

航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-861

航空写真による航空機地上追跡用レーダの較正

矢澤 健司 ・ 稲垣 敏治
小野 孝次 ・ 岡 遠一

1985年6月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

目 次

記 号	1
第 1 章 序 論	4
第 2 章 レーダの概要	5
第 3 章 航空写真によるレーダの較正方法	11
第 4 章 飛行実験	18
第 5 章 結果と検討	20
第 6 章 結 論	27
あとがき	28
引用文献	28
付 録 A	29
付 録 B	34
付 録 C	36

航空写真による航空機地上追跡用レーダの校正*

矢澤 健 司** 稲垣 敏 治**

小野 孝 次** 岡 遠 一**

Calibration of an On-Ground Aircraft Tracking Radar

by Aerial Photogrammetry

by

Kenji Yazawa, Toshiharu Inagaki, Takatsugu Ono, Toichi Oka

ABSTRACT

This work was carried out in order to calibrate an on-ground tracking radar for obtaining the accurate position of an aircraft during flight testing. The calibration was performed by aerial photogrammetry for estimating the position and the attitude of an aircraft compared with synchronized data from tracking radar. The accuracy of aerial photogrammetry using a non-metric camera, was less than 0.2% of the flight altitude from ground. The accuracy corresponds to an angle of 0.01 degree at 1000m height and 10km distance from the radar. It is comparable to the resolution of the radar.

記 号			
AZ	レーダ極座標の方位角(北を 0°)	F	焦点距離
$\hat{AZ}(t)$	校正された方位角	H	レーダ直角座標の高度(= $-Z$)
AZ_{P_j}	j 番目の写真から推定した方位角	H_i	i 番目の標点の高度
C	位置及び姿勢角の被推定ベクトル [$X_0, Y_0, Z_0, \phi, \theta, \psi$]	H_a	航空機の高度
C_0	C の初期値ベクトル	H_r	滑走路を原点とした高度
C_{PE}	地上座標系からカメラ座標系への変換マトリックス	H_{r_0}	滑走路を原点としたときのレーダ位置の高度
E_i	i 番目の地上の標点	J	評価関数
EL	レーダ極座標の仰角(水平を 0°)	J_0	初期値 C_0 における評価関数
$\hat{EL}(t)$	校正された仰角	L_i	i 番目の標点の緯度
EL_{P_j}	j 番目の写真から推定した仰角	$L_x(m,n)$	印画紙上の基準点(m, n)から($m, n+1$)までのX軸の長さ
		$L_y(m,n)$	印画紙上の基準点(m, n)から($m+1, n$)までのY軸の長さ
		L_0	ローカル座標系の原点の緯度
		$M_x(m,n)$	基準フィルム上の基準点(m, n)から($m, n+1$)までのX軸の長さ

*昭和60年3月5日 受付

**飛行実験部

$M_y(m,n)$	基準フィルムの基準点 (m, n) から $(m+1, n)$ までの Y 軸の長さ	X	レーダ直角座標の X 軸 (北を正)
M_0	17 座標系の縮小率	X_i	i 番目の標点の地上の X 座標
N	標点の数又は、地球の東西方向の半径	X_{e_i}	地球座標系での i 番目の標点の X 座標
O	投影中心	X_{e_0}	地球座標系でのローカル座標系の原点の X 座標
P_c	光学中心 (主点) のフィルム座標	X_{m_0}	17 座標系の原点の赤道からの経線長
P_i	i 番目の標点を印画紙に投影した点	X_{m_i}	ガウス・クリュゲル図法の i 番目の標点の X 座標
P_{e_i}	i 番目の地上の標点	$X'^2_{m_i}$	17 座標系でのレーダを原点とした i 番目の標点の X 座標
P_{n_i}	i 番目の標点をネガフィルムに投影した点	X_{m_R}	17 座標系でのレーダの X 座標
P'_{n_i}	大気屈折のあるときに i 番目の標点をネガフィルムに投影された点	X_r	滑走路端を原点にした直角座標の X 軸
P_{x_i}	i 番目の標点のフィルム上の X 座標	X_{r_0}	滑走路端を原点にした直角座標のレーダ位置の X 座標
P'_{x_i}	機械的中心から測った i 番目の標点 X 座標	X_{P_i}	i 番目の標点のカメラ座標系の X 座標
\hat{P}_{x_i}	P_{x_i} の推定値	X_0	カメラの投影点の X 座標
PX	光学中心 (主点) からの P_{x_i} のベクトル	XL	基準フィルム内のローカルな X 軸
PX'	機械中心からの P'_{x_i} のマトリックス	X_{1_i}	P_i から YL 軸に下した垂線の長さ
$P_{x_{ij}}$	モンテカルロシミュレーションの j 回目, i 番目のフィルム座標 x 軸データ	X_{2_i}	X_{1_i} に縮尺率をかけたフィルム上の長さ
P_{y_i}	i 番目の標点のフィルム上の Y 座標	X_{3_i}	標点 i の基準フィルム座標の X 座標
P'_{y_i}	機械的中心から測った i 番目の標点 Y 座標	Y	レーダ直角座標の Y 軸 (東を正)
\hat{P}_{y_i}	P_{y_i} の推定値	Y_i	i 番目の標点の地上の Y 座標
$P_{y_{ij}}$	モンテカルロシミュレーションの j 回目, i 番目のフィルム座標 y 軸データ	Y_{e_i}	地球座標系での i 番目の標点の Y 座標
RAN_i	標準偏差が 1 である i 番目の正規乱数値	Y_{e_0}	地球座標系でのローカル座標系の原点の Y 座標
$R(m,n)$	基準フィルム (m, n) 番目の基準点	Y_{m_0}	17 座標系の原点の Y 座標 (=0)
$R_x(m,n)$	基準フィルム (m, n) 番目の X 座標	Y_{m_i}	ガウス・クリュゲル図法による i 番目の標点の Y 座標
$R_y(m,n)$	基準フィルム (m, n) 番目の Y 座標	Y'_{m_i}	17 座標系でのレーダ位置を原点にした i 番目の標点の Y 座標
SR	レーダとトランスポンダ間の距離	Y_{m_R}	17 座標系でのレーダの Y 座標
$\hat{SR}(t)$	較正されたスラントレンジ	Y_r	滑走路端を原点にした直角座標の Y 軸
SR_{P_i}	写真から推定したスラントレンジ	Y_{P_i}	i 番目の標点のカメラ座標系の Y 座標
$S_x(m,n)$	基準点 (m, n) と $(m, n+1)$ 間の印画紙の縮尺率	Y_0	カメラの投影点の Y 座標
$S_y(m,n)$	基準点 (m, n) と $(m+1, n)$ 間の印画紙の縮尺率	YL	基準フィルムのローカルな Y 軸
T	レーダの遅延時間	Y_{1_i}	標点 i から XL 軸に下した垂線の長さ
W_i	重みマトリックス (2*2)	Y_{2_i}	Y_{1_i} に縮尺率をかけたフィルム上の長さ
w_{x_i}	$W_i(1, 1)$ の値	Y_{3_i}	標点 i の基準フィルム座標の Y 座標
w_{y_i}	$W_i(2, 2)$ の値	Z	レーダ直角座標の Z 軸 (下を正)
		Z_i	i 番目の標点の地上の Z 座標
		Z_{e_i}	地球座標系での i 番目の標点の Z 座標

Z_{e_0}	地球座標系でのローカル座標系の原点の Z座標	λ_0	ローカル座標系の原点の経度
Z_{p_i}	i 番目の標点のカメラ座標系の Z 座標	λ_i	i 番目の標点の経度
Z_0	カメラの投影点の Z 座標	ϵ_i	残差ベクトル $[\epsilon_{x_i}, \epsilon_{y_i}]^T$
a	地球の赤道半径	ϵ_{x_i}	P_{x_i} の測定値と推定値の残差
a_n	レンズ歪補正	ϵ_{y_i}	P_{y_i} の測定値と推定値の残差
b_{mn}	地図歪補正	θ	カメラのピッチ角
c_{mn}	座標変換マトリクスの各要素	θ_a	航空機のピッチ角
d_{mn}	地球-ローカル座標変換マトリクスの各 要素	θ_i	x_0 を基準にした x_i 迄の角度
d_r	大気屈折補正量	σ_F	焦点距離 F の標準偏差
e	地球の回転楕円体の離心率	σ_{p_x}	P_x の推定値と測定値の差の標準偏差
f	楕円体偏平率	σ_{p_y}	P_y の推定値と測定値の差の標準偏差
i	標点の番号	τ_{TP}	トランスポンダの遅延時間
j	フィルムの番号	ϕ	カメラのバンク角
m	変換マトリクスの行番号	ϕ_a	航空機のバンク角
n	変換マトリクスの列番号	ϕ	カメラの方位角
r	フィルムの半径方向の長さ	ϕ_a	航空機の方位角
v	電波の速度	ϕ_R	基準フィルム座標系と測定フィルム座標 系の傾き
$\Sigma(\theta)$	レーダホーンアンテナの和信号	ϕ_r	滑走路の進入方位角
$\Delta(\theta)$	レーダホーンアンテナの差信号	$\psi_x(m,n)$	基準フィルム座標系に対するローカルな X 軸の傾き
$\Delta\phi$	カメラと航空機のバンク角取り付け偏差	$\psi_y(m,n)$	基準フィルム座標系に対するローカルな Y 軸の傾き
$\Delta\theta$	カメラと航空機のピッチ角取り付け偏差		
$\Delta\theta$	幾何学的中心から光学中心までの角度		
$\Delta\phi$	カメラと航空機の方位角取り付け偏差	$\frac{dJ}{d\Delta C}$	評価関数 J の ΔC による微分
ΔAZ	方位角補正量	$\frac{\partial J}{\partial C^T}$	評価関数 J の C^T による 1 次の傾斜結果は n 行ベクトルになる
ΔC	C の修正ベクトル	$\frac{\partial^2 J}{\partial C^T \partial C}$	評価関数 J の C による 2 次の傾斜, 結果 は n 行 n 列のマトリックスになる
ΔEL	仰角補正量	$\frac{\partial \epsilon_i}{\partial C^T}$	i 番目の標点の残差の C^T による 1 次の傾 斜, 結果は 2 行 n 列のマトリックスにな る
ΔB_i	地図座標系からローカル座標系への高度 の変換補正值	$\frac{\partial^2 \epsilon_i}{\partial C \partial C^T}$	i 番目の標点の残差 C による 2 次の傾斜, 結果は $2n$ 行 n 列のマトリックスになる
ΔSR	スラントレンジの補正量	$\frac{\partial \epsilon_i}{\partial X_0}$	i 番目の標点の残差の X_0 に対する傾斜
ΔX_i	地図座標系からローカル座標系への X 軸 の変換補正值	$\frac{\partial \epsilon_i}{\partial Y_0}$	i 番目の標点の残差の Y_0 に対する傾斜
ΔY_i	地図座標系からローカル座標系への Y 軸 の変換補正值	$\frac{\partial \epsilon_i}{\partial Z_0}$	i 番目の標点の残差の Z_0 に対する傾斜
ΔY_a	設定コースからの左右径路偏差		
ΔZ_a	設定コースからの上下径路偏差		
r_i	i 番目の標点のガウスクリュウゲル図法 における子午線収れん角		
κ_i	i 番目の標点のガウスクリュウゲル図法 における線歪角		

$\frac{\partial \epsilon_i}{\partial \phi}$	i 番目の標点の残差の ϕ に対する傾斜
$\frac{\partial \epsilon_i}{\partial \theta}$	i 番目の標点の残差の θ に対する傾斜
$\frac{\partial \epsilon_i}{\partial \psi}$	i 番目の標点の残差の ψ に対する傾斜
$\frac{\partial c_{mn}}{\partial \phi}$	座標変換マトリクスの各要素 ϕ に対する傾斜
$\frac{\partial c_{mn}}{\partial \theta}$	座標変換マトリクスの各要素 θ に対する傾斜
$\frac{\partial c_{mn}}{\partial \psi}$	座標変換マトリクスの各要素 ψ に対する傾斜

第 1 章 序 論

航空機の飛行実験では正確な位置情報が必要となる場合がある。特に、ターミナルエリア・ガイダンスのようにアプローチから接地までの実験を行なうには位置情報は欠かせないが、十分な精度を持ち、且つ実時間性を持っている装置は非常に限られてくる。

このような目的に使用できる装置としては、MLS¹⁾、GPS²⁾、追跡用レーダ⁴⁾等があるが、MLS と GPS は現在開発中又は軍事用として使われているため現時点においては使用できない。当所では比較の実績のある装置として航空機追跡用地上装置(以下、レーダと言う)を製作した。このレーダの特徴は、比較的精度が高く、移動、設置が容易である。その反面、同時に一機の追跡しかできないこと、又、ビーム幅がせまいため初期捕捉がむずかしいこと等の欠点がある。しかし、飛行試験用として使うため、この欠点はそれほど大きな障害にはならない。

追跡用レーダを使う場合、移動し設置した後にアライメント(較正)を行なわなければならない。レーダの精度は一般的にアンテナの指向性、S/N(ノイズ特性)、追従速度等によって決ってしまうが、レーダの持ちうる性能を最大限に使うためにはアライメントの精度が一番重要になってくる。

アライメントの方法としては次の三つが考えられる。

1) 遠方にある正確に位置がわかっている塔にトランスポンダ(第 2 章参照)を取り付けレーダアン

テナをトランスポンダアンテナに合わせ方位角、仰角及び距離を読み取る。その値と測量による値を比較し較正する。

ロ) 1)と同様に塔のトランスポンダにレーダを合わせ、同時にボアサイトスコープ(光学照準器)をトランスポンダアンテナに合わせレーダの電波軸と光学軸を合わせる。その後、夜間に恒星(北極星等)にボアサイトを合わせ、その時の恒星の位置から方位角、仰角を較正する。

ハ) トランスポンダを航空機に搭載し、レーダで追従しデータを記録する。同時に航空機から真下の航空写真を撮影し、航空写真測量により航空機の位置を推定する。この位置データを写真を撮影した同時刻のレーダデータと比較しレーダの較正を行なう。

イ) とロ) は適当な塔がある場合比較的容易にできる方法であるが、電波の地面反射の影響(マルチパス)をさけるため大きな仰角を必要となる。そのため高い塔が必要となり、どこでも行なえる方法ではない。ハ)の方法は航空写真測量を行なわなければならないが高度も高くとれ、距離も遠くできるので高い精度の較正を行なうことができる。又、この方法は実際に運用する空域で較正を行なうことができるのでマルチパスの影響もある程度打消すことが期待できる。

この他、人工衛星にトランスポンダが搭載されている場合(通信衛星等)には、ハ)と同様な較正を行なうことができる¹¹⁾

本報告書では航空写真測量によるレーダの較正方法を採用し、飛行試験を行ない実際にデータを解析しレーダの較正を行なった。又、航空写真測量の推定精度についても何種類かの方法によって調べた。特に、使ったカメラが非測定用のカメラであったので、焦点距離の推定及びレンズの歪特性についても検討する必要がある。又、フィルム座標の読み取りも専門的な装置を使わずに簡易な方法で必要な精度で読み取れるよう工夫した。飛行試験では動的なデータ例として、機上で気圧高度計及び 2 つの DME 局を受信し、レーダデータと比較した。以下レーダの概要、航空写真測量、飛行試験及び解析結果について述べる。

第2章 追跡用レーダの概要

製作された航空機追跡用レーダシステムは図2-1に示すように機上のトランスポンダ及び、地上の追跡用レーダシステムから成っている。表2-1に主要性能を示す。レーダデータは実時間処理用計算機によって直角座標に変換され磁気テープに記録されると共にテレメータ送信機によって機上受信機に送られコース偏差をパイロットに示すことも可能である。

表2-1 レーダ主要性能

項目	性能
1) 総合静止精度	
a) 測角精度	0.2 mil rms
b) 測距精度	5 m rms
2) 空中線型式	1.5mカセグレン型パラボラ空中線 (G=38 dB 以上)
3) 送信機周波数	9825 MHz
4) 送信機出力	10kW, 0.5 μsec 幅, 1 kHz
5) 受信感度	-92 dBm
6) 測角機分解能	0.1 mil
7) 測距機分解能	1 m
8) トランスポンダ	9875 MHz
周波数, 出力	1 kW

2.1 機上トランスポンダ

機上トランスポンダは地上レーダからパルス変調された9,825MHzの電波を受信し、これによりトランスポンダ内部のマグネトロンを駆動し9,875MHzの電波を地上に向けて発射する。受信周波数と送信周波数の違いは、トランスポンダ以外からの反射波による影響を避けるためのもので50MHz周波数をずらしてある。又、Xバンドの周波数帯を使っているので電界強度の減衰に注意を払わねばならない。特に、航空機が旋回等の運動を行なった時、翼等によってアンテナが隠れることをさけるために航空機胴体の下面と上面の両方にアンテナを取り付けて、受信感度が減衰したとき使用するアンテナを自動的に切り換えがなされるようにした。さらに、このトランスポンダの外部スイッチにより地上の追跡用レーダにパルスを送ることが出来る。このパルス信号は追跡用レーダのデータ(距離、仰角、方位角)と一緒に取り込まれるので飛行試験の際の機上で得られるデータ(高度、速度、姿勢角等)と追跡用レーダとの同期信号として用いることが出来る。

トランスポンダを使うこのような追跡用レーダではトランスポンダがレーダからの電波を受信してから地上に向けての電波の送信までに遅延時間が生じるので地上のレーダの測距部ではこれをオフセットとして取り除いている。

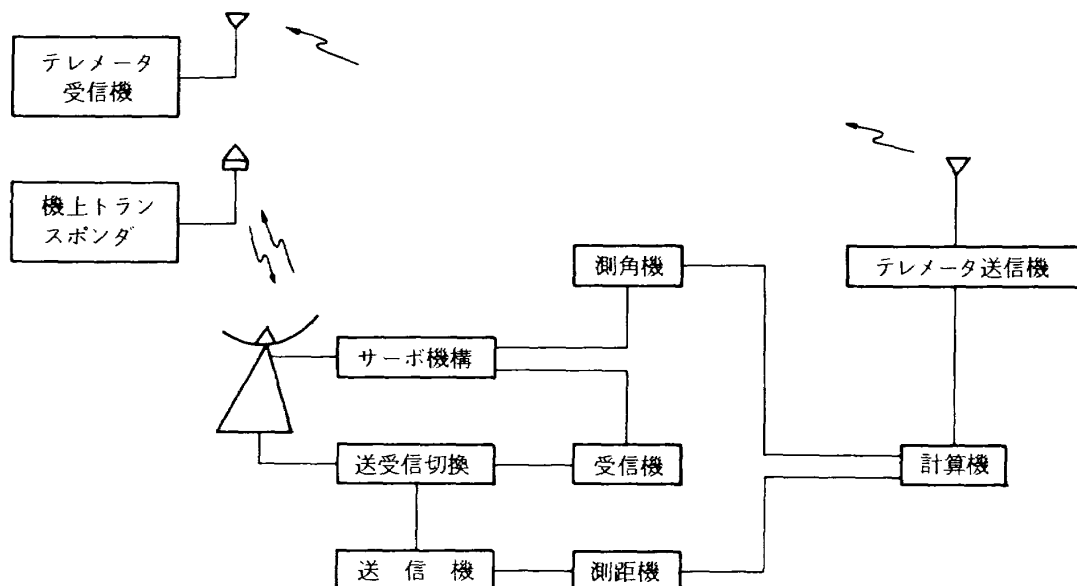


図2-1 航空機追跡用レーダシステム

2.2 地上レーダシステム

地上レーダシステムはサーボ機構により駆動されるパラボラアンテナ、送受信機及び測角・測距機から成っている。(図2-1参照)

トランスポンダからの電波を指向性の強いカセグレン型パラボラアンテナで受信する。この型のアンテナは図2-2(a)に示すように2つの反射鏡(回転放物面反射鏡, 回転双曲面反射鏡)と田の字型に配列された4つのホーンアンテナから成っている。

反射鏡は受信電波を図2-2(b)のように4つのホーンアンテナ, A, B, C, Dに収束させる。各ホーンアンテナに収束されたビームがあたる面積に比例した出力信号が得られる。図2-2(c)のように左右(又は上下)方向にアンテナ全体を振った場合, 受信信号のピークが左右(又は上下)にずれて表われる。このずれの角度はビーム幅にはほぼ一致している。4つのアンテナの信号を加算した信号を $\Sigma(\theta)$ とすると図2-2(d)のように0を中心とした1つのピークを持つ信号が得られる。左右方向の差信号 $\Delta(\theta)$ はホーンアンテナのAとCの和からBとDの和を減じたもので, 中心で急激に減衰する特性を持っており, 左右に二つのピークを持っている。 $\Sigma(\theta)$ に比べると $\Delta(\theta)$ の左側は $\Sigma(\theta)$ と同位相であるが右側はBとDの信号が勝って逆位相になっている。 $\Sigma(\theta)$ の信号に同期した半周期ごとにON-OFFするスイッチで $\Delta(\theta)$ の差信号を位相検波し, フィルタで搬送波を取りのぞくと, アンテナが右側にずれると正の電圧が, 左にずれると負の電圧が出力され図2-2(e)のようにアンテナのずれる角度に比例した検波出力が得られる。これは上下方向にアンテナがずれた場合も同様で $A+B-(C+D)$ の差信号を $\Sigma(\theta)$ の和信号を使って位相検波するとアンテナがずれた上下の角度に比例した出力電圧が得られる。

この信号をそれぞれ仰角サーボ及び方位角サーボに入力することによりアンテナを常に電波の入ってくる方向に向けることができる。角度検出は仰角, 方位角それぞれの軸に取り付けられた精, 粗2つのシンクロで取り出されシンクロ/デジタル変換機により16ビットのデジタル信号として指示器及び計算機インターフェースに出力されている。

一方, 測距装置は送信機から出力される9.8 GHz,

10 kWの0.5 μ secのパルスが1 msecおきにアンテナから発射され, 機上のトランスポンダの受信機を通り τ_{TP} (sec)の遅延時間ののち送信機から再び追跡用レーダアンテナに向かって電波が発射される。レーダとトランスポンダの直線距離を SR とし, 電波の速さを v とすればレーダが電波を発射して受信するまでの時間 T は次の式によって求まる。

$$T = 2SR/v + \tau_{TP} \quad (2-1)$$

(1)式から距離 SR は次のように求まる。

$$SR = v(T - \tau_{TP})/2 \quad (2-2)$$

このように送信から受信までの時間 T を測ることによって距離 SR を測定することができる。

2.3 データ処理システム

データ処理システムは図2-3のようにレーダからのデータをインターフェースを通してデータ処理用計算機に取り込む。計算機は実時間演算処理により磁気テープにレーダデータを書き込み, XYレコーダに航空機の軌跡を描かせ, ペンレコーダにその他のデータを出力する。又, レーダの極座標から直角座標の変換を行ない, 与えられた軌跡からのずれをテレメータによって航空機に送り, パイロットに示すこともできる。この計算機は汎用の計算機としても使うことができ20Mbyteのディスク, シリアルプリンター, CRTの入出力端末, 及びカードリーダーがある。又, データ処理用として16 CHのA/D変換器及びPCM解読器が接続されているので, A/D変換, PCM解読等のデータ処理装置としても使用することができる。

表2-2に計算機に取り込むデータを示す。測距(SR)と測角(EL, AZ)及びステータスは16 bitのデジタルデータとして取り込んでいる。 DSR , DEL 及び DAZ はサーボ機構の偏差電圧をA/D変換したもので, サーボの遅れを補正するために取り込んでいる。ステータス信号は表2-3のようにレーダの状態を示すもので応答速度の切換, マニュアル/オートモードの切換等の状態を表している。

ステータスのMSBには同期用信号ビットがあり機上のトランスポンダの同期用接点を閉じるとこのビットが0から1になるようになっている。

磁気テープにはこの他, 計算機内部の時刻データ及び直角座標に変換された X, Y, Z 座標及び, 計

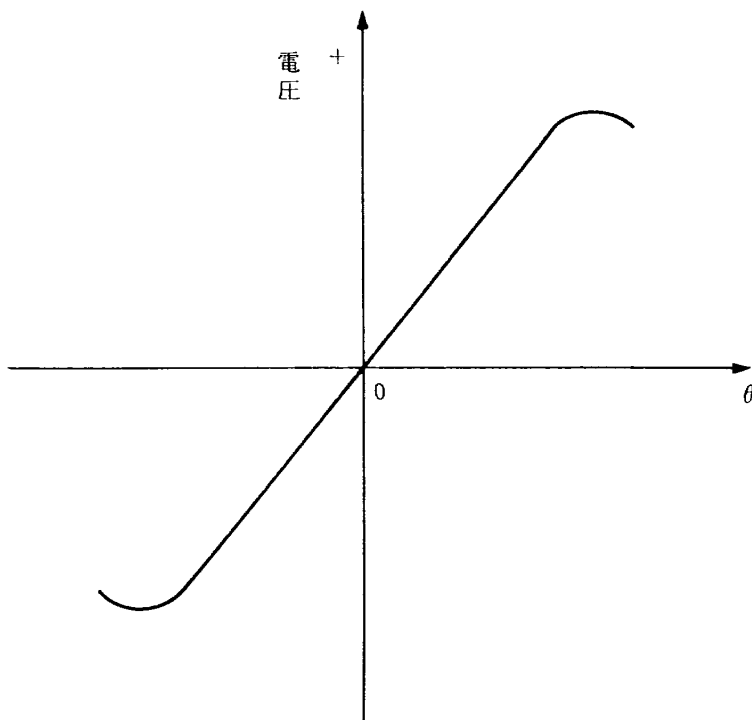
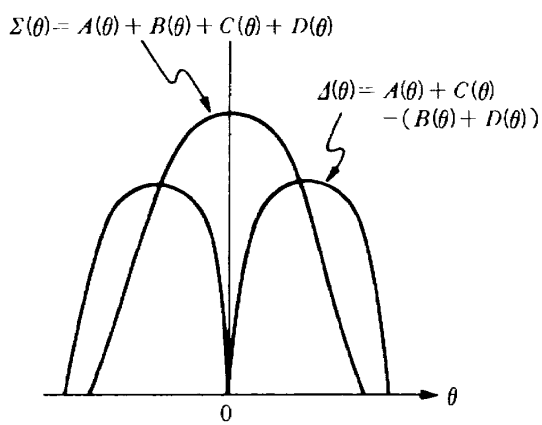
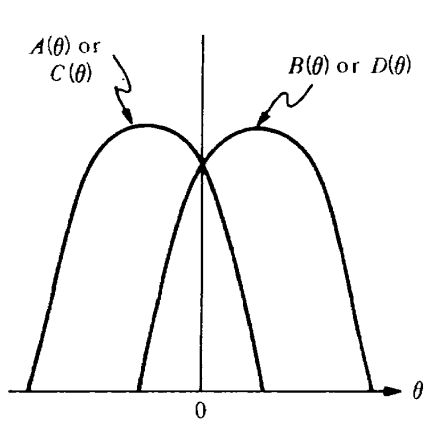
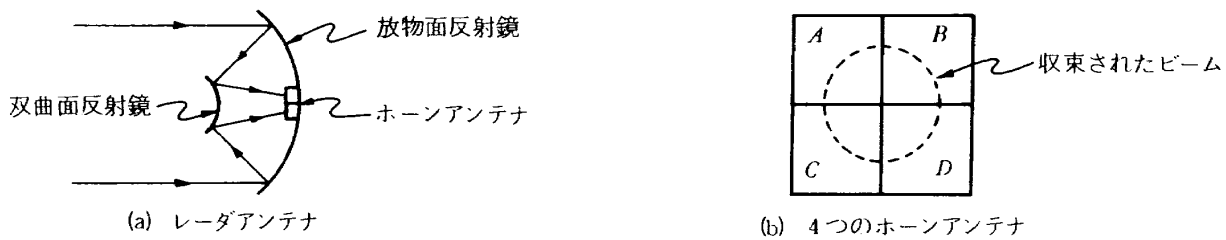


図2-2 レーダアンテナの構成と指向性

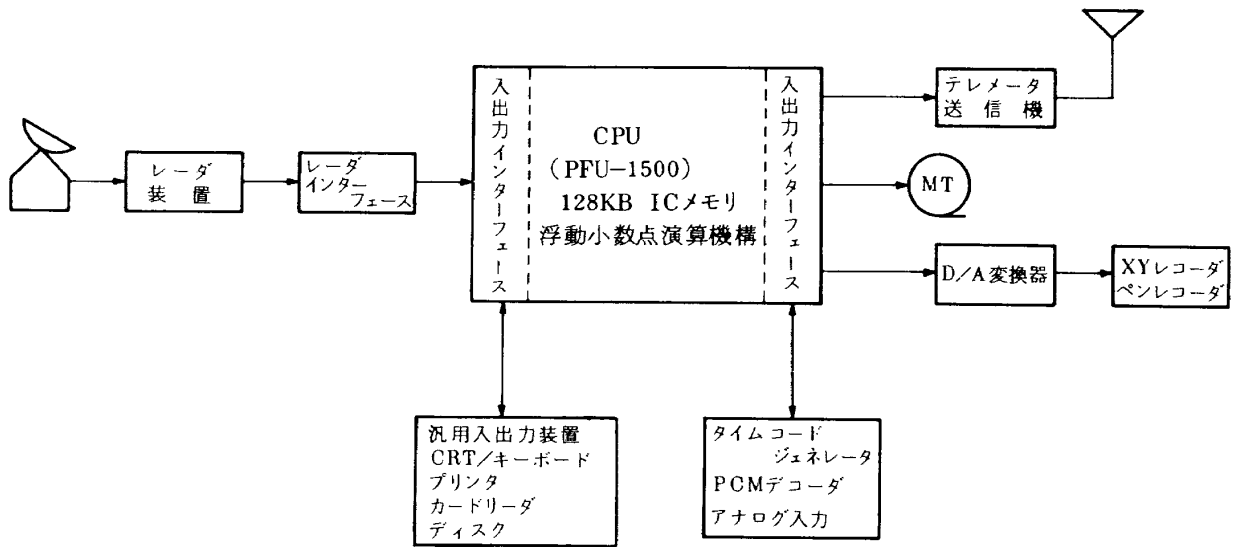


図 2-3 レーダデータ処理システムブロック図

表 2-2 計算機に取り込まれるレーダデータ

No	項目名	略称	内 容
1	直 距 離	SR	LSB 1 m 16 ビット構成 最大 65535 m $2^{16}-1$
2	距 離 偏 差	DSR	LSB $50 \times 2^{-11} m$ 12 ビット構成 オフセットバイナリ形式
3	仰 角	EL	LSB 180×2^{-15} 16 ビット構成 最大 180 deg
4	仰角偏差	DEL	LSB $1.0 \times 2^{-11} deg$ 12 ビット構成 オフセットバイナリ形式
5	方 位 角	AZ	LSB 180×2^{-15} 16 ビット構成 最大 359.995 deg
6	方位角偏差	DAZ	LSB $1.0 \times 2^{-11} deg$ 12 ビット構成 オフセットバイナリ形式
7	状態信号	STS	

算機内部に設定した軌跡からの上下、左右の経路偏差データを記録している。

表 2-4 のように XY レコーダ用及びペンレコーダ用出力が 8 チャンネル 12 ビットの D/A 変換器で出力される。

レーダの極座標から直角座標の変換は次の通りである (図 2-4 参照)。

$$X = SR \cos(EL) \cos(AZ) \quad (2-3)$$

$$Y = SR \cos(EL) \sin(AZ) \quad (2-4)$$

$$H = SR \sin(EL) \quad (2-5)$$

X : レーダを原点とし北の方向を正とする

Y : レーダを原点とし東の方向を正とする

H : レーダを原点とし上の方向を正とする

SR : レーダから航空機までの直線距離

EL : レーダの仰角 (水平を 0 度, 垂直を 90 度)

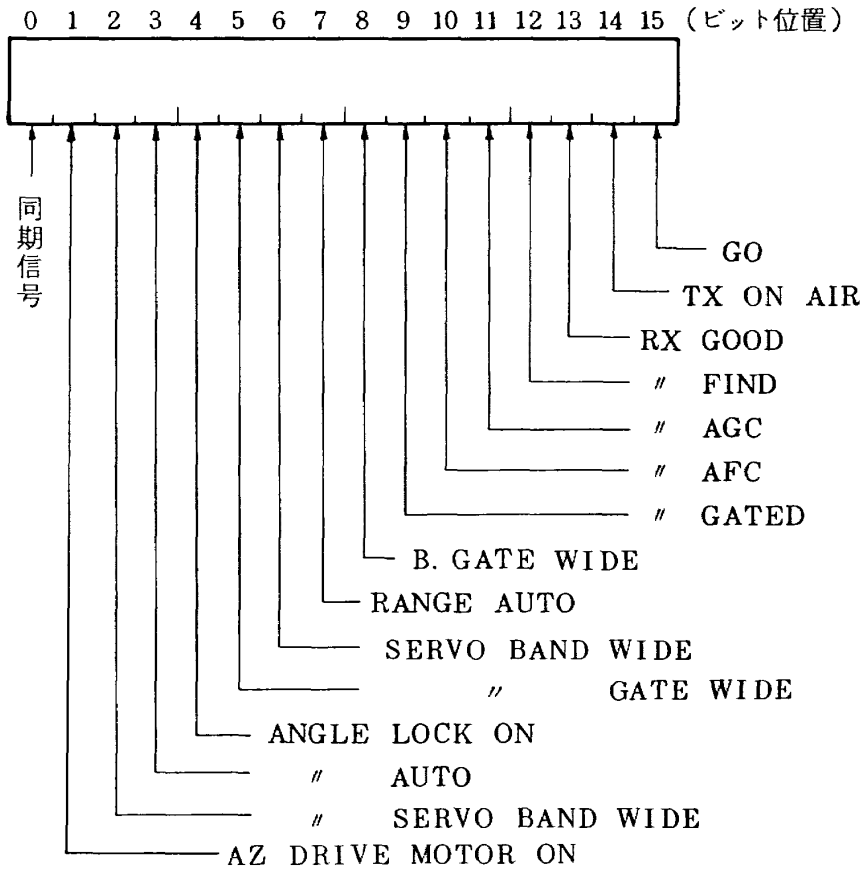
AZ : レーダの方位角 (北を 0 度, 東を 90 度)

又、直角座標から極座標への変換は次のようになる。

$$SR = \sqrt{X^2 + Y^2 + H^2} \quad (2-6)$$

$$EL = \tan^{-1} \left(\frac{H}{\sqrt{X^2 + Y^2}} \right) \quad (2-7)$$

表 2-3 ステータス信号の内容



項 目	位 置	詳 細
GO	B 15	システムスタート信号で、レーダ・データのロギング開始座標演算を開始する。
RX GOOD	B 13	SR, AZ, EL値がGOODで、各偏差値を加算し、座標演算を行う。 NON GOODの場合はNGとする。

表 2-4 計算機のXY及びペンレコーダ出力

No	項目名	略 称	内 容
1	X座標値	X	12ビットの2進数で2の補数表現 ビット0がPEN UP, ビット1, 2, 3でチャンネル番号
2	Y座標値	Y	"
3	距離偏差	DSR	"
4	仰角偏差	DEL	"
5	方位角偏差	DAZ	"
6	左右偏差	DY	"
7	上下偏差	DZ	"
8	Z座標値	Z	"

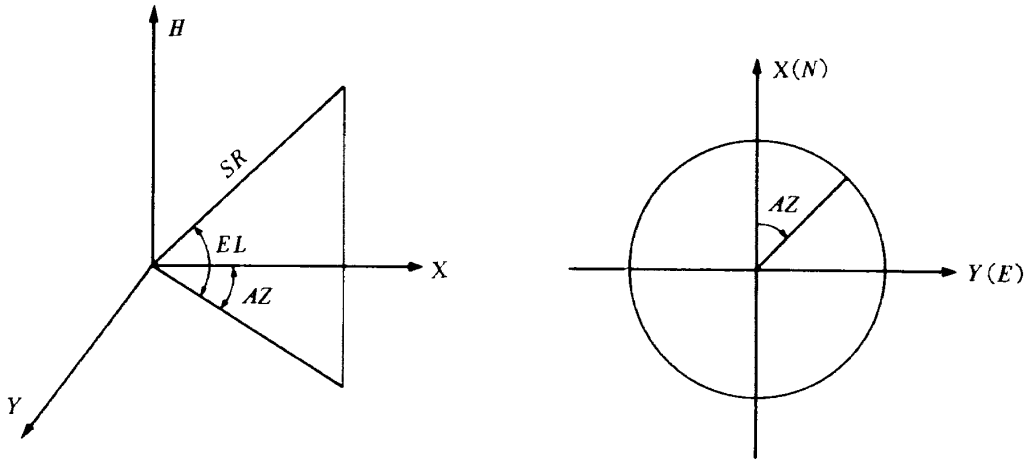


図 2-4 レーダ座標

$$AZ = \tan^{-1} \left(\frac{Y}{X} \right) \quad (2-8)$$

$$\text{or } \cos^{-1} \left(\frac{X}{\sqrt{X^2 + Y^2}} \right)$$

$$\text{or } \sin^{-1} \left(\frac{Y}{\sqrt{X^2 + Y^2}} \right)$$

今、図 2-5 のように滑走路の着地点を原点とし、滑走路の進入方向を X 軸と考えるため、計算上でレーダを着地点に持ってゆきレーダの X 軸を ϕ_r まで回転させると (2-3) ~ (2-5) 式は次のようになる。

$$X_r = SR \cos(EL) \cos(AZ - \phi_r) + X_{r0} \quad (2-9)$$

$$Y_r = SR \cos(EL) \sin(AZ - \phi_r) + Y_{r0} \quad (2-10)$$

$$H_r = SR \sin(EL) + H_{r0} \quad (2-11)$$

但し、 X_{r0} : レーダの X 座標値

Y_{r0} : レーダの Y 座標値

H_{r0} : レーダの H 座標値

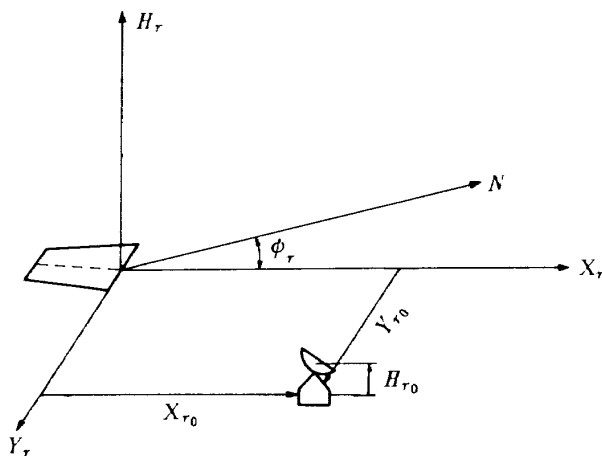


図 2-5 滑走路を基準にした座標系とレーダ位置の関係

ϕ_r : 滑走路の進入方向

径路偏差は三次元空間に通過点を置き、その各点を直線、円弧で結びその径路からの左右偏差を DY 、上下偏差を DZ として図 2-6 のように表わしている。テレメータでこの DY 及び DZ を送信し、機上の受信機で受信しアナログデータに変換しフライトディレクタ等に入力してパイロットにコースからのずれを示すことができる。写真 1 にレーダガイダンス実験の様子を示す。テレメータは全部で 10 CH のデータを送ることができるので機上で必要なデータを地上計算機のプログラムを追加、又は変更して送ることができるが、計算機は 20 msec の周期で実時間処

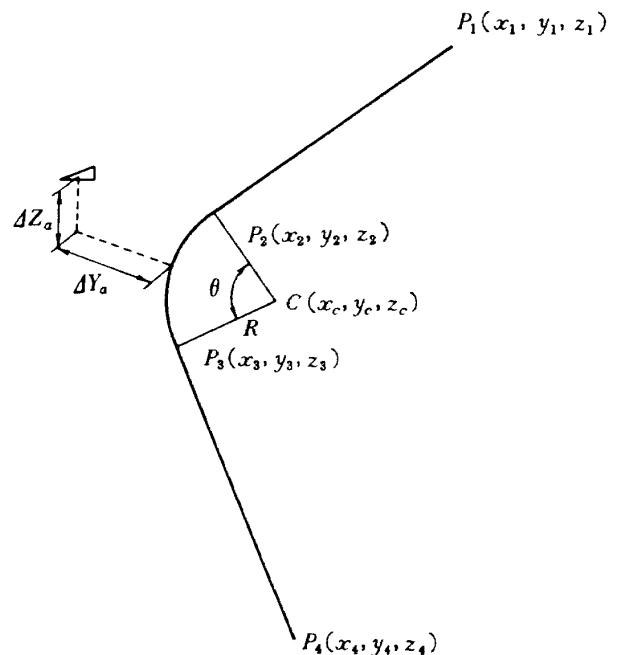


図 2-6 飛行径路からの水平及び垂直偏差

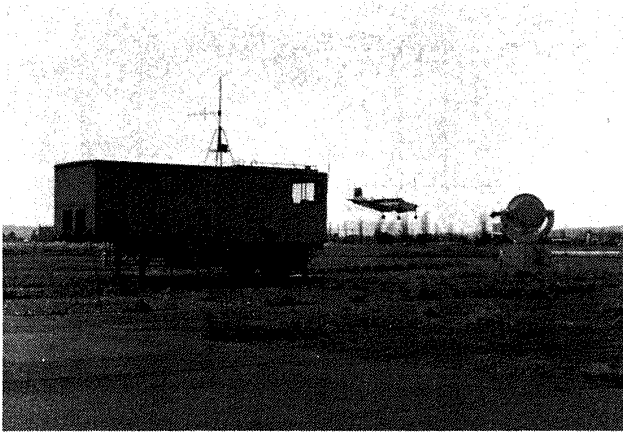


写真1 航空機地上追跡用レーダシステム

理を行なっているのであまり大きなプログラムを追加することはできない。

第3章 航空写真によるレーダの較正方法

レーダの較正方法としては序論で述べたように、

- イ. 塔を使う方法
- ロ. 恒星を使う方法
- ハ. 航空写真を使う方法

等があるが、イとロは両方とも静的な方法で、一点しか較正データが得られないので飛行している航空機の追跡用レーダの較正方法としてあまり高い精度は期待できないため、ハの航空写真を使って実際に飛行している航空機をレーダで追跡し、同時に写真を取り航空機の位置を正確に測量してレーダのデータを較正する方法を取った。

この章では航空写真測量の考え方、及び実際の解析方法について述べる。

3.1 航空写真測量^{5), 6), 7), 12)}

航空写真測量は地図を作成する時に多く用いられている。

写真測量はカメラを精密な角度測定器として使い、位置を正確に測定するもので、次の二つがある。一つは単写真測量と言って一枚の写真から数点の基準点のフィルム上の位置を読みとり、基準点の三次元座標との関係から航空機(カメラ)の三次元座標における位置及び姿勢角(傾き, 方向)を測定する。

もう一つは2枚以上の写真から航空機の位置, 姿勢角の他に新しい標点の三次元座標を求める立体写

真測量である^{6), 7)}

今回は航空機の位置情報のみが必要であるため単写真測量についてのみ述べる。

カメラの座標系はピンホールカメラを考えると図3-1のように地上の点 E_i は投影中心 O を通過して焦点距離 F の所にあるネガフィルムの P_{ni} に投影される。これをポジフィルム又は印画紙に焼付けると P_i 点に投影される。以下理解しやすくするために写真の投影はポジフィルム又は印画紙上の座標を扱っていく。

カメラの光軸は右手系を使い Z_p 軸とし下方にとる。この座標系は航空機の機体軸と同じ方向をとった。このため一般に使われている写真測量の座標系と Z_p 軸及び Z_p 軸回りの回転軸が逆になっている⁶⁾。回転軸の記号も ϕ , θ , ψ とし、航空機の姿勢角と同じ方向にとる¹⁶⁾。実際にはカメラの取り付け角が機体軸とは一致しないので $\Delta\phi$, $\Delta\theta$, $\Delta\psi$ だけ機体の姿勢角と異なるが、写真測量の場合カメラの姿勢角のみが必要であるため、 ϕ , θ , ψ についてのみ議論を進める。

今、任意の地上の点を原点とし、 XY 平面は原点における水平面に一致している地上座標系を考える。 E_i 点の座標を X_i, Y_i, Z_i とし、カメラの投影中心

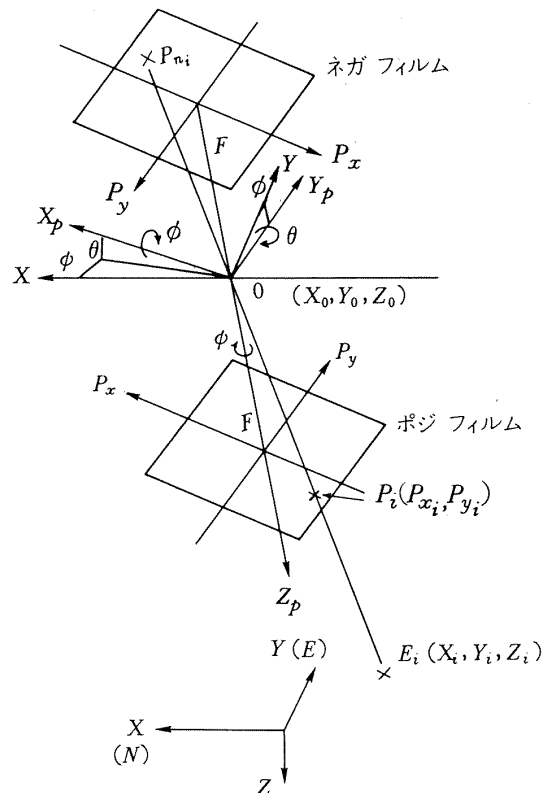


図3-1 地上座標系及び写真座標

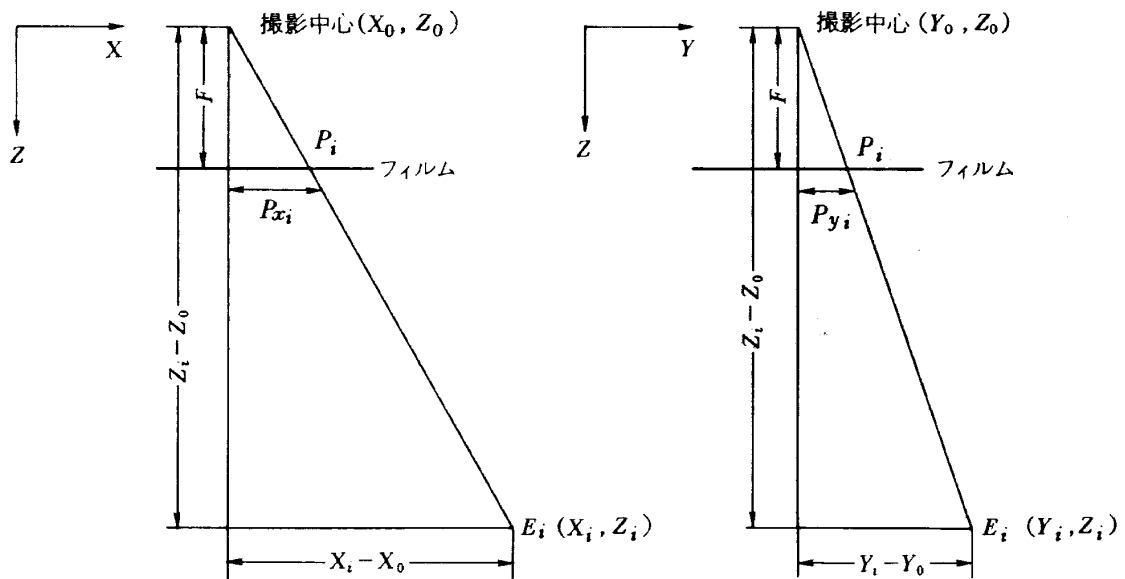


図 3-2 フィルムへの投影

の座標を X_0, Y_0, Z_0 とする。そしてカメラの姿勢角は原点の座標軸と平行であるとする。つまり ϕ, θ, ψ とも零であるとすれば、フィルム上の投影された P_i 点の座標は図 3-2 から次のように求められる。

$$P_{xi} = \frac{F}{Z_i - Z_0} (X_i - X_0) \quad (3-1)$$

$$P_{yi} = \frac{F}{Z_i - Z_0} (Y_i - Y_0) \quad (3-2)$$

この式は、原点を投影中心に移動し縮尺率 $F/(Z_i$

$-Z_0)$ で $(X_i - X_0)$ 及び $(Y_i - Y_0)$ をフィルム面上に投影したことになる。(3-1) 式及び (3-2) 式が成り立つためにはカメラの姿勢角が常に零であればよい。

言い換えれば姿勢角が零でない場合、すべての基準点をカメラの座標系 (X_p, Y_p, Z_p) へ座標変換することにより (3-1) 及び (3-2) 式が成り立つ。地上座標系 (X, Y, Z) からカメラ座標系 (X_p, Y_p, Z_p) への座標変換をマトリックス表示により次式に示す。

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & \sin \phi \\ 0 & -\sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \phi & \sin \phi & 0 \\ -\sin \phi & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \phi & \cos \theta \sin \phi & -\sin \theta \\ \sin \phi \sin \theta \cos \phi & \sin \phi \sin \theta \sin \phi & \sin \phi \cos \theta \\ -\cos \phi \sin \theta & +\cos \phi \cos \theta & \\ \cos \phi \sin \theta \cos \phi & \cos \phi \sin \theta \sin \phi & \cos \phi \cos \theta \\ +\sin \phi \sin \theta & -\sin \phi \cos \theta & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \\ &= C_{PE} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (3-3) \end{aligned}$$

この座標変換マトリクス C_{PE} は地上座標系をカメラ座標系に変換するもので航空機で使われている慣性軸から機体軸に変換するマトリクスとまったく同じである。

(3-1), (3-2)式はこのマトリクスを使うことによりカメラの姿勢角が ϕ , θ , ψ の一般的な場合に拡張でき、次のようになる。

$$P_{x_i} = \frac{F}{Z_{P_i}} X_{P_i} \quad (3-4)$$

$$P_{y_i} = \frac{F}{Z_{P_i}} Y_{P_i} \quad (3-5)$$

但し,

$$\begin{bmatrix} X_{P_i} \\ Y_{P_i} \\ Z_{P_i} \end{bmatrix} = C_{PE} \begin{bmatrix} X_i - X_0 \\ Y_i - Y_0 \\ Z_i - Z_0 \end{bmatrix} \quad (3-6)$$

(3-4), (3-5)式で求められた P_{x_i} , P_{y_i} は、航空機の位置が地上座標系で (X_0, Y_0, Z_0) , 姿勢角 (ϕ, θ, ψ) の時、地上の標点 (X_i, Y_i, Z_i) が写真のフィルム面上に投影された座標となる。

ここで、測定されるデータは写真座標 P_{x_i} , P_{y_i} と各基準点の位置 (X_i, Y_i, Z_i) である。

問題は $i = 1 \sim n$ 個のデータを使って航空機の位置 (X_0, Y_0, Z_0) 及び姿勢角 (ϕ, θ, ψ) を求めようとするものである。

今、焦点距離 F は既知として初期値 $C_0 (Z_0, Y_0, Z_0, \phi, \theta, \psi)$ を与えた場合 (3-4), (3-5) 式を使って推定値 \hat{P}_{x_i} , \hat{P}_{y_i} を求め、その値とフィルムからの計測値、 P_{x_i} , P_{y_i} との誤差 ϵ_{x_i} , ϵ_{y_i} を次の式で表わす。

$$\epsilon_{x_i} = P_{x_i} - \hat{P}_{x_i} \quad (3-7)$$

$$\epsilon_{y_i} = P_{y_i} - \hat{P}_{y_i} \quad (3-8)$$

この誤差の二乗による評価関数 J を次の様に定義する。

$$\begin{aligned} J &= \sum_{i=1}^N [\epsilon_{x_i} \ \epsilon_{y_i}] W_i \begin{bmatrix} \epsilon_{x_i} \\ \epsilon_{y_i} \end{bmatrix} \\ &= \sum_{i=1}^N \epsilon_i^T W_i \epsilon_i \end{aligned} \quad (3-9)$$

但し,

$$W_i = \begin{bmatrix} w_{x_i} & 0 \\ 0 & w_{y_i} \end{bmatrix}, \quad \epsilon_i = \begin{bmatrix} \epsilon_{x_i} \\ \epsilon_{y_i} \end{bmatrix}$$

W_i は重み関数で一般に単位マトリクスとして除いてもあまり影響はない。特に ϵ_x と ϵ_y の差が大きいときは $1/\epsilon_x^2$ 及び $1/\epsilon_y^2$ に比例した値を取る。この理由は繰り返し計算の収れんを良くする為である。

ここで評価関数 J を最小にする $C (X_0, Y_0, Z_0, \phi, \theta, \psi)$ が求める解である。

J を最小にするためのアルゴリズムは色々あるが、ここでは修正ニュートンラプソン法を適用する。修正ニュートンラプソン法は初期値が比較的誤差が少ない時収れんの速度は早く、アルゴリズムも複雑ではないので航空機のパラメータ推定によく使われている¹³⁾修正ニュートンラプソン法による未知数 $C (X_0, Y_0, Z_0, \phi, \theta, \psi)$ の推定について次に述べる。

(3-9) 式の評価関数 J を未知数 C でテーラ展開して 2 次の項まで表わすと次のようになる。

$$J = J_0 + \frac{\partial J}{\partial C^T} \Delta C + \frac{1}{2} \Delta C^T \frac{\partial^2 J}{\partial C \partial C^T} \Delta C \quad (3-10)$$

ここで J を未知数の修正量 ΔC で微分して極小値を求めると次のようになる。

$$\begin{aligned} \frac{dJ}{d\Delta C^T} &= \frac{\partial J}{\partial C^T} + \Delta C^T \frac{\partial^2 J}{\partial C \partial C^T} \\ &= 0 \end{aligned} \quad (3-11)$$

(3-11) 式より修正量 ΔC^T は次のように求まる。

$$\Delta C^T = - \left(\frac{\partial J}{\partial C^T} \right) \cdot \left(\frac{\partial^2 J}{\partial C \partial C^T} \right)^{-1} \quad (3-12)$$

未知数の初期値 C_0 は次のように修正される。

$$C_1^T = C_0^T + \Delta C^T \quad (3-13)$$

修正された値 C_1^T を初期値として (3-12), (3-13) を計算することにより未知数 C はある一定値に収れんしていく。収れん性は未知数の数 (モデル), 初期値のとり方, 及びフィルムや地上の標点の測定精度で異なるが通常 4 ~ 5 回で収れんされ、この値が求める解となる。

次に (3-12) 式の一次と二次の偏微分値の計算方法について述べる。(3-9) 式から一次の偏微分値は次のようになる。

$$\frac{\partial J}{\partial C^T} = 2 \sum_{i=1}^N \left\{ \epsilon_i^T W_i \frac{\partial \epsilon_i}{\partial C^T} \right\} \quad (3-14)$$

又、二次の偏微分値は

$$\frac{\partial^2 J}{\partial C \partial C^T} = 2 \sum_{i=1}^N \left\{ \frac{\partial \epsilon_i^T}{\partial C} W_i \frac{\partial \epsilon_i}{\partial C^T} + \epsilon_i^T W_i \frac{\partial^2 \epsilon_i}{\partial C \partial C^T} \right\} \quad (3-15)$$

ここで(3-15)式の右辺の第二項目は初期値がある程度精度があれば ϵ_i^T が小さくなり無視できると考え省略することができる。この省略により計算時間も短くなり、計算機のメモリも節約できる。(3-15)式は一般のニュートンラプソン法によるもので第二項を省略することで修正ニュートンラプソン法と呼ばれている^{3), 5), 13)} (3-15)式は次のようになる。

$$\frac{\partial^2 J}{\partial C \partial C^T} = 2 \sum_{i=1}^N \left\{ \frac{\partial \epsilon_i^T}{\partial C} W_i \frac{\partial \epsilon_i}{\partial C^T} \right\} \quad (3-16)$$

(3-14), (3-15)式の詳しい求め方については付録Aに示す。

3.2 写真フィルム座標の計測

今回使用したカメラは非測定用のカメラでハッセルブラッド 500 EL/M である(写真2)。レンズはツァイス 40mm ディスタゴンである。カメラ、及びレンズの仕様を表3-1に示す。



写真2 ハッセルブラッド 500 EL/M

表 3-1 カメラ及びレンズ仕様

カメラ型式	ハッセルブラッド 500EL/M
フィルム	60 mm
有効フィルム面積	55*55 mm
レンズ型式	ツァイスディスタゴン ^{T*}
焦点距離	40 mm
視野角	88° (対角)

このカメラは非測定用の一般のカメラであるので座標の基準マークがない。又、レンズの歪の他、焦点距離及び光学中心も数%の誤差を含んでいると見なければならぬ。そこで次のような手順でカメラの焦点距離、光学中心及び歪補正を行なった。

1) 仮の座標を図3-3に示すようにフィルム有効画面の各コーナの座標(1, 2, 3, 4)から仮の中心座標0を決定し、Y軸を底辺1-2に平行にとり、それに直角な軸をX軸とする。X軸は航空機進行方向に取ってある。

2) フィルム座標を正確に読み取るための道具としてはモノコンパレータ又はステレオコンパレータ等があるが、特殊な装置を使わずに写真の引伸機を使い約5~10倍に拡大して通常のスケールによって

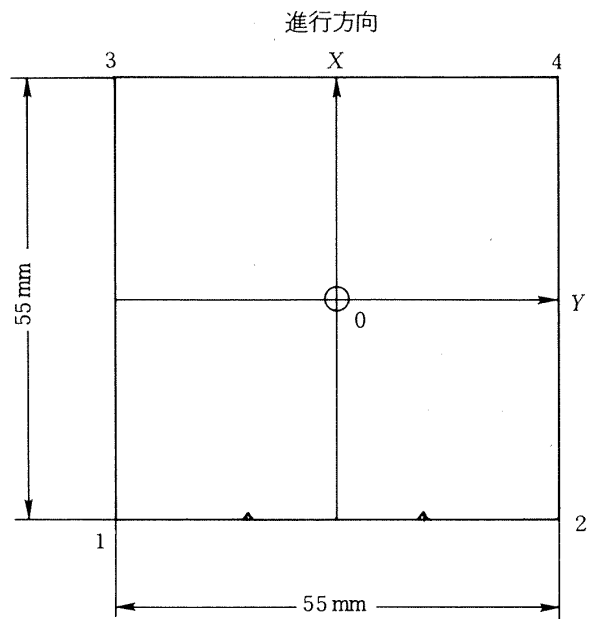


図 3-3 フィルム座標

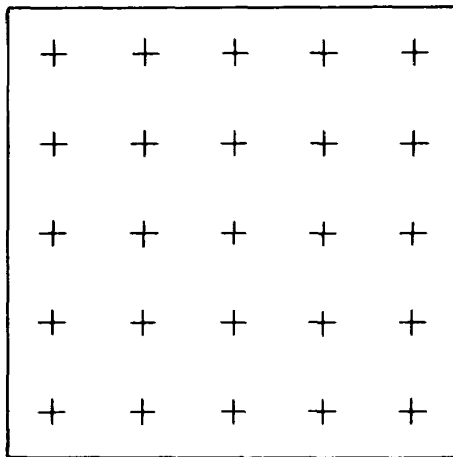


図3-4 基準フィルム

読み取る。これによりフィルム面上0.02~0.05mm程度の分解能が得られる。しかし、引伸機のレンズの歪や倍率が精度に影響するので、図3-4のような25個の基準点の入った基準フィルムを作成し1 μ mの精度のモノコンパレータで各基準点の相対位置をあらかじめ測定し、この基準フィルムと被測定フィルムを重ねて引き伸しする。各基準点のX軸方向及びY軸方向の距離を測り、基準データと比較することによりX及びY軸方向の引伸機の歪も含んだ倍率が得られる。

この倍率を使い、測定すべき点の位置を基準点を基準にして測り、全ての被測定点を基準フィルム座標に変換する。このデータを測定フィルム座標に変換して各測定点の座標を求める。この測定の手順は付録Bに示す。

3) 焦点距離及び光軸の推定

焦点距離及び光軸の推定のため図3-5のように標点 E_0, E_1, \dots, E_n を基準面上に等間隔に置く。基準点 E_0 から垂直線を引き、その線上にカメラを設置する。カメラと E_0 を結んだ線を基準にして他の基準点の角度を測定する。標点 $E_1 \dots E_n$ に対応する角度を $\theta_1 \dots \theta_n$ とする。一方フィルム上に投影される基準点及び標点のX座標を $P'_{x_0}, P'_{x_1}, \dots, P'_{x_n}$ とする。投影中心からフィルム面上に垂直に下した線がフィルム面に交わる点を P_c とし光学中心(主点)とする。光学中心と投影中心迄の距離を F とすると、これが焦点距離である。

問題はこの焦点距離 F と光学中心の座標 P_c を求めることである。

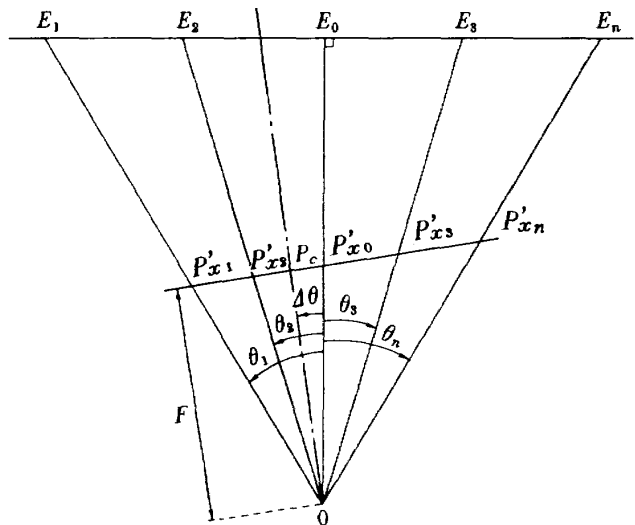


図3-5 焦点距離, 光学中心の測定

今、 P'_{x_0} と P_c との角度を $\Delta\theta$ とすると $F, P'_{x_0}, P_c, \Delta\theta$ の間には次のような関係式が成り立つ。

$$P_c - P'_{x_0} = F \tan \Delta\theta \quad (3-17)$$

P'_{x_i} は次のように表わされる。

$$P'_{x_i} - P'_{x_0} = P_c - P'_{x_0} + F \tan (\theta_i - \Delta\theta) \quad (3-18)$$

これから焦点距離 F は

$$F = \frac{P'_{x_i} - P_c}{\tan (\theta_i - \Delta\theta)}$$

又は、(3-17)式を使って P_c を消去し、 F の値はレンズの歪のため位置によって異なるので、各位置での焦点距離を F_i とすると次のようになる。

$$F_i = \frac{P'_{x_i} - P'_{x_0}}{\tan (\theta_i - \Delta\theta) + \tan \Delta\theta} \quad (3-19)$$

レンズの歪は半径方向のものが一番大きいとされているので、半径方向に対称な点を光学中心であると仮定し、 $\Delta\theta$ を変化させ F_i が P_c を中心に対称になる所を見つける。 F_i の対称性を決めるために式(3-20)のような計算を $\Delta\theta$ を0.01度づつ変化させて行ない、次式により F_i の標準偏差が最小になる $\Delta\theta$ を見つけた。

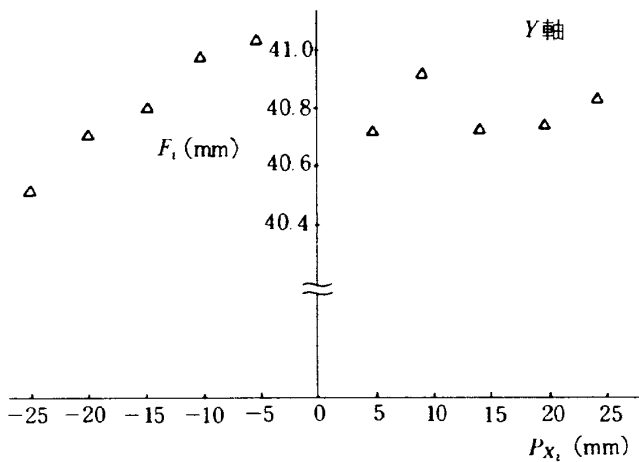


図 3-6 フィルム位置と焦点距離

$$\sigma_{F \min} = \left\{ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_i - \bar{F})^2 \right\}^{1/2} \quad (3-20)$$

その結果は図3-6に示すように求められた焦点距離は中心が長い凸型をしている。

これにより $\Delta\theta$ を決定しこの $\Delta\theta$ を使ってレンズの公称値 $F = 40 \text{ mm}$ に対応したフィルム座標 P_{x_i} を次のように計算する。

$$P_{x_i} = 40 \tan(\theta_i - \Delta\theta) \quad (3-21)$$

この P_{x_i} が理想的なレンズにより得られるべきフィルム座標であるので、機械的中心から測定した位置 P'_{x_i} を P_{x_i} に変換するために次のような3次式を作り最小二乗法により各係数を求めた。

$$P_{x_i} = a_0 + a_1 P'_{x_i} + a_2 P'_{x_i}{}^2 + a_3 P'_{x_i}{}^3 \quad (3-22)$$

n 個のデータを使って(3-22)式をマトリックスで書き替えると次のようになる。

$$PX = A PX'$$

$$PX = \{P_{x_1}, P_{x_2} \dots P_{x_n}\}$$

$$A = \{a_0, a_1, a_2, a_3\}$$

$$PX' = \begin{bmatrix} 1, & 1, & \dots & 1 \\ P'_{x_1}, & P'_{x_2} & \dots & P'_{x_n} \\ P'_{x_1}{}^2, & P'_{x_2}{}^2 & \dots & P'_{x_n}{}^2 \\ P'_{x_1}{}^3, & P'_{x_2}{}^3 & \dots & P'_{x_n}{}^3 \end{bmatrix}$$

次式を使って最小二乗により係数 A を求める。

$$A = PX PX'{}^T (PX' PX'{}^T)^{-1} \quad (3-23)$$

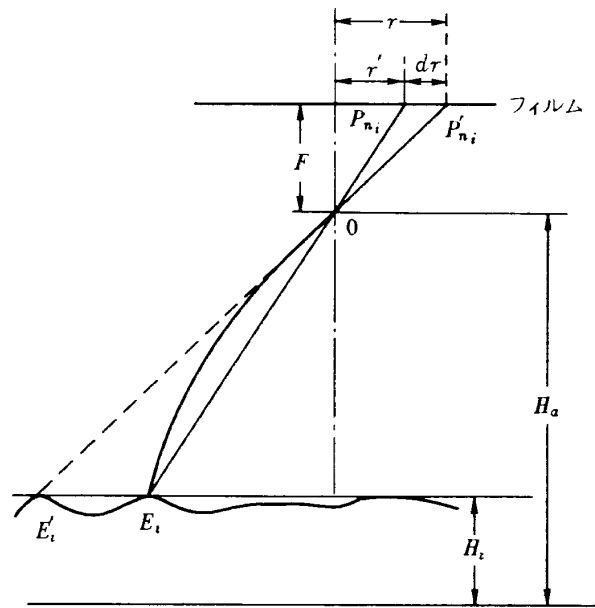


図 3-7 大気による屈折補正

(3-23)式から求めた係数 A を使って(3-22)式より補正されたフィルム位置 P_{x_i} を求めることができる。 P_{y_i} も同様な手順により求める。

4) 大気屈折補正

大気の密度は鉛直方向に変化するため、光が屈折して曲ってしまう。この現象によるずれの量はフィルム上で同心円状に広がり、必ず中心から遠ざかるようにずれる。図3-7に示すように標点 E_i はフィルム上の P_{n_i} に写るべきであるが、大気の屈折のため P'_{n_i} に写る。このため dr だけ外側にずれる。この補正量 dr は次のように求めることができる¹²⁾

$$dr = r (r^2/F^2 + 1) \delta(H_a, H_i) \quad (3-24)$$

$$\text{但し, } \delta(H_a, H_i) = (1 - 0.06 H_i) \{ 1.2 (H_a - H_i) - 0.38 (H_a - H_i)^2 \} 10^{-3}$$

ここで、 H_a, H_i の単位は km である。

3.3 地上の標点の測定

3.1 で示した写真測量を行なうには 3.2 で示したフィルム座標の測定の他にそれに対応する地上の標点の測定が必要である。

1) 地上標点の座標系

地上標点の座標系はレーダの設置した所を原点とした直角座標をとる。通常の写真測量では上を Z 軸に取っているが今回は飛行機の座標軸に合わせるため 3.1 のように下向きを Z 軸の正とした。

2) 標点の測量方法

測量の方法は次の三つが考えられる。

a) レーダ原点から三角測量していく。

b) 立体写真の解析を行ない最初の二枚の写真の標点については三角測量で求め、写真測量で次の写真の為の標点を求め三枚以後の写真を解析していく。

c) 国土基本図(1/2500)を利用して地図から標点の座標を求める。

上記のうち、a)及びb)は最も一般的に行なわれている標点の測量方法であるが、膨大な労力と費用がかかるため、今回は比較的に手軽にできるc)を選んだ。

但し、c)の場合は読み取り精度の検討及び地図の歪補正について検討しなければならない。

3) 地図の読み取り精度

国土基本図と同等な1/2500地図を使った。この地図は航空写真測量を基にして作成されている。通常の写真測量の精度は撮影高度に対し2~3/10000の精度を持っている⁸⁾したがって、撮影高度を3000mとすれば0.5~1mの精度は期待できる。又、地図の読み取り精度を0.2~0.3mmとすればやはり0.5~0.75mの分解能に対応する。レーダ自体の誤差が25km離れて約5m rmsであるのでレーダの較正はこの程度の標点の精度があればよいと考えられる。但し、高度については地表面が等高線で表わされているので、建物の屋上等の点は使えず建物の角が地表面に接する場所を写真から選ばなければならず、標点の選択は制限が加えられる。

4) 地図の歪補正

地球が回転楕円体である為、これを平面に投影する地図には必ず歪が生ずる⁸⁾この歪を含んだ地図座標とレーダを原点にした直角座標とを比較した場合どの程度の差があるか計算で求め、最終的には次式に示すような二次の補正式を作り各係数を最小二乗法で求め地図座標 $(X_{m_i}, Y_{m_i}, H_{m_i})$ からレーダを原点にした直角座標 (X_i, Y_i, Z_i) に変換した。

$$\Delta X_i = b_{11} + b_{12}X_{m_i} + b_{13}X_{m_i}^2 + b_{14}Y_{m_i} + b_{15}Y_{m_i}^2$$

$$\Delta Y_i = b_{21} + b_{22}X_{m_i} + b_{23}X_{m_i}^2 + b_{24}Y_{m_i} + b_{25}Y_{m_i}^2$$

$$\Delta H_i = b_{31} + b_{32}X_{m_i} + b_{33}X_{m_i}^2 + b_{34}Y_{m_i} + b_{35}Y_{m_i}^2$$

$$X_i = X_{m_i} + \Delta X_i \quad (3-25)$$

$$Y_i = Y_{m_i} + \Delta Y_i$$

$$Z_i = -(H_{m_i} + \Delta H_i)$$

この地図座標とレーダ直角座標の変換の詳細については付録Cに示してある。

3.4 写真測量結果からのレーダ較正

以上、写真測量から撮影を行なった時の航空機の位置のレーダを原点にした直角座標が各写真毎に求められるので、これよりレーダデータと比較して補正量を求める。

1) 直角座標からレーダ極座標への変換

j 番目の写真から得られた座標を X_{0j}, Y_{0j}, H_{0j} ($=-Z_{0j}$)とすればこれをレーダ極座標へ変換すると次式のようなになる。

$$SR_{pj} = (X_{0j}^2 + Y_{0j}^2 + H_{0j}^2)^{1/2}$$

$$EL_{pj} = \sin^{-1} \left(\frac{H_{0j}}{SR_{pj}} \right) \quad (3-26)$$

$$AZ_{pj} = \sin^{-1} \frac{Y_{0j}}{(X_{0j}^2 + Y_{0j}^2)^{1/2}}$$

但し、 $X_{0j} < 0$ の時、 $AZ_{pj} = \pi - AZ_{pj}$

2) レーダの補正

レーダデータと写真データの同期はシャッターを切った時のタイミングを使用した。この信号はレーダトランスポンダを通して地上レーダに送り、レーダデータと共に記録する。この時のレーダの測定値を SR_j, EL_j, AZ_j とするとレーダの補正量 $\Delta SR, \Delta EL, \Delta AZ$ は次式のように求まる。

$$\Delta SR = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (SR_{pj} - SR_j)$$

$$\Delta EL = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (EL_{pj} - EL_j) \quad (3-27)$$

$$\Delta AZ = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (AZ_{pj} - AZ_j)$$

これにより補正されたレーダの値 $\widehat{SR}, \widehat{EL}, \widehat{AZ}$ は次のようになる。

$$\widehat{SR}(t) = SR(t) + \Delta SR$$

$$\widehat{EL}(t) = EL(t) + \Delta EL \quad (3-28)$$

$$\widehat{AZ}(t) = AZ(t) + \Delta AZ$$

以後、この値を使って航空機の位置を求め必要な座標へ変換して使うことができる。

この補正は一般的に写真測量を行なったコース上で有効であり、測定範囲を広げると地形上のマルチパス等の撮影で誤差が生ずる恐れがある。測定範囲を広げるためには写真測量範囲を広げる必要がある。その場合、上で示した一次の補正量だけでなく、高次又は別の補正項の必要性がでてくる可能性がある。¹¹⁾

第 4 章 飛行実験

第 3 章の較正方法に従って、追跡用レーダで実際に航空機を追跡し、同時に機上より地上の写真撮影をする実験を行なった。使用した航空機は当所所有の実験用航空機ビークラフト 65 型クィーンエア機（以下実験機という）である。

飛行実験は追跡用レーダアンテナが地上障害物に影響されないコース（実験機が見透せるコース）で、なるべく航法援助施設である VOR/DME 局と追跡用レーダを結ぶコースを選定した。この事はパイロットに対してコースの目安となる。また航空写真解析に必要な地図についても考慮し追跡用レーダ（当所調布飛行場分室に設置）と木更津 VOR/DME 局を結ぶ線上の東 1 km を飛行コースに選択した（以下実験コースという）（図 4-1）。このコースを高度はば一定で飛行し、追跡用レーダで追跡した。機上では木更津からの DME（距離測定装置）の指示値を

目安に機体に取り付けられたカメラで地上を撮影し、同時に機上データ（高度、姿勢角、距離（DME）等）を計測しデータレコーダに記録した。

4.1 実験機搭載器材及びデータの同期

実験機には追跡用レーダからの電波に対して応答するトランスポンダ（2.1 項参照）、及び地上撮影用カメラ（3.2 項参照）が搭載されている。

カメラは実験機の胴体下面にあいている写真撮影用孔に取り付けた。（写真 3、4、5）

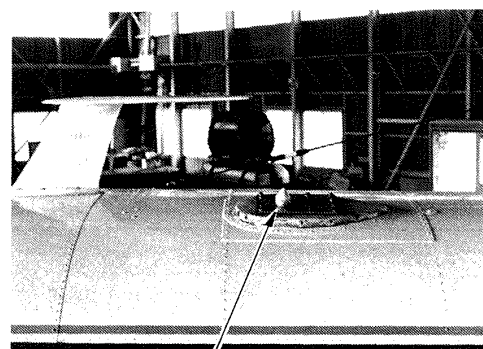


写真 3



写真 4



写真 5

実験用航空機及びアンテナ取付状況

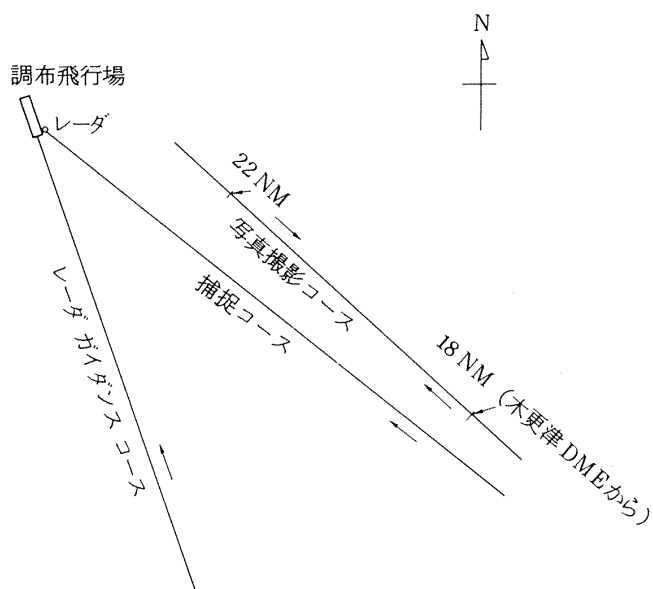


図 4-1 飛行試験コース

又、実験機は可変安定応答機^{9),10)}に改造され、種々の機上データが取得できるようになっている。データは一般的な飛行データ（対気速度、気圧高度、姿勢角等）の他DME局からの距離信号（Slant Range）も取得できる。さらに外部からの信号もA/D変換により取り込める端子があるのでこれを利用することにより機上データ、追跡用レーダデータ及び航空写真データとの同期をとることができる。即ち、カメラシャッター信号を一つは外部信号取り込み口より機上データとして、もう一つはトランスポンダの同期信号の取り込み口により追跡用レーダに送られ追跡用レーダデータとして記録される。機上データはPCM（Pulse Code Modulation）化された信号としてデータレコーダに記録される。PCM化に際してのデータサンプリング時間は $1/8$ secである。さらに飛行中に実験状況を知る為に6チャンネルの



カメラ

写真6 搭載用実験機材

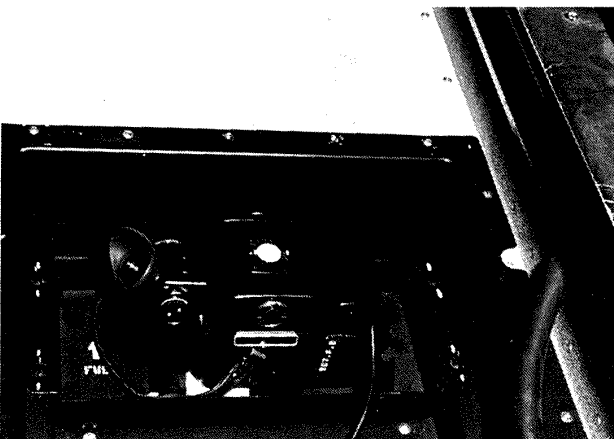


写真7 カメラ取付状況

ペンレコーダを搭載し、必要に応じて出力させモニタできる。搭載器材の取り付け状況を写真6、7に示す。

4.2 実験手順

データ取得の本実験前には実験機をレーダで確実に捕捉する飛行を行なわなければならない。これは追跡用レーダのビーム幅が狭いため、アンテナを操作するむずかしさがあるのと同時にメインローブのビームで機体を捕捉する必要があるためである。一般にアンテナからはメインローブの他にどうしてもサイドローブの電波が出るが（図4-2、図4-3参照）、サイドローブはメインローブに比べて電界はかなり弱い。しかしながら比較的近い距離ではサイドローブで機体を捕捉してしまうことがある。サイドローブで捕捉されると遠距離で電界が急激に弱まり追尾できなくなることはもちろんであるが、得られるデータ（仰角、方位角）は誤りである。従ってメインローブで捕捉することが飛行実験する為の第一の条件である。一度メインローブで捕捉できれば、この実験範囲程度では追尾できることが何回かの飛行実験で前もって確かめられている。今回用いた捕捉の為の飛行は実験機が定められたコース（追跡用レーダと木更津VOR/DME局を結ぶ線上

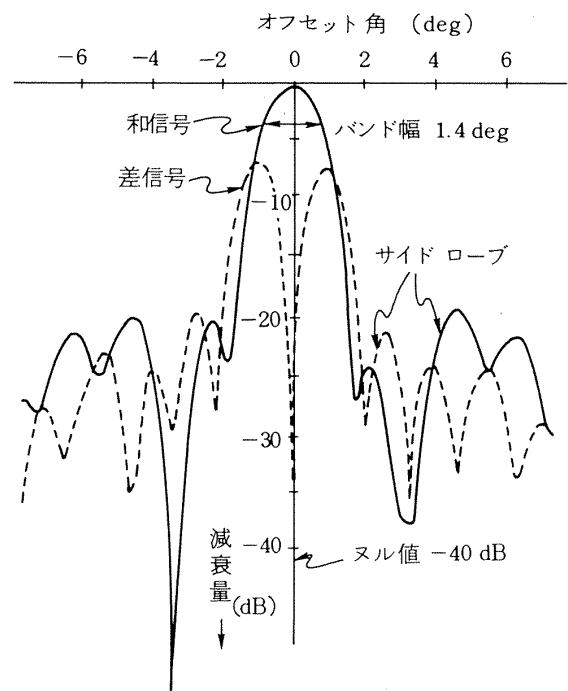


図4-2 レーダの指向性(AZ)

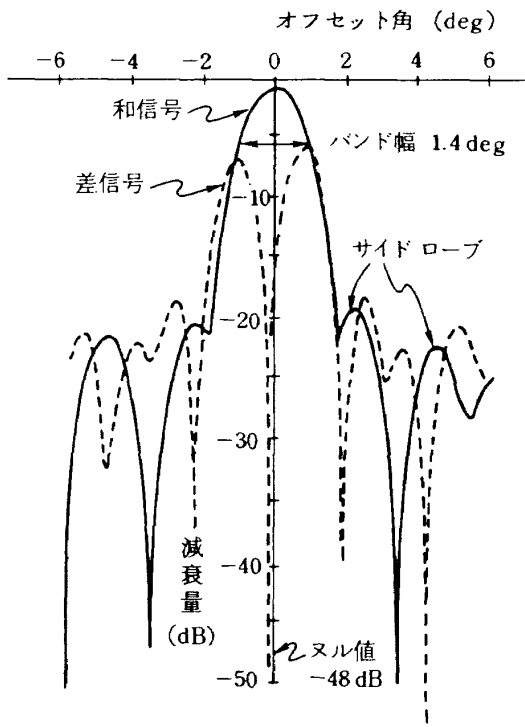


図 4-3 レーダの指向性 (EL)

捕捉コース(図4-1))を追跡用レーダに向って飛行し、機上からのおよその位置情報(DME指示)の連絡を追跡用レーダ側で受け、待ち受けて受信レベルが一番高くなった時に手動から自動追尾に切り換える方法をとった。このとき、あらかじめ追跡用レーダの距離、仰角、方位角を計算して設定しておいた。捕捉後、実験機は追跡用レーダ上空を追越し、地上で追跡用レーダアンテナの動きと機体を目視でにらみ、メインローブで捕捉している事を確認した。実験コースを飛行するために2.3項で述べたようにテレメータを用い、このコースよりのずれ信号を機上に送り飛行指令計器であるADI, HSI, のガイドスロープ及びローカライザ指示部に表示させパイロットへのコース指針とした。本実験における飛行形態は以下の通りである。

- 1) 高度 …………… 3000 ft, 2500 ft の各高度で水平飛行
- 2) 速度 …………… 120 mph IAS
- 3) 計測飛行範囲 …… 木更津VOR/DME局より18~22NM

第 5 章 結果と検討

以下、写真データの推定精度についての検討、写

真データとレーダデータの比較、及びレーダデータと機上データ(気圧高度計, DME)との比較について述べる。

5.1 航空写真測量の推定精度

航空写真から航空機の位置及び姿勢角を推定するとき、その推定精度がどの程度か次に示す三つの方法で検討する。

1) カメラの位置、及び標点の位置を正確に測定し、これを写真にとり解析を行なって得た推定値と測定値を比較して焦点距離の精度を検討する。

2) 航空写真を解析したとき、フィルム面の測定座標と推定座標との残差の標準偏差値を使いモンテカルロシミュレーションを行なう^{5), 4)}。残差と同じ標準偏差を持つ乱数を各標点だけ作り、これをシミュレーション・データの真値に加え、誤差を含んだデータを作る。このデータを使って推定を j 回行ない推定値の誤差の平均値、及び標準偏差を求め推定精度の評価を行なう。

3) 気圧高度計の高度と、写真測量の推定値を比較し、その差の標準偏差を求め、推定精度の検討の参考とする。

5.1.1 焦点距離の推定精度

図5-1に示すように建物の2階から道路上に置かれた標点を撮影した。カメラの位置および各標点の座標を表5-1に示す。解析した結果を表5-2に示す。この結果からカメラの位置と道路上に取った座標の原点間の距離を推定値と比較すると、実測値は23.184 m, 推定値は23.074 mと110 mmの差が生じている。

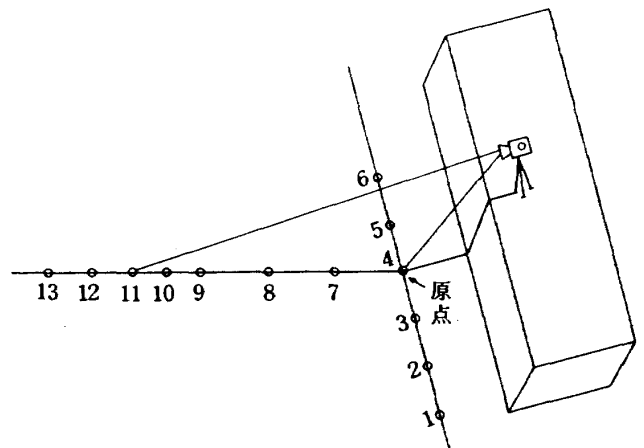


図 5-1 焦点距離推定のための各標点とカメラの位置関係図

表 5-1 焦点距離推定用標点の座標とカメラ位置

標点の位置 標点の番号	X(m)	Y(m)	Z(m)	備考
0	-22.616	0.000	5.0993	カメラ位置 座標基準点
1	0.000	-15.000	0.2035	
2	0.000	-10.000	0.1075	
3	0.000	-5.000	0.0470	
4	0	0	0	
5	0.000	5.000	0.0240	
6	0.000	10.000	0.0285	
7	10.000	0.000	-0.1210	
8	20.000	0.000	-0.1205	
9	30.000	0.000	-0.1225	
10	35.000	0.000	-0.1185	
11	40.000	0.000	-0.1285	
12	50.000	0.000	-0.0355	

表 5-2 焦点距離の推定結果

項目	実測値	推定値
X_0 (m)	-22.616	-22.53
Y_0 (m)	0	0.015
Z_0 (m)	-5.099	-4.893
ϕ (deg)	77.3	76.93
θ (deg)	0	-0.69
ψ (deg)	90.0	89.06
SR_p (m)	23.184	23.074

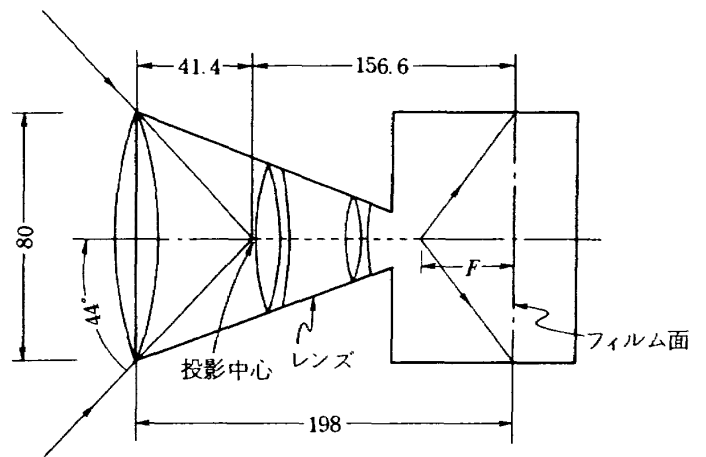


図 5-2 レンズの投影中心と焦点距離の違い

この原因の1つにフィルムからみた投影中心とレンズの入射角からみた投影中心とが異なり、一致していないことがあげられる。図5-2に示すように何枚かのレンズ群によって構成されているレンズに入射してくる光は、直線的にフィルムまで到達せず折れ曲ってフィルムまでとどく。この為、レンズの入射角からみた投影中心はフィルム面から F の距離にはなく、もっと前にくる。この値は次のように概算によって求められる。レンズ前面の径が 80mm、最大入射角が 88° であるので $\pm 44^\circ$ の入射光が交る点とレンズ前面迄の距離を l とすると $l = 40 \text{ mm} / \tan 44^\circ = 41.4 \text{ mm}$ と求まる。フィルム面からレンズ前面ま

での距離が 198mm あるので投影中心はフィルム面から 156.6mm となる。この修正を写真測定の推定値に加えれば $23.074 + 0.1566 = 23.231$ となり実測値との差は $23.231 - 23.184 = 0.047 \text{ m}$ となる。Z 軸方向の距離の精度は、縮尺率 $F / (Z_i / Z_0)$ の精度と対応しており、これは焦点距離が $0.047 / 23.074 = 2.03 \times 10^{-3}$ 約 0.2% の精度で求まっていると考えられる。高度が 1000 m の推定誤差が約 2m 程度と考えられる。

5.1.2 モンテカルロ・シミュレーション

航空写真を解析した結果、各標点のフィルム座標での測定値と推定値の残差の標準偏差を(3-7)、(3

-8) 式を使って次のように求める。

$$\epsilon_{x_i} = \hat{P}_{x_i} - P_{x_i} \quad (3-7)$$

$$\epsilon_{y_i} = \hat{P}_{y_i} - P_{y_i} \quad (3-8)$$

$$\sigma_{Px} = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\epsilon_{x_i} - \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \epsilon_{x_j})^2 \right)^{1/2} \quad (5-1)$$

$$\sigma_{Py} = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\epsilon_{y_i} - \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \epsilon_{y_j})^2 \right)^{1/2} \quad (5-2)$$

(5-1), (5-2) 式で求めた標準偏差を使って正規乱数を作り, この正規乱数を読み取り誤差として

推定値 \hat{P}_{x_i} , 及び \hat{P}_{y_i} に加え, シミュレーションデータを作る。

$$P_{x_{ij}} = \hat{P}_{x_i} + \sigma_{Px} RAN_{i+(j-1)2N} \quad (5-3)$$

$$P_{y_{ij}} = \hat{P}_{y_i} + \sigma_{Py} RAN_{i+1+(j-1)2N} \quad (5-4)$$

このシミュレーションデータを使って(3-12), 及び(3-13)式により位置, 及び姿勢角を推定する。これを $j = 1 \sim M$ 回繰り返して推定値の M 回の標準偏差を求めた結果を表 5-3 に示す。表 5-3 には高度 3000 ft と 2500 ft で各 9 枚のフィルムについてモンテカルロシミュレーションを行なっている。各フィルムについて σ_{Px} , σ_{Py} を与えその結果, 推定誤差 σ_x , σ_y , σ_z , 及び σ_ϕ , σ_θ , σ_ψ が計算される。表中の N は標点の数である。各々の値の平均値を高度

表 5-3 モンテカルロ法による誤差解析 (標準偏差)

	フィルム座標誤差の標準偏差		推定パラメータの標準偏差						N (個)
	σ_{Px} (mm)	σ_{Py} (mm)	σ_{x_0} (m)	σ_{y_0} (m)	σ_{z_0} (m)	σ_θ (mrad)	σ_ϕ (mrad)	σ_ψ (mrad)	
H = 3000 ft									
FLT 1-1	0.077	0.081	2.9	1.0	0.8	2.0	2.0	0.7	12
FLT 1-2	0.086	0.081	3.0	1.4	0.7	1.8	2.2	0.7	14
FLT 1-3	0.039	0.054	1.5	0.8	0.5	1.1	1.0	0.4	11
FLT 1-4	0.065	0.066	2.2	0.5	0.6	1.5	1.3	0.7	11
FLT 1-5	0.038	0.063	2.2	0.6	0.6	1.5	1.5	0.4	10
FLT 1-6	0.060	0.080	2.4	0.6	0.6	1.7	1.5	0.6	12
FLT 1-7	0.041	0.057	2.8	0.6	0.6	1.9	1.9	0.7	10
FLT 1-8	0.054	0.047	2.1	0.6	0.4	1.5	1.4	0.5	12
FLT 1-9	0.070	0.073	3.0	0.4	0.7	2.6	2.0	0.7	12
平均値	0.059	0.067	2.5	0.7	0.6	1.7	1.6	0.6	
H = 2500 ft									
FLT 2-1	0.072	0.058	2.6	0.7	0.5	2.1	1.8	0.5	14
FLT 2-2	0.068	0.079	2.7	1.3	0.6	2.2	2.5	0.7	11
FLT 2-3	0.079	0.101	3.8	1.1	1.0	3.0	3.2	0.8	12
FLT 2-4	0.111	0.092	4.2	3.8	2.4	4.3	5.0	1.5	10
FLT 2-5	0.055	0.065	3.0	1.4	0.8	2.8	2.9	0.7	10
FLT 2-6	0.046	0.044	2.2	0.4	0.3	2.1	1.4	0.5	13
FLT 2-7	0.087	0.070	2.7	0.9	0.7	2.5	1.5	0.9	12
FLT 2-8	0.088	0.076	2.7	1.0	0.8	2.2	2.3	1.0	12
FLT 2-9	0.051	0.066	2.5	0.9	0.8	2.1	2.2	0.8	8
平均値	0.073	0.072	2.9	1.3	0.8	2.6	2.5	0.8	

M = 20

3000 ft と 2500 ft について示してある。FLT 1-1 ~ FLT 1-9 は高度 3000 ft の結果で標準偏差の平均値が $\bar{\sigma}_x$ が 2.5 m, $\bar{\sigma}_y$ が 0.7 m, $\bar{\sigma}_z$ が 0.6 m となった。又, FLT 2-1 ~ FLT 2-9 は高度 2500 ft の結果で $\bar{\sigma}_x = 2.9$ m, $\bar{\sigma}_y = 1.3$ m, $\bar{\sigma}_z = 0.8$ m となった。この標準偏差はフィルム座標の測定誤差が σ_{P_x} , 及び σ_{P_y} である場合に生ずる推定誤差の統計的な値であり, 各推定値の精度を表わすと考えられる。 $\bar{\sigma}_x$, $\bar{\sigma}_y$, $\bar{\sigma}_z$ の値が各ケース共異なった値を示している原因としては, フィルム座標, 及び地図座標の読み取り精度の他に標点の配置のしかたが考えられる。一般に X 軸方向に広く標点が配置されれば X_0 及び θ の精度が高くなり, Y 軸方向に広く標点を配置すれば Y_0 , 及び ϕ の精度が高くなる。又, 放射状に広く標点を配置すれば Z_0 , 及び ψ の精度が上がる事が考えられる。しかしながら, 今回は地図から標点の座標を読み取るために, 地面と接する建物の角がはっきりと見えている点, という制限があり理想的な配置は取れなかったが, フィルムの各コーナーに 3 点ぐらい標点を取れるように配慮した。

5.1.3 航空写真の推定高度と気圧高度計との比較

航空写真の推定高度と気圧高度計との比較を表 5-4 に示す。これからわかのように高度差は 3000 ft で 34 m, 2500 ft で 30 m である。これを各高度で割った比高度で比べると 3.7% と 3.9% となりスケールファクタの違いであることがわかる。これは, 気圧高度計が標準気圧の遞減率を用いて較正してあるために気温等が変化すると標準気圧からずれるために生ずる誤差と考えられる¹¹⁾。又, 標準偏差は 3000 ft で 1.56 m, 2500 ft で 1.37 m と比高度で表わすと 0.17% 及び 0.18% に相当する。

この標準偏差の値はモンテカルロシミュレーションで出てきた値の約 2 倍とオーダ的には一致する。

大気屈折補正を行なった場合, 高度 3000 ft のとき約 2 m 高度が高く修正された。

以上の精度の検討から, 今回の写真測量の推定精度は高度 2500 ~ 3000 ft では, X 軸, Y 軸, Z 軸共に約 2 ~ 3 m 程度の推定精度が期待できる。これは, レーダから 10 km の地点では角度換算で約 0.01 ~ 0.02 度となり, レーダの分解能と同じオーダである。

表 5-4 気圧高度と写真高度の比較

PHOTO NO	写真高度 (m)	気圧高度 (m)	差 (m)
FLT 1-1	923.5	888.2	35.3
FLT 1-2	923.6	888.5	35.1
FLT 1-3	930.3	894.9	35.4
FLT 1-4	910.3	876.0	34.3
FLT 1-5	912.2	879.2	33.0
FLT 1-6	914.0	881.1	32.9
FLT 1-7	913.8	878.9	34.9
FLT 1-8	913.9	883.6	30.3
FLT 1-9	910.5	877.1	33.4
平均値	916.9		33.84
標準偏差			1.56
比高度			0.037

(高度 3000 ft)

PHOTO NO	写真高度 (m)	気圧高度 (m)	差 (m)
FLT 2-1	764.4	732.6	31.8
FLT 2-2	761.5	731.2	30.3
FLT 2-3	752.5	722.5	30.0
FLT 2-4	752.7	721.8	30.9
FLT 2-5	752.2	721.8	30.4
FLT 2-6	763.3	731.7	31.6
FLT 2-7	756.0	728.5	27.5
FLT 2-8	758.2	729.1	29.1
FLT 2-9	741.0	712.7	28.3
平均値	755.8		29.99
標準偏差			1.37
比高度			0.039

(高度 2500 ft)

5.2 写真データとレーダデータの比較

飛行実験は高度 3000 ft (実験 No.1) と 2500 ft (実験 No.2) の飛行ケースで行なわれ, 航空写真データとして各々 9 枚の写真が得られた。これらの写真を 3.3 項に従って解析を行ない, 結果を表 5-5 及び表 5-6 に示す。

レーダデータは 2.3 項に述べた磁気テープデータより読み取った。データはアンテナと実験機までの距離 (SR), アンテナの仰角 (EL), アンテナの方位角 (AZ) 及び同期信号である。又, 航空写真データは極座標に変換し, レーダデータと比較した。そ

表 5-5 航空写真データ

PHOTO NO	X_0 (m)	Y_0 (m)	Z_0 (m)	θ (deg)	ϕ (deg)	ψ (deg)
FLT 1-1	-5810.5	8840.2	-923.5	4.91	-1.57	-52.99
FLT 1-2	-5194.2	8198.4	-923.6	5.02	-1.35	-54.11
FLT 1-3	-4588.1	7504.0	-930.3	3.11	-2.25	-54.84
FLT 1-4	-3986.7	6804.4	-910.3	5.46	0.25	-57.65
FLT 1-5	-3425.1	6075.0	-912.2	5.21	-0.95	-58.36
FLT 1-6	-2824.6	5360.4	-914.0	4.99	0.70	-56.14
FLT 1-7	-2183.9	4610.8	-913.8	5.13	-0.75	-56.88
FLT 1-8	-1601.5	3962.5	-913.9	4.35	0.36	-55.80
FLT 1-9	-1021.1	3308.6	-910.5	5.90	1.69	-53.89

表 5-6 航空写真データ

PHOTO NO	X_0 (m)	Y_0 (m)	Z_0 (m)	θ (deg)	ϕ (deg)	ψ (deg)
FLT 2-1	-6000.3	8739.5	-764.4	4.39	-2.74	-49.69
FLT 2-2	-5347.6	8060.1	-761.5	5.00	-2.11	-54.65
FLT 2-3	-4758.6	7345.2	-762.5	4.51	-0.86	-56.54
FLT 2-4	-4163.1	6603.1	-752.7	5.05	2.49	-57.68
FLT 2-5	-3595.0	5888.8	-752.2	5.46	-2.17	-56.37
FLT 2-6	-3029.5	5199.3	-763.3	5.71	-0.96	-53.80
FLT 2-7	-2395.0	4510.5	-756.0	5.85	-1.46	-52.53
FLT 2-8	-1719.8	3814.5	-758.2	5.03	-2.08	-52.55
FLT 2-9	-1127.7	3087.5	-741.0	4.67	1.73	-54.25

の結果を表5-7に示す。この結果より写真データとレーダデータの差の平均値及び標準偏差は次の通りである。

$$\Delta SR = 12.5 \pm 4.8 \text{ (m)}$$

$$\Delta EL = -0.33 \pm 0.023 \text{ (deg)}$$

$$\Delta AZ = -1.14 \pm 0.049 \text{ (deg)}$$

従ってこの ΔSR , ΔEL , ΔAZ をレーダデータの補正值と考える。

5.3 写真データ, レーダデータ, 及び機上データの比較

動的なデータの比較をするために, 図5-3, 図5-4に写真データ, レーダデータ, 及び参考データとして機上データをプロットした。レーダデータは ΔSR , ΔEL , ΔAZ の補正を(3-28)式により行なった。

図5-3の気圧高度計のデータは気圧の補正, 及び遞減率の平均温度による補正¹⁵⁾を行ない, 図5-4の位置データはDMEデータ(2つのVOR/DME局からの飛行機までの距離)から求め, レーダ直角座標に変換した。

図5-3の高度変化の時間履歴及び, 図5-4のX-Y面での飛行軌跡及び, レーダデータとには明らかなバイアス的な差が見られる。気圧高度については, 5.1.3で述べたようにその時の気温等で左右される為, 絶対高度を求めることはむずかしい。又, DMEデータも航法用として用いられるもので公称0.1NM(185.2m)の許容誤差がある。今, レーダデータに合うようにDMEデータを補正(最小二乗法)してみると,

表 5-7 写真測量とレーダトラッキングの比較

PHOTO NO	SR (m)		EL (deg)		Az (deg)				
	写真	レーダ	差	写真	レーダ	差	写真	レーダ	差
FLT 1-1	10619.0	10606.0	13.0	4.989	5.345	-0.356	123.32	124.459	-1.138
FLT 1-2	9749.2	9729.0	20.2	5.436	5.768	-0.332	122.36	123.503	-1.143
FLT 1-3	8844.6	8841.0	3.6	6.038	6.383	-0.345	121.44	122.525	-1.085
FLT 1-4	7938.6	7921.0	17.6	6.584	6.965	-0.381	120.37	121.580	-1.210
FLT 1-5	7033.4	7021.0	12.4	7.452	7.784	-0.332	119.41	120.520	-1.110
FLT 1-6	6127.6	6113.0	14.6	8.578	8.970	-0.392	117.79	118.954	-1.164
FLT 1-7	5183.0	5175.0	8.0	10.155	10.475	-0.320	115.34	116.455	-1.115
FLT 1-8	4370.6	4356.0	14.6	12.070	12.442	-0.372	112.01	113.275	-1.265
FLT 1-9	3580.3	3562.0	18.3	14.733	15.095	-0.362	107.15	108.254	-1.104
FLT 2-1	10630.9	10619.0	11.9	4.123	4.438	-0.315	124.49	125.596	-1.106
FLT 2-2	5702.6	9688.0	14.6	4.502	4.861	-0.359	123.56	124.728	-1.168
FLT 2-3	8784.2	8775.0	9.2	4.914	5.229	-0.315	122.94	124.085	-1.145
FLT 2-4	7842.1	7835.0	7.1	5.508	5.806	-0.298	122.23	123.420	-1.190
FLT 2-5	6940.3	6932.0	8.3	6.222	6.553	-0.331	121.40	122.536	-1.136
FLT 2-6	6055.8	6050.0	15.8	7.229	7.553	-0.324	120.23	121.311	-1.081
FLT 2-7	5162.5	5146.0	16.5	8.421	8.745	-0.324	117.97	119.009	-1.039
FLT 2-8	4252.4	4236.0	16.4	10.271	10.552	-0.281	114.27	115.406	-1.136
FLT 2-9	3369.5	3367.0	2.5	12.705	12.986	-0.281	110.07	111.171	-1.101

PHOTO NO	ΔSR (m)		ΔEL (deg)		ΔAz (deg)	
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
FLT 1	13.6	4.9	-0.355	0.023	-1.148	0.054
FLT 2	11.4	4.6	-0.314	0.023	-1.122	0.043
総 合	12.5	4.8	-0.334	0.023	-1.135	0.049

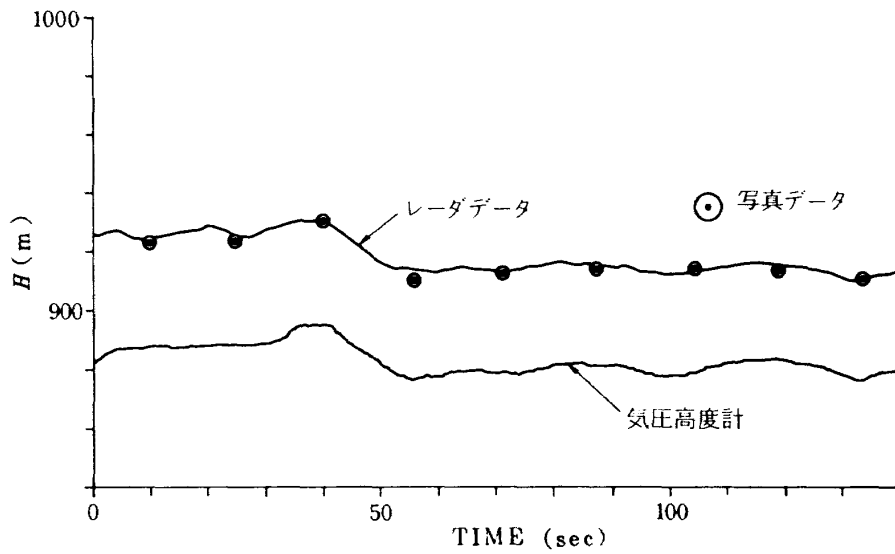


図 5-3 (a) 実験結果 (3000 ft)

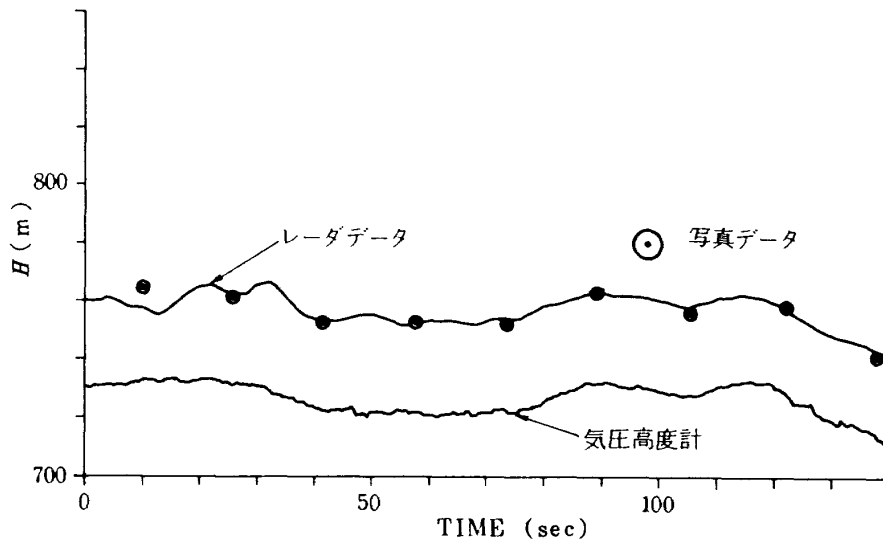


図 5-3 (b) 実験結果 (2500 ft)

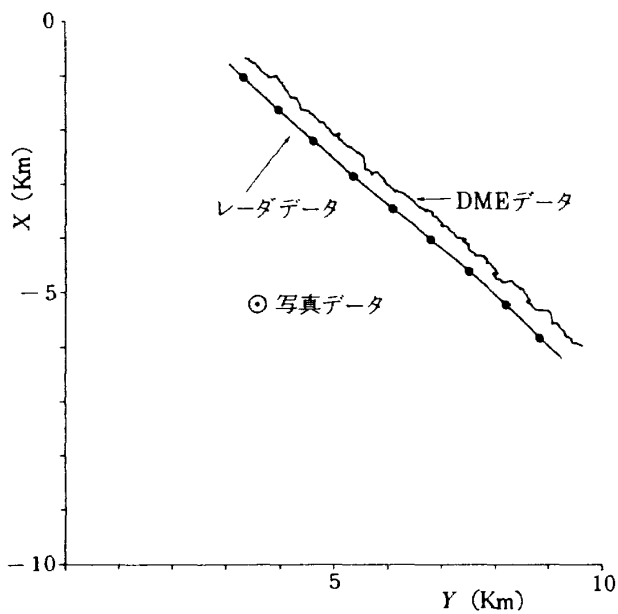


図 5-4 (a) 実験結果 (3000 ft)

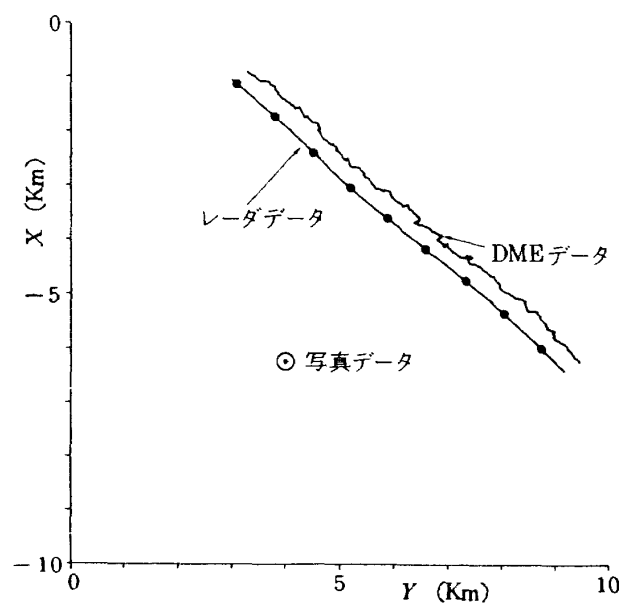


図 5-4 (b) 実験結果 (2500 ft)

実験No1 No1 DME … 363 ± 43 (m)
 (3000 ft) No2 DME … 119 ± 30 (m)
 実験No2 No1 DME … 363 ± 40 (m)
 (2500ft) No2 DME … 114 ± 31 (m)

のバイアスを、又、その精度については標準偏差を考慮すればよい事がわかった。

5.4 写真データ(姿勢角)と機上データの比較

表5-5で得た写真データの姿勢角(θ_p, ϕ_p, ψ_p)と機上データの姿勢角を図5-5に示す。

この結果から分かるように写真測量から推定した姿勢角は機上データとよく一致している。この姿勢角の一致する程度が写真測量の精度を表わしているが、この残差の中にはジャイロの誤差、及びカメラの防振台による取付角の変化等を含んでいるのでこ

の残差すべてが誤差ということにはならない。

第6章 結 論

航空写真を使う事により航空機追跡用レーダの較正を行なった結果から次のような結論を得た。

- 1) 今回の航空写真の位置推定精度は測定高度750~900m間では2~3m(1 σ)と考えられ、レーダの較正基準として適当である。
- 2) 写真とレーダの差の標準偏差はスラントレンジで約5m、仰角(EL)、方位角(AZ)は各々0.03°、及び0.05°であった。
- 3) 応用例として気圧高度計、及び2局のDMEデータから計算した位置との比較を行なったが較正されたレーダは十分これらの標準のスケールとして

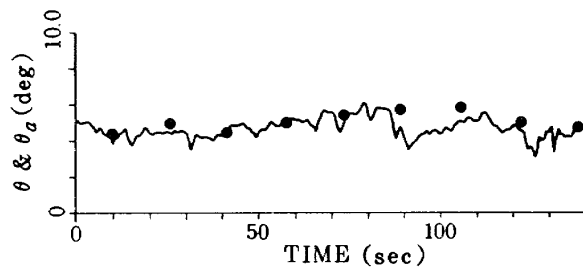
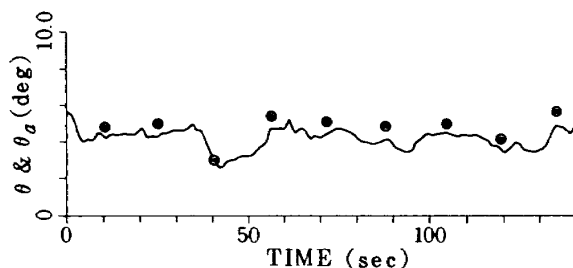
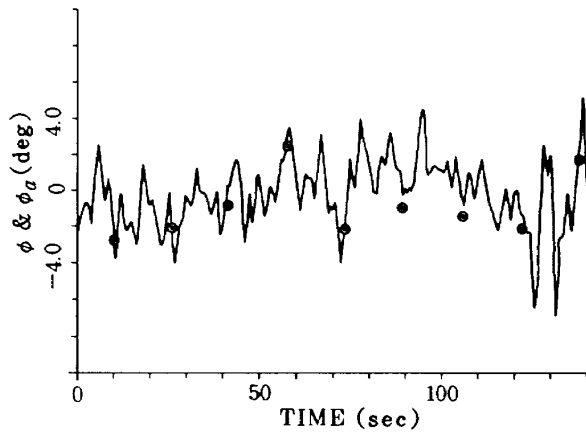
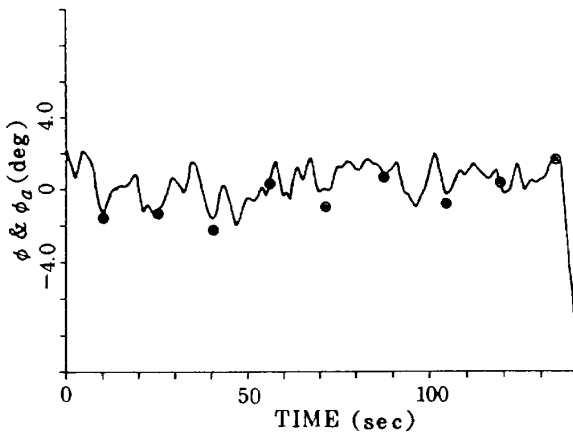
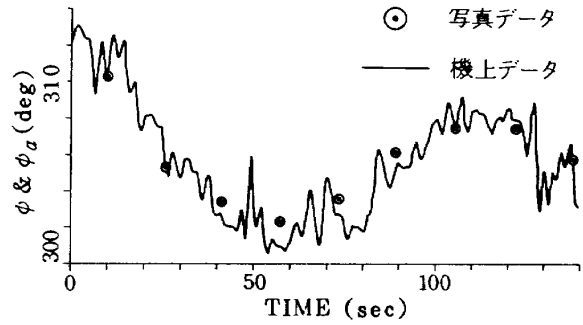
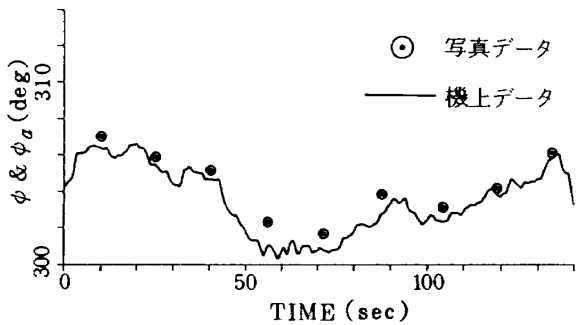


図5-5 (a) 写真データと機上データの比較 (3000 ft)

図5-5 (b) 写真データと機上データの比較 (2500 ft)

使用できる。

あとがき

航空機追跡用レーダはターミナルエリア・ガイダンスの研究のため古茂田真幸飛行試験室長が企画し、製作調整は明星電気株式会社におねがいをした。

この報告書をまとめるにあたり写真測量については国土地理院測図部国土基本図課の矢口彰技官に、地図座標系については同院地理調査部地理第一課の本山満技官に御指導頂いた。又、写真測量の基本的なプログラムについては研修生の小川啓司君が作成したものを使用した。この他、東京大学生産技術研究所の村井俊治教授及び別府護郎飛行実験部長に、写真測量及び報告書全般についてアドバイスを頂いた。

これらの方々に深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 北野宏久：MLSについて，第18回飛行機シンポジウム，1980年11月。
- 2) ミッションモデル及び多目的衛星に関する調査検討(3.3.9 航行援助技術衛星 p174-175) 昭和54年度宇宙開発事業団委託業務成果報告書，財団法人未来工学研究所，1980年3月。
- 3) 矢澤健司，稲垣敏治：ストラップダウン型運動計測装置による航空機の姿勢角，速度，位置の推定について，第17回飛行機シンポジウム，1979年11月。
- 4) 矢澤健司，岡遠一，小野孝次，稲垣敏治：航空機地上追跡レーダの評価，第20回飛行機シンポジウム，1982年11月。
- 5) 小川啓司：飛行試験によるデータ処理の研究(空中三角測量)，東京電機大学電子工学科卒業論文，1981年2月。
- 6) 村井俊治：写真による三次元測量，日本写真測量学会，応用写真測量委員会，1983年6月。
- 7) 村井俊治：解析写真測量，日本写真測量学会，解析写真測量委員会，1983年6月。
- 8) 小坂和夫：地図編集と投影，株式会社山海堂，1982年1月。
- 9) 古茂田真幸，川幡長勝，塚野雄吉，小野孝次：可変安定応答実験機(VSRA)について(I)，日本航空宇宙学会誌第31巻第349号，1983年2月。
- 10) 小野孝次，古茂田真幸，塚野雄吉，河内啓二：基準径路設定装置の試作とそれを用いた飛行実験，第16回飛行機シンポジウム，1978年12月。
- 11) Stanley K. Garoutte: New Radar Calibration & Performance Monitoring Techniques for Enhanced Flight Test Data, AIAA-83-2780-, AIAA/AHS/IES/SETP/SFTE/DGLR 2nd Flight Testing Conference, Nov. 1983
- 12) 春川光男：入門解析空中三角測量 その1，国土地理院，1977.3.
- 13) Iliff, Kenneth W.; Taylon Lawrence W. Jr.; Ditermination of Stability Derivatives From Flight Data Using a Newton-Raphson Minimization Technique NASA TN D-6759, 1972
- 14) Wand F. Hodge and Wayne H. Bnyant : Monte Carlo Analysis of Inaccuracies in Estimated Aircraft Parameters Caused by Uumodeled Flight Instrumentation Errors. NASA TN D- 7712, 1975
- 15) 東京天文台：理科年表(気190-気193)，丸善株式会社，昭和58年11月
- 16) McRuer, Ashlcnas and Graham : Aircraft Dynamics and Automatic Control P227, Princeton University Press, 1973

付録A 写真測量アルゴリズム

• フィルムへの投影

$$P_{x_i} = \frac{F}{Z_{p_i}} X_{p_i} \quad (3-4)$$

$$P_{y_i} = \frac{F}{Z_{p_i}} Y_{p_i} \quad (3-5)$$

但し,

$$\begin{bmatrix} X_{p_i} \\ Y_{p_i} \\ Z_{p_i} \end{bmatrix} = C_{PE} \begin{bmatrix} X_i - X_0 \\ Y_i - Y_0 \\ Z_i - Z_0 \end{bmatrix} \quad (3-6)$$

$$C_{PE} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix} \quad (A-1)$$

$$C_{11} = \cos \theta \cos \phi$$

$$C_{12} = \cos \theta \sin \phi$$

$$C_{13} = -\sin \theta$$

$$C_{21} = \sin \phi \sin \theta \cos \phi - \cos \phi \sin \phi$$

$$C_{22} = \sin \phi \sin \theta \sin \phi + \cos \phi \cos \phi$$

$$C_{23} = \sin \phi \cos \theta$$

$$C_{31} = \cos \phi \sin \theta \cos \phi + \sin \phi \sin \phi$$

$$C_{32} = \cos \phi \sin \theta \sin \phi - \sin \phi \cos \phi$$

$$C_{33} = \cos \phi \cos \theta$$

• 評価関数

$$\epsilon_{x_i} = P_{x_i} - \hat{P}_{x_i} \quad (3-7)$$

$$\epsilon_{y_i} = P_{y_i} - \hat{P}_{y_i} \quad (3-8)$$

$$J = \sum_{i=1}^N [\epsilon_{x_i}, \epsilon_{y_i}] W_i \begin{bmatrix} \epsilon_{x_i} \\ \epsilon_{y_i} \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^N \epsilon_i^T W_i \epsilon_i \quad (3-9)$$

但し,

$$W_i = \begin{bmatrix} w_{x_i} & 0 \\ 0 & w_{y_i} \end{bmatrix}, \quad \epsilon_i = \begin{bmatrix} \epsilon_{x_i} \\ \epsilon_{y_i} \end{bmatrix}$$

• 修正ニュートンラプソン法

$$J = J_0 + \frac{\partial J}{\partial C^T} \Delta C + \frac{1}{2} \Delta C^T \frac{\partial^2 J}{\partial C \partial C^T} \Delta C \quad (3-10)$$

$$\frac{dJ}{d\Delta C} = \frac{\partial J}{\partial C^T} + \Delta C^T \frac{\partial^2 J}{\partial C \partial C^T} \quad (3-11)$$

$$\Delta C^T = - \left(\frac{\partial J}{\partial C^T} \right) \cdot \left(\frac{\partial^2 J}{\partial C \partial C^T} \right)^{-1} \quad (3-12)$$

$$C_i^T = C_{i-1}^T + \Delta C^T \quad (3-13)$$

$$C^T = [X_0, Y_0, Z_0, \phi, \theta, \psi] \quad (A-2)$$

一次及び二次の偏微分値

$$\frac{\partial J}{\partial C^T} = 2 \sum_{i=1}^N \left\{ \epsilon_i^T W_i \frac{\partial \epsilon_i}{\partial C^T} \right\} \quad (3-14)$$

$$\frac{\partial^2 J}{\partial C \partial C^T} = 2 \sum_{i=1}^N \left\{ \frac{\partial \epsilon_i^T}{\partial C} W_i \frac{\partial \epsilon_i}{\partial C^T} \right\} \quad (3-15)$$

$$\frac{\partial \epsilon_i}{\partial C^T} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \epsilon_i}{\partial X_0} & \frac{\partial \epsilon_i}{\partial Y_0} & \frac{\partial \epsilon_i}{\partial Z_0} & \frac{\partial \epsilon_i}{\partial \phi} & \frac{\partial \epsilon_i}{\partial \theta} & \frac{\partial \epsilon_i}{\partial \psi} \end{bmatrix} \quad (A-3)$$

各パラメータの偏微分値

$$(1) \frac{\partial \epsilon_i}{\partial X_0}$$

$$\epsilon_i = \begin{bmatrix} \epsilon_{x_i} \\ \epsilon_{y_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{x_i} \\ P_{y_i} \end{bmatrix} - \left(\frac{F}{Z_{p_i}} \right) \begin{bmatrix} X_{p_i} \\ Y_{p_i} \end{bmatrix} \quad (A-4)$$

$$\frac{\partial \epsilon_i}{\partial X_0} = -F \frac{\partial \left(\frac{1}{Z_{p_i}} \right)}{\partial X_0} \begin{bmatrix} X_{p_i} \\ Y_{p_i} \end{bmatrix} - \frac{F}{Z_{p_i}} \begin{bmatrix} \frac{\partial X_{p_i}}{\partial X_0} \\ \frac{\partial Y_{p_i}}{\partial X_0} \end{bmatrix} \quad \begin{matrix} a) \\ b) \end{matrix} \quad (A-5)$$

$$\frac{\partial \left(\frac{1}{Z_{p_i}} \right)}{\partial X_0} = -\frac{1}{Z_{p_i}^2} \frac{\partial Z_{p_i}}{\partial X_0} \quad c) \quad (A-6)$$

a) 式 3-6 から

$$\frac{\partial X_{p_i}}{\partial X_0} = \frac{\partial [C_{11} \ C_{12} \ C_{13}] \begin{bmatrix} X_i - X_0 \\ Y_i - Y_0 \\ Z_i - Z_0 \end{bmatrix}}{\partial X_0} \quad (A-7)$$

$$\frac{\partial X_{p_i}}{\partial X_0} = \frac{\partial [C_{11} \ C_{12} \ C_{13}]}{\partial X_0} \begin{bmatrix} X_i - X_0 \\ Y_i - Y_0 \\ Z_i - Z_0 \end{bmatrix} + [C_{11} \ C_{12} \ C_{13}] \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (A-8)$$

$$\frac{\partial [C_{11} \ C_{12} \ C_{13}]}{\partial X_0} = 0 \quad (A-9)$$

ゆえに

$$a) \frac{\partial X_{p_i}}{\partial X_0} = [C_{11} \ C_{12} \ C_{13}] \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = -C_{11} \quad (A-10)$$

同様に

$$b) \frac{\partial Y_{p_i}}{\partial X_0} = [C_{21} \ C_{22} \ C_{23}] \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = -C_{21} \quad (A-11)$$

$$c) \frac{\partial Z_{P_i}}{\partial X_0} = [C_{31} \ C_{32} \ C_{33}] \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = -C_{31} \quad (A-12)$$

ゆえに

$$\frac{\partial \epsilon_i}{\partial X_0} = -\frac{F C_{31}}{Z_{P_i}^2} \begin{bmatrix} X_{P_i} \\ Y_{P_i} \end{bmatrix} + \frac{F}{Z_{P_i}} \begin{bmatrix} C_{11} \\ C_{21} \end{bmatrix} \quad (A-13)$$

$$(2) \frac{\partial \epsilon_i}{\partial Y_0} = -F \frac{\partial \left(\frac{1}{Z_{P_i}} \right)}{\partial Y_0} \begin{bmatrix} X_{P_i} \\ Y_{P_i} \end{bmatrix} - \frac{F}{Z_{P_i}} \begin{bmatrix} \frac{\partial X_{P_i}}{\partial Y_0} \\ \frac{\partial Y_{P_i}}{\partial Y_0} \end{bmatrix} \quad \begin{matrix} a) \\ b) \end{matrix} \quad (A-14)$$

$$\frac{\partial \left(\frac{1}{Z_{P_i}} \right)}{\partial Y_0} = -\frac{1}{Z_{P_i}^2} \frac{\partial Z_{P_i}}{\partial Y_0} \quad c) \quad (A-15)$$

(1)と同様に

$$a) \frac{\partial X_{P_i}}{\partial Y_0} = [C_{11} \ C_{12} \ C_{13}] \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix} = -C_{12} \quad (A-16)$$

$$b) \frac{\partial Y_{P_i}}{\partial Y_0} = [C_{21} \ C_{22} \ C_{23}] \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix} = -C_{22} \quad (A-17)$$

$$c) \frac{\partial Z_{P_i}}{\partial Y_0} = [C_{31} \ C_{32} \ C_{33}] \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix} = -C_{32} \quad (A-18)$$

ゆえに

$$\frac{\partial \epsilon_i}{\partial Y_0} = -\frac{F C_{32}}{Z_{P_i}^2} \begin{bmatrix} X_{P_i} \\ Y_{P_i} \end{bmatrix} + \frac{F}{Z_{P_i}} \begin{bmatrix} C_{12} \\ C_{22} \end{bmatrix} \quad (A-19)$$

$$(3) \frac{\partial \epsilon_i}{\partial Z_0} = -F \frac{\partial \left(\frac{1}{Z_{P_i}} \right)}{\partial Z_0} \begin{bmatrix} X_{P_i} \\ Y_{P_i} \end{bmatrix} - \frac{F}{Z_{P_i}} \begin{bmatrix} \frac{\partial X_{P_i}}{\partial Z_0} \\ \frac{\partial Y_{P_i}}{\partial Z_0} \end{bmatrix} \quad \begin{matrix} a) \\ b) \end{matrix} \quad (A-20)$$

$$\frac{\partial \left(\frac{1}{Z_{P_i}} \right)}{\partial Z_0} = -\frac{1}{Z_{P_i}^2} \frac{\partial Z_{P_i}}{\partial Z_0} \quad c) \quad (A-21)$$

(1)と同様に

$$a) \frac{\partial X_{P_i}}{\partial Z_0} = [C_{11} \ C_{12} \ C_{13}] \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} = -C_{13} \quad (A-22)$$

$$b) \frac{\partial Y_{P_i}}{\partial Z_0} = [C_{21} \ C_{22} \ C_{23}] \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} = -C_{23} \quad (A-23)$$

$$c) \frac{\partial Z_{P_i}}{\partial Z_0} = [C_{31} \ C_{32} \ C_{33}] \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} = -C_{33} \quad (A-24)$$

ゆえに

$$\frac{\partial \epsilon_i}{\partial Z_0} = -\frac{F C_{33}}{Z_{P_i}^2} \begin{bmatrix} X_{P_i} \\ Y_{P_i} \end{bmatrix} + \frac{F}{Z_{P_i}} \begin{bmatrix} C_{13} \\ C_{23} \end{bmatrix} \quad (\text{A-25})$$

$$(4) \frac{\partial \epsilon_i}{\partial \phi} = -F \frac{\partial \left(\frac{1}{Z_{P_i}} \right)}{\partial \phi} \begin{bmatrix} X_{P_i} \\ Y_{P_i} \end{bmatrix} - \frac{F}{Z_{P_i}} \begin{bmatrix} \frac{\partial X_{P_i}}{\partial \phi} \\ \frac{\partial Y_{P_i}}{\partial \phi} \end{bmatrix} \quad \begin{array}{l} \text{a)} \\ \text{b)} \end{array} \quad (\text{A-26})$$

$$\frac{\partial \left(\frac{1}{Z_{P_i}} \right)}{\partial \phi} = -\frac{1}{Z_{P_i}^2} \frac{\partial Z_{P_i}}{\partial \phi} \quad \text{c)} \quad (\text{A-27})$$

(1)と同様に

$$\text{a)} \quad \frac{\partial X_{P_i}}{\partial \phi} = \begin{bmatrix} \frac{\partial C_{11}}{\partial \phi} & \frac{\partial C_{12}}{\partial \phi} & \frac{\partial C_{13}}{\partial \phi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_i - X_0 \\ Y_i - Y_0 \\ Z_i - Z_0 \end{bmatrix} = 0 \quad (\text{A-28})$$

$$\text{b)} \quad \frac{\partial Y_{P_i}}{\partial \phi} = \begin{bmatrix} \frac{\partial C_{21}}{\partial \phi} & \frac{\partial C_{22}}{\partial \phi} & \frac{\partial C_{23}}{\partial \phi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_i - X_0 \\ Y_i - Y_0 \\ Z_i - Z_0 \end{bmatrix} \quad (\text{A-29})$$

$$\text{c)} \quad \frac{\partial Z_{P_i}}{\partial \phi} = \begin{bmatrix} \frac{\partial C_{31}}{\partial \phi} & \frac{\partial C_{32}}{\partial \phi} & \frac{\partial C_{33}}{\partial \phi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_i - X_0 \\ Y_i - Y_0 \\ Z_i - Z_0 \end{bmatrix} \quad (\text{A-30})$$

$$(5) \frac{\partial \epsilon_i}{\partial \theta} = -F \frac{\partial \left(\frac{1}{Z_{P_i}} \right)}{\partial \theta} \begin{bmatrix} X_{P_i} \\ Y_{P_i} \end{bmatrix} - \frac{F}{Z_{P_i}} \begin{bmatrix} \frac{\partial X_{P_i}}{\partial \theta} \\ \frac{\partial Y_{P_i}}{\partial \theta} \end{bmatrix} \quad \begin{array}{l} \text{a)} \\ \text{b)} \end{array} \quad (\text{A-31})$$

$$\frac{\partial \left(\frac{1}{Z_{P_i}} \right)}{\partial \theta} = -\frac{1}{Z_{P_i}^2} \frac{\partial Z_{P_i}}{\partial \theta} \quad \text{c)} \quad (\text{A-32})$$

$$\text{a)} \quad \frac{\partial X_{P_i}}{\partial \theta} = \begin{bmatrix} \frac{\partial C_{11}}{\partial \theta} & \frac{\partial C_{12}}{\partial \theta} & \frac{\partial C_{13}}{\partial \theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_i - X_0 \\ Y_i - Y_0 \\ Z_i - Z_0 \end{bmatrix} \quad (\text{A-33})$$

$$\text{b)} \quad \frac{\partial Y_{P_i}}{\partial \theta} = \begin{bmatrix} \frac{\partial C_{21}}{\partial \theta} & \frac{\partial C_{22}}{\partial \theta} & \frac{\partial C_{23}}{\partial \theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_i - X_0 \\ Y_i - Y_0 \\ Z_i - Z_0 \end{bmatrix} \quad (\text{A-34})$$

$$\text{c)} \quad \frac{\partial Z_{P_i}}{\partial \theta} = \begin{bmatrix} \frac{\partial C_{31}}{\partial \theta} & \frac{\partial C_{32}}{\partial \theta} & \frac{\partial C_{33}}{\partial \theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_i - X_0 \\ Y_i - Y_0 \\ Z_i - Z_0 \end{bmatrix} \quad (\text{A-35})$$

$$(6) \frac{\partial \epsilon_i}{\partial \phi} = -F \frac{\partial \left(\frac{1}{Z_{P_i}} \right)}{\partial \phi} \begin{bmatrix} X_{P_i} \\ Y_{P_i} \end{bmatrix} - \frac{F_{P_i}}{Z_{P_i}} \begin{bmatrix} \frac{\partial X_{P_i}}{\partial \phi} \\ \frac{\partial Y_{P_i}}{\partial \phi} \end{bmatrix} \quad \begin{array}{l} \text{a)} \\ \text{b)} \end{array} \quad (\text{A-36})$$

$$\frac{\partial \left(\frac{1}{Z_{P_i}} \right)}{\partial \phi} = -\frac{1}{Z_{P_i}^2} \frac{\partial Z_{P_i}}{\partial \phi} \quad \text{c)} \quad (\text{A-37})$$

$$a) \frac{\partial X_{P_i}}{\partial \phi} = \begin{bmatrix} \frac{\partial C_{11}}{\partial \phi} & \frac{\partial C_{12}}{\partial \phi} & \frac{\partial C_{13}}{\partial \phi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_i - X_0 \\ Y_i - Y_0 \\ Z_i - Z_0 \end{bmatrix} \quad (A-38)$$

$$b) \frac{\partial Y_{P_i}}{\partial \phi} = \begin{bmatrix} \frac{\partial C_{21}}{\partial \phi} & \frac{\partial C_{22}}{\partial \phi} & \frac{\partial C_{23}}{\partial \phi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_i - X_0 \\ Y_i - Y_0 \\ Z_i - Z_0 \end{bmatrix} \quad (A-39)$$

$$c) \frac{\partial Z_{P_i}}{\partial \phi} = \begin{bmatrix} \frac{\partial C_{31}}{\partial \phi} & \frac{\partial C_{32}}{\partial \phi} & \frac{\partial C_{33}}{\partial \phi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_i - X_0 \\ Y_i - Y_0 \\ Z_i - Z_0 \end{bmatrix} \quad (A-40)$$

$$\frac{\partial C_{11}}{\partial \phi} = 0, \quad \frac{\partial C_{12}}{\partial \phi} = 0, \quad \frac{\partial C_{13}}{\partial \phi} = 0 \quad (A-41)$$

$$\frac{\partial C_{21}}{\partial \phi} = \cos \phi \sin \theta \cos \phi + \sin \phi \sin \phi \quad (A-42)$$

$$\frac{\partial C_{22}}{\partial \phi} = \cos \phi \sin \theta \sin \phi - \sin \phi \cos \phi \quad (A-43)$$

$$\frac{\partial C_{23}}{\partial \phi} = \cos \phi \cos \theta \quad (A-44)$$

$$\frac{\partial C_{31}}{\partial \phi} = -\sin \phi \sin \theta \cos \phi + \cos \phi \sin \phi \quad (A-45)$$

$$\frac{\partial C_{32}}{\partial \phi} = -\sin \phi \sin \theta \sin \phi - \cos \phi \cos \phi \quad (A-46)$$

$$\frac{\partial C_{33}}{\partial \phi} = -\sin \phi \cos \theta \quad (A-47)$$

$$\frac{\partial C_{11}}{\partial \theta} = -\sin \theta \cos \phi \quad (A-48)$$

$$\frac{\partial C_{12}}{\partial \theta} = -\sin \theta \sin \phi \quad (A-49)$$

$$\frac{\partial C_{13}}{\partial \theta} = -\cos \theta \quad (A-50)$$

$$\frac{\partial C_{21}}{\partial \theta} = \sin \phi \cos \theta \cos \phi \quad (A-51)$$

$$\frac{\partial C_{22}}{\partial \theta} = \sin \phi \cos \theta \sin \phi \quad (A-52)$$

$$\frac{\partial C_{23}}{\partial \theta} = -\sin \phi \sin \theta \quad (A-53)$$

$$\frac{\partial C_{31}}{\partial \theta} = \cos \phi \cos \theta \cos \phi \quad (A-54)$$

$$\frac{\partial C_{32}}{\partial \theta} = \cos \phi \cos \theta \sin \phi \quad (A-55)$$

$$\frac{\partial C_{33}}{\partial \theta} = -\cos \phi \sin \theta \quad (A-56)$$

$$\frac{\partial C_{11}}{\partial \phi} = -\cos \theta \sin \phi \tag{A-57}$$

$$\frac{\partial C_{12}}{\partial \phi} = \cos \theta \cos \phi \tag{A-58}$$

$$\frac{\partial C_{13}}{\partial \phi} = 0, \quad \frac{\partial C_{23}}{\partial \phi} = 0, \quad \frac{\partial C_{33}}{\partial \phi} = 0 \tag{A-59}$$

$$\frac{\partial C_{21}}{\partial \phi} = -\sin \phi \sin \theta \sin \phi - \cos \phi \cos \phi \tag{A-60}$$

$$\frac{\partial C_{22}}{\partial \phi} = \sin \phi \sin \theta \cos \phi - \cos \phi \sin \phi \tag{A-61}$$

$$\frac{\partial C_{31}}{\partial \phi} = -\cos \phi \sin \theta \sin \phi + \sin \phi \cos \phi \tag{A-62}$$

$$\frac{\partial C_{32}}{\partial \phi} = \cos \phi \sin \theta \cos \phi + \sin \phi \sin \phi \tag{A-63}$$

付録B 標点のフィルム座標の求め方

航空写真測量ではフィルムに投影された標点の座標を精度良く求めることが重要になってくる。

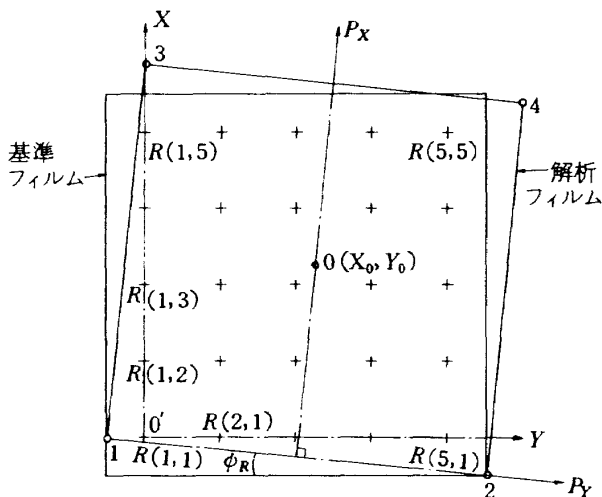
今回は、フィルムに座標基準マークがない為、測定フィルムと基準フィルムを重ねて印画紙に引き伸して焼き付け、基準フィルムの基準点を基にして座標を求めた。測定フィルムの絶対的な位置はフィルムのコーナを基準にした。

具体的な測定方法としては、図B-1のような25個の基準点を持つ基準フィルムを測定しようとするフィルムを重ねて印画紙に引き伸して焼き付け、それを通常の設定によって標点のフィルム座標を求め

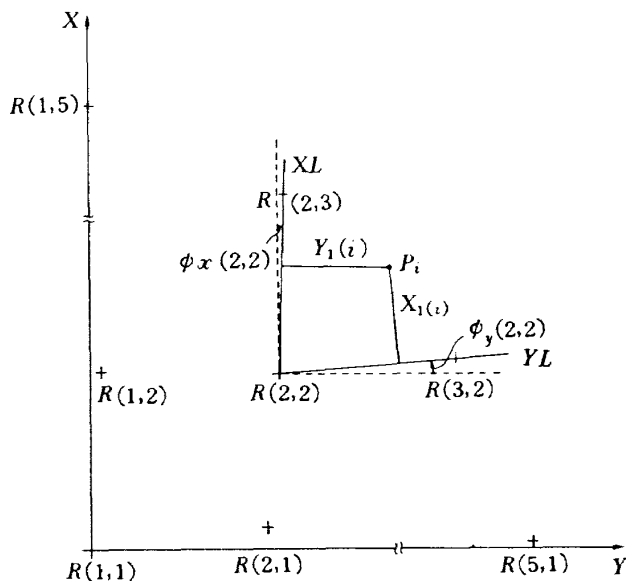
た。この方法によると印画紙上でフィルムが約8倍の拡大率を持っているので0.2mmの精度で標点を読み取ることによりフィルム上で0.025mmの精度が期待できる。なお、基準フィルムにある25個の基準点は1/1000mmの精度で読み取ってある。

測定手順

図B-1は基準フィルムと被測定フィルムを重ねて印画紙に引き伸ばしたものである。図B-2は図B-1を拡大したもので、標点 P_i は基準点 $R(2, 2)$ の近くにある。



図B-1



図B-2

1) 縮尺率を求める。

基準点 $R(m, n)$ を原点として $R(m, n+1)$ 及び $R(m+1, n)$ までの長さ $L_x(m, n)$, $L_y(m, n)$ を印画紙上で測定する。

$$L_x(m, n) = R(m, n) \sim R(m, n+1) \quad (\text{B-1})$$

$$L_y(m, n) = R(m, n) \sim R(m+1, n) \quad (\text{B-2})$$

基準フィルムの基準点座標データから $L_x(m, n)$, $L_y(m, n)$ に対応する基準フィルムの長さを計算して、これより縮尺率を求める。

$$M_x(m, n) = (\{R_x(m, n+1) - R_x(m, n)\}^2 + \{R_y(m, n+1) - R_y(m, n)\}^2)^{1/2} \quad (\text{B-3})$$

$$M_y(m, n) = (\{R_x(m+1, n) - R_x(m, n)\}^2 + \{R_y(m+1, n) - R_y(m, n)\}^2)^{1/2} \quad (\text{B-4})$$

これから縮尺率 S_x , S_y は次のようになる。

$$S_x(m, n) = M_x(m, n) / L_x(m, n) \quad (\text{B-5})$$

$$S_y(m, n) = M_y(m, n) / L_y(m, n) \quad (\text{B-6})$$

2) 標点 P_i の座標

図B-2のように測定標点 P_i を基準点 $R(m, n)$ を原点とし $R(m, n+1) \sim R(m, n)$ を通る直線を XL 軸, $R(m+1, n) \sim R(m, n)$ を通る直線を YL 軸とする時の座標 $X_1(i)$, $Y_1(i)$ を測定する。

$X_1(i)$: P_i から YL 軸に下した垂線の長さ

$Y_1(i)$: P_i から XL 軸に下した垂線の長さ

これをフィルム面上の長さに変換すると

$$X_2(i) = S_x(m, n) * X_1(i) \quad (\text{B-7})$$

$$Y_2(i) = S_y(m, n) * Y_1(i) \quad (\text{B-8})$$

3) 基準フィルムの座標変換

基準フィルムの基準点の座標は $R(1, 1) \sim R(1, 5)$ を通る直線を X 軸, 原点 $(1, 1)$ を通り X 軸と直交する直線を Y 軸として読み取ってある。

このためローカルな XL YL 軸は XY 軸と平行ではないので基準フィルムの座標に変換するために下に述べるような座標変換を行なう。

XL 軸と X 軸の傾き ϕ_x , YL 軸と Y 軸の傾き ϕ_y を求める。

$$\phi_x(m, n) = \tan^{-1} \left(\frac{YL(m, n+1) - YL(m, n)}{XL(m, n+1) - XL(m, n)} \right) \quad (\text{B-9})$$

$$\phi_y(m, n) = \tan^{-1} \left(\frac{XL(m+1, n) - XL(m, n)}{YL(m+1, n) - YL(m, n)} \right) \quad (\text{B-10})$$

$\phi_x(m, n)$, $\phi_y(m, n)$ を用いて P_i の $X-Y$ 座標を基準フィルムの座標に変換する。

ϕ_x と ϕ_y が十分小さく $\cos \phi_x$ と $\cos \phi_y$ が 1 とすると

$$X_3(i) = RX(m, n) + X_2(i) + Y_2(i) * \sin \phi_y \quad (\text{B-11})$$

$$Y_3(i) = RY(m, n) + Y_2(i) + X_2(i) * \sin \phi_x \quad (\text{B-12})$$

ここでフィルム座標を定義しておく。

被測定フィルムの四隅の点を、図B-1のように 1 ~ 4 とすると 1 ~ 2 を通る直線を測定フィルムの基準線と定義する。

基準フィルムの座標に変換された 1 ~ 4 の座標を用いて原点を求め、そこを通過して基準線に平行に Y 軸を、直角に X 軸をとる。原点 X_0 , Y_0 は次式によって求める。

$$X_0 = \frac{X_3(1) + X_3(2) + X_3(3) + X_3(4)}{4} \quad (\text{B-13})$$

$$Y_0 = \frac{Y_3(1) + Y_3(2) + Y_3(3) + Y_3(4)}{4} \quad (\text{B-14})$$

4) 標点 P_i をフィルム座標に変換する。

基準フィルムと被測定フィルムを重ねたときの座標軸の傾き ϕ_R は被測定フィルムの基準線と基準フィルムの Y 軸のなす角度で表される。

$$\phi_R = \tan^{-1} \frac{X_3(2) - X_3(1)}{Y_3(2) - Y_3(1)} \quad (\text{B-15})$$

基準フィルムの座標で表された標点 P_i は次式によってフィルム座標 $X-Y$ に変換され P'_{x_i} , P'_{y_i} が求まる。

$$P'_{x_i} = \{X_3(i) - X_0\} \cos \phi_R - \{Y_3(i) - Y_0\} \sin \phi_R \quad (\text{B-16})$$

$$P'_{y_i} = \{X_3(i) - X_0\} \sin \phi_R - \{Y_3(i) - Y_0\} \cos \phi_R \quad (\text{B-17})$$

以上の方法は通常のスケーラで測定する場合を示したがデジタル的に XY 座標を読み取るデジタイザや専用のフィルム座標読み取り機であるコンパレータを使用する場合について述べる。

○デジタイザによる方法

デジタイザは精度が 0.1 ~ 0.01 mm まで多くの機

種があるが直交性にすぐれているのでスケールで測定する場合より精度が上り、又測定も容易になる。

データ処理方法としては、まず印画紙に焼き付けられた基準フィルムの4つの基準点 $R(m, n)$, $R(m, n+1)$, $R(m+1, n)$, $R(m+1, n+1)$ をデジタイザで読み取り $X_1(m, n)$, $X_1(m, n+1)$, $X_1(m+1, n)$, $X_1(m+1, n+1)$ 及び $Y_1(m, n) \sim Y_1(m+1, n+1)$ を得る。このデータを使って式(3-22)と同様なモデルを作り、引伸機のレンズ及び印画紙の歪及び縮尺率を補正し原点をデジタイザの座標から基準フィルムの座標に移動する。

モデルの係数 A は次のようにして求める。

$$PX = A PX' \quad (B-18)$$

$$PX = \{ R_x(m, n), R_x(m, n+1), R_x(m+1, n), R_x(m+1, n+1) \}$$

$$A = \{ a_0, a_1, a_2, a_3 \}$$

$$PX' = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ X_1(m, n) & X_1(m, n+1) & X_1(m+1, n) \\ X_1^2(m, n) & X_1^2(m, n+1) & X_1^2(m+1, n) \\ X_1^3(m, n) & X_1^3(m, n+1) & X_1^3(m+1, n) \\ & & 1 \\ & & X_1(m+1, n+1) \\ & & X_1^2(m+1, n+1) \\ & & X_1^3(m+1, n+1) \end{bmatrix}$$

これから式(3-23)を使って A が求まる。

$$A = PX PX'^T \{ PX' PX'^T \}^{-1} \quad (3-23)$$

デジタイザの読み取り座標 $X_1(i)$ は次のように基準フィルム座標 $X_3(i)$ に変換される。

$$X_3(i) = A \begin{bmatrix} 1 \\ X_1(i) \\ X_1^2(i) \\ X_1^3(i) \end{bmatrix} \quad (B-19)$$

以下、式(B-13)~(B-17)によりフィルム座標を求める。 Y 座標も同様な手順で求めることができる。

○コンパレータによる方法

コンパレータは直接フィルムからコンパレータの

基準座標 $X_3(i)$, $Y_3(i)$ が 0.001~0.002mm の精度で読めるので以下、式(B-13)~(B-17)によりフィルム座標を求めることができる。

付録C 地図座標からローカル座標への変換

地図から写真測量のコントロールポイントの座標データを読みとるため地図の歪による誤差の補正を多項式によって行ない更に地図座標からローカル直角座標への変換を行なう。その為の補正式を最小二乗法を用いて求める。

概要

国土地理院で作っている国土基本図をはじめ公共測量図は平面直角座標(17座標系)を使っている。この図法は日本全土を分単位で緯度、経度を17分割してそれぞれの範囲をガウス・クリューゲル図法⁸⁾で投影するもので、局地的測量は平面上の直角座標として扱うことができるが、広い範囲で写真測量の基準点として扱う場合歪が生じる。そこでこの歪を計算して誤差モデルを作り地図上の歪を補正する。

誤差モデルを作るための手順を図C-1に示す。

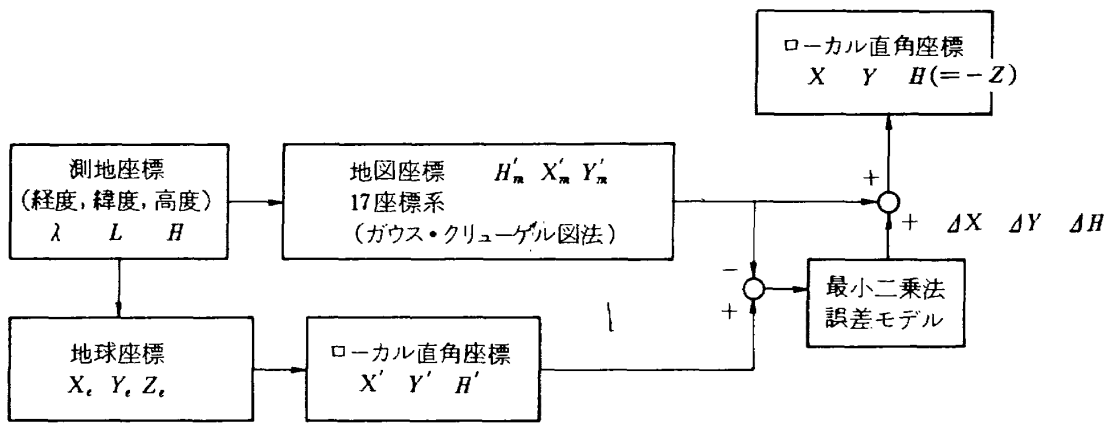
(1) まず経度、緯度で表わす測地座標で原点(レーダ位置)から(飛行コース上に)適当な間隔で経度、緯度を割り振り、このデータからガウス・クリューゲル図法を使って17座標系の地図座標に変換する。
(2) 一方、経度、緯度から回転楕円体の変換式を使って地球の中心を原点にした地球座標に変換する。次に原点をローカルな原点に移動して真北をX軸とし、H軸を地表から垂直に取った直角座標系に変換し、ローカル直角座標を作る。

(3) ここで地図座標系の座標とローカル直角座標系の差を求め多項式で近似して誤差モデルを作る。この誤差モデルで計算した補正值で地図座標を修正してローカル直角座標系を作る。

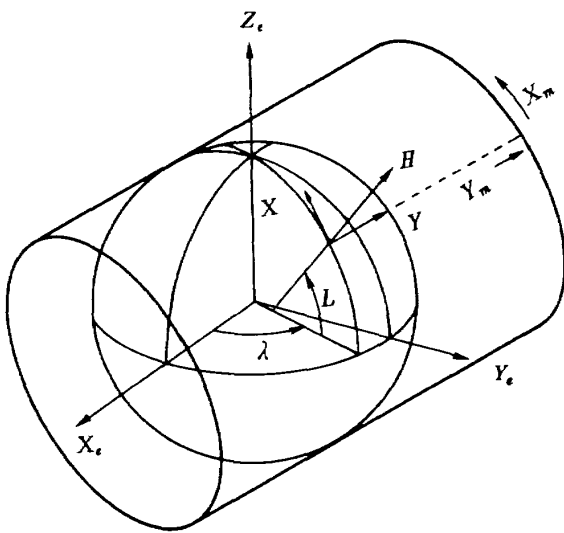
1) 測地座標→地図座標

図C-2に示すように地球はベッセル楕円体で近似でき測地座標は赤道を極軸を中心に東西180°の角度で表わした経度(λ)、赤道を中心に南北90°で表わした緯度(L)及び地球表面からの高度 H で表わした座標系である。

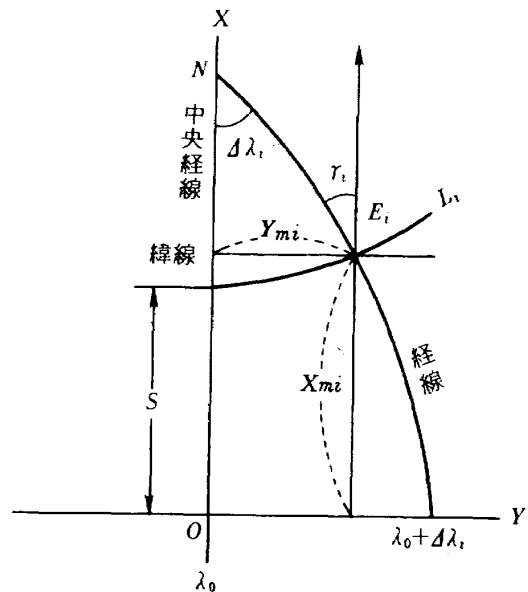
この回転楕円体を平面に投影するために原理的に



図C-1 地図座標からローカル座標への変換モデルを求めるためのブロック図



図C-2 測地座標, 地球座標, ローカル座標及び地図座標の関係図



図C-3 ガウスクリューゲル図法

は横円筒図法が使われる。この横円筒図法は図C-2からわかるように経線が接するように円筒を横にかぶせ、その円筒に投影するもので一般に横メルカトル座標と呼ばれる。

ガウス・クリューゲル図法は1844年にガウスが回転楕円体から球面に等角投影し、更に平面に正角横円筒図法で投影するガウスの正角二重投影を発表し、1912年この図法は更にクリューゲルによって回転楕円面から直接平面に等角投影されるこの図法に発展し、1934年 M. Tardi の改良によって完成された。

わが国では国で行なう基本測量、また、公共測量の座標（17座標）としてこの座標系が用いられている。

図C-3において地球上の点 E_i の緯度を L_i 、中央

経線よりの経度差を $\Delta\lambda_i$ とし、 E_i を投影した座標を X_{mi} 、 Y_{mi} とし、 E_i における子午線収れん角 τ_i 、線歪曲を κ_i とするとき、中央経線から 2° 以内ならば地図投影及び測量のための座標は次の式から求めることができる。

$$\begin{aligned} \frac{X_{mi}}{N} = & \frac{S}{N} + \frac{\Delta\lambda_i^2}{2\rho^2} \sin(L_i) \cos(L_i) \\ & + \frac{\Delta\lambda_i^4}{24\rho^4} \sin(L_i) \cos^3(L_i) (5-t^2) \end{aligned} \quad (C-1)$$

$$\begin{aligned} \frac{Y_{mi}}{N} = & \frac{\Delta\lambda_i}{\rho} \cos(L_i) + \frac{\Delta\lambda_i^3 \cos^3(L_i)}{6\rho^3} (1-t^2+\eta^2) \\ & + \frac{\Delta\lambda_i^5 \cos^5(L_i)}{120\rho^5} (5-18t^2+t^4) \end{aligned} \quad (C-2)$$

$$\kappa_i = 1 + \frac{\Delta \lambda_i^2 \cos^2(L_i)}{2 \rho^2} (1 + \eta^2) + \frac{\Delta \lambda_i^4 \cos^4(L_i)}{24 \rho^4} (5 - 4 t^2) \quad (\text{C-3})$$

$$\tau_i = \Delta \lambda \sin \phi \left[1 + \frac{\Delta \lambda_i^2 \cos^2(L_i)}{3 \rho^2} (1 + 3 \eta^2) + \frac{\Delta \lambda_i^4 \cos^4(L_i)}{15 \rho^4} (2 - t^2) \right] \quad (\text{C-4})$$

$$t = \tan(L_i)^2, \quad \eta = \frac{e^2}{1 - e^2}, \quad N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2(L_i)}}$$

但し, S は赤道から緯度 L_i までの経線長

a は地球の赤道半径

e は地球の離心率

$\rho = 206264.806$ 秒

$\Delta \lambda_i$ の単位は秒

17 座標系は, 日本全国を 17 の座標に分割し, それぞれの範囲をガウス・クリューゲル図法で投影するものである。UTM 座標 (ユニバーサル横メルカトル座標) も同じ図法を用いるが, 17 座標系と異なるところは, UTM のように原点 (赤道上) からの縦座標をそのまま用いず赤道上からの座標値より, それぞれの座標系の原点までの経線長 S を減じたものを縦座標として用いている。

17 座標系の各原点の経度, 緯度は表 C-1 に示す。(C-1) 及び (C-2) 式に原点の経度緯度を代入して $X_{m_0}, Y_{m_0}(=0)$ を求める。又, 任意の点 X_{m_i}, Y_{m_i} を同様に求め $(X_{m_i} - X_{m_0}), (Y_{m_i} - Y_{m_0})$ に縮小率 M_0 (0.9999) をかけたものを 17 座標系とする。この縮小率は地図全体が $1/10000$ の誤差に収まるようにするためである。このようにして経度, 緯度を代入して 17 座標系の直角座標 X_{m_i}, Y_{m_i} を計算する。高度 H は修正する必要がなくそのまま使用する。

次に原点を 17 系の原点から写真測量の時使用する任意の点に移動すると 17 座標系の原点 X_{m_0}, Y_{m_0} は消去され次のようになる。

$$X'_{m_i} = (X_{m_i} - X_{m_R}) M_0 \quad (\text{C-5})$$

$$Y'_{m_i} = (Y_{m_i} - Y_{m_R}) M_0$$

但し, X_{m_R}, Y_{m_R} は 17 系における新しい原点の座標 (レーダ位置)

(C-1)~(C-5) 式によって測地座標から地図座標

への変換ができた。

2) 測地座標→地球座標

一方測地座標 (L_i, λ_i) から地球座標 $(X_{e_i}, Y_{e_i}, Z_{e_i})$ に変換するために次のような計算を行なう。

$$X_{e_i} = (N + H_i) \cos(L_i) \cos(\lambda_i) \quad (\text{C-6})$$

$$Y_{e_i} = (N + H_i) \cos(L_i) \sin(\lambda_i) \quad (\text{C-7})$$

$$Z_{e_i} = \{N(1 - e^2) + H_i\} \sin(L_i) \quad (\text{C-8})$$

但し,

$$N = a / \{1 - e^2 \sin^2(L_i)\}^{1/2}$$

$$e = \sqrt{f(2-f)}, \quad a = 6337397.155 \text{ m}$$

$$H_i : \text{高度} \quad f = 1/299.152813$$

3) 地球座標→ローカル座標 (レーダ直角座標)

地球座標からローカル直角座標 (レーダ直角座標) に変換する。ここで注意しなければならないのはローカル直角座標で Z 軸と反対に H 軸をとっているためにこの系は左手系になっていることである。

$$\begin{bmatrix} X'_i \\ Y'_i \\ H'_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{e_i} - X_{e_0} \\ Y_{e_i} - Y_{e_0} \\ Z_{e_i} - Z_{e_0} \end{bmatrix} \quad (\text{C-9})$$

$$\text{但し, } d_{11} = -\sin(L_0) \cos(\lambda_0)$$

$$d_{12} = -\sin(L_0) \sin(\lambda_0)$$

$$d_{13} = \cos(L_0)$$

$$d_{21} = -\sin(\lambda_0)$$

$$d_{22} = \cos(\lambda_0)$$

$$d_{23} = 0$$

$$d_{31} = \cos(L_0) \cos(\lambda_0)$$

$$d_{32} = \cos(L_0) \sin(\lambda_0)$$

$$d_{33} = \sin(L_0)$$

L_{i_0}, λ_{i_0} は写真測量で使う座標の原点 (レーダ位置) の緯度, 経度

$X_{e_0}, Y_{e_0}, Z_{e_0}$ はその点の地球座標

4) 誤差モデル

(C-5) 式及び (C-9) 式で求めた地図座標とローカル直角座標の差を求める。

$$\Delta X_i = X'_i - X_{m_i} \quad (\text{C-10})$$

$$\Delta Y_i = Y'_i - Y_{m_i} \quad (\text{C-11})$$

$$\Delta H_i = H'_i - H_{m_i} \quad (\text{C-12})$$

この差を次に示す多項式で近似して誤差モデルを作る。

表C-1 測量座標系・平面直角座標系(17系)

系番号	座標系原点		所 属 地 域
	緯度(φ)	経度(λ)	
I	33° 0' 0"	129° 30' 0"	長崎・鹿児島県のうち北緯35度から南であり、かつ東経130度から西である区域(喜界島を含む)
II	33° 0' 0"	131° 0' 0"	佐賀・福岡・大分・熊本・宮崎・鹿児島県(I系に属する区域を除く)
III	36° 0' 0"	132° 10' 0"	山口・島根・広島県
IV	33° 0' 0"	133° 30' 0"	香川・愛媛・徳島・高知県
V	36° 0' 0"	131° 20' 0"	兵庫・鳥取・岡山県
VI	36° 0' 0"	136° 0' 0"	京都府・大阪府・福井・滋賀・三重・奈良・和歌山県
VII	36° 0' 0"	137° 10' 0"	石川・富山・岐阜・愛知県
VIII	36° 0' 0"	138° 30' 0"	新潟・長野・山梨・静岡県
IX	36° 0' 0"	139° 50' 0"	東京都・福島・栃木・茨城・埼玉・千葉・神奈川・群馬県
X	40° 0' 0"	140° 50' 0"	青森・秋田・山形・岩手・宮城県
XI	44° 0' 0"	140° 15' 0"	胆振支庁管内の有珠・虻田郡・檜山支庁管内、後志支庁管内、小樽市、函館市、渡島支庁管内
XII	44° 0' 0"	142° 15' 0"	札幌市、石狩支庁管内、網走支庁の紋別郡、旭川市、上川支庁管内、宗谷支庁管内、日高支庁管内、室蘭市、胆振支庁(有珠、虻田郡を除く)空知支庁管内、留萌支庁管内
XIII	44° 0' 0"	144° 15' 0"	北見市、帯広市、釧路市、網走市、根室市、根室支庁管内、釧路支庁管内、網走支庁管内(紋別郡を除く)、十勝支庁管内
XIV	26° 0' 0"	142° 0' 0"	北方北緯28°、南方北緯24°、西方東経140°30'、および東方東経143°を境界線とする区域内
XV	26° 0' 0"	127° 30' 0"	沖縄本島およびその付属島嶼、伊是名、伊平屋諸島、久米島
XVI	26° 0' 0"	121° 0' 0"	宮古群島、八重山群島および尖閣諸島
XVII	26° 0' 0"	131° 0' 0"	北大東島、西大東島、沖大島、東島

$$\Delta X_i = b_{11} + b_{12} X'_{m_i} + b_{13} X'^2_{m_i} + b_{14} Y'_{m_i} + b_{15} Y'^2_{m_i} \quad (\text{C-13})$$

$$\Delta Y_i = b_{21} + b_{22} X'_{m_i} + b_{23} X'^2_{m_i} + b_{24} Y'_{m_i} + b_{25} Y'^2_{m_i} \quad (\text{C-14})$$

$$\Delta H_i = b_{31} + b_{32} X'_{m_i} + b_{33} X'^2_{m_i} + b_{34} Y'_{m_i} + b_{35} Y'^2_{m_i} \quad (\text{C-15})$$

(C-13)～(C-15) 式の結果を使って次のように地図座標からローカル直角座標への変換が行なえる。

$$X_i = X'_{m_i} + \Delta X_i \quad (\text{C-16})$$

$$Y_i = Y'_{m_i} + \Delta Y_i \quad (\text{C-17})$$

$$Z_i = -(H'_{m_i} + \Delta H_i) \quad (\text{C-18})$$

(C-13)～(C-15) 式の各係数は (C-5) 式及び (C-10)～(C-12) 式の結果から最小二乗法によって求めることができる。最小二乗法で係数を求めるときは写真測量を行なう空域の周辺の経度、緯度データを使うと補正はより精度良く求まる。10 km 程度のコースで計算を行なったところ (C-10)～(C-12) 式の偏差は X 及び Y 軸は最大 10 m 程度、高度は 10 m 程度でたが、(C-13)～(C-18) 式の補正を行なうことで約 ΔX の誤差が ± 20 mm, ΔY で ± 1 mm, ΔH で 0.1 mm 程度の範囲であった。

航空宇宙技術研究所報告861号

昭和60年6月発行

発行所 航空宇宙技術研究所
東京都調布市深大寺東町7-44-1
電話武蔵野三鷹(0422)47-5911(大代表)〒182
印刷所 株式会社 共 進
東京都杉並区久我山5-6-17

Printed in Japan