

講 座

新 し い 測 量 4.

航空写真測量と路線計画

丸 安 隆 和*
中 村 英 夫**

1. はしがき

航空写真測量は道路、鉄道などの路線計画、路線設計のための地形測量の方法としてきわめて効果的なものであることはいまでは衆知である。しかも最近になって航空写真測量は単に地形図を描く方法としてだけではなく、さらに、電子計算機と組み合わせて路線計画、路線設計を能率化し、合理化する一つの手段として積極的な意味をもつようになってきた。

したがって現在においては、道路、鉄道などの計画技術者にとって航空写真測量の原理、あるいは利用法の知識は不可欠のものとなってきたと思われる。1963年にワシントンで行なわれた第9回パンアメリカン道路会議では道路工学にたずさわるもの、および道路工学科の学生に航空写真測量および航空写真判読の講義および演習を課すべきであると決議しているが、これはその一つのあらわれといえるだろう。

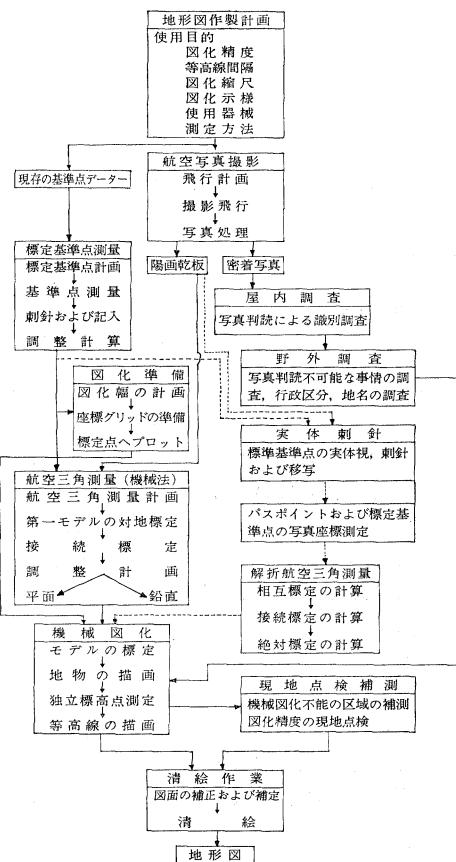
本講座では、はじめに、道路、鉄道の計画、設計に航空写真測量を用いる際、路線計画技術者が知らねばならない事項について、特にその計画の基礎となる事項および検査の基準などについて述べ、その後航空写真を用いて路線計画および路線設計を能率的に行なう方法について説明した。

2. 路線設計のための地形図作製

航空写真測量によって地形図を作製するためには、大きくわけて三つの段階の作業が必要である。

- ① 航空写真撮影：つぎの段階の作業に最も適した写真を撮影する。
- ② 基 準 点：地上測量による標定基準点設置および航空三角測量による標定基準点の増設。
- ③ 図 化：図化機による地形、地物の描画。この作業をさらに細かくわけて、その流れにしたがって表わしてみると図一1のようになる。

図一1 地形図作製の工程



特に路線設計に用いる場合を念頭においたとき、地形図化に至る一連の作業過程と必要事項についてつぎに述べることにする。

(1) 図化計画の基礎

地形図作製計画の基礎は、その地形図の必要精度、すなわち等高線間隔と平面位置の精度である。

等高線間隔は第一にはその地形図の使用目的によって当然変わるべきものである。使用目的とはこの場合

- ① 初期の路線調査
- ② 比較線を検討する予備設計
- ③ 工事実施のための設計

の三段階の作業を意味する。また等高線間隔は、等高線による地形の近似の性質から考えて、その地形の複雑さの強度によって異なったものであるべきである。一般的にいって等高線間隔は表一に示すような値とすればよいであろう。

平面位置に関しては、設計に際して地物の位置をこの地形図から直接物差で測りとることを考えると、その必要精度は図上で 0.5 mm 以下であることが必要である。

* 正会員 工博 東京大学教授 生産技術研究所
** 正会員 東京大学生産技術研究所

表-1 使用目的と等高線間隔 (単位:m)

	平坦地	丘陵地	山岳地
初期調査	2.0	3.0	5.0
計画設計	1.0	2.0	3.0
実施設計	0.5	1.0	2.0

これを地図縮尺により実長に換算すれば表-2のようになる。

つぎに撮影高度の決定である。撮影高度は低いほど

地図の精度を増すが、一方写真枚数を増加させ、モデル数を増し、ひいては地上基準点の数をふやさねばならない。ところが写真測量の作業能率は、このモデル数が増せばこれに逆比例的に減ずるものであるから、経費の増大をきたすことになる。したがって撮影高度の決定は、地形図の必要とする精度をその目的に照らして決めたのち、慎重に行なわなければならない。

撮影高度と図化精度との関係は撮影条件、使用機械などによって異なるので、いちがいにはいえないが経験上表-3のような数値と考えればよいだろう。

表-3 撮影高度と図化精度

撮影高度 (m)	点の中等誤差		等高線の中等誤差
	平面位置	標高	
1 200	±0.6	±0.3	±(0.3+0.3 tg α)
1 800	±1.0	±0.5	±(0.5+0.5 tg α)
2 800	±1.5	±0.7	±(0.7+0.7 tg α)
3 800	±2.0	±1.0	±(1.0+2 tg α)

(2) 標定基準点測量

航空三角測量および図化作業のために標定基準点が必要である。これらの点は三角測量、多角測量および水準測量によりその平面位置および標高を測定する標定基準点は平均して1モデルにつき1点の割合で必要である。また標高値のみを有する標高基準点は撮影高度の約1/2の距離ごとに設置しなければならない。とくに実施設計を目的とする場合には、これら基準点の数はさらに増すことがのぞましい。標定基準点には対空標識を設置し、写真上に明瞭に写るようにする。またこの標定点は、のちに道路中心線を設置するとき利用しやすい位置に設けるのがよい。標定基準点測量の精度はつぎの値を標準とすればよいであろう。

表-4 基準点測量の許容誤差

	図化縮尺	中等誤差(cm)
平面位置	1/5 000	±40
	1/3 000~1/2 000	±30
	1/1 000	±20
標高	1/5 000	±40
	1/3 000~1/2 000	±30
	1/1 000	±20

(3) 撮影

撮影計画が定まり、標高基準点への対空標識設置が完了すれば写真撮影が行なわれる。撮影時期としては表面が草木におおわれた所の測定精度をあげるため落葉期をえらぶことが望ましい。路線計画用の撮影には、画角の大きい $f=15\text{ cm}$ の RMK 15/23, RC 8 などのカメラを用いる。

撮影に際して、撮影業者に指示すべき事項としては、

- ① 使用するカメラの種類、画面距離
- ② 撮影コース、飛行高度、撮影基準面高、写真縮尺、撮影開始地点および終了地点、各コース長
- ③ 撮影開始予定日、および終了予定日

などが必要である。

(4) 空中三角測量

空中三角測量とは、地上測量によりすでに求めた標定基準点にもとづいて、図化作業に必要な写真的標定点を増設し、その座標および標高を決定する作業であって、これは一級図化機を用いて機械的に行なう方法とコンパレーターと電子計算機によりこれを解析的に行なう方法がある。この二つの方法のどちらを用いてもその成果には大差はないが、能率的には電子計算機を用いる解析法の方がまさる。この作業の検査は、標定基準点の残存誤差を調べることによって行なう。その制限値の標準としては表-5に示す値をとればよい。

表-5 標定基準点の許容残存誤差

	図化縮尺	1/5 000	1/3 000~1/2 000	1/1 000
標高	中等誤差	±1.2	±0.6	±0.3
	最大誤差	2.0	1.0	±0.5
平面位置	中等誤差	±0.9	±0.5	±0.3
	最大誤差	1.5	0.8	0.4

また、隣接コース間の接合は、タイポイントの座標の較差によって検査する。その制限基準としては平面位置は飛行高度の 0.25 %, 標高は 0.30 % 程度とすればよい。

(5) 図化作業

写真から地形図を作製する図化作業にわが国で一般に用いられている図化機械としては

マルチ プレックス、ケルシュ プロッター、ウィルド A-8、ウィルド A-7、ツァイス C-8

などがある。図化機の性能として、撮影高度 H と最小等高線間隔 $4h$ との比（これを C ファクターという）で表わすことがある。

$$H = C \cdot 4h$$

この値は撮影条件、地形などによって異なるが、普通マルチ プレックス、ケルシュ プロッターで 500 ~ 600, A-8, A-7, C-8 で 1 200 ~ 2 000 である。

したがって路線計画の場合には、小縮尺の図化にはケルシュ プロッターやマルチ プレックスでもよいが、大

縮尺のものには A-8 程度以上のものを使う必要がある。

図化精度を規定する方法として、つぎの二とおりの表わし方がある。

第一は許容誤差の値として規定するものであって、普通完成図において

「平面位置の 90 % が図上 0.5 mm 以下の誤差で、1 mm を越えるものがあつてはならない。標高の 90 % は等高線間隔の 1/2 以内の誤差で等高線間隔を越えるものがあつてはならない」。

第二は中等誤差、確率誤差、80% 誤差、90% 誤差などできめる方法である。通常、中等誤差でいって

平面位置の中等誤差 図上 ±0.5 mm

標 高 ±3/10 000 H m

程度とする。ここで H は撮影高度である。

この地形図の精度は、できる限り多くの等高線にまじわるようなトラバース測量を行ない、それにそつて縦断水準測量を行なつて点検する。

地形図上には独立標高点を記入しておく。独立標高点は予定道路と交差する道路、鉄道、堤防などや丘、山、峠などに配置し、重要な点については水準測量によりその他の点については写真測量により、図化作業の際に測定する。

(6) 現地補測および調査

深い森林地帯や陰影のために写真測量による図化作業が困難である区域については現地での補測を行なわなければならぬ。このことは道路設計を目的とする場合特に大切である。

また、写真上判読困難な事項や特殊地形あるいは行政区画、地名などについては現地調査により資料を収集してその成果を地形図上に記入する。

3. 航空写真測量と電子計算機による道路設計

道路設計のための地形図作成と航空写真測量をとり入れることはここ数年かなりの普及をみてきた。また、道路設計の各部分に電子計算機を導入する試みも行なわれてきている。しかしこれらはこれまでの道路設計の作業の一部に個々に航空写真測量ないしは電子計算機がとり入れられたにすぎなかつたが、最近になってこの二つの技術を直接組み合わせ一つの作業システムを作り出し道路設計作業を合理化する研究が各国で進められ多くの成果を上げようとしている。そこで、ここではこの新しい方法の概要をのべることにする。

(1) この方法の特質

ここにのべる設計法は、その作業過程において、これまでの方法とは異なつたいくつかの特徴をもつてゐる。これを列挙するとおよそつぎのような点があげられる。

① 航空写真を最大限に利用し、地形や土地利用その

他の情報を航空写真測量または航空写真判読により得て、現地での調査測量をできるだけ減らそうとしていること。

② 多くの費用、時間を要するものである地形図化を必要最小限にとどめ航空写真の実体視でこれにかえていること。

③ 航空写真測量により得た地形データは、デジタルな形で座標記録装置を通じて直接電子計算機に記憶させ、その間において人間の介在する必要をなくしていること。

④ 平面線形、縦断線形の計算から土工量などの数量計算までの一連の設計計算を電子計算機により迅速、正確に行なえること。

⑤ 横断面などの設計図や透視図、土積曲線図などの製図には自動図化機を用い、電子計算機の出力データがただちに製図できること。

(2) 地形データの測定と表現方法

地形データを得る方法としては

① 現地測量 ② 航空写真測量

の二つの方法が考えられる。この二つはその目的に応じて使い分けなければならない。各点の位置をきわめて高い精度で求める必要のあるときには、三角測量、水準測量などの現地測量を行なうことが必要である。しかし一点一点についてそれほど高い精度を必要とせず、全体的な均一な精度がのぞまれる地形測量には、航空写真測量によるのがその経済性、能率性から考えて得策である。したがつて道路設計を目的とする場合、最終的な実施設計の縦断測量あるいは特に詳細な測定を必要とする断面測量以外には航空写真測量により地形データを求めるのがよいだろう。

こうして測定した地形データを表現する形式として

① アナログ的な表現 ② デジタル的な表現

が考えられる。アナログ表現とは図紙上などに相似のモデルとして地形を表わすものであつて、その代表的な例は等高線地図であり、断面図などもこれに當る。またデジタル表現とは地形をデジタル量すなわち三次元座標値で表わすものであつて、計画道路の通過予定地帯全域をランダムに配置した点の座標値の集まりとして表現する場合 (Digital Terrain Model) や、各横断線上に配置した点の座標値の集まりとして表わす場合などがある。アナログ表現は感覚的に地形をとらえるのに適しているが、その反面、これから土工量などを算出する場合、一度これを物差しやプランメータなどを用いて図上で測定し、計算する必要がある。デジタル表現はこの手数と不正確さをのぞくため、地形測量に際して直接数値で地形を表わし、さん孔テープや磁気テープに記録し、以後の土工量計算などのデータ処理を電子計算機で一挙に行

なおうとするものである。ただディジタル表現では、一見して地形を把握することができないから、この点を地形図、写真の実体視、フォトマップなどで補う必要がある。

以上にのべてきた二つの測量法とその結果の二通りの表現法を組み合わせてそれらの特徴と利用を考えてみるとつきのようになる。

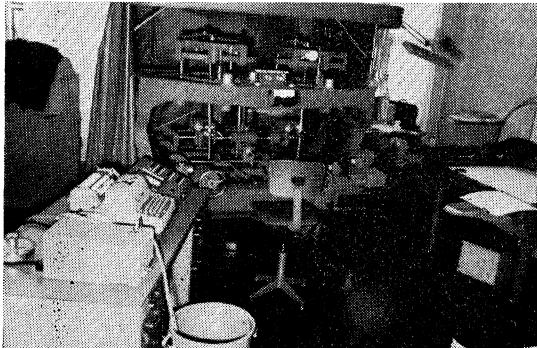
a) 地上測量のアナログ表現 これは経済的にも能率的にも b) にはるかに劣るものであり、精度的にも b) と同等程度にしか期待できないから深い森林地帯のように航空測量の不可能な場所にのみ限定される。

b) 航空測量のアナログ表現 ペーパー ロケーションを目的とする場合、その均一な精度、経済性より考えて、また感覚的に地形、地物を把握することができる点からはこの方法が最も適しているといえる。

c) 地上測量のデジタル表現 高い精度で点の測定をする場合にはこの方法以外には考えられない。また中心線の水準測量をこの方法で行ない d) の方法で求めた横断測量結果をこの数値にもとづいて補正すれば航空写真測量による横断測量の精度を向上させることができる。

d) 航空測量のデジタル表現 これは航空写真を図化機を用いて実体測定した結果を数値で表わすものであり、図化機に連動する電子的な自動記録装置を取りつけてはじめて効果の期待できるものである(写真-1)。この方法の利点は一つには点の測定であるためアナログ表現の等高線の場合にくらべて約2倍の精度の向上が期待できることであり、いま一つにはこの測定結果を用いて行なう設計作業に際して、このデータを直接電子計算機に与えることができる点である。したがってたとえば予備設計の段階において多くの比較路線を検討する場合、幅広い帶状の地帯の地形を Digital Terrain Model として測定しておけば幾本の比較線についてもその横断面をいちいち測定することなく、この Model より内そりにより、ただちに各路線についての縦横断地形が求まり、ひき続き工事数量計算までを電子計算機により遂行

写真-1 座標記録装置の付属した実体図化機 A-7



することが可能になる。また実施設計においても、すでに決められた中心線にそってその各測点における横断面を実体測定し、さん孔テープに記録し、その後に続く工事数量計算までのデータ処理を電子計算機に行なわせることができる。地上での中心線縦断測量が完了した後においてはその結果を電子計算機に与え、さきに測定し記録した横断面の補正をすれば、わずかの計算時間でより高い精度で設計を完了することができる。

ここでこのような各方法によって測定した地形データより土工量を求めた場合の精度についてのカリフォルニア州道路局の行なった実験結果を紹介しておくことにしよう。

- ① 航空写真測量による横断測定結果を用いた場合(航空写真測量のデジタル表現)の土工量の誤差は 2.5% である。
- ② 等高線間隔 2 ft の航空写真測量による地形図より横断地形データをうる場合(航空写真測量のアナログ表現)，それより得た土工量の誤差は 2.5~3% である。
- ③ 航空写真測量により直接得た横断測定結果を現地での縦断測量結果にもとづいて補正するとき(航空写真測量のデジタル表現を地上測量のデジタル表現により補正)，それより得た土工量の誤差は 0.5% で，これは普通の地上での横断測量より得た土工量より精度は高い。

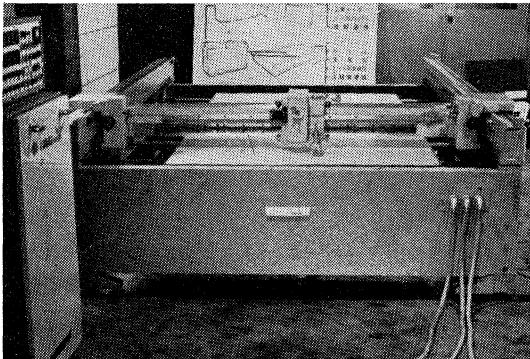
以上述べてきた道路設計のための地形データの測定法、表現法を、その目的に応じてまとめてみると、つきのような使いわけをするのが正確かつ合理的な設計を経済的、能率的に行なうのに最もぞましいと考えられる。

- ① 初期調査：既存の 1/10 000~1/50 000 地形図
- ② 予備設計：航空写真(縮尺 1/10 000~1/20 000)の実体視またはフォトマップによる路線選定および Digital Terrain Model による比較路線の比較設計
- ③ 実施設計：航空写真(縮尺 1/5 000~1/10 000)から作製する 1/1 000 地形図上での平面線形検討、航空写真の実体測定による横断測量、地上での縦断水準測量

(3) 電子計算機による設計

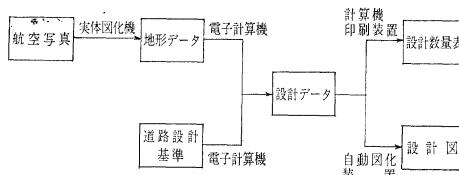
上に述べたようにして得た地形データをもとにして、各段階の設計に応じたデータ処理作業を電子計算機を最大限に利用し、可能な限り人間の手による作業を排して行なう。その際電子計算機の判断、計算とならんで最終的な出力データを再びアナログ形式に表わす過程すなわち製図作業の自動化を図ることも重要である。この目的に応ずる自動描画装置も最近開発され、実用化されはじめできている。写真-2 に示す装置はその一例であって、

写真-2 自動描画装置 Drafter Numericon



電子計算機の出力テープを読み込み、このデータにもとづいてパルスモータを駆動させ、ペンまたはケガキ針で紙またはスクライビングシートに図を描くものである。そのペン移動速度は 600~1 200 mm/min、描画精度は ± 0.05 mm である。この設計法では、航空写真測量と電子データ処理装置は 図-2 に示すように組み合わせられ航空写真の有する情報は道路設計図へと変換される。

図-2 データの変換



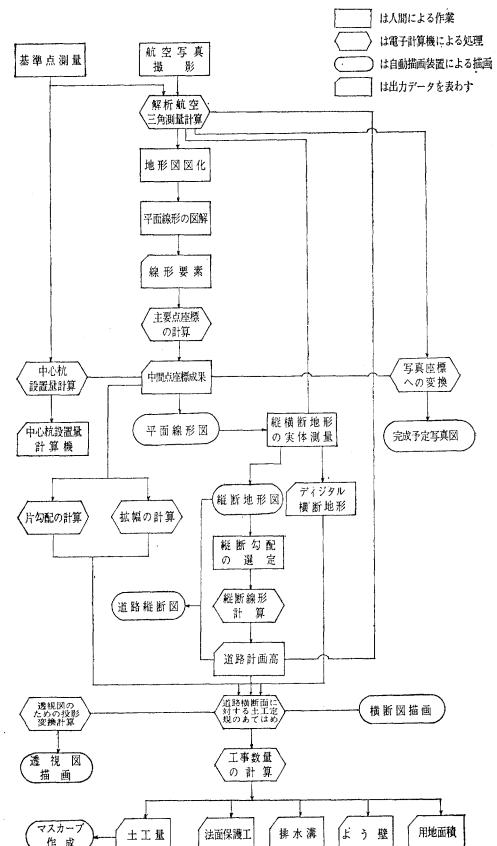
この過程において電子計算機の行なう計算ないしはデータ処理としてはつぎのようなものがあげられる。

- ① 三角網、トラバース網の計算
 - ② 航空三角測量の計算
 - ③ Digital Terrain Model の作製
 - ④ 平面線形の調整計算、中間測点の座標計算
 - ⑤ 縦断線形計算
 - ⑥ 片勾配のすりつけ計算、舗装縁高の計算
 - ⑦ 拡幅量計算
 - ⑧ 縦横断地形の内そう
 - ⑨ 道路横断面に対する土工定規のあてはめ
 - ⑩ 土工量、張芝面積、排水側溝、擁壁などの数量計算
 - ⑪ 土積曲線作製計算、運土距離の計算
 - ⑫ 中心線設置量の計算
 - ⑬ 透視図のための投影変換
 - ⑭ 航空写真上へ実体的に道路を描き入れるための射影変換
 - ⑮ 各種図面描画のための縮尺化
- 自動描画装置を用いて図化するものとしては
- ① 平面線形図
 - ② 縦断図
 - ③ 横断図
 - ④ 土積曲線図
 - ⑤ のり面展開図
 - ⑥ 透視図
 - ⑦ 航空写真上への道路完成予定図
- などがある。

これら各計算の相互間、および各計算と自動図化の間は十分有機的に結びつけ、隘路になる過程を減らし、また一つの計算の出力データがただちに他の計算の入力デ

ータとして用いることができるようなプログラムおよびシステムが必要である。この有機的な結合、二重手間になる計算を排除する必要性はしばしば鉄道操車場における貨車の入れ換え作業の場合を例にとって説明されている。このような考え方方にしたがってプログラムした実施設計のためのシステムの一例を示したのが 図-3 である。

図-3 作業の流れ
(実施設計)



4. むすび

以上述べてきた航空写真測量と電子計算機による設計法は、これまでの方法とくらべて約 $\frac{2}{3}$ の時間で約 $\frac{1}{2}$ の人数でしかも同程度ないしはそれ以下の費用で設計作業を完了することができるといわれている。また、間接的には計画路線の詳細な検討による工事費の節減、技術者の有効な配置などが可能になり、その効果を考えればそれより得られる利益はきわめて大きいものであるといえよう。そしてこの方法は道路設計のみならず、鉄道、水路にも応用できるものである。今後のいっそうの研究、開発とその活用がまたれるやうである。