

航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-623

航空機の動揺による“MSS画像の幾何的なひずみ”
の簡易な補正法について

岡 遠 一 ・ 矢 沢 健 司 ・ 稲 垣 敏 治

1980 年 9 月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

航空機の動揺による“MSS画像の幾何的なひずみ” の簡易な補正法について*

岡 遠一** 矢沢 健司** 稲垣 敏治**

A Simple Method for Correcting the Geometric Distortion of Airborn Multispectral Data

Tohichi OKA, Kenji YAZAWA and Toshiharu INAGAKI

ABSTRACT

An experimental study has been made to correct the geometric distortion of airborne multispectral images. Distorted in-flight images were corrected with measured attitude angles (Pitch & Yaw) by means of the newly developed program, which was established by our numerical simulations. Comparing the corrected images with the corresponding photographs, clearly proves the advantage of this simple method for correction.

1. ま え が き

最近リモートセンシング情報が広い分野にわたって数多く利用されているが、LANDSAT等の人工衛星からのデータとともに、航空機によるMSS (Multispectral Scanner) データも、島国で山が多く国土利用が細分化されている我が国では重要である。航空機によるリモートセンシングの利点は、目的によって随時、適当な解像度の画像データを収集できることである。しかしながら、その画像から正確な情報を得るためには、天候・太陽の位置・飛行経路等の条件が満たされ、その上に気流も安定していなければならない。すなわち、航空機によるMSS画像は走査機構の性質上、気流の乱れ等によって探査機が動揺すると、得られる画像に“幾何的なひずみ”を生じ、動揺の角速度がある程度以上になると画像と地図等との対応が困難になる。画像内と対応する地図上に共通のGCP (地上基準点) が必要な数見出さ

れる場合は、画像座標から地図座標に変換する高次多項式を求めて、地図座標に画像データを埋め込む補正法がある。一方すべての画素を取得した時刻における探査機の位置と姿勢が知れると、ある画素がどの地域を示しているかを計算で求められる。したがって各画素の対応する地域を、計測した探査機の運動データで計算し、それをモザイクすれば幾何的なひずみを補正したことになる。実際に標準的なCCT (Computer Compatible Tape) に収められた画素の画素データの数は、1フレーム当たり40万個以上もあり、不規則な大きさ・形・順序で並んでいる画素の座標を計算して完全にモザイクするには、多くの費用と時間を必要とする。さらに探査機の運動を画素に見合う精度で計測することは、ほとんど不可能である。

ここでは、特別研究促進調整費によって各省庁合同で昭和51年度から3年にわたって行なわれた、「リモートセンシング情報の収集・処理・解析手法に関する総合研究」に参加して行なった一連の実験的研究の概要と、画像補正に適した運動計測装置の開発について、ならびに新たに考案した「幾何的なひずみによって地図等と対

* 昭和55年3月13日受付

** 飛行実験部

応のつけにくい画像を救済するための補正法」とその効果について報告する。

2. 探査機の「ふるまい」

総合研究の第1回合同飛行調査では、従来から航空機の動特性を計測するための、飛行試験に用いていたセンサとデータ・レコーダによって、探査中の機体(YS-11)の運動を計測・記録した。この一部のデータは、国土地理院の行なった画像の幾可的ひずみを補正する試行のために、CCTに変換して提供した。

この合同調査に際して、国土地理院は画像補正を試行するための調査地域内に、多数の空三(航空三角測量)用の基準点を設け、約10秒毎に撮影した航測写真から、露出時の機体(カメラ)の位置・姿勢をかなりの精度で測定した。提供した運動データを空三データによって補正(Update)した値で、MSSが自動的に補正したロール角を除く、6自由度の画像補正を行ない、その誤差を1画素以内にとどめることができた。¹⁾

2・1 運動計測システム

使用した計測システムは、第1表に示した計測項目、MSSのスキャン・ラインのスタートを示す信号、航測カメラのシャッタ信号、ならびにデータ処理を自動的に行なうための時刻信号を14チャンネルのアナログ・データ・レコーダに同時に記録する方式とした。このシステムは航空機の安定性操縦性や失速特性等を計測するため、5～10年前に製作した装置だが、その総合精度は計測項目別に設定したフルスケールに対して±1%程度であることが過去の実験で確認されており、今回の実験のためのキャリブレーションでも確認した。しかしなが

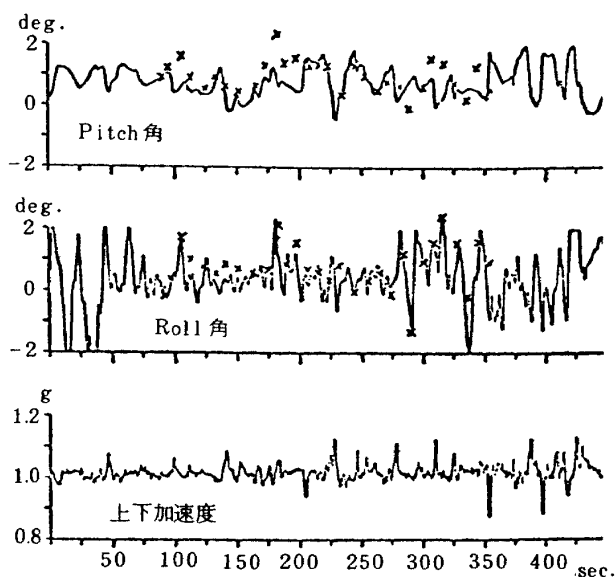
第1表 従来から使用している運動計測センサ

Ch	計測項目	変換器
1	ϕ ロール角	バーチカル・ジャイロ
2	θ ピッチ角	"
3	p ロール角速度	レイト・ジャイロ
4	q ピッチ角速度	"
5	r ヨー角速度	"
6	a_x 前後加速度	加速度変換器
7	a_y 横方向加速度	"
8	a_z 上下加速度	"
9	V_p 対気速度	圧力変換器
10	H_p 気圧高度	"

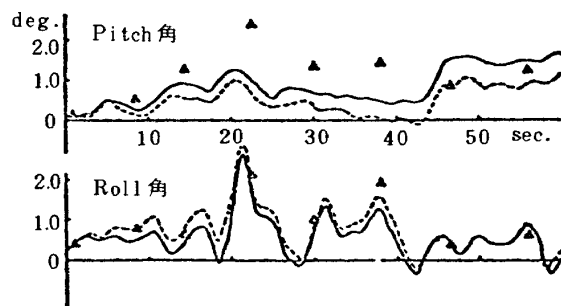
ら、この実験のように長時間にわたる計測や、地表上に固定した座標に対する計測の経験がないため、それぞれのセンサやデータ・レコーダのドリフト(零点移動)に充分な注意が必要であった。またバーチカル・ジャイロは回転軸を重力の方向に、水銀スイッチでエレクト(起立)する方式のため、旋回中や加速中は切離すとしても、その補正毎に0.2°程度の誤差は避けられない。

2・2 計測値の精度

得られた計測値の精度を実際的に確かめるため、同時に撮影した航空測量用の写真による空三の結果が国土地理院から提供されたので、計測値との比較を行なった。空三データは写真の露出時における機体の位置と方角余弦を、位置: 0.5 m, 高度: 1 m, 傾き角: 1' (0.1 m rad)程度の誤差で示している。計測値はアナログ量で記録したので、高周波ノイズとサンプリングによる誤差を除くため、10 Hz 以上-12 db/oct のフィルタを入れてから、毎秒100サンプルずつのA/D変換を行なった後、図化を行なったり解析に利用した。



第1図 姿勢角の計測値



第2図 計測値の比較

第1図は、比較のおだやかな日の、探査コースにおけるバーチカル・ジャイロによる計測値で、図中の×印は空三の値である。図はこの種の実験としては、かなりの一致を示しているが、ピッチ角に 1° 以上の差が認められる。そこで、同時に計測したレート・ジャイロによる角速度の値を積分してみた。第2図は第1図で、空三の値と計測値の差が大きい130秒から320秒の間を拡大して、レート・ジャイロの積分値(点線)を重ねたもので、空三の値は△で示した。

この時積分に用いたレート・ジャイロの計測値の零点は、ドリフトを補正する意味で、コースとその前後を含む400秒間の算術平均とした。図は独立した3つの方法によって同じ傾き角を計測した結果であるが、空三によるピッチ角の値がかけはなれているが目立つ。初めのうちは、この原因を測定位置(ジャイロ類は航空機の重心附近、航測カメラは胴体最後部)の違い、あるいは計測またはデータ整理のミスと考えたが、後になって航測カメラに前後のオーバーラップ率を均一にするための“調整しろ”があるためとわかった。

2・3 探査機の動揺

当日の紀伊半島東部は12月としては珍しく穏やかな晴天で、国土地理院と航技研のために設定した伊勢・松坂地区のコース2, 3, 4を飛行した午前11時ごろは北寄りの風が5m程度吹いていたが、この地方特有の鈴鹿山脈越えによる乱気流はほとんど感じられなかった。すなわち、これ等のコース全体で姿勢角の変動は第1図に示した第2コースの場合とほぼ同様で、均合点からの変動の平均値はピッチ角: $\pm 0.5^\circ$, ロール角: $\pm 1^\circ$ で、偏流角は $3^\circ \pm 1^\circ$ であった。

飛行経路のコースからのずれの最大値は横方向:80m, 高度:15mで、横方向のコースからのずれが大きくなった原因はパイロットに大きな角速度を生ずる様な操だを禁じたためと考えられる。この調査の様なMSS探査と正確な航空写真測量を兼ねる飛行の操縦はかなり困難であろう。その後、熊野川河口の第10コースを飛行するところには、日照による海岸附近特有のガストが発生し、姿勢角の均合点からの変動の平均値はピッチ角: $\pm 2^\circ$, ロール角: $\pm 5^\circ$, 方位角: $\pm 5^\circ$ となった。

ちょうど、この2つのケースはMSS探査を行なっているYS-11型機の動揺として、気流の乱れがほとんど無い場合と中程度の場合に相当するであろう。

3. 画像修正の数値実験

最初の合同調査で、探査機の動揺と計測器の精度の概

要が明らかになったので、MSS画像の補正に必要な、計測機器の精度と補正のアルゴリズムを確認するため、大型電子計算機によって数値実験を行なった²⁾

ここでは後の補正法と関連する部分について述べる。

3・1 構成と仮定

横方向131, 進行方向201の網目で、1辺が1単位の正方形(ラインプリンタの1字分)ができる様に区切られた水平面を走査することにして、それぞれの区画の様子をローマ字で示した。第3図はその一例で、拡大部分に示した様に字の打ち出されていない所も、独立した1画素としての意味を持っている。これを基本パターンとして取扱うことにする。

簡単のため、MSSの真下で瞬間視野が1単位になり、かつ実際の相似も考慮にいれて、パラメータを次の様に決めた。

MSS: 瞬間視野角(f)	0.286° (5 mrad)
1走査線中の画素数	249 (片側125)
毎秒走査回数(ω)	16
片側視野角	35° (補正後 30°)
航空機: 高度(H)	200単位
速度(V)	8単位/秒

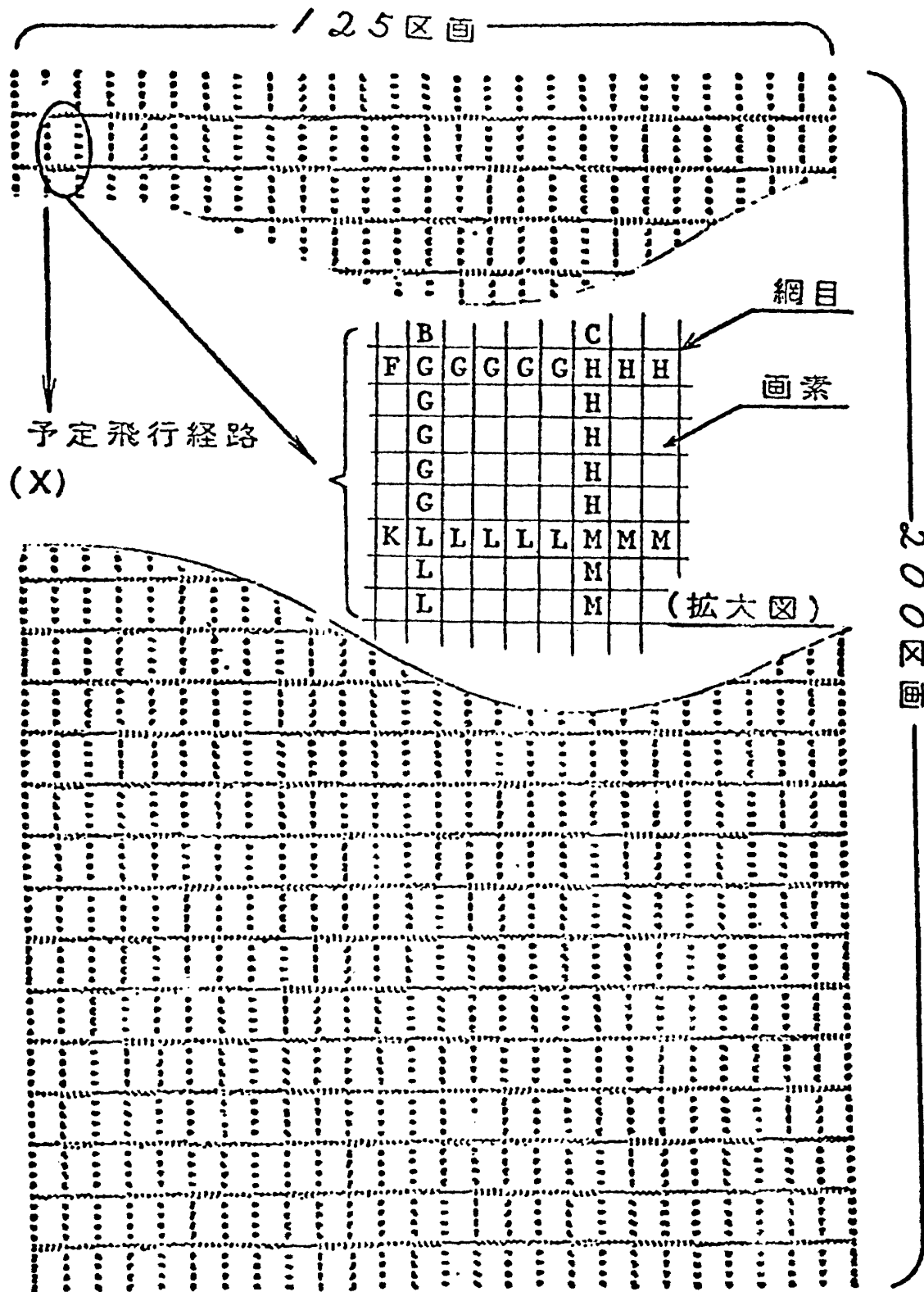
センサ(鏡)の向きが走査線毎に、機首方向に直角な面内を等速度で 360° 回転するMSSを模擬すると、画素を読み取る時刻と視角(瞬間視野角の中心線が機体のZ₀軸となす角 λ)は、基本パラメータによって等間隔にきざまれる。瞬間視野角で等角度にきざまれた実際の画素は、視角が大きくなると共に大きな面積を表わすことになるので、この様な画素は基本パターンの文字で直接示すことが出来ない。ここでは、刻々に得られる画素を、視角が交わる基本パターンの区画を示す文字(空白を含む)で代用できると仮定した。基本パターン上である画素の視角が交わる点の座標 X , Y は、機体の位置 R_x , R_y , R_z と姿勢角 ϕ ; θ , ψ によって、演算時間節約のため姿勢角の変化を微小として2次の項を省略すると、

$$\begin{aligned} X &= R_x - R_z \cdot \tan \theta - R_z \cdot \tan(\lambda + \phi) \cdot \sin \psi \\ Y &= R_y + R_z \cdot \tan(\lambda + \phi) \cdot \cos \psi / \cos \theta \end{aligned} \quad (1)$$

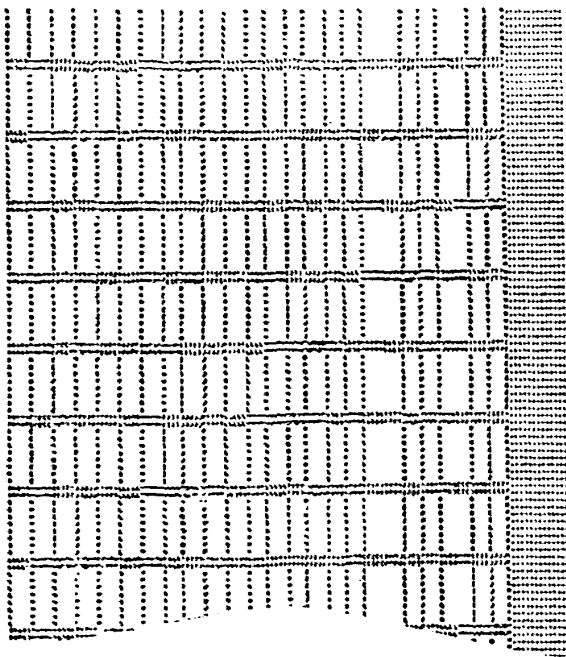
で算出される(5・2節参照)。この座標が対応する基本パターンの文字(空白)を順にラインプリンタに打ち出してMSS画像を模擬することにした。ここでは動揺による画像のひずみを重視するため、MSSの視野角は片側約 35° , 補正した画像の視野角は約 30° とした。さらに幾可的な画像のひずみには左右による違いが無いものとして、模擬した画像はMSSが真下から左側だけ

を走査した場合を示す様にした。 $R_x = v \cdot t$ として λ 以外を0にした動揺の無い場合の模擬画像を第4図に示した。図は等間隔に配置した印字の列が、文字を選ぶ仮定のため、空白部を読み飛ばした時に狭まり、字の部分

読み飛ばした時に広がる変則的なものとなった。しかしながら、画素が動揺によって移動する状況や、補正の有意性を視覚的にとらえるためには十分であろう。また右端の・で示された部分はバターの外側を走査したこと



第3図 数値実験の基本パターン



第4図 動揺のない時のMSS模擬画像

を表わしているが、これは後に動揺を与える時にパターンを有効に使うためである。この図は機体が第3図の左から6区画目の上空を、パラメータに従って図の上から下に向かって移動し、収集した画像と言える。

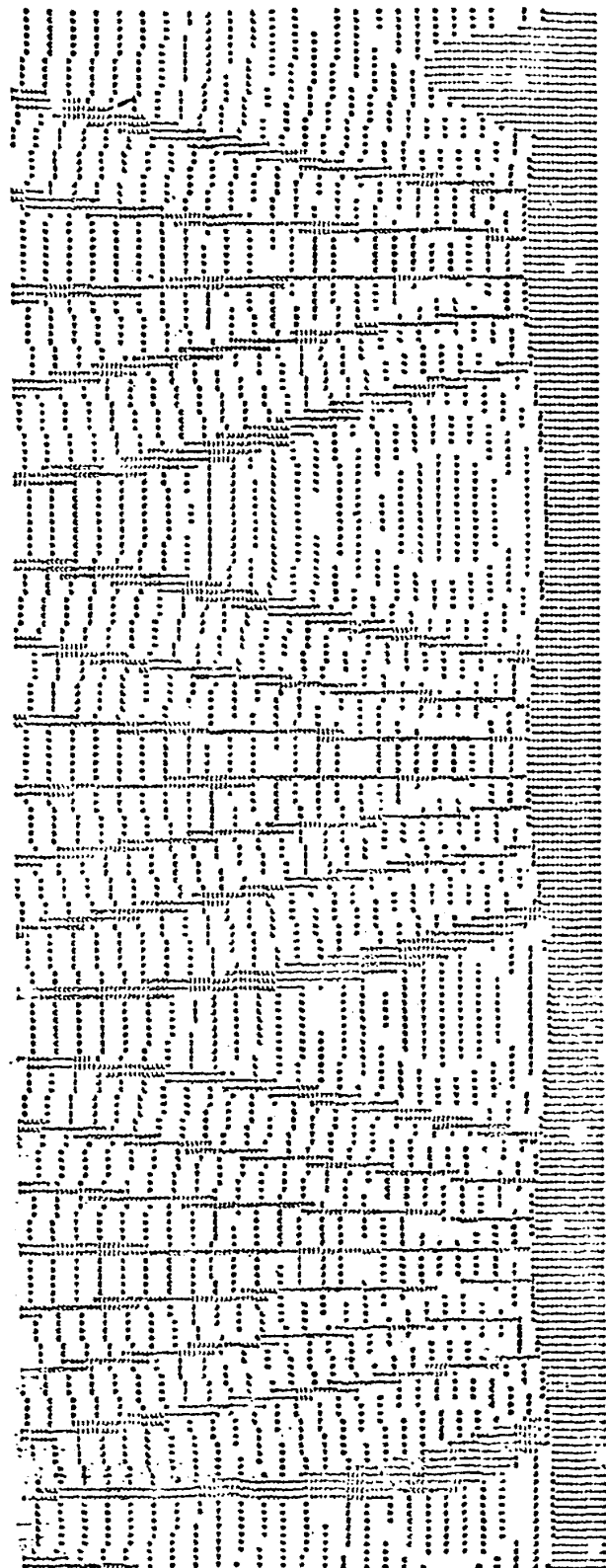
航空機の動揺を模擬するためには、(1)式の位置・姿勢の各成分(R_x , R_y , R_z , ϕ , θ , ψ)に、独立な正弦波を位相も考慮して代入した。

3・2 補正の方法と確認

理想的な補正ができると、結果は基本パターンと一致するはずなので、同じ区画に収集した画素(文字)を位置・姿勢の測定値を使って並べ変える。すなわち、(1)式に代入した正弦波に計測誤差を加味して、 X , Y を再計算すると収集した画素を埋め込むべき区画が求まる。この時、仮定・動揺・走査回数で、区画に該当する画素が無い場合と、2個以上になる場合があるが、このような区画には、区画と画素の中心が最も近い距離にある画素を埋め込むことにした。

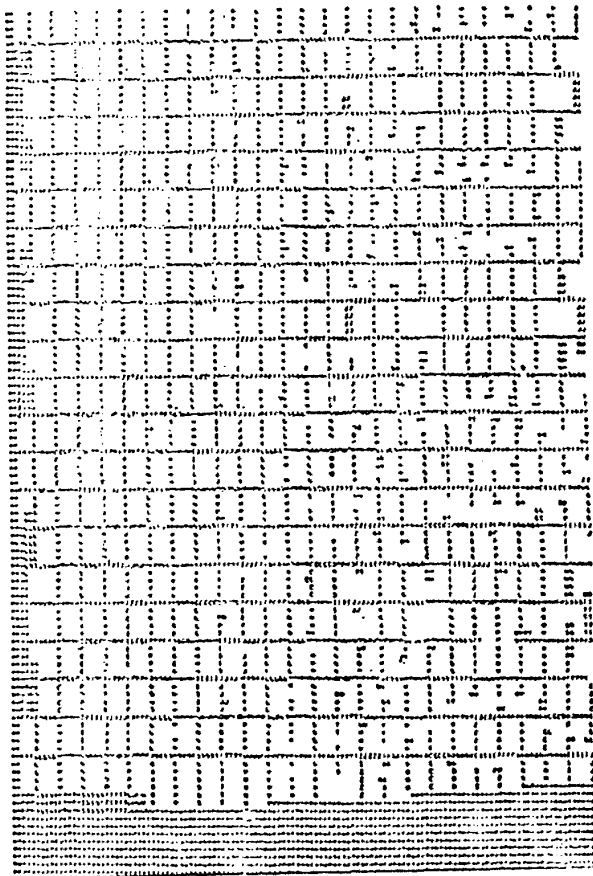
第2表 模擬した動揺

	振幅	位相	周期
X 方向(R_x)	1単位	-180°	20秒
Y 方向(R_y)	1単位	-90°	4秒
Y軸回り(θ)	1.5°	0	20秒
Z軸回り(ψ)	3°	0	4秒

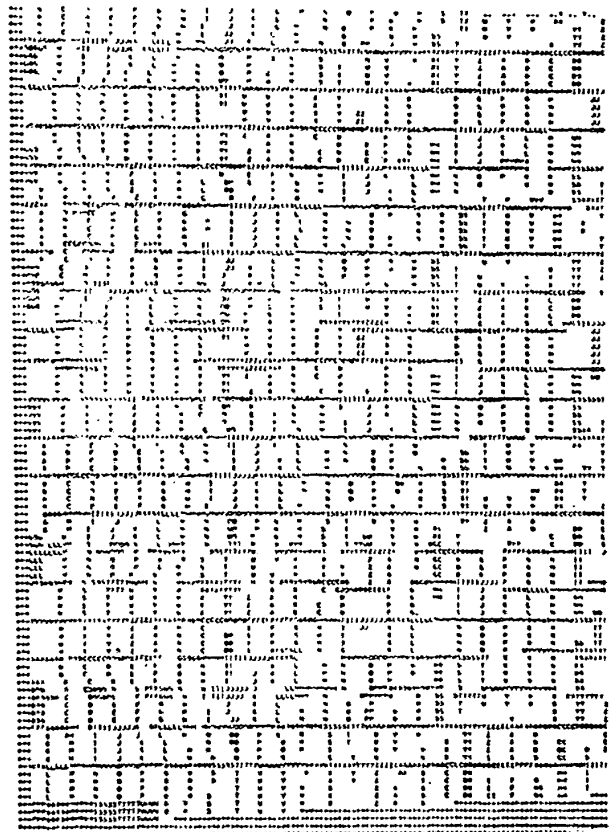
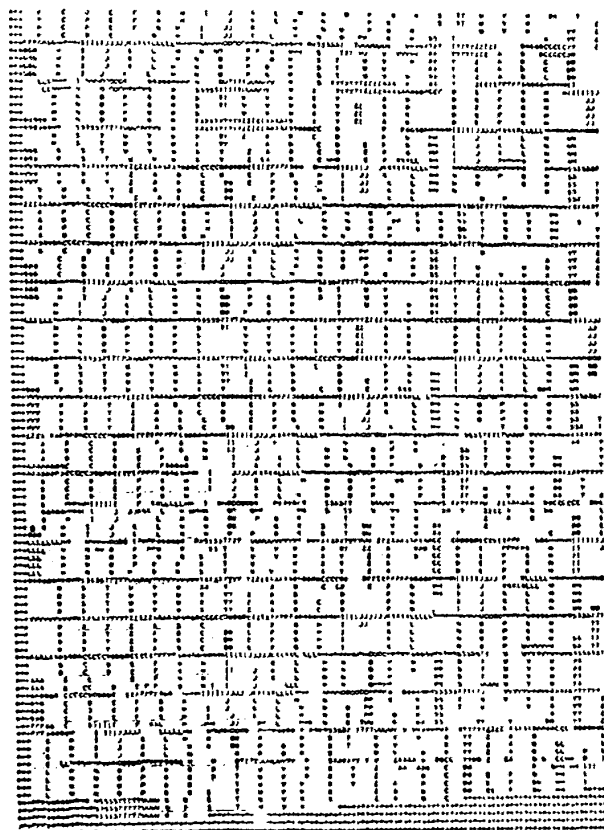


第5図 動揺でひずんだ模擬画像

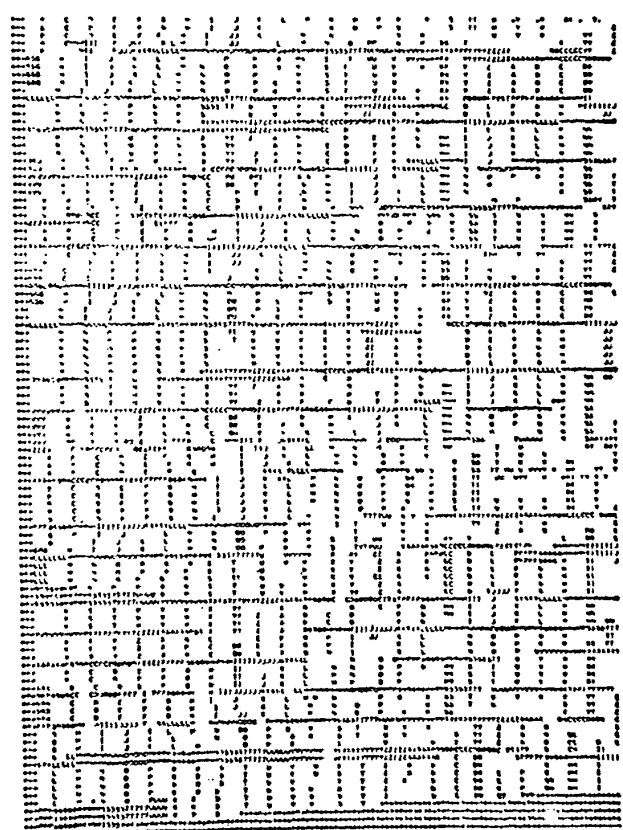
第2表に振幅・位相・周期で示した動揺を、第4図を得る様に飛行した航空機に与えた時、得られる模擬画像が第5図である。この動揺は合同調査の結果を参考にして、固定翼機の縦の長周期運動とダッチロール運動の減



第6図 すべての運動を補正した画像

第8図 姿勢角の計測値に-10%の誤差
がある場合の補正画像

第7図 姿勢角だけを完全な精度で補正した画像



第9図 姿勢角の有効数字を0.01で打ち切った補正画像

衰を0として模擬したが、MSSが自動的に補正するローリングと、画像にほとんど影響しない高度の変化を無視した。

第5図を、計測器の誤差0すなわち第2表の動揺そのもので補正した結果が第6図である。図の右半分では見かけ上の欠損や重複が目立つが、ほとんどが1画素以内の誤差で、第3図・第4図との比較で、ほぼ満足な補正ができたと言えるであろう。

3.3 姿勢角のみによる補正と計測器の誤差

航空機の運動のうち θ と ψ だけが計測できたと仮定して、 θ と ψ について計測誤差0で補正した結果が第7図である。この図は、横の変位と速度変化が補正されないもので、縦の文字の線が左右に揺れ、横の線の間隔が伸び縮みしているが、第5図と比べるとかなり改善されている。

この角度の計測値に -10% の誤差があった場合は第8図となり、計測値に誤差が無くても有効数字を0.01で打ち切った場合が第9図である。この2つの図は第7図と比べてほとんど劣化が認められないので、これ等の場合もかなりの補正効果があると言えよう。すなわち、 θ 、 ψ が $\pm 10\%$ 以内の感度誤差で、 0.01° の分解能を持つ傾き角計測装置で読み取れると、地図等との対応を容易にする補正が可能なことを証明している。

4. 運動計測装置の製作と実用化

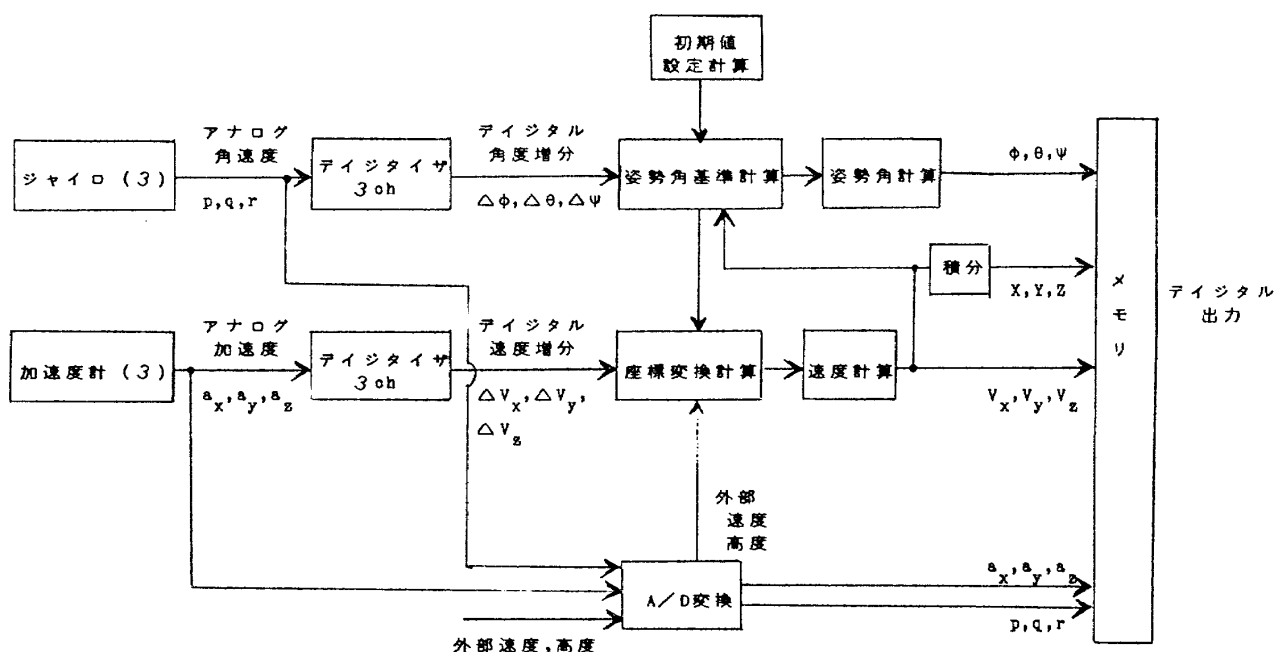
画像の幾可的なひずみを補正するための運動計測装置

として、2自由度ジャイロ、レイト・ジャイロ、空気圧情報、電子航法装置等はそれぞれに問題点があるので、精度、取扱い安さ、価格を考慮して、市販のMUP・ISS（多目的慣性計測装置）をこの目的のため改造して使用することを計画した。³⁾

4.1 基本装置の概略

選択した装置の基本型は、運動体の3軸に関する加速度と角速度を検出するIMU（慣性計測部）と、装置全体のコントロール、検出値の座標変換、積分、精度向上を行なうDU（演算処理部）で構成され、運動体の姿勢角、角速度、速度、変位を出力する。その機能の概要を第10図にブロック線図で示した。まず停止時の方位角と計測地域の緯度を、地球の自転を補正するための初期値として設定する。一方外部から速度と高度（それぞれ 10% 程度までの誤差は許される）を、ピッチ角とロール角のドリフトを減らすための信号として入力する。これ等はIMUの計測値とともにDUで行なう計算に用いられる。

INS（慣性航法装置）も含めてこの種の慣性型の運動計測装置に共通の問題点は、電源投入後約30分間IMUを静止状態にたもたなければならない準備時間を必要とすることである。すなわち、前述の初期値から地球の自転角速度を計算し、静止状態でセンサのドリフトやバイアスのトリミングを行ない、さらに方位角を90度回転して初期値とセンサの感度の確認を自動的に行なうためである。



第10図 基本型運動計測装置ブロック図

4・2 改造工事と静的な精度

実際にこの装置で求められる変位の精度は、MSSの画素の大きさに対応するとは考えられないので、その演算と出力を中止して、演算処理部に生じた余裕を出力フォーマットの整備と、姿勢角の精度向上に当てることにした。出力型式はMSS用のデータ・レコーダの空きチャンネルに記録しやすい様にPCM(パルス記号変調)とした。その構成は、DUの演算処理能力にあわせて毎秒50フレーム、1フレーム16ワード(有効データ11~16ビット:15ワード)で、この項目と仕様を第3表に示した。

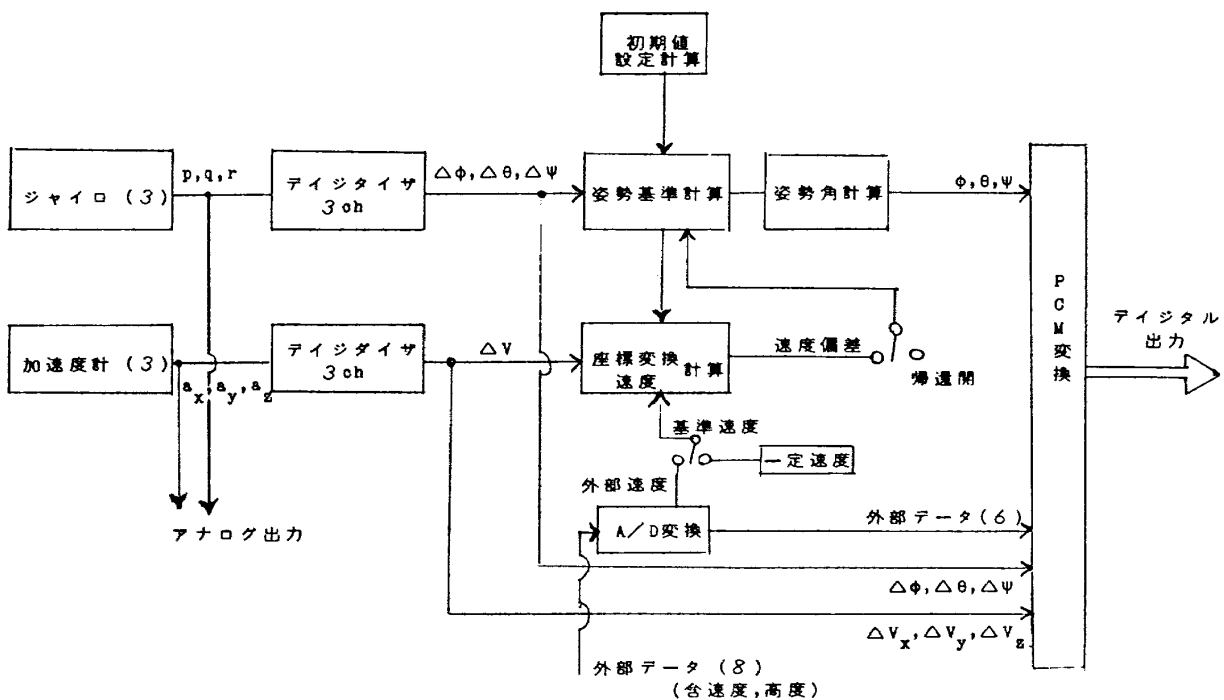
基本装置では外部からの速度と高度の信号あるいは予定した運動の平均速度を、加速度計の積分値と比較して基準姿勢の計算にフィード・バックすることにより、ピッチ角とロール角のドリフトを減らしている。ところがリモートセンシングを行なう航空機は、そのコースが、地形や太陽の位置等によって定められる場合が多く、その上一回の飛行で多数の目標地域を調査する場合もあるため、外部からの速度情報として対気速度を使用すると風向風速による対地速度との誤差が無視できない。一方、飛行中の平均速度を利用するとしても、この種の飛行には数多くの旋回や速度変化を必要とするので、次の節の試験の結果にも表われた様に、かえって誤差を増大する場合がある。そこで外部からの速度信号と一定な希望す

る速度を適宜切換えられ、かつこれ等の速度偏差による帰還を中止できる様にプログラムを改修した。この改修後の計算機能のブロック線図を第11図に示したが、たとえばドップラ・レーダの様な比較的精度の良い対地速度計が使える時は常時外部信号による速度偏差の帰還を行ない、空気圧情報しか得られない場合は調査地域までの巡航中だけ外部信号として帰還に利用し、旋回中は帰還を中止し、MSS走査中は予定した対地速度を入力するといった変則的な使用が可能となり、長時間計測を行なう場合に姿勢角の計測精度を向上できる。方位角については帰還が無いためある程度のドリフトは避けられないので、マグネット・コンパスや電子航法装置で知った値を使って計測中に更新できる様にした。

改修後の仕様精度はすでに第3表に示したが、これを静的に確める試験を傾斜台とターン・テーブルで行なった。6個のセンサ(加速度計:3, 角速度計:3)の単体試験に相当する一軸だけの定速回転ならびに定角度の傾斜に対しては、仕様規格の精度より一けた程度良好であったが、傾斜角を組合せて行なった試験では最大検出範囲($\pm 90^\circ$ ただしリモートセンシング中の変動はたかだか $\pm 15^\circ$)の近くでは、規格ぎりぎりであった。この原因はセンサの入力軸のミスアライメントで、計測値から推算したその最大値は 2 mrad (0.1°)であった。実際の計測ではこの誤差はDUでドリフトとしてトリムさ

第3表 運動計測装置の出力

順序	項目	検出範囲	出力 フルスケール	BIT数	分解能(LSBの値)	測定精度
1	A/D出力 CH1	0~ $\pm 10\text{ VDC}$	10 VDC	12	0.00488V/BIT	フルスケールの $\pm 0.3\%$ 以下
2	↑ CH2	↑	↑	↑	↑	
3	↑ CH3	↑	↑	↑	↑	
4	↑ CH4	↑	↑	↑	↑	
5	↓ CH5	↓	↓	↓	↓	
6	A/D出力 CH6	0~ $\pm 10\text{ VDC}$	10 VDC	12	0.00488V/BIT	(1)ロール, ピッチ姿勢角 ・プリセット速度使用の場合 $\pm 0.13^\circ$ 以下 ・外部速度使用の場合 $\pm 0.1^\circ$ 以下 ・速度情報なしの場合 $\pm 0.13^\circ \pm 3^\circ/\text{h}$ 以下 (2)方位角 $\pm 0.13^\circ \pm 3^\circ/\text{h}$ 以下 (3)角度増分 $(\Delta\theta X, \Delta\theta Y, \Delta\theta Z)$ $\pm 0.2^\circ/\text{S}$ 以下 $\pm 0.0957\text{ m}/\text{S}^3$
7	ロール角度増分($\Delta\theta X$)	0~ $\pm 100^\circ/\text{S}$	205.063 $^\circ/\text{S}$	11	0.2 $^\circ/\text{S}/\text{BIT}$	
8	ロール姿勢角(ϕ)	0~ $\pm 90^\circ$	180 $^\circ$	16	0.00549 $^\circ/\text{BIT}$	
9	ピッチ角度増分($\Delta\theta Y$)	0~ $\pm 100^\circ/\text{S}$	205.063 $^\circ/\text{S}$	11	0.2 $^\circ/\text{S}/\text{BIT}$	
10	ピッチ姿勢角(θ)	0~ $\pm 90^\circ$	180 $^\circ$	16	0.00549 $^\circ/\text{BIT}$	
11	ヨー角速増分($\Delta\theta Z$)	0~ $\pm 100^\circ/\text{S}$	205.063 $^\circ/\text{S}$	11	0.2 $^\circ/\text{S}/\text{BIT}$	
12	方位角(ψ)	0~ $\pm 180^\circ$	180 $^\circ$	16	0.00549 $^\circ/\text{BIT}$	
13	X速度増分($\Delta V X$)	0~ $\pm 48.99\text{ m}/\text{S}^2$	97.98 $\text{ m}/\text{S}^2$	11	0.0957 $\text{ m}/\text{S}^2/\text{BIT}$	
14	Y速度増分($\Delta V Y$)	0~ $\pm 48.99\text{ m}/\text{S}^2$	97.98 $\text{ m}/\text{S}^2$	11	0.0957 $\text{ m}/\text{S}^2/\text{BIT}$	
15	Z速度増分($\Delta V Z$)	0~ $\pm 48.99\text{ m}/\text{S}^2$	97.98 $\text{ m}/\text{S}^2$	11	0.0957 $\text{ m}/\text{S}^2/\text{BIT}$	



第11図 姿勢角を重視した運動計測装置ブロック図

れるので、姿勢角の計算上はかなり改善されるはずであり、小型のセンサならびに取付台の工作上やむをえないものと考えたことにした。

同時に速度を0としてDUで計算されたピッチ角とロール角の最大誤差は $\pm 0.07^\circ$ 以内で、約10分間の試験中にドリフトはほとんど認められなかった。方位角の計算値には5分間に -0.2° 弱のドリフトを含んでいるらしく、 $-2.2^\circ/h$ のレートで補正すると誤差の最大値は $\pm 0.05^\circ$ 以内になった。

4・3 動的な地上試験

前節に述べた速度の帰還法によって生じる誤差やセンサのミスアライメントが、複雑な運動の計測にどの程度影響するかを調べた。

初めに常に直交する2軸(Y, Z)回りの回転を与えられる構造の傾斜台による簡単な試験を行なった。IMUを対応する座標軸に合わせて取り付け、まずY軸回りに -10° (頭下げのピッチ角)を取り、次にZ軸(傾斜した取り付け面に垂直)回りに 90° 回転すると、IMUのピッチ角(θ)とロール角(ϕ)が入り代る。更にY軸回りに 20° の回転を与えてロール角が $+10^\circ$ になる様にしてから、再びZ軸を 90° もとにもどすとピッチ角が $+10^\circ$ になり、最後にそれを水平にすると最初の姿勢にもどる。この一連の操作は、IMUの中心の位置を動かすことなしに、すべてのセンサに運動を入力

したことに相当するので、この間データを連続的に記録し大型計算機によって解析した。

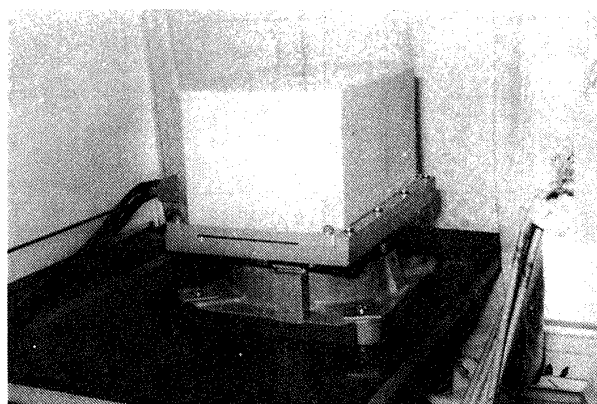
第12図は結果の一例で、この場合センサは試験中の約2分間ドリフトが一定であると仮定して、加速度計の出力を、角速度計の出力を積分して求めた姿勢角を使って、慣性軸に変換し重力の成分を取り除いた値を2度積分した変位(実際は0)を求めた。この時、その2乗平均が最小になる様に、 ψ 以外のセンサのバイアス(零点)と、それ等の積分の初期値を求めたものである。図の $\hat{\phi}$, $\hat{\theta}$, $\hat{\psi}$ は解析による推定値であるが、ISSが示した姿勢角もこの図のスケールでは完全に一致するので、その差を拡大して上段に示した。 $\phi_m - \hat{\phi}$ と $\theta_m - \hat{\theta}$ の最大値は約 0.2° で仕様精度の2倍に当たるが、ミスアライメント等の影響で、運動中に 0.2° の誤差を生じることもあり得ると解釈した。 $(\psi_m - \hat{\psi})$ の図で大きなインパルスが見られるのは、計算機の演算周期のずれによって入力角速度が大きな時に現れるものである。また ψ_m のドリフトと思われる成分の原因は、推定値の計算に $\hat{\psi}$ のバイアスをトリミングする機構が無いためである。

次に一定速度による帰還を行なった場合に速度の変化が ϕ , θ の計測値に与える影響を調べる試験をマイクロバスを使って行なった。ISSを第13図の写真の様にバスに取り付け、道路の状況で変わる微少な姿勢角の計測値と、姿勢角によってX, Y軸方向の加速度計に現れる地球の重力による成分との比較を、停車状態でエンジ

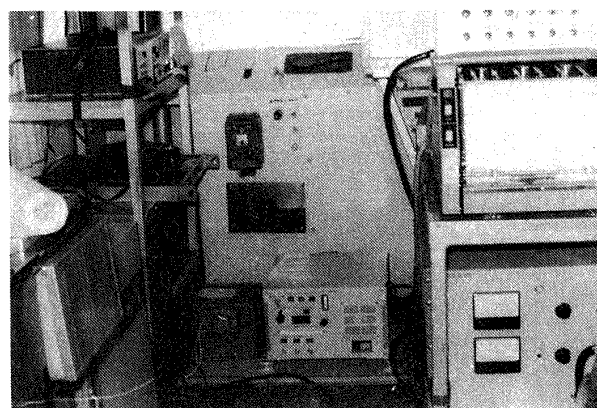
ンも停止して行ない、走行によって生じる姿勢角計測値の誤差を求めた。設定速度を0にした1時間の停車中や、予定速度を守った300m程度の走行後には特筆すべき差は見出せなかったが、速度の設定値が大きく異なる場合は、帰環を行わない場合のドリフトとほぼ同等の誤差を生じた。第14図は約30分間市街地を走行した結果を整理した図で、設定速度を22kt(40km/h)にして、信号にしたがって発進・停止をくり返しながらか計測したものである。図中の直線は誤差0を示し、破線に乗った場合は誤差 $\pm 1^\circ$ を示している。 θ に 0.3° 程度、 ϕ にその半分程度の誤差が現れているが、停止・発進・加速・旋回による速度誤差が計測値に影響したものであろう。

以上に述べた試験・解析の結果は満足できるものではないが、実際に探査コースを直線飛行する航空機の運動は比較的小さいはずなので、前節に述べた帰還の切替え

による精度向上も期待して、実地の評価を航空写真測量あるいは計測姿勢角による画像補正の結果から行なうべきであろう。

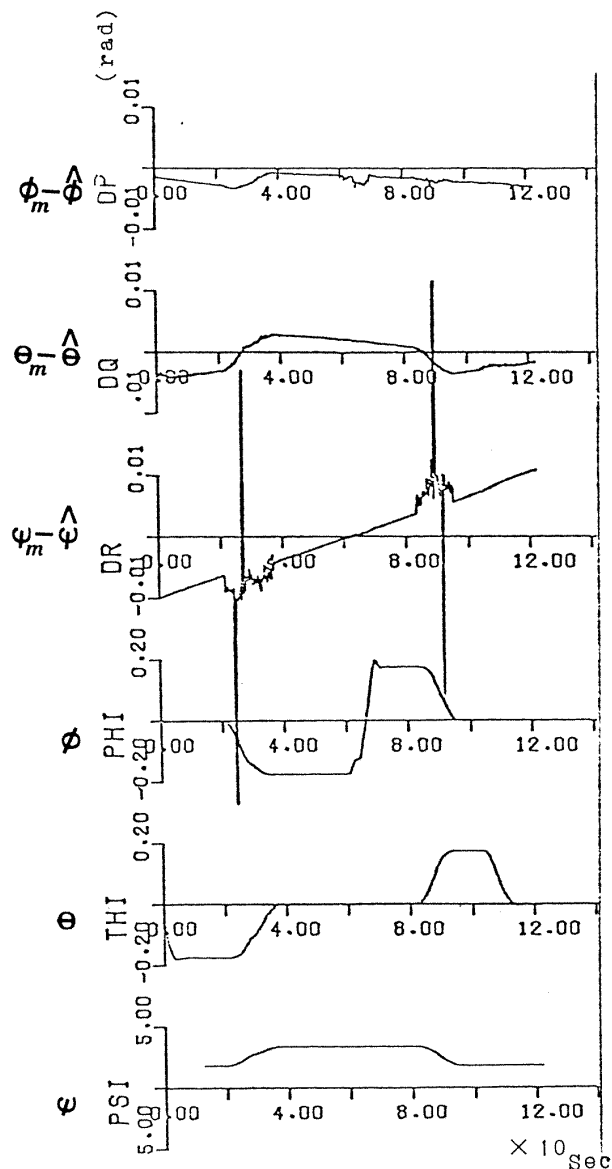


(A) IMU

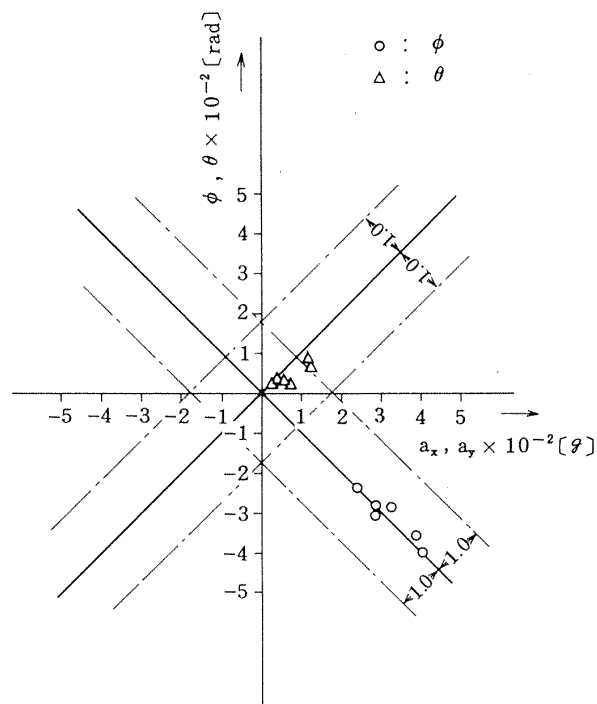


(B) DUとモニタ

第13図 マイクロバスに取付けたISS



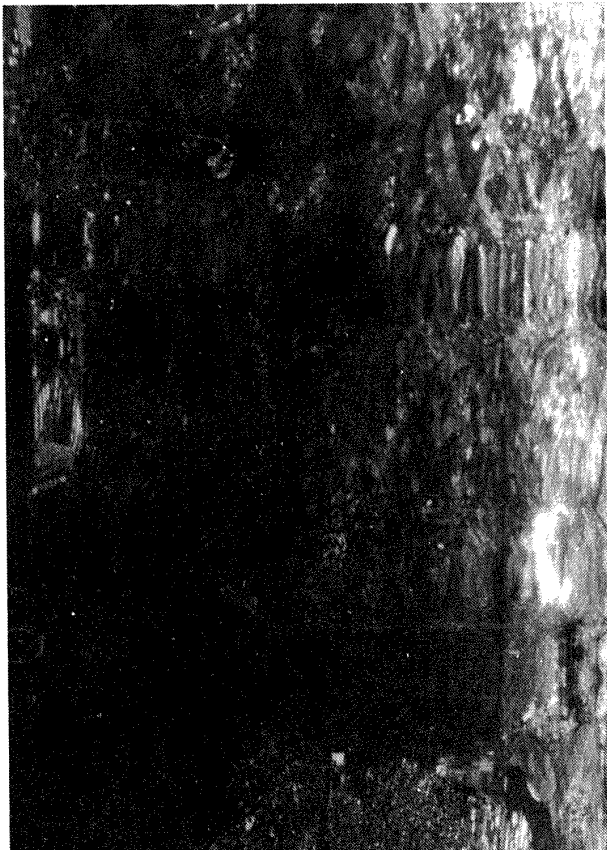
第12図 回転運動の解析



第14図

5. 姿勢角による画像補正法

昭和53年10月の第4回合同調査で探査機を故意に動揺させ、大きなひずみのある画像データが得られた。この画像を、同時にISSで計測した姿勢角のみによって、手軽に補正する方法を当所の大型計算機で試みた。使用した画像データは標準型のCCTに編集された形で翌日撮影した航空写真とともに資源調査所から提供されたもので、その一部を第15図に示した。ほぼ同じ地域の航空写真が第16図であるが、画像の方は走査線のことを100%オーバーラップする様に約2倍とっている。データの可視化はMSSの第6チャンネルを、資源調査所のデジタル画像データ処理装置を借用して白黒フィルムに焼付けたものである。当所の大型計算機は直接IBM標準型CCTを読み取ることができず、画像処理用の周辺機器も無いため、補正したデータを画像として直接見ることはできない。そこで補正するCCTデータを計算機のファイルに入れた後に処理する方式として、画像は一部をラインプリンタに文字を重ねて打ち出す技法により、補正の効果を調べながらパラメータの調整やプログラムの修正ができる様に計画した。



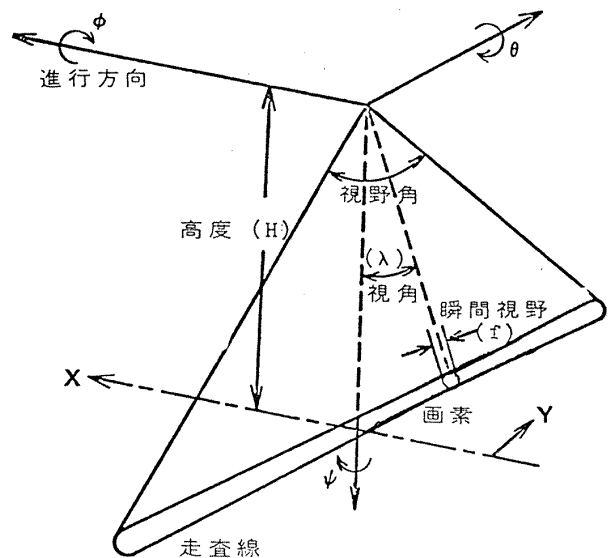
第15図 幾何的なひずみのあるMSS生データ

5・1 補正画像の仮定

一般にMSS画像は探査機の機首方向を軸として走査線を等速度で回転させ、一回転毎に得られる走査線を並べて構成される。走査線は第17図に示した様に、対応する地表上の幅すなわち画素の直径(L)が、瞬間視野(f)、視角(λ)、高度(H)によって $L = f \cdot H / \cos^2 \lambda$ となり、その長さ(W)は、視角の最大値(λ_{\max})と高度から、 $W = 2H \cdot \tan \lambda_{\max}$ となる。一方画像データを輝度あるいは濃淡に変換して



第16図 補正を試行する地区の航空写真



第17図 画素の概念図

直視するための装置（例えばCRTやドット・プリンタ）は画素を等間隔に並べて表示するので、地表と相似な画像を得るためには、一般にタンジェント補正と呼ばれる補正が必要である。そこで“動揺による幾可的なひずみの補正”とは、収集した画素データ（濃淡の値）を画像化装置の直交座標（画素の中心で作る格子）上に再配列して、できるだけ地表と相似な画像を作ることと定義する。この定義によって生じる問題点と最適な画素の選択法を検討し、合同調査で使用したMSSに注目しながら、ここで行なう補正の方針を次の様に定めた。

（1）再配列のための座標

画像化装置の画素の中心を結び、その間隔を1単位とする格子状の座標に、MSSが走査線の中央を走査した時に隣り合う画素の中心を基準にして、その間隔（地表上の距離）を1単位とする格子座標を対応させると、両方の格子座標に比例関係が成立する。この様に、中心座標で表わされた補正出力の座標に、収集した画素の中から最も適した画素データを埋め込むことにする。ところが、画像の幅すなわち走査線（地表上の長さ）を構成する画素の数は、この単位で等間隔に配置すると、等角度でぎざまれたMSSの画素の数より多く必要となるが、ここでは簡単のため、この座標単位に固定して補正法の検討を進める。

実際に、MSSデータを編集したCCTの1フレーム（図化の単位）は 803×588 個の画素（8ビットのグレー・レベル・データ）で構成され、MSSの瞬間視野角は 2.5 m rad なので、視野角はほぼ 2 rad となり、走査線の長さは地表で $W = 2H \cdot \tan(1 \text{ rad}) =$

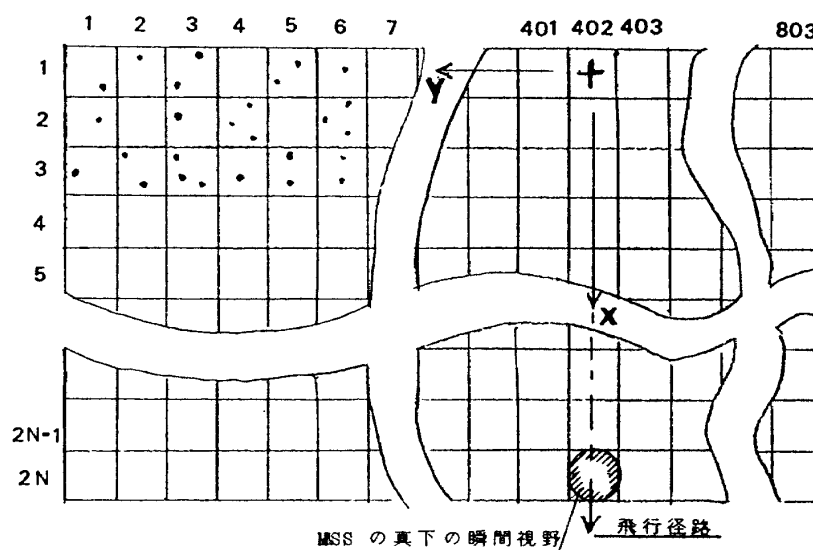
$3.15H$ となる。補正出力の座標で走査線の画素の数をCCTと同じ 803 にすると $W = 2H$ となり、画像の対象地域の幅が走査線の約 63% （視野角で約 78% ）に減少するので、視角 45° 以上の画素を切り捨てたことになる。この点については精度と費用の面からの検討を必要とするが、このプログラムでは出力ファイルのレコード長の関係から、1走査線の画素を 1023 個まで計算できるので、補正対象地域の幅が走査線の約 80% （視野角で約 90% ）まで補正可能である。

補正後の出力画像の縦方向の画素（走査線）の数を、 588 にするためには、収集した走査線のオーバーラップの関係で、CCT入力画像の数フレーム分が必要になる場合もある。また航空機の動揺の大きさによって、補正対象地域の前後で収集した走査線を、ある程度余分に入力しておく必要もある。そこで補正画像の走査線の数は入出力とも自由に選べる様にした。

（2）画素の選択法

まず収集した画素の中心が指す地表の位置を（1）で定めた座標で後出の（2）式を使って計算する。この値を指標として、出力画像に最も適した画素データ（濃淡）を選ぶ。一般的な方法は、数値実験で用いた出力画像の格子点に最も近い指標を持つ画素データを使う方法で、ニアレストネバー法と呼ばれている。しかしながら、この方法は、収集した画素データに指標（タグ）を付けて、一時ファイルに収納してから再配列する等、計算機に広い作業領域を要求する。

ここで用いた方法は、第18図に示した様に出力画像の画素が対応する正方形の1辺が1単位になる様な区画



第18図 出力座標と画素の関係

に、指標が含まれる画素データを埋め込んで行く、同じ区画に2つ以上の収集した画素が該当する場合は、すべての画素データの算術平均をその区画の画素データとし、該当するデータが無い場合はその回りの区画8個のうち有効なデータの平均値を利用する。この選び方の特徴は、収集した画素を全部使っていることと、平均する方法がフィルタの役割をしてノイズを消す効果があることである。

(3) 運動データ

航空機の特徴的な運動の周期は、速いものでも縦の短周期約1 Hz、ダッチロール約0.3 Hzであり、1本の走査線を走査するのに要する時間は0.03内至0.005秒程度なので、この間姿勢角の変化は無いものと仮定して、走査線の中央附近の計測値を1本の走査線全体に適用した。

5・2 画素の座標計算

航空機は予定した一定速度で、予定したコースをはずすことなく飛行したと仮定する。偏流角もコースを通し

て一定として、 Ψ のバイアスとして算入する。

1番目に収集した画素の中心の地上(補正画像の格子)の座標は、第1番目の走査線の中心(MSSの真下)を原点とすると、採集した時刻(t_1)によって視角(λ_1)が決まり、その走査線に対して計測値から読み取った、機体軸回りの姿勢角(ϕ_1, θ_1, Ψ_1)によって第19図から得られる(2)式によって求めた。

$$\begin{aligned} X &= H \tan \theta \cos \Psi + H \tan(\phi + \lambda) \sin \Psi / \cos \theta + Vt \\ Y &= H \tan \theta \sin \Psi - H \tan(\phi + \lambda) \cos \Psi / \cos \theta \end{aligned} \quad (2)$$

ただしロール角(ϕ)は、ほとんどのMSSに自動的な補正機構があるので、その場合二重の補正を行なわない様に、0と置くことにした。

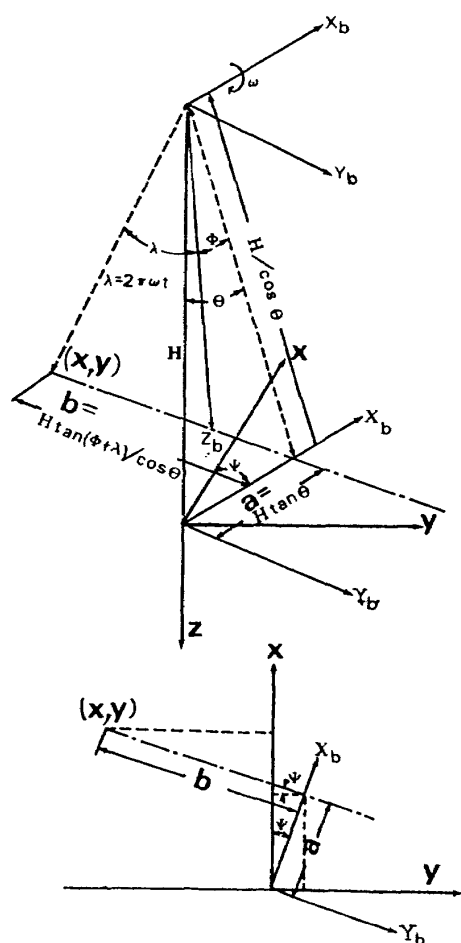
5・3 プログラムの概要

始めに補正画像を作る地域を定め、(2)で示した区画に分割すると、標準的な画像は、すでに概念図を第18図に示した様になる。

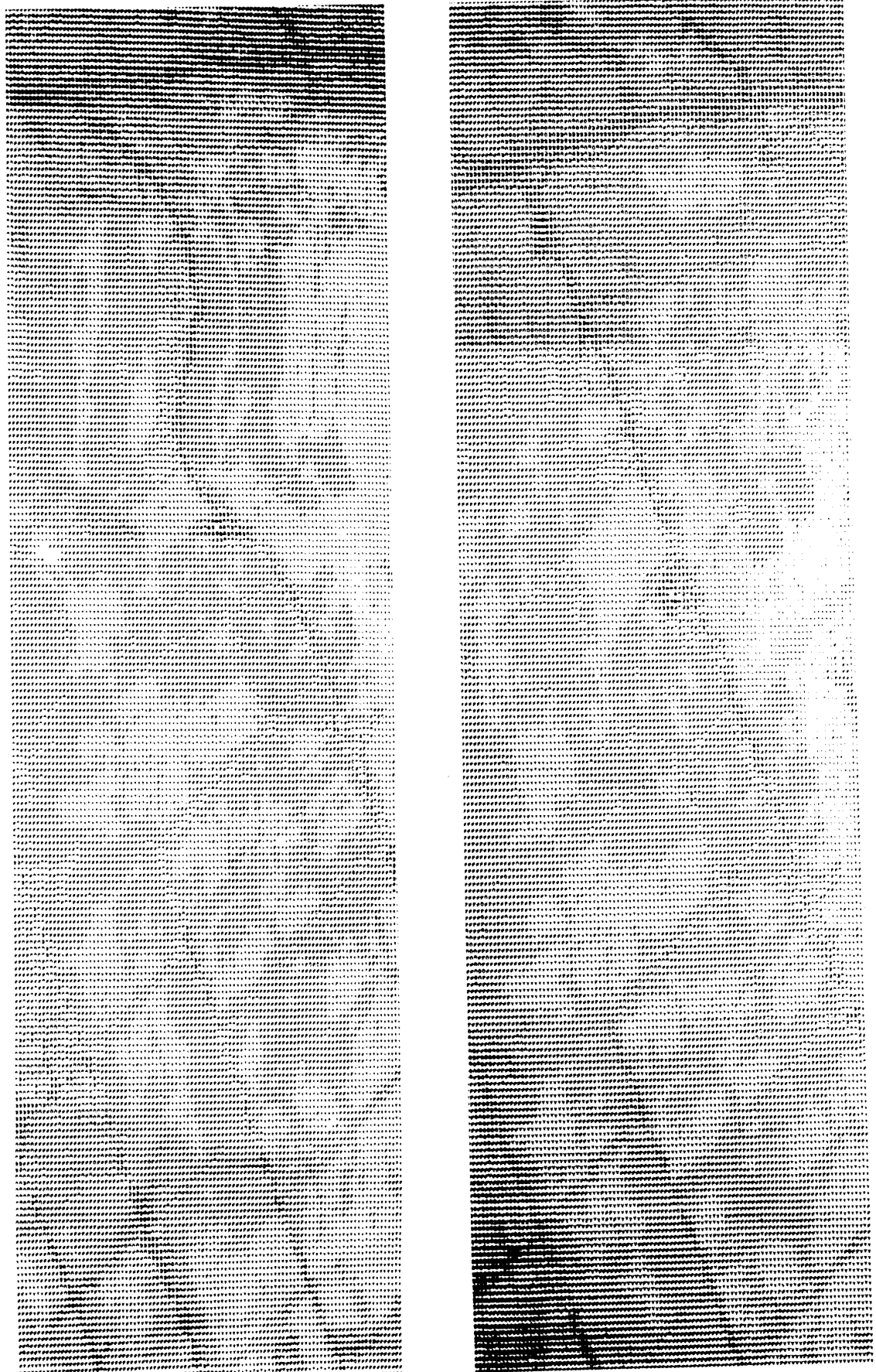
座標の原点は+印で、X軸は図で下向になり、区画の数は補正画像で1走査線内の画素の数だけ横方向に並び、X軸方向は走査線の数となる。

計算機に走査線2N(Nは作画区域内の θ, Ψ の最大値を瞬間視野角で割った値より大きな整数)本分の画像データと、それぞれの区画に算入された画素の数を示すインデックス(K)を記憶できる作業領域を用意する。補正する画素の座標を(2)式で計算し、どの区画に入るかによって画素データを埋め込んで行く。同じ区画に2個以上の画素が対応する場合は、すでに存在するデータ(a)と新たに現われたデータ(b)を、Kによって $(K \cdot a + b) / K + 1$ で計算して埋め込み、その区画のデータの値を、取り入れたデータの算術平均にする。(2N+1)本目の走査線に該当する画素が出現した時点で、N本目までの走査線内でまだデータが入っていない区画を、K=0で検索する。空いている区画へ、その周囲8箇所(画像の端では3か5)にあるデータの平均値を走査線の順に埋め込む。たとえば第18図の(1.4)の区画へは、(1.3)、(1.5)、(2.3)、(2.4)のデータの値の和を4で割って埋める。空き区画が無くなった走査線N本目までのデータは、作業が終了したのでバッファ・メモリへ送り出し、空いた作業領域を2N+1から3N本目までの走査線に割当てて、この作業を繰り返すと補正が完了する。

ラインプリンタへ画像を出力するには、画素単位で作業範囲を指定すると同時に、原画像の利用範囲を計算時



第19図 画素の座標関係



第20図 ラインプリンタによる画像

間短縮のため定める。次に8ビットの画素データを、プリンタの活字とその重ね合せによって16段階の濃淡で表すため、LSBとMSBの近くで合計4ビットを無視することにして、連続する4ビットが適宜に選べることで代用した。この結果、得られる画像は第20図の様に、明暗が逆転したコントラストの少ないものとなるが、地図と比較して補正に使ったパラメータやNの値を調整したり、確認するためには十分であろう。

6. 補正した画像

6・1 ラインプリンタ画像の活用

第16図の左下に見える比較的広い直線状の道路とそれに直交するあぜ路の部分を、第15図のMSSデータに補正プログラムを適用してラインプリンタに打ち出したのが第20図である。図の左側は補正プログラムに運動データを入力しなかった場合で、収集した原画像(第15図)にタンジエント補正とオーバーラップの調整を行なったものになっている。右側は速度・偏流角の値を修正した後 θ 、 ψ のデータによって補正した図である。プログラムにパラメータとして入力する定数は、毎秒走査回数・対地速度・対地高度・偏流角であるが、これ等は飛行前に計画した値と飛行中に計測した値は必ずしも一致しない。作画範囲に最も適した飛行条件が計測できるのは、ドップラ・レーダと電波高度計あるいはINSによる測定値が記録できた場合である。第20図の様に作画区域と同じ区域の航空写真や地図があり目標地点間の距離を比較できる時には、反対に入力した飛行条件を修正できる。実際にこの図では偏流角を方位角のドリフトを含めて約 5° 、速度を4Kt修正して、相対的な誤差をほとんど1画素以内にした。しかしながら、これ等の誤差が5%以内ならばほとんど目立たないし、地形を判別するためならば有効な補正ができる。

収集した画像の一部を補正してラインプリンタに出力すると、短時間の計算で補正の成否の判定や、パラメータと運動データの調整ができるので、補正に必要な時間を短縮できた。

6・2 動揺と画像

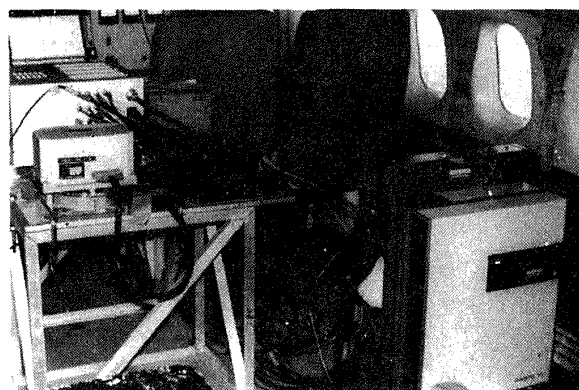
第15図を収集した時の運動データを第21図に示した。機体は図の15秒の附近でラダーをインパルス状に取ったため、機首を右に振り続いてダッチロール・モードに入っている。約24秒の所では逆の操だを行なった。前節で述べた様にパラメータを修正して、 θ 、 ψ の変化を0とした、タンジエント補正と走査数の調整だけを行

なった画像が第22図である。探査機は図の中央附近を下から上に向かって飛行している。左右に通じる一番広い道路の手前で機首を右に約 6° 振ったため、図の左下すみの直線状の道路が左にふくらんで見える。図の中央を過ぎた所で今度は機首を左に振ったため、図の左側中央部を左右に通る道路の一部を2度以上走査している。この時はピッチ角も同時に減少しているため、競合効果によって図に正弦波状の虚像を作っている。一方ヨー・レート(方位角速度)によって、画像の上下の距離が極端に伸びたり縮んだりする様子も図から明らかである。

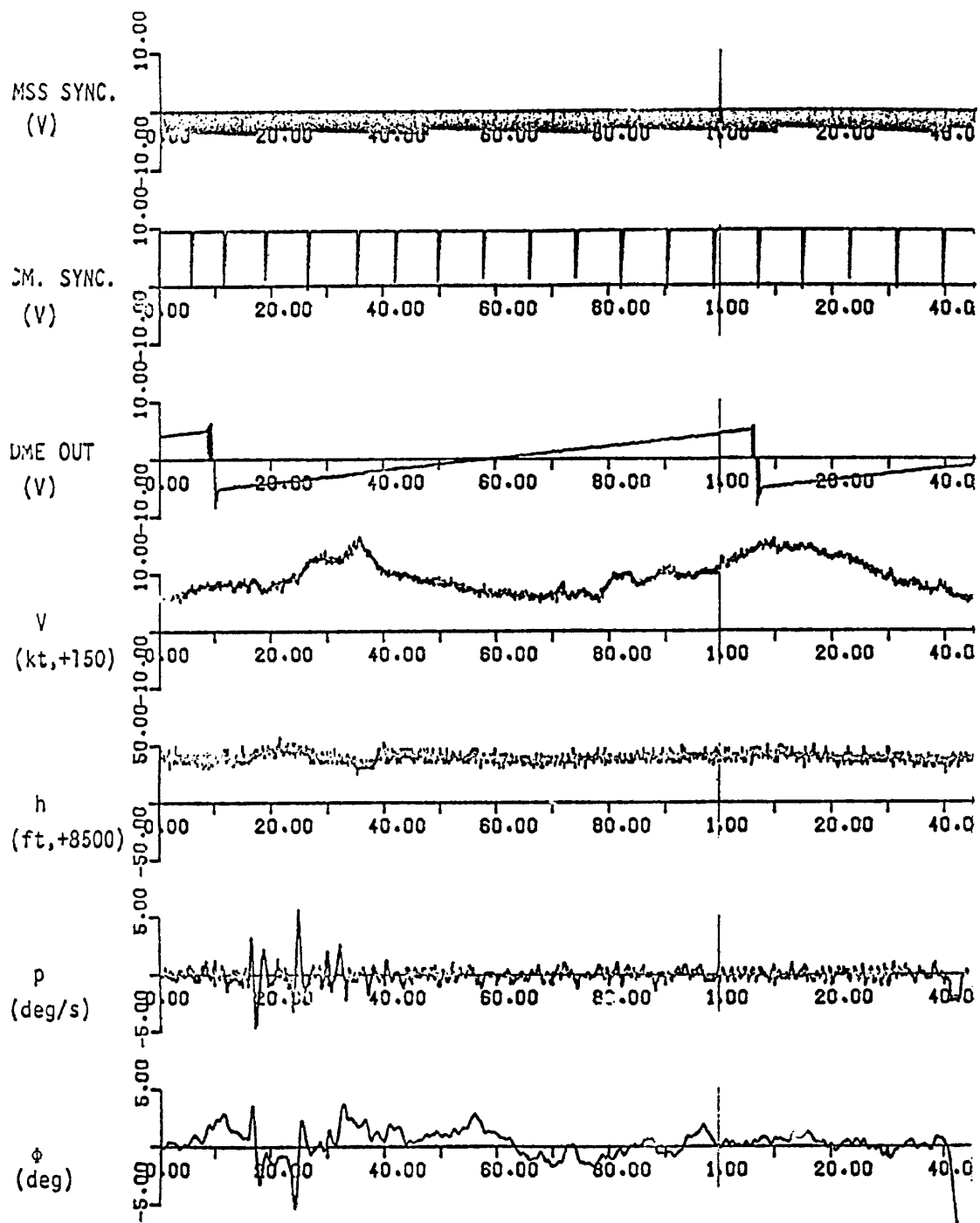
6・3 補正画像の評価

運動データとして θ と ψ だけを用いて補正を完了した画像が第23図である。この図では幅が1画素(6m)程度の道路の幾何的な関係が良く保たれており、ラインプリンタによる作画範囲内では相対誤差は1画素以内と言える。第21図でしま模様になって判別不能だった地域もかなり改善されている。以上の結果から4章に述べた運動計測装置による姿勢角の測定誤差は 0.1° 以内と言えるであろう。

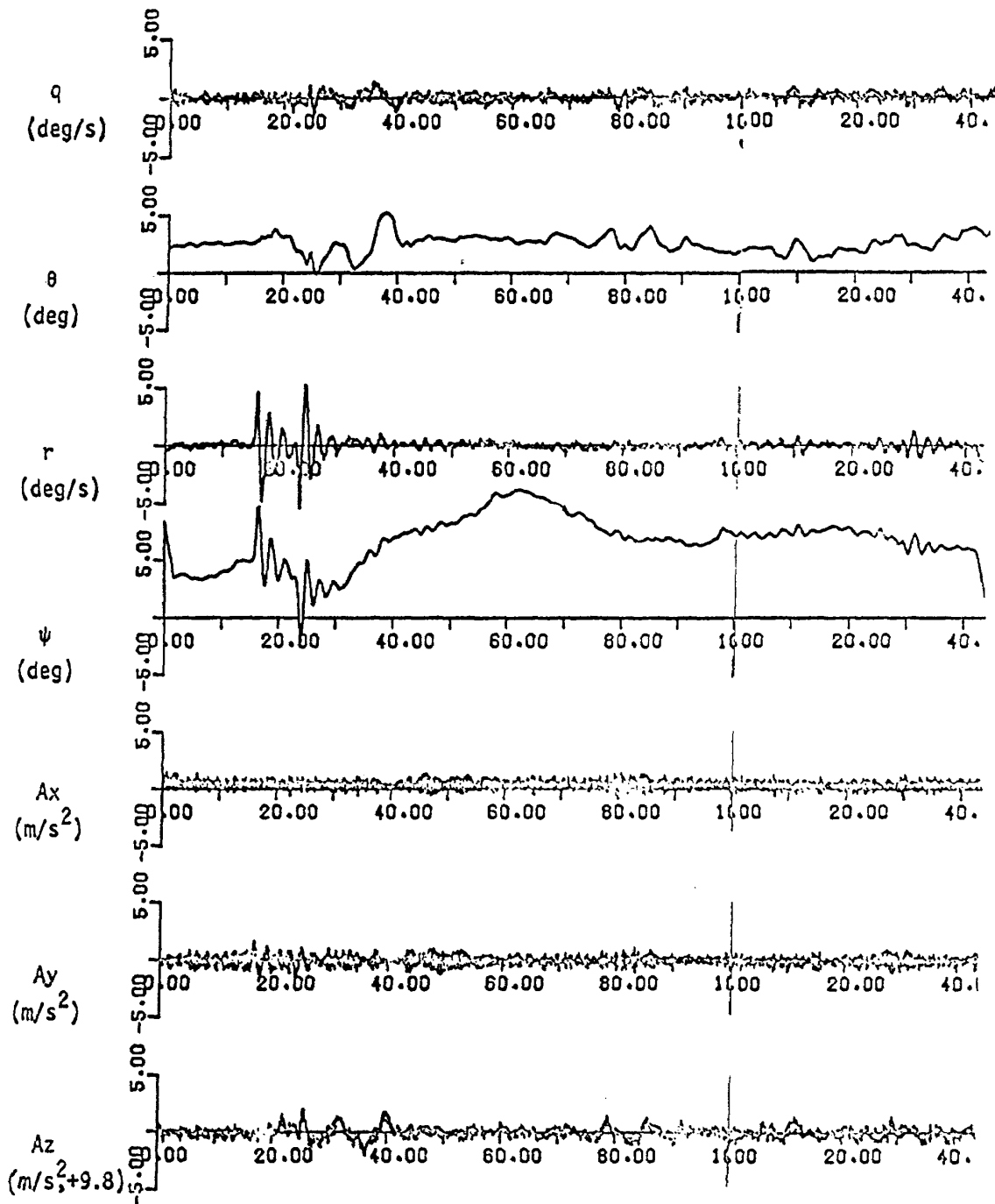
この図で問題点の1つは、前節で取り上げた左側中央部分に見える道路の下にある長方形の区域である。第16図では輪郭がはっきりして貯水池の様に見えるが、第15図・第22図ともに走査方向の関係で上方にほぼ同じ長さだけ伸びている。第22図の場合それが左上に向って、にじみ出た様に見えるのは、補正法の空き画素を回りのデータの平均値で埋める方法によると考えられ第23図でも同様であろう。図の少し上の森の所でも似た現象があり、どちらも走査線の少な目の区域なので、この欠点は走査倍数を増すことで解決すると考えられる。



YS-11機に取り付けた運動計測装置



第 21 図 Remote Sensing YS-11



Flight Test Data (1978.10.21-C2)



第 22 図 運動によるひずみを残した画像



第 23 図 補正を完了した画像

7. む す び

実験的な研究によって開発した“簡易な幾何的ひずみの補正法”とそのプログラムについて、次の様な結論が得られた。

1. ダッチロールによってしま模様には見えない画像の救済がこの方法で可能である。
2. ニアレストネバー法とここで用いた平均値を使う方法は、走査線の数で十分であれば大差が無く、この方法は走査した画素をすべて使う点と、ノイズを消す効果がある点ですぐれている。
3. 記憶容量の大きなマイクロ・コンピュータを利用すれば、ある1チャンネルの画像について、数秒のむだ時間で補正が可能で、収集飛行中に画像の確認ができる。
4. 運動計測装置の出力をMSSの走査線と同期し、PCM型式でMSSデータ用のHDDT（高密度デジタル・テープ）に記録して、データをCCTに編集する作業中にこの補正を行えば、特に補正のための時間を必

要としない。

この研究は政府研究機関が合同で行なった総合研究の一環として進められ、各省庁の皆様から多くの御教示をいただき、なかでも国土地理院ならびに資源調査所からは貴重なデータの提供を受けた。また重ね打ちの技法等の画像処理技術は計算センタ・データ処理研究室から指導を受けた。お世話になった皆様に深く感謝し厚く御礼を申し上げる次第である。

文 献

- 1) 建設省国土地理院：リモートセンシング情報の収集・処理・解析手法に関する総合研究，昭和54年2月
- 2) 岡：MSS画像補正のための航空機動揺測定，日本航空学会誌 第303号 昭和54年4月
- 3) 矢沢ほか：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講演集 昭和54年11月

航空宇宙技術研究所報告 623 号

昭和 55 年 9 月 発行

発行所 航空宇宙技術研究所
東京都調布市深大寺町 1880
電話武蔵野三鷹(0422)47-5911(大代表)〒182
印刷所 株式会社実業公報社
東京都千代田区九段南 4-2-12
