

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6)

A Development of Error Adjustment Methods in Combined Photogrammetry and Land Surveying

近 津 博 文*・村 井 俊 治**
Hirofumi CHIKATSU and Shunji MURAI

1. は じ め に

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新しいシステムであるGPS (Global Positioning System) が現在米国で開発中である。これは現在使われているNNSS (Navy Navigation Satellite System) の改良発展型であり、一般的には以下のような長所を持っていることが知られている。

- 1) 利用時間帯に対して制限を受けない。
- 2) 天候に左右されない。
- 3) 2点間の視通を必要としない。
- 4) 長距離の測量が光波測距儀以上の精度でできる。
- 5) 観測が簡単である。
- 6) 世界共通の座標系で測定の座標値を得ることができる。

GPSの利用方法には1点測位法と相対測位法とがある。1点測位法は高速で移動する航空機およびロケット等の位置、速度等の情報をリアルタイムで決定する方法であり、この方法がGPSの本来の利用方法である。

しかし、測量の立場からは測定に長時間を必要とするもの高精度な結果が得られる相対測位法が主な使用方法になると思われる。

ところで、リアルタイムで航空機自身の位置を知ることができる1点測位法を、航空機より写真撮影が行われた場合に適用すれば、写真が撮影された位置、すなわち、外部標定要素のうちの撮影点の位置を知ることが可能であると考えられる。このように、写真測量の分野におけるGPSの利用方法を考えた場合、1点測位法は極めて有効な方法であると思われる。

筆者らは地上測量から得られる距離あるいは角等の測定値と写真測量の測定値とを同時に調整することにより、少ない基準点数で、しかも単写真からでも外部標定要素と測定の3次元座標とを同時に求めることができる同時調整法を開発した¹⁾²⁾³⁾。

そこで、本報告では距離および写真測量の測定値と、

*東京電機大学理工学部

**東京大学生産技術研究所 第5部

さらにGPSにより得られる測定値とを同時に調整する方法の開発を行う。また、その結果に対して検討を行う。

2. GPSを考慮した同時調整法

測定の地上座標を $P_i(X_i, Y_i, Z_i)$ 、対応する写真座標を $p_i(x_i, y_i)$ 、撮影点の地上座標を (X_0, Y_0, Z_0) 、また x 軸、 y 軸および z 軸の周りの写真の回転角をそれぞれ ω 、 ϕ および κ とする。

一方、2点間の距離を l_{ij} として、写真座標および距離に対する各残差をそれぞれ v_{xi}, v_{yi}, v_{zi} 、また、各基準点に対する残差を v_{x0}, v_{y0}, v_{z0} とすると距離の測定値を考慮した同時調整における各補正量は次の関数 G_0 を最小とする値として求められた²⁾。

$$G_0 = \{ [p_0(v_{xi}^2 + v_{yi}^2)] + [p_1 v_{ii}^2] + [p_2(v_{xi}^2 + v_{yi}^2 + v_{zi}^2)] \} \quad (1)$$

ただし、 $[\]$; ガウスの総和記号

p_0 ; 共線条件式に対する重み

p_1 ; 辺条件式に対する重み

p_2 ; 基準点に対する重み

一方、GPSから得られる撮影点の各地上座標に対する残差を、それぞれ v_{x0}, v_{y0}, v_{z0} とする。また、上記の p_0, p_1, p_2 の各重みのほかに撮影点に対する重みを p_3 とすると結局この場合の各補正量は次の関数 G_1 を最小とする値として求めることができる。

$$G_1 = \{ [p_0(v_{xi}^2 + v_{yi}^2)] + [p_1 v_{ii}^2] + [p_2(v_{xi}^2 + v_{yi}^2 + v_{zi}^2)] + [p_3(v_{x0}^2 + v_{y0}^2 + v_{z0}^2)] \} \quad (2)$$

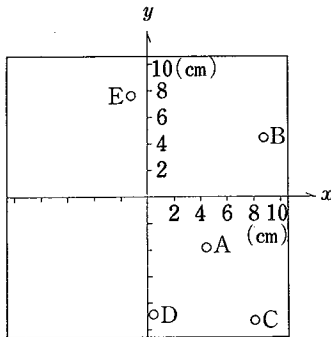
3. シミュレーションモデル

本研究で使用したシミュレーションデータは測量に用いられた例をもとに理論値を求め、さらにランダム誤差を与えて作成したものである。また、研究の対象となる地形モデルは、図-1とする。

一方、表-1~3に基準点の真値、観測値、写真座標、

表一 1 基準点の地上座標および写真座標

| 基準点 | 地 上 座 標 | | | | | 写 真 座 標 | | |
|-----|------------|------------------|-----------|------------|----------------|---------|----------|----------|
| | X_0 (m) | 真 値 Y_0 (m) | Z_0 (m) | X (m) | 観測値 Y (m) | Z (m) | x (mm) | y (mm) |
| A | -13615.222 | -30414.893 | 85.292 | -13615.230 | -30414.890 | 85.270 | 43.904 | -38.124 |
| B | -13392.607 | -30265.466 | 36.820 | -13392.609 | -30265.476 | 36.826 | 87.126 | 44.361 |
| C | -13586.767 | -30619.308 | 36.251 | -13586.772 | -30619.301 | 36.238 | 79.763 | -93.777 |
| D | -13779.863 | -30512.109 | 37.345 | -13779.877 | -30512.115 | 37.315 | 4.279 | -89.571 |
| E | -13642.382 | -30113.646 | 63.152 | -13642.360 | -30113.660 | 63.180 | -13.429 | 56.145 |



図一 1 基準点の配置

表一 2 外部標定要素の真値

| | |
|----------------------------|-------------------------------|
| $X_0 = -13673.473\text{m}$ | $\omega = 0^\circ 14' 23.7''$ |
| $Y_0 = -30270.038$ | $\phi = -0 15 22.1$ |
| $Z_0 = 660.029$ | $\kappa = 25 50 4.0$ |

表一 3 測線の深さ

| 測 線 | 測定値 (m) |
|-----|---------|
| AB | 272.467 |
| AC | 212.133 |
| AD | 197.108 |
| AE | 303.280 |

外部標定要素の真値および距離の測定値を示す。なお、真値および測定値等は以下のようにして定めた。

まず、写真座標は正しいものとして単写真標定を行い、各写真の外部標定要素を求める。次に、先に定めた5点に対する3次元座標を算出し、これを各基準点に対する理論上の真値とする。なお、最初に与えられた各座標値は観測値とし、また単写真標定より算出された値を外部標定要素の観測値とする。

一方、各基準点の理論上の真値を用いて算出される外部標定要素および距離の各値をそれぞれの理論上の真値とする。また、距離の測定値は理論上の真値に各距離の標準偏差に従った正規乱数を加算したものとする。

4. 調 整 結 果

地上測量の測定値として距離だけを考慮した同時調整法では写真上に少なくとも3点の基準点が必要であった²⁾。しかし、距離のほかに鉛直角観測により各測点の標高も既知であるとするならば、次の3つの場合でも各測点の3次元座標を算出できることを示した³⁾。

- 1) 基準点の数が2点の場合 (図一 2 (a))。
- 2) 基準点が1点存在し、さらに基準点から測点中の任意の1点に対する定位が行われた場合 (図一 2 (b))。
- 3) 基準点が1点存在する場合で、基準点の3次元座標を任意に (0, 0, 0) とした場合 (図一 2 (c))。

ところで、GPSにより撮影点の地上座標が既知 (誤差を含む) となった場合には、距離の測定値だけでも上記の各場合に対して写真の標定および測点の3次元座標の算出が可能であると思われる。

そこで、本報告では3次元座標が既知である5点 (A, B, C, D, E) の内、基準点数を3とする場合には点A, B, Cを基準点とし、基準点数2の場合には点A, Bを基準点および基準点数1の場合には点Aを基準点とし他の点は座標が未知である測点とした。

なお、本報告では写真座標および測距に用いた測定器の精度の違いにより共線条件式に対する重みを1000および辺条件式に対する重みを1とした。また、基準点および撮影点に対する重みは便宜上1とした。それらの結果を表一 4 に示す。

また、表一 4 (a) は本報告で用いた図一 1 のモデルに対して距離の測定値だけを考慮した前報の単写真標定付き同時調整法の結果 (基準点数3) を示したものである。

一方、外部標定要素の値と真値との誤差を、前報の結果³⁾ と合わせて示したものが図一 3 である。

これらの図、表より以下のことが理解される。

- 1) GPSから得られる撮影点の地上座標と距離の測定値とを用いた同時調整法によれば、写真上に基準点が少なくとも1点あれば、単写真からでも部標定要素と測点の3次元座標とを求めることができる。

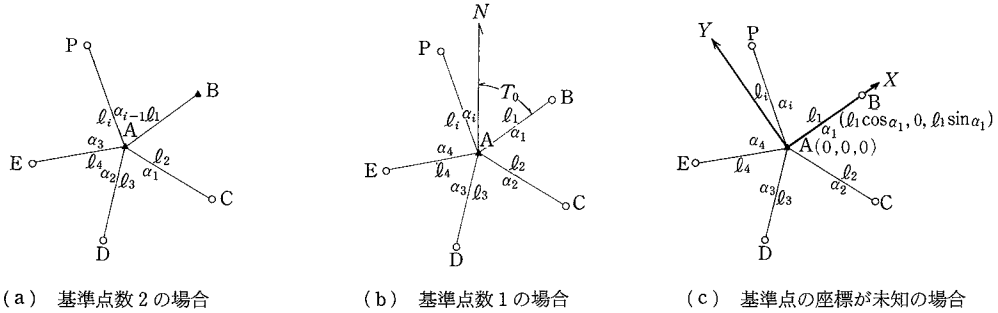


図-2 距離と鉛直角とを測定した場合の同時調整法

表-4 (a) 距離だけを考慮した場合

| | mdx (m) | mdy (m) | mdz (m) |
|-------------|-----------|-----------|-----------|
| 最大誤差 | 0.031 | 0.036 | 0.156 |
| 平均誤差 | 0.013 | 0.010 | 0.058 |
| 逐次近似計算の平均回数 | 6 | | |
| 距離の平均誤差 | 0.006 (m) | | |

(b) GPSを考慮した場合 (基準点数3の場合)

| | mdx (m) | mdy (m) | mdz (m) |
|-------------|-----------|-----------|-----------|
| 最大誤差 | 0.030 | 0.053 | 0.029 |
| 平均誤差 | 0.015 | 0.014 | 0.016 |
| 逐次近似計算の平均回数 | 6 | | |
| 距離の平均誤差 | 0.005 (m) | | |

(c) GPSを考慮した場合 (基準点数2の場合)

| | mdx (m) | mdy (m) | mdz (m) |
|-------------|-----------|-----------|-----------|
| 最大誤差 | 0.031 | 0.037 | 0.056 |
| 平均誤差 | 0.019 | 0.014 | 0.026 |
| 逐次近似計算の平均回数 | 5 | | |
| 距離の平均誤差 | 0.002 (m) | | |

(d) GPSを考慮した場合 (基準点数1の場合)

| | mdx (m) | mdy (m) | mdz (m) |
|-------------|---------------|-----------|-----------|
| 最大誤差 | 0.116 | 0.138 | 0.032 |
| 平均誤差 | 0.076 | 0.055 | 0.015 |
| 逐次近似計算の平均回数 | 5 | | |
| 距離の平均誤差 | 0.0000007 (m) | | |

- 2) GPSを考慮した基準点数が2の場合の同時調整法より得られる平面座標の精度は基準点数が3の従来の同時調整法の結果と同程度である。
- 3) GPSを考慮した同時調整法における高さ方向の精度は比較的基準点数に左右されない。また従来の同時調整法の結果と比べて非常に良い結果である。
- 4) 撮影点の地上座標の精度は基準点数に左右されない。

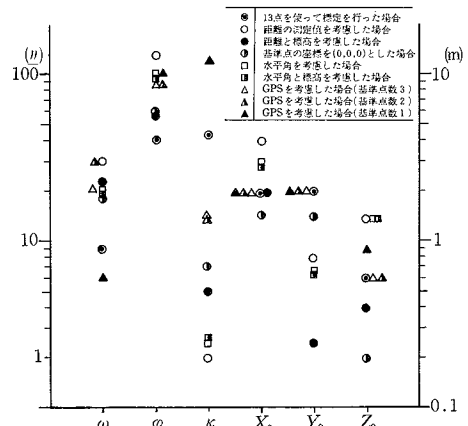


図-3 外部標定要素の精度

5) GPSを考慮した同時調整法によれば基準点の数が僅かに1点でも13点の基準点を使ったセルフキャリブレーション付き単写真標定と同程度の精度で外部標定要素を求めることができる。

5. 同時調整法に対するGPSの評価

前節において、GPSから得られる撮影点の地上座標の精度が基準点と同程度であるならば、GPSを考慮した同時調整法により基準点数の削減および地上測定の簡素化が可能であることが示された。

ところで、一般に1点測位法に対する精度は相対測位法より悪いことが知られている。

そこで、本報告では撮影点の精度と同時調整法の結果とを比較することによりGPSの同時調整法への応用の実現性を検討する。

なお、計算は図-1のモデルに対して以下の点を考慮して行うものとする。

- 1) 誤差は撮影点の各地上座標にそれぞれ必ず含まれているものとする。
- 2) 誤差の大きさは1, 5, 10, 50および100mの5通り

研 究 速 報

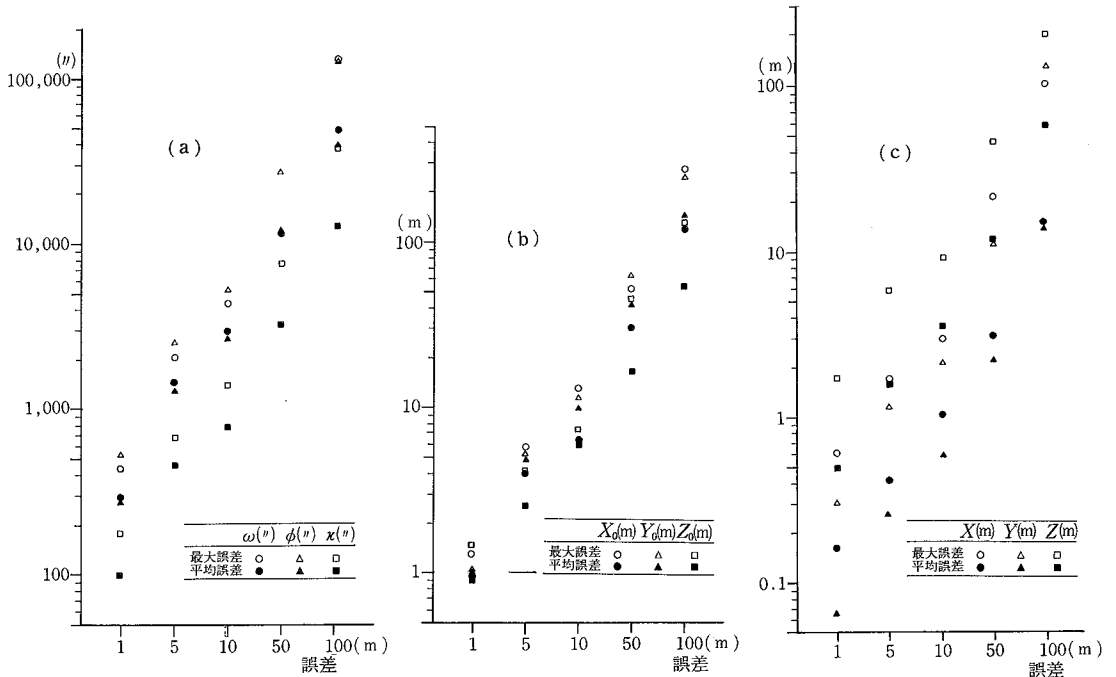


図-4 同時調整方法に対するGPSの評価

とする。

- 3) 誤差の方向は (+, +, +), (+, +, -), (+, -, +), (+, -, -), (-, +, +), (-, +, -), (-, -, +), (-, -, -) の8通りとする。
- 4) 数cmの誤差が含まれているものとする基準点に対する重みを1として、誤差の2乗に反比例する量を撮影点に対する重みと定める。
- 5) 2点A, Bを基準点とする。

上記の結果を示した図-4 ((a), (b), (c)) より以下のことが理解される。

- 1) 撮影点のXおよびY座標の精度は同時調整法により僅かに改善される程度であり、最初に仮定した誤差が大きく減少されることはない。
- 2) 撮影点のZ座標の精度に対しては同時調整法に対する効果が顕著に認められる。
- 3) 測点の地上座標、特に平面座標の精度は撮影点に含まれる誤差の1割程度の値で求められることがわかった。

6. 結 語

本報告では距離および写真測量の測定値と、さらにGPSにより得られる測定値とを同時に調整する方法の開発を行った。その結果以下のことが明らかになった。

- 1) 距離の測定値以外にGPSにより得られる測定値を用いることにより写真上に基準点が少なくとも1点存

在すれば、単写真からでも外部標定要素と測点の3次元座標が求められることがわかった。

- 2) GPSを考慮した同時調整法の結果はGPSから得られる撮影点の精度に左右され、地上基準点の精度と同程度の精度で撮影点の値が得られるならば基準点数の削減および測量に対する省力化からも優れた調整方法であると思われる。

7. 今後の課題

GPSは現在開発中のシステムであり、最終的にはどの程度の精度が得られるのかは今のところ不明である。

ところで、本報告で示したとおり撮影点の精度に対して測点の平面座標の精度はかなり良い傾向を示すことが確かめられた。今後はこの特徴に着目してGPSを取り入れた同時調整法の実用化を検討する。

(1987年5月29日受理)

参 考 文 献

- 1) 近津博文・村井俊治：距離測定を制約条件にした空中三角測量，昭和61年度秋学期学術講演会論文集，日本写真測量学会，pp. 1~4, 1986
- 2) 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3），生産研究，VOL. 39, No 1, pp. 21~24, 1987
- 3) 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4），生産研究，VOL. 39, No 3, pp. 35~38, 1987