

〔特別講演〕

写真測量による地形図作成

建設省国土地理院 平井 雄

設計から管理にいたる建設事業のいたるところで地図が使われております。それらの地図の大部分は空中写真測量という手法で作られております。ここでは、写真測量の手法によって、空中写真から地形図が作られる過程の概要を御紹介いたします。

1. 再現の原理

地形図はいうまでもなく、地表の3次元的な形状を表わしたものです。一方、写真は被写体の表面の2次元的な記録でしかありません。したがって、2次元的な記録である写真から、いかにして、被写体形状の3次元的な情報を得るかということがまず問題になります。

この問題は2次元の写真を2枚使うことで解決されます。つまり、 $2 \times 2 = 4$ で3を間に合わせます。 $2 \times 2 = 4$ といいましたが、この4の中には、重複が1つあるのでちょうど3になります。

したがって、3次元計測の写真測量では、同一被写体を撮った、異なった2枚の写真を必要といたします。例えば、空中写真測量で使われる空中写真は、図1に示すように、お互いに60%程度重複しながら順々に撮られている。

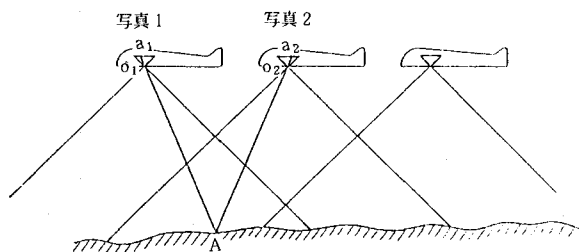


図1 写真測量用空中写真の撮影

この重なり合った部分を実体部、共通の実体部をもつ1組の写真をステレオグラムと呼ぶ。

つまり、写真測量では、ステレオグラムを使って、実体部の3次元計測を行なう訳である。

空中写真の実体部にある点は、少なくとも2つの写真上に像点をもっている。例えば、図1に示される地上点Aは、レンズO₁を通して、写真1上の点a₁に、レンズO₂によって、写真2上の点a₂に像を結んでいる。

いま、こうして撮影されたフィルムを現像し、撮影されたときの状態でカメラに載せ、撮影された地点にそのままどしたらどうなるかを考えてみよう。

光は同一媒体の中をそのまま逆に進む性質をもっているので、写真1上の点a₁を出てO₁を通った光は、撮影時とは逆にO₁Aの路を通して進む。写真2上の点a₂を出た光も同じようにO₂Aの路をたどり、両者は、被写体上の点Aでお互いに交わる。

実体部上のすべての点について同じことがいえるので、写真1と写真2から出た対応する光束の交点の集合は被写体の表面と全く一致する。この交点の集合はモデルと呼ばれる。

これまでの話をまとめると次のようになる。すなわち「撮影時の状態がそのまま再現されれば、対応する光束の交点の集合は、被写体の表面の形状と完全に一致する形状をもつモデルを形造る」

この考え方は「再現の原理」Reconstruction principleと呼ばれている。

形状が一致すれば、そのうえで測った、座標、距離、比高等は、当然地上測量で得たものと一致する。

このように、「再現の原理」によってモデルを作り、そのモデル上で必要な量、形等を計測し、地上測量に代えようというのが写真測量である。

2. 「再現の原理」の実現

再現の原理によれば、1組の実体写真対：ステレオグラムを撮ったときの状態を再現すれば、被写体と合同のモデルを作ることができるが、実際に言葉通りに撮影時の状態を再現することは不可能である。空中写真の場合は、カメラが一つしかないし、また同じものが2つあったにせよ、何十キログラムのものを数千メートルの上空に静止させておくことも、また、そこから出てきた弱い光を地上で観測することもできない。

したがって、再現の原理を使うにしても、何とか、我々の手におえるような形に変えて適用する方法をみつけないければならない。

そのための最も簡単な方法が図2に示されている。

図2は、図1から飛行機を消したもので、図2の写真1、写真2はそれぞれ図1の写真1、写真2に対応している。したがって、撮影時の状態がそのまま再現されて作られたモデルM-1は、被写体と全く合同の形状をしている。

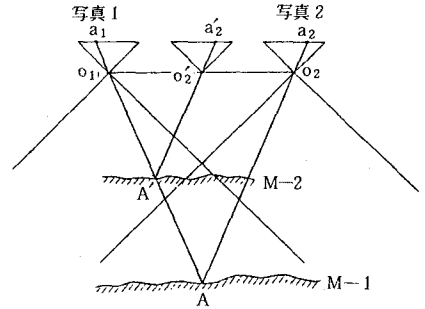


図2 撮影状態の再現

2つの投影中心レンズ O_1 と O_2 を結ぶ $\overline{O_1 O_2}$ は空中基線または単に基線と呼ばれているが、いま、右側のカメラを空間での傾きを変えずに、この基線に沿って、 O_1 と O_2 の中間の点 O'_2 まで動かしたとしてみよう。A点の写真2上の像点 a_2 も平行移動して a'_2 に来る。 a'_2 と O'_2 を結ぶ直線は、カメラの傾きを変えなかったで、初めの状態に対応する光束 $\overline{O_1 A}$ と $\overline{O_2 A}$ の作った平面 $O_1 O_2 A$ 上にある。したがって、 $\overline{a'_2 O'_2}$ と $\overline{a_1 O_1}$ とは空間で交わる。この交点を A' とすると、 $\triangle O_1 A' O'_2$ と $\triangle O_1 A O_2$ とは相似三角形で、かつ $\overline{O_1 O'_2} = \frac{1}{2} \overline{O_1 O_2}$ なので、 $\overline{O_1 A'} = \frac{1}{2} \overline{O_1 A}$ になる。 O_1 と新しいモデルM-2上の点を結ぶ線分についてはすべてこの関係が成り立つので、結局、モデルM-2は、最初のモデルM-1と相似で大きさが1/2ということになる。

このように、基線に沿って、傾きを変えずに、2つのカメラを近づけることによって、任意の縮尺のモデルを作ることができる。両方のカメラがぶつかり合うとそれ以上近づけることができないので、その場合は、ちょっとした工夫が必要となるが、いずれにせよ、こうして、作りたい地図と同じ縮尺のモデルを作ることができる。その上で必要なものの位置を計測し、プロットしていけば、求める地形図が得られることになる。

この操作を連続的に行なうための装置を図化機という。

3. 再現の原理の数式による表現

写真はレンズを投影中心とする中心投影による像として扱うことができます。地表の点の位置を表わす測地座標は、回転楕円体の上につくられた座標系ですが、極く狭い範囲なら空中の直交座標で近似することができます。したがって、原点の平行移動を別とすれば、地上座標と写真座標とは図3に示すような関係として表わすことができます。

図3では、地上点の位置は、投影中心を原点とし、Z軸は原点を通る下方鉛直方向に、X軸は、原点と隣りの写真の投影中心を含む鉛直面上でZ軸に直交するように、Y軸は、X軸とZ軸に直交する方向にとった直交座標系で表わしてあります。写真上の点の位置は、投影中心から写真面に下した垂線と写真面との交点を原点に、写真のふちに平行にとった x 軸、 y 軸によって作られる

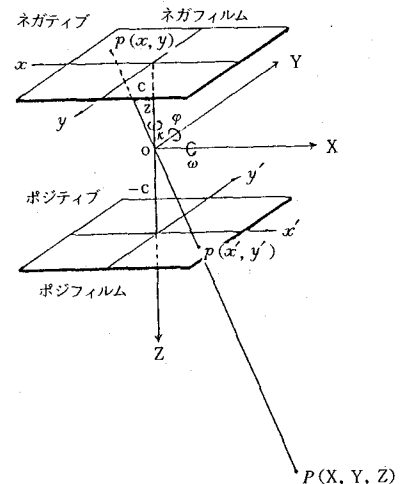


図3 地上座標と写真座標

直交座標系で表わされます。

カメラの光軸が完全に鉛直方向を向いた状態でとられた写真を鉛直写真といいますが、鉛直写真の写真座標 (x_1, y_1) と地上点の座標 (X, Y, Z) の間には、投影中心と写真面の間の距離を C とすると、図から明らかなように

$$\frac{x_1}{C} = \frac{X}{Z}, \quad \frac{y_1}{C} = \frac{Y}{Z} \quad \dots\dots\dots (1)$$

という簡単な関係が成り立ちます。

隣りの写真も同じ高さで撮られた鉛直写真で、2つの投影中心間の距離（基線長）を B とすると、隣りの写真の投影中心も X 軸にあり、かつ、隣りの写真の投影中心を原点とする地上点の座標は、 X 方向に B だけ平行移動させたものになるから、隣りの写真の写真座標 (x_2, y_2) と地上点の座標 (X, Y, Z) の間には

$$\frac{x_2}{C} = \frac{(X-B)}{Z}, \quad \frac{y_2}{C} = \frac{Y}{Z} \quad \dots\dots\dots (2)$$

の関係が成り立つ。 $y_1 = y_2$ であるから、独立な変数は、 $x_1, x_2, y_1 (= y_2)$ の3つで、これから地上点の座標 X, Y, Z が求められることになる。

カメラが傾いた状態で撮影された写真上の点の位置と、地上点の位置の関係は、もう少し複雑で、座標系を図3のようにとり、回転を ω, φ, κ の順に行なうとして、式1に相当する関係が

$$\begin{aligned} \frac{X}{Z} &= \frac{q_{11} \cdot x + q_{12} \cdot y + q_{10} \cdot c}{q_{31} \cdot x + q_{32} \cdot y + q_{30} \cdot c} \\ \frac{Y}{Z} &= \frac{q_{21} \cdot x + q_{22} \cdot y + q_{20} \cdot c}{q_{31} \cdot x + q_{32} \cdot y + q_{30} \cdot c} \end{aligned}$$

ただし、

$$\begin{aligned} q_{11} &= -\sin \kappa \sin \omega \sin \varphi + \cos \kappa \cos \varphi \\ q_{12} &= -\cos \kappa \sin \omega \sin \varphi - \sin \kappa \cos \varphi \\ q_{10} &= \cos \omega \sin \varphi \\ q_{21} &= \sin \kappa \cos \omega \\ q_{22} &= \cos \kappa \cos \omega \\ q_{20} &= \sin \omega \\ q_{31} &= -\sin \kappa \sin \omega \cos \varphi - \cos \kappa \sin \varphi \\ q_{32} &= -\cos \kappa \sin \omega \cos \varphi + \sin \kappa \sin \varphi \\ q_{30} &= \cos \omega \cos \varphi \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (3)$$

で表わされる。

更に原点の移動 X_0, Y_0, Z_0 および x_h, y_h を考慮すると、写真座標と地上座標の関係を与える一般式が得られる。即ち、

$$\begin{aligned} \frac{X-X_0}{Z-Z_0} &= \frac{q_{11}(x-x_h) + q_{12}(y-y_h) + q_{10} \cdot c}{q_{31}(x-x_h) + q_{32}(y-y_h) + q_{30} \cdot c} \\ \frac{Y-Y_0}{Z-Z_0} &= \frac{q_{21}(x-x_h) + q_{22}(y-y_h) + q_{20} \cdot c}{q_{31}(x-x_h) + q_{32}(y-y_h) + q_{30} \cdot c} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (4)$$

4. 撮影時の状態の再現

再現の原理のところで説明したように、写真測量では、撮影時の状態を再現してモデルを作り、それを使って地

図を描いたり、点の位置を求めたりするので、写真測量による地形図作成作業は、撮影時の状態を再現する工程とできあがったモデル上を走査する工程に大別されることになる。前者は標定、後者は図化と呼ばれる。

撮影時の状態を再現する標定は、別ないい方をすれば、撮影時のカメラの状態を示すパラメーターの正しい値を決定する操作だということができる。1つのカメラの状態は、投影中心の位置(B_x, B_y, B_z)とカメラの傾き(κ, ω, φ)の6つのパラメーターで表わされるので、1対のカメラの状態を決める標定では、結局、いかに12の要素を決めるかということが問題になる。この12の要素は同時に決めることもできるが、通常、相互標定、絶対標定の2つの段階に分けて決定される。

相互標定では、対応する光束はすべて空間で交差するという条件を使って、2つのカメラの相対的位置が決められ、

絶対標定では、地上座標の分かった基準点を使ってモデルの地上座標系への接続が行なわれる。

対応する光束の交差の条件は、幾つかの方法で表わすことができるが、ここでは、共面条件を使う方法を紹介しよう。

共面条件というのは、図4に示すように、対応する光束が同一平面内にあるという条件である。

地上座標系 $X-Y-Z$ によって表わした、2つの投影中心及び2つの対応する像点の座標を(X_0^1, Y_0^1, Z_0^1), (X_0^2, Y_0^2, Z_0^2), (X_1, Y_1, Z_1), (X_2, Y_2, Z_2)とすると、共面条件は、

$$\begin{vmatrix} X_0^1 & Y_0^1 & Z_0^1 & 1 \\ X_0^2 & Y_0^2 & Z_0^2 & 1 \\ X_1 & Y_1 & Z_1 & 1 \\ X_2 & Y_2 & Z_2 & 1 \end{vmatrix} = 0 \quad \dots\dots\dots (5)$$

という形で表わされる。

いま2つのカメラの相対的位置を決めるのに、図5に示すように、第1カメラの位置を基準にして第2カメラの位置を決めることとしよう。

基線 X 方向の要素 B_x を単位とし、 $b_y = B_y/B_x$,
 $b_z = B_z/B_x$ とすると、(5)の共面条件は、

$$\begin{vmatrix} 1 & b_y & b_z \\ X_1 & Y_1 & Z_1 \\ X_2 & Y_2 & Z_2 \end{vmatrix} = 0 \quad \dots\dots\dots (6)$$

と書きかえることができる。ここで、(X_1, Y_1, Z_1), (X_2, Y_2, Z_2)は、

$$\begin{pmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ -c \end{pmatrix}$$

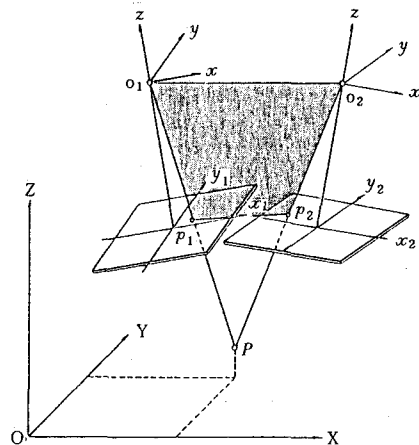


図4 共面条件

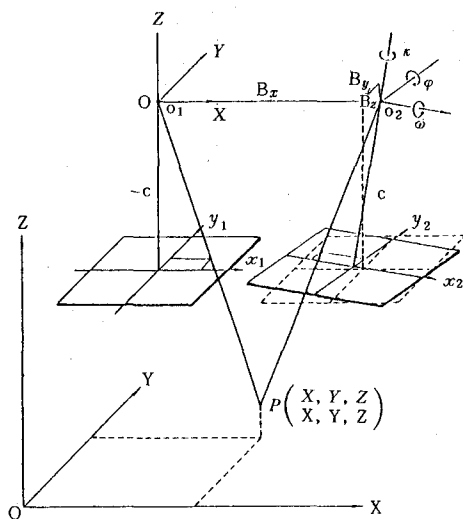


図5 第2カメラの接続

$$\begin{pmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & -\sin \omega \\ 0 & \sin \omega & \cos \omega \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \varphi & 0 & \sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \kappa & -\sin \kappa & 0 \\ \sin \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ -c \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 \\ b_x \\ b_y \end{pmatrix}$$

である。

決定すべき値は、 b_y , b_z , κ , φ , ω の5つなので、5つ以上の点について(6)式を作り、それを解いて求める値を決めればよい。

絶対標定では、相互標定によって作られたモデル座標を地上座標に変換するため、モデルの3次元での回転、原点の移動及び縮尺の決定が行なわれ、残りの7つの要素が決められる。

そのためには、当然、地上座標とモデル座標の両方が分かっている点が必要となる。写真測量の平板測量等の地上測量に対する利点は、経済性と迅速性にあるが、もし、各モデルの絶対標定に必要なすべての点の地上座標を地上測量によって得るとすれば、その利点の大半が消えてしまう。その解決のため空中三角測量が行なわれる。

5. 空中三角測量

相互標定で説明したように、一方のカメラ位置が正しく分かっているれば、もう一つのカメラ位置に関する6つの要素のうち5つは地上基準点なしで決めることができる。

したがって、図6にあるように、何らかの方法で、最初のモデルの絶対標定ができ、したがって、地表に対するカメラ1, 2の正しい位置が再現できれば、3番のカメラの位置は、カメラ2を動かさずに、カメラ3の要素で相互標定を行ない、更に、2番目のモデル縮尺を1番目のモデル縮尺に合わせることで決定できる。

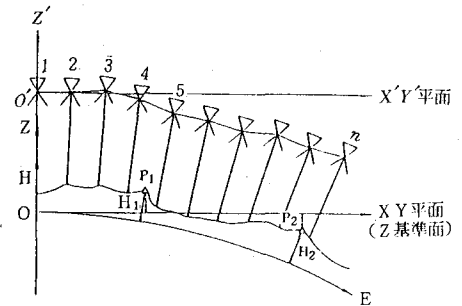


図6 空中三角測量

この操作を次々に続けていけば、原理的には幾らでも接続し、正しいカメラ位置を再現していくことができる。

その結果、1つ1つのモデルの代わりに、地表の形状と類似の形をした細長いストリップと呼ばれるものができあがる。そのストリップを適当な方法で地上座標に変換してやれば、ストリップ内の任意の点の地上座標が得られることになる。

この空中三角測量は、三角測量の後方交会を繰り返して行なうようなものである。後方交会は誤差の影響が大きい、それを繰り返してであるから、空中三角測量では観測誤差の影響の累積による歪みが非常に大きくなる。

したがって、空中三角測量では、誤差の調整をいかに行なうかが大きな問題になる。他の測量における誤差調整の場合と同様、空中三角測量の誤差の調整も最小自乗法を適用して行なわれる。

最小自乗法では、観測回数が多いほど、また、合理的な条件方程式の多いほど、得られた値の誤差の中は小さくなる。そこで、できるだけ、多くの条件を観測値の間に設定して最小自乗法を適用しようとする試みが行なわれる。一般に地形図作成にあたっては、単独のコースではなく、お互いに重なり合う部分をもつ平行したコースを幾つも撮影し、ある地域を実本部をもつ空中写真で覆うのが普通である。この幾つかのコースを一まとめにブロックと呼ぶ。空中三角測量の調整計算では、条件を増やすため、共通の点では同じ座標をもつといったような条件を作って、ブロック全体を一度に調整することがしばしば行なわれる。これをブロック調整と呼ぶ。

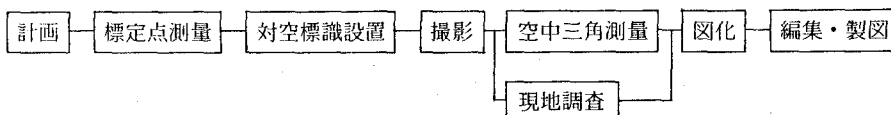
いずれにせよ、観測誤差によっておこされた歪みを補正する訳であるが、歪みを直す対象を、コース単位にとるか、モデル単位にとるか、光束そのものを対象とするかによって、多項式法、独立モデル法、バンドル法に分けられる。

最小自乗法は、結局のところ観測方程式の逆行列を計算することに帰するが、条件が増えるとその2乗に比例して計算量が増加する。したがって、上記調整法のどの方法をとるかは、要求精度、地上基準点数とその配置等を考慮して適切に決めることが必要である。

6. 地形図作成の工程

空中写真は、地表の形態について教えるだけでなく、地表にあるもの、更には、それから推測できる、例えば土壌だとか表層地質といったことについての非常に多くの情報をもっているし、能力があれば読みとることができる。しかしながら、地形図には、写真から読みとれる以外の事柄についても表示することが必要なので、それらについては、現地へ行って直接調査することが必要である。

このような各作業を工程順に並べると、地形図作成作業の工程は次のようになる。



写真測量では、写真上での計測が中心なので、その良否がすべての成果の良否を決定する。したがって、最初の計画段階における撮影計画の適否が、すべての作業が適切に行なわれるかどうかの鍵を握っている。

撮影計画では、使用カメラ、撮影縮尺または高度、撮影コース、使用航空機、写真材料、写真の重複度、補助器材の使用の有無、撮影時期等を定めるが、それらは、撮影の目的、撮影地域の状態、要求される精度、基準点の配置、後続作業で使用する図化機等を考慮して決められる。

これらの中でも、写真縮尺は決定的な要素であるが、それは写真測量の精度と要求される精度を比べて決められる。バンドル調整法で点の位置を決める場合には、写真上の測定精度が数マイクロメートルにできるといわれているが、地形図作成の場合は、50マイクロメートル以上と考えておくのが無難であろう。

7. 測量分野における技術革新

以上、今日では、多少古典的ともなった写真測量による地図作成工程について説明したが、測量の世界でも、他の技術分野同様、電子工学、計算機分野での急激な発展の影響をうけて技術革新がすすんでいる。

そのうちで思いつくものをあげると、

- ・エレクトロタキオメーターによる距離、角度の同時観測と観測値の自動記録
- ・上記データの小型計算機による処理
- ・上記結果の自動製図機による図形表示
- ・各種光波測距儀の性能の飛躍的向上
- ・地図編集・製図分野へのコンピューター・グラフィックス技術の導入
- ・人工衛星測地技術の発展
- ・VLBI等宇宙技術の測量分野への応用
- ・DTMその他数値地図関連技術の発展
- ・解析図化機の発展

等がある。講演では、これらのものについて簡単に触れていく。