小とする値として求められる。

$$G_0 = \{ [p_0 (\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2)] + [p_1 (\Delta l_k^2)] + [p_2 (\Delta X_j^2 + \Delta Y_j^2 + \Delta Z_j^2)] \} \cdots \cdots (1)$$

なお、高さの測定値を考慮した場合には高さに対する補正量 ΔH_i を考慮して式(1)を次式とする。

$$G_1 = \{ [p_0 (\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2)] + [p_1 (\Delta l_k^2)] + [p_2 (\Delta X_j^2 + \Delta Y_j^2 + \Delta Z_j^2)] + [p_3 (\Delta H_i^2)] \} \cdots \cdots (2)$$

本論文のテストモデルに対する結果は式(2)によるものである。

一方、撮影点の測定値を考慮した場合には撮影点に対する補正量を ΔX_o , ΔY_o , ΔZ_o として、

$$G_2 = \{ [p_0 (\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2)] + [p_1 (\Delta l_k^2)] + [p_2 (\Delta X_j^2 + \Delta Y_j^2 + \Delta Z_j^2)] + [p_3 (\Delta H_i^2)] + [p_4 (\Delta X_o^2 + \Delta Y_o^2 + \Delta Z_o^2)] \} \cdots \cdots (3)$$

となる。

なお、式(3)は地上測量の組み合わせ方により変化する。たとえば、距離と基準点と撮影点とを考慮した場合の同時調整法は次式となる。

$$G_3 = \{ [p_0 (\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2)] + [p_1 (\Delta l_k^2)] + [p_2 (\Delta X_j^2 + \Delta Y_j^2 + \Delta Z_j^2)] + [p_4 (\Delta X_o^2 + \Delta Y_o^2 + \Delta Z_o^2)] \} \cdots \cdots (4)$$

ただし、 l ; 基準点数と測点数との和、 m ; 基準点数、

n ; 測線数 []; ガウスの総和記号、 p_0 ; 写真座標に関する重み、 p_1 ; 長さに関する重み、 p_2 ; 基準点の座標に関する重み、 p_3 ; 高低差に対する重み、 p_4 ; 撮影点に対する重み

4. テストモデル

本論文で使用した写真は約 1 m の高さにおいてピント合わせを行なった後ニコン F2 (普通角 $f=55$ mm) により 2 本の鋼尺が写し込まれるように撮影されたものであり、鋼尺上の点 A, B, D, E をそれぞれ基準点とし、点 A の座標を (O, O, O) とした。また、点 A, B および点 D, E 間の距離は共に 200mm であり、写真座標の測定に使用したデジタイザーの最小読定値は $20\mu\text{m}$ である。なお、図-5 は標尺の設置タイプ 3 の場合であり、点 A, B を含む鋼尺はほぼ水平に設置し、もう 1 本の鋼尺は傾けて (点 E を約 2 cm 高めて) 設置した場合である。

また、図-5 において a, b は平面上に設置された物体であり、ともに表面は平らであり、それぞれの高さは 5.1cm および 3.5cm である。

なお、本論文で使用した写真は非測定カメラで撮影されたものであり、このような場合には主点のずれ、

図-5 テストモデル

レンズのディストーション等に対する補正を考慮する必要がある。本論文における結果は上記の各内部標定要素を考慮したセルフキャリブレーション付同時調整法により算出されたものである。

一方、本論文では簡便的に測定器具の最小読定値に反比例する重み方法¹⁾を採用し、距離および基準点に対する最小読定値を 1 mm として、 $p_0 : p_1 : p_2 = 50 : 1 : 1$ とした。

5. 結 果

本論文では標尺の設置タイプごとに以下の項目について検討を行なった。

- 1. 対をなす 2 枚の写真に対して、各単写真毎に同時調整法によりそれぞれの外部標定要素を算出した後、2 枚の写真に対して共線条件式を当てはめて写真上の各測点に対する 3 次元座標を求めた場合。
- 2. 単写真標定より算出された各外部標定要素の値と各測点に対する高さを与えて単写真から各測点の平面座標を求めた場合。

表-1 は 18 個の測点に対する各 3 次元座標の誤差の最大値と平均値を示したものである。また、図-6 ~ 7 は各測点の 3 次元座標に対する誤差の大きさを各設置タイプ毎に示したものである。なお、図-6 ~ 7 における 1 ~ 18 の測点番号は図-5 より選出した点に通し番号をつけたものである。

これらの結果、以下のことが理解される。

- 1. 1 対の写真から 3 次元座標を求めた場合（表-1、図-6）。

設置タイプ 1 の場合、Z 座標の誤差の平均値は 1.4 cm であり、X、Y 座標の平均値はそれぞれ 6 mm および 3 mm である。しかし、高さが存在する点 (a, b 上) において、特に Z 座標に対する誤差が大きく、測点 3 において最大値 3.9 cm を示す。これは 2 本の標尺が同一平面上にほぼ水平 ($Z = \bar{O}$) に設置されていることに起因するものと思われる。

また、設置タイプ 4 の場合には、Z 座標の誤差の平均値は 1.7 cm と大きい、X、Y 座標の平均値は共に 5 mm 以下である。しかし、写真上の端の点 (特に測点 9, 10) で誤差が大きく、測点 9 では Y 座標が最大値 (1.1 cm) を示し、また測点 10 では X および Z 座標が最大値となり、Z 座標に対する最大値は約 8 cm に

もおよんでいる。これは、2 本の標尺がともに水平に設置されていない為、推定された点 D, E の第一近似値に対する信頼性が低かったためと思われる。

一方設置タイプ 3 の場合、Z 座標の誤差の最大値は 1.1 cm と約 1 cm あるものの、これは第 3 測点のみに対する結果であり、他の測点に対する Z 座標の誤差の大きさはすべて大体 5 mm 以下である。また X、Y 座標の誤差の最大値は共にほぼ 5 mm (X 座標：6 mm, Y 座標：5 mm) であり、X、Y、Z 座標の平均値はそれぞれ 2 mm, 1 mm, 4 mm である。

また、設置タイプ 2 の場合には各 3 次元座標に対する誤差の最大値は共に 5 mm 以下 (X 座標：4 mm, Y 座標：5 mm, Z 座標：4 mm) であり、また X、Y、Z 座標に対する平均値はそれぞれ 1 mm, 2 mm および 2 mm である。

したがって、タイプ 2 ないし 3 の設置パターンを採用するのが適当であると思われ、この結果本論文の様に非測定カメラを使用した場合でも、標尺型による同時調整法から得られる結果は十分に満足できるものであると思われる。

- 2. 単写真から平面座標を求める場合 (表-1、図-7)

タイプ 1 の場合には第 2 測点における X 座標の誤差が最大値 (1.4 cm) であったが、他の測点における X および Y 座標に対する誤差の大きさはすべて 1 cm 以下である。また、X、Y 座標に対する誤差の平均値はそれぞれ 5 mm および 3 mm である。

タイプ 4 の場合には第 3 測点に対する Y 座標の誤差が最大値 (1.0 cm) であったものの、他の測点に対する誤差の大きさは X、Y 座標共に 1 cm 以下であり、また X、Y 座標に対する誤差の平均値はそれぞれ 2 mm および 5 mm であった。

表-1 標尺型同時調整法の結果

TYPE	CASE	最大値 (cm)			平均値 (cm)		
		DX	DY	DZ	DX	DY	DZ
1	一対 単写真	2.1	0.8	3.9	0.6	0.3	1.4
		1.4	0.9	—	0.5	0.3	—
2	一対 単写真	0.4	0.5	0.4	0.1	0.2	0.
		0.4	0.9	—	0.2	0.2	—
3	一対 単写真	0.6	0.5	1.1	0.2	0.1	0.4
		0.4	0.5	—	0.2	0.1	—
4	一対 単写真	1.9	1.1	7.8	0.4	0.2	1.7
		0.5	1.0	—	0.2	0.5	—

図-6 標尺型による誤差の分布（一対の場合）

図-7 標尺型による誤差の分布 (単写真の場合)

この結果、3次元座標ではかなり大きな誤差を示した場合（タイプ1，4）でも、高さと外部標定要素とを与えることにより算出される平面座標は十分に良い値であると判断される。

一方、タイプ2および3に対する誤差の最大値はX，Y座標共に1 cm以下であり、誤差の平均値は1ないし2 mmである。

以上のように、単写真から平面座標を求める場合にはXおよびY座標に対する誤差の平均値はタイプに関わらずすべて5 mm以下であった。したがって、この場合には設置タイプに対してあまり神経質になる必要はないと思われる。

6. 結 語

本研究は室内モデルに対して実施したものであり、実際の現場等では斜面上に標尺を設置しなければならない場合もある。しかし、極めてコンパクトな傾斜角読み取り器により簡単にかつ高精度（ $\pm 0.01^\circ$ ）に標尺の傾斜角が測定できることを考慮すると、標尺型は遺

跡・古墳調査および近接写真測量等の大縮尺の写真測量において効果的な方法であると思われる。

距離を考慮した同時調整法は橋、堤防、道路および建物等の長さが分かるものが写真に写しこまれていれば利用できるため、この調整法の応用範囲は極めて広く、写真測量における基準点の設置に伴う作業の簡略化において極めて有効な方法であると思われる。

参 考 文 献

- 1) 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.
- 2) 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に対するGPSの利用，写真測量とリモートセンシング，Vol. 27, No. 1, pp.6-18, 1988.
- 3) GPS人工衛星による精密測位システム，測量，Vol. 37, No. 1, pp.39-41, 1987.
- 4) F.W. MOONEY：Terrestrial Evaluation of the GPS Standard Positioning Service，Navigation，Vol. 32, No. 4, pp.351-369, Winter, 1985-1986.
- 5) 日本測地学会：GPS-人工衛星による精密測位システム，1986.