

リニアアレイセンサによるステレオ画像を用いた  
数値地形モデルの自動作成に関する研究

A Study on Automated Generation of Digital  
Terrain Model Using Stereo Linear Array  
Sensor Data

昭和 60 年

柴 崎 亮 介

## 目次

|                                   |    |
|-----------------------------------|----|
| 第1章 研究の概要                         | 1  |
| 1.1 研究の背景と目的                      | 2  |
| 1.2 従来の研究                         | 8  |
| 1.2.1 リニアアレイセンサの外部標定に関する<br>従来の研究 | 9  |
| 1.3.1 ステレオ対応点の自動探索に関する従来の研究       | 14 |
| 1.3 研究の特色                         | 23 |
| 第2章 リニアアレイセンサによるステレオ画像の作成         | 25 |
| 2.1 画像作成シミュレーションの構成要素             | 26 |
| 2.1.1 リニアアレイセンサ諸元及びB/H比           | 28 |
| 2.1.2 リニアアレイセンサの搭載方式              | 31 |
| 2.1.3 衛星(プラットフォーム)の軌道及び姿勢         | 33 |
| 2.1.4 地球の自転及び曲率                   | 42 |
| 2.1.5 地形及び地表輝度データ                 | 45 |
| 2.1.6 大気の影響                       | 49 |

|       |                                  |    |
|-------|----------------------------------|----|
| 2.2   | ステレオ画像の作成シミュレーション                | 52 |
| 2.2.1 | ステレオ画像の作成方法                      | 52 |
| 2.2.2 | テストスタディ                          | 55 |
| オ3章   | リニアアレイセンサ画像の幾何補正                 | 59 |
| 3.1   | はじめに                             | 60 |
| 3.2   | リニアアレイセンサの幾何学                    | 62 |
| 3.2.1 | 座標系                              | 62 |
| 3.2.2 | 共線条件                             | 71 |
| 3.3   | 内部歪等の補正方法                        | 75 |
| 3.3.1 | 内部歪等の種類                          | 75 |
| 3.3.2 | 補正方法                             | 76 |
| 3.4   | リニアアレイセンサの外部標定方法                 | 79 |
| 3.4.1 | 地上基準点のみを利用する外部標定方法               | 79 |
| 3.4.2 | 地上基準点及び衛星の位置・姿勢の計測データを併用した外部標定方法 | 90 |
| オ4章   | リニアアレイセンサの外部標定シミュレーション           | 94 |

|       |                               |     |
|-------|-------------------------------|-----|
| 4.1   | シミュレーションで検討する要因の抽出            | 96  |
| 4.2   | 外部標定シミュレーションの方法               | 101 |
| 4.3   | 外部標定シミュレーションの結果               | 106 |
| 4.3.1 | 地上基準点の数に関する検討                 | 106 |
| 4.3.2 | 地上基準点の分布に関する検討                | 114 |
| 4.3.3 | 衛星の位置-姿勢データの併用手法の<br>効果に関する検討 | 118 |
| 4.4   | まとめ                           | 126 |
| オ5章   | 画像相関を用いたステレオ対応点の自動探索          | 127 |
| 5.1   | はじめに                          | 128 |
| 5.2   | 画像の前処理                        | 129 |
| 5.2.1 | 既存の前処理手法                      | 129 |
| 5.2.2 | 本研究における前処理手法                  | 135 |
| 5.3   | 画像相関によるステレオ対応点の自動探索<br>アルゴリズム | 145 |
| 5.3.1 | ステレオ対応点の相関精度に関する検討            | 147 |



|         |                      |     |
|---------|----------------------|-----|
| 5.3.1.1 | 検討すべき要因の抽出           | 147 |
| 5.3.1.2 | 各要因の検討結果             | 152 |
| 5.3.2   | ステレオ対応点の自動探索アルゴリズム   | 175 |
| 5.4     | 対応結果の後処理             | 182 |
| オ6章     | 数値地形モデルの自動作成精度に関する検証 | 185 |
| 6.1     | 精度の検証において検討すべき要因の抽出  | 186 |
| 6.2     | 自動作成精度の検証方法          | 188 |
| 6.3     | 検証結果                 | 191 |
| 6.4     | 考察結果                 | 200 |
| オ7章     | 結論                   | 203 |
| (参考文献)  |                      | 208 |

# 1章 研究の概要

## 1.1 研究の背景と目的

### 1) 研究の背景

1972年から78年にかけて打ち上げられた LANDSAT 1~3号により得られた MSS 画像や RGB 画像を主な契機として人工衛星からのリモートセンシングの有効性が様々な分野で証明されてきた。

LANDSAT 1~3号に搭載された MSS, RGB を第1世代とすると、1980年代には表 1.1 に示すような第2世代のセンサを搭載した衛星の打ち上げが行われ、または計画されている。

このうち Shuttle 搭載の Large Format Camera, Spacelab 搭載の Metric Camera (Zeiss RMK  $30/23$ ), STEREO SAT, MAPSAT および SPOT に搭載されるリニアレイセンサにより、地上解像力が  $10m \sim 30m$  のステレオ画像が得られる。

これにより、 $5万 \sim 10万$ 分の1の地形図に相当する精度で地形の三次元測定 (数値地形モデルの作成) が可能と言われており、特に用途途

上図などのように地図等の適当な地域データの整備されていない地域  
 には、同時に収集されるマルチスペクトラルデータと合わせて貴重な地域  
 データとして大いに期待されている。

表 1.1 1980年代に打ち上げが計画されているあるいは打ち上げられた  
 リモートセンシング衛星

| 打上げ国   | 衛星        | センサ                                               | 備考           |
|--------|-----------|---------------------------------------------------|--------------|
| USA    | LANDSAT   | Thematic Mapper <sup>(1)</sup> , MSS              | 84年打上げ       |
|        | Shuttle   | Large Format Camera <sup>(2)</sup>                | 84年打上げ       |
|        | Shuttle   | Shuttle Imaging Radar <sup>(2)</sup>              | 81年打上げ       |
|        | MAPSAT    | Linear Array Sensor <sup>(2)</sup>                | 計画中          |
|        | STEREOSAT | " "                                               | 計画中          |
| ESA*   | Spacelab  | Metric Camera <sup>(2)</sup><br>(Zeiss RMC 30/23) | 1983<br>打上げ  |
| France | SPOT      | Linear Array Sensor <sup>(2),(3),(4)</sup>        | 85年打上<br>げ予定 |

\* ESA : European Space Agency

図 1-1 は 10 万分の 1 より大きなスケールの地図が全体の 50% 以下しかカバ  
 していない国、あるいは地域を示している。(1976 国連調査による。) この調  
 査によっても衛星による地形の三次元測定、すなわち数値地形モデルの作成

の有効性がきわめて高いことがわかる。

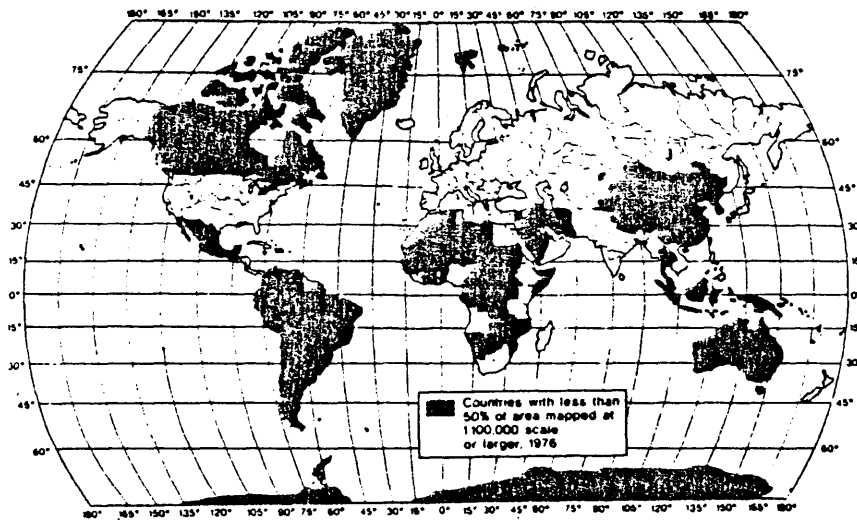


図 1-1 10万分の1より大きいスケールの地図が全城の50%以下しかカバーしていない国、あるいは地域（黒く塗った部分）

一般にステレオ画像による三次元測定を精度良く行うためには、

- 1) 撮影時のセンサの位置および三軸姿勢の正確な値を知り、
- 2) ステレオ画像上にある莫大な数の測定地点の画像座標を効率的に精度よく求める必要がある。

レンズカメラによる三次元測定では 1) については、写真測量学の原理が適用でき、2) についても既存の図化機を利用することによって従来の空中写真と同様の処理が可能である。

一方、本研究で対象としたリニアレイセンサによる三次元測定に於ては、カメラの場合に比べ表1・2に示すような相違点があるため、以下のような課題を解決する必要がある。

1) リニアレイセンサではセンサ位置と三軸姿勢がラインごとに変化するのを、これを時間あるいはライン数の関数として求めなければならぬ。

(リニアレイセンサの外部標定手法の開発)

2) リニアレイセンサにより得られる画像は、一般の写真とは異なり、中心投影画像でないために、既存の図化機による図化はできない。そのため、ステレオ画像上に多量の対応点を自動的に探索し、三次元座標を計算する方法を開発する必要がある。

表 1-2 三次元測定におけるレンズカメラとリニアアレイセンサの比較

|                    | レンズカメラ                                                        | リニアアレイセンサ                                                                            |
|--------------------|---------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| 画像データの形            | アナログ<br>(階調・色調等)                                              | デジタル<br>(電気信号)                                                                       |
| 記録媒体               | フィルム                                                          | MT, ディスクなど                                                                           |
| 光線の幾何モデル           | 中心投影                                                          | ラン方向, 平行投影<br>ラン直角方向, 中心投影                                                           |
| 外部標定要素             | レンズ位置 $X_0, Y_0, Z_0$<br>三軸姿勢 $\omega_0, \varphi_0, \kappa_0$ | センサ位置 $X_0(t), Y_0(t), Z_0(t)$<br>三軸姿勢 $\omega(t), \varphi(t), \kappa(t)$<br>(時間の関数) |
| 図化方法<br>(三次元座標の計算) | 図化機による<br>図化                                                  | 機械によるステロ対応<br>点の自動探索と三次<br>元座標の計算                                                    |

## 2) 研究の目的

以上により本研究の目的は以下の2つである。

- (1) リニアレイセンサによるステレオ画像を用いて地形の三次元測定を行い、数値地形モデルを自動作成するために必要な手法を開発する。すなわち、
  - i) リニアレイセンサ画像の標定要素（センサの投影中心位置と三軸姿勢）を時間あるいはライン番号の関数として求める手法（外部標定手法）を開発すること。
  - ii) デジタルな形で与えられるステレオ画像上の対応点を自動的に探索する方法を開発すること。
- (2) リニアレイセンサ画像から自動作成される数値地形モデルの精度を検証し、合わせて画像の  $B/H$  比などが自動作成精度に与える影響の大きさを定量的に明らかにすることにより、望ましい撮影条件等を検討するための基礎資料とする。



## 1.2 従来の研究

前節で述べた本研究の目的を達成するために解決する必要がある技術的課題は大きく以下の2つに分けられる。

- 1) リニアレイセンサの外部標定に関する課題
- 2) リニアレイセンサによるステロ画像におけるステロ対応点の自動探索に関する課題

本節では、これらの技術的課題に関して行われた従来の研究のうち主要なものについて整理し、それらの問題点等についてまとめる。

## 1.2.1 リニアレイセンサの外部標定に関する従来の研究

リニアレイセンサの外部標定に関するアプローチは大きく2つにわけられる。一つは、センサのプラットフォーム（衛星）の位置及び姿勢を G. P. S (Global Positioning System) <sup>(2)</sup> や Stellar Sensor <sup>(2)</sup> 等のセンサなどを用いて直接計測しようと言うものであり、他の一つは、写真測量の原理に基づいて地上基準点等に関する共面条件式や共線条件式を設定し、それらを解くことにより解析的にセンサの位置、姿勢を求めようと言うものである。

前者については Itek <sup>(5)</sup> や Colvocoresses <sup>(6)</sup>, Welch <sup>(7)(8)</sup> らが各々 MAPSAT 計画, STEREOSAT 計画の技術的実現可能性について検討する際に述べたものがある。Itek によれば MAPSAT 衛星画像を用いて 7~25 m の相対(測地)精度, 50-100 m の絶対(測地)精度を得るためには、10 m レベルのセンサ位置計測精度及び 4 秒前後 (1 $\sigma$  値) の姿勢計測精度が必要とされている。これらの精度は、それぞれ G. P. S の利用及び Stellar Sensor の利用により達成可能とされているが、それでもなお 5~10 万分の 1 の地形図に対応して絶対測地精度が得られてはいない。すなわち、5~10 万分の 1 の地形

図に対応した測地精度を得るためには、さらに地上基準点による位置合せを行う必要がある。また、これらの論文で要求された姿勢安定性等を十分満足する衛星を製作することは技術的にもコスト的にも負担が大きいと考えられるため、衛星に対する要求を低下させる代わりに、それを画像処理手法等でカバーした方が得策と考えられる。

地上基準点等を用いて解析的にセンサの外部標定を行う手法は

筆者らにより初めて開発されたものである。<sup>(9),(10),(11)</sup> それ以降の研究としては Hofman<sup>(12),(13)</sup>、<sup>(16)</sup> Wu のものがある。

Hofman<sup>(12),(13)</sup> は前視、後視に加えて鉛直下方を向いたリニアアレキセンサを搭載するセンサ方式について各部標定方法を提案している。それは地上基準点について共線条件式を設定し、さらにセンサの各画像にそれぞれ共通して映っている点（航空写真測量でのタイポイント、パスポイントに相当）について共面条件式を設定し、これらの式（共線及び共面条件式）を解くことにより、極めて短い時間間隔ごとのセンサの位置、姿勢を求めるものである。センサの位置、姿勢の求められていない時刻については、位置、姿勢の推定

められている点より補間的に位置、姿勢を与えることになる。この方法によれば、

航空機のようにプラットフォームの位置、姿勢の変動が激しい場合

でも、標定の時間間隔を短くすることにより対応することができ、また後述す

る Wu の方法に比べ必要な地上基準点の数が少なくて済む。しかも、基準点数

が走査長によらないという長所をもっている。しかしながら、パスポイント等の画像

座標を非常に数多く、精度良く測定する必要がある。そのため Hotman はこ

の測定を自動相関によって行うとしている。しかしながら現在の画像相

関技術のレベルより見て計算時間の長さ、結果の信頼性など解決すべき

課題は多い。また Hotman の方法は 3 基以上のセンサを搭載した

場合にしか適用できない。したがって少なくとも SPOT 衛星には適用で

きないことになる。

Wu の方法<sup>(16)</sup>は Hotman と同じく 3 センサ搭載方式を想定した上で、共線・

共面条件式を利用しているが、Hotman がセンサの位置、姿勢の値を直接

求めているのに対し、センサの位置、姿勢の時間変化を表わすフリエ級数

あるいは多項式の係数を求めるというものである。この方法によれば、必要な

パスポイントの数は原理的にはゼロであることから、パスポイントの座標測定に自動相関を用いる必要はない。しかしながら、プラットフォームの位置、姿勢変化が複雑で、時間上のフーリエ級数や多項式ではうまく表現できない場合には、走査長を短くしないと適用できない。また、複雑な位置、姿勢変化をよよく表すためにフーリエ級数や多項式の係数の個数を増加させると、標定に必要な地上基準点数が増加するという欠点がある。

さらに、こういった解析的方法を特に衛星搭載のリニアアレイセンサの標定に利用する場合には、以下のような大きな問題がある。すなわち、衛星搭載のリニアアレイセンサの場合、地上の走査中に比べて衛星高度が非常に高い、すなわちセンサの走査角が極めて小さい。(SPOTやSTEREOSATでは走査中約60kmに対し高度は約700~800km) したがって共線共面条件式だけから外部標定を行った場合、センサの位置、姿勢の推定値が極めて不安定となり、測地精度が低下する。そのため、共線共面条件式以外に衛星位置、姿勢の計測値に関する制約式も加えた標定を行い、センサ位置、姿勢の推定値の安定化をはかる必要がある。航空写真測量ではセン

サ(航測カメラ)の位置や傾きを電波測距機器やジャイロ等を利用して直接計測した値を共線・共面条件式以外の制約式として用いている例<sup>(14)(15)</sup>がある。

● しかしながら、多くの例ではセンサ位置や姿勢の直接計測精度が標定精度に比べて劣っているため、これらの計測値の利用が実用的な意味でそれほど

有効ではないとされている。一方、衛星をプラットフォームとして利用する場合に、衛星の位置・姿勢の計測精度(位置精度は飛行高度に対する相対精度)が航空機の場合に比べて高いことや計測データが容易に入手できることから、計

● 測データの外部標定への利用を図ることがより有効であると考えられる。つまり、

センサの外部標定要素を直接、G.P.SやStellar Sensor等より計測する手法と地上基準点等より解析的に求めようとする手法を統合することにより、

より精度の良い標定を効率的に行うことが可能である。本研究はこうした計測法と解析法を併用して精度の向上と実用性の向上を図ろうとするものであり、これら

● の研究には見られなかった考え方を提示している。

## 1.2.2 ステレオ対応点の自動探索に関する従来の研究

ステレオ対応点の自動探索に関する研究はこれまで主に写真測量の分野で行われている。したがって本節では写真測量の分野における研究を中心にレビューすることによって、それらを衛星からのリニアレイセンサ画像に適用する場合の問題点等についてまとめる。

なお、ステレオ対応点の自動探索アルゴリズムは大きく、1) ステレオ画像の前処理、2) 画像相関によるステレオ対応点の自動探索、3) 探索結果の後処理に分けられるので、本節の構成もそれに従っている。

### 1) ステレオ画像の前処理

前処理の方法はさらに画像の質的处理と幾何学的処理に分けられる。質的处理とはノイズ除去といった画質の改善やエッジの強調といった画像強調などの処理であり、幾何学的処理とは画像の分割や再配列といった画素の並びかえを伴う処理である。

画像相関精度を低下させる要因とその影響を減少させるための質的前処理方法の例を示したものが表1.3である。リニアレイセンサ画像の前処理によい

表 1.1 画像の自動相関精度の低下要因とその前処理手法

|              | 精度の低下要因                                                                                                                            | 前処理手法                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|--------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| センサに起因するもの   | <ul style="list-style-type: none"> <li>画像(センサ)のノイズ</li> <li>センサの検知素子の感度特性の差によるラインノイズ</li> </ul>                                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>高周波成分の除去<sup>(17)(18)(19)</sup><br/>(近傍平均, ローパスフィルタ等)</li> <li>各検知素子のキャリブレーション</li> <li>累積頻度曲線を利用してラインノイズの除去<sup>(20)</sup></li> <li>ランダムノイズ付加によるラインノイズの除去<sup>(21)</sup></li> </ul>                                            |
| 撮影条件に起因するもの  | <ul style="list-style-type: none"> <li>光学系の周辺減光</li> <li>太陽光の反射</li> <li>地形の起伏等による陰影</li> <li>撮影時間, 方向の違いによる画像間の輝度レベルの差</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li><math>\cos^4 \theta</math> 補正, シュイティング曲面の作成による補正等</li> <li>同上, あるいはサンスポット部分の抽出・除去</li> <li>陰影部の抽出・除去<sup>(22)</sup></li> <li>正規化等<br/>斜面の方向の違い等によって生ずる局所的な輝度レベルの差は画像の自動相関を行う際にある程度考慮し, その影響を減少させる例<sup>(23)</sup>がある</li> </ul> |
| 地表の状態に起因するもの | <ul style="list-style-type: none"> <li>規則的な輝度の変化<br/>(テクスチャ)</li> <li>積雪, 雲など一様な輝度の分布</li> </ul>                                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>規則的な変化パターンに対応する周波数成分の除去等</li> <li>ローパスフィルタ(相関窓の拡大等)</li> <li>一様部分の除去<sup>(22)</sup></li> </ul>                                                                                                                                  |
| その他          | <ul style="list-style-type: none"> <li>自動相関精度<sup>(向上)</sup>を目的としたエッジ強調</li> </ul>                                                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>ラプラシアン等によるエッジ強調<sup>(24)(32)</sup></li> </ul>                                                                                                                                                                                   |



くは画像のノイズの発生状況及び利用する画像相関手法を考慮して適当な前処理手法を採用する必要がある。

幾何学的な前処理手法の代表的なものは

(1) 共役直線に沿った画素の再配列<sup>(17) (22) (23) (25) (26) (27)</sup>

(2) 画像の圧縮による階層構造化<sup>(17) (22) (28)</sup>

である。

共役直線に沿った画素の再配列は図1.2.に示すようにステレオ写真上の対応点のペア ( $a$ と $a'$ ,  $b$ と $b'$ ,  $c$ と $c'$ ) はそれぞれ同じ共役直線にのって

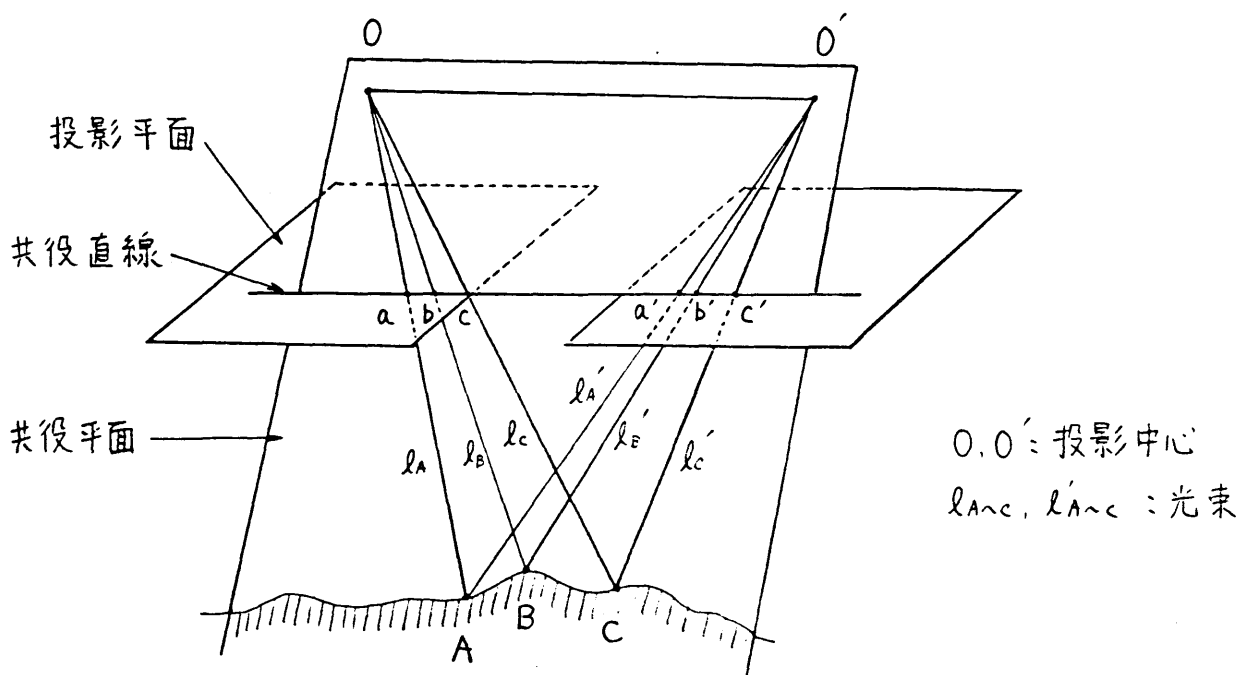


図1.2 共役直線と共役平面

いるという性質を利用したものである。たとえばライン方向を共役直線と一致するようにステレオ画像を再配列すると、ある点のステレオ対応点には必ず同一ライン番号を持つことから探索速度の向上、アルゴリズムの単純化を図ることが出来る。

画像の圧縮によるヒエラルキー構造化は図1-3に示すように画像圧縮を繰り返すことにより画像を階層化するものである。対応点の探索は上位レベルの（圧縮度の高い）画像から行い、それを順次、最終レベル（原）画像まで続けられる。上位レベルの画像に於ける探索結果は下位レベル画像に於ける探索に対して対応点の予想存在範囲を与えることから

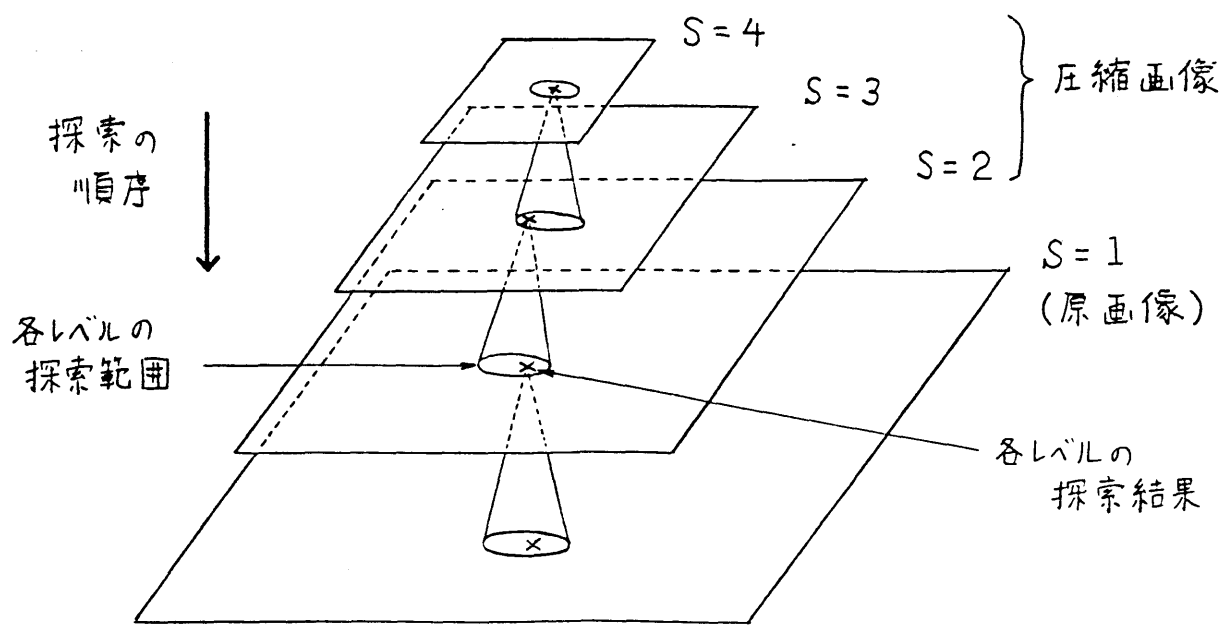


図1-3 画像の階層化と対応点の探索

最初から原画像上で探索を行う場合に比べて探索のトライアル回数を大きく減少させまた、大きな探索エラーを防止することができると考えられる。

エアレイセンサ画像においてはセンサの位置・姿勢が時間的に変化する  
ことから、一般の写真にみられるような共役直線は存在しない。しかしながら  
プラットフォームが衛星の場合には位置・姿勢の時間変化が小さいことから  
近似的な共役直線を求めることができる。本研究では擬似共役直線を  
求めることにより画像の再配列を行う手法を提示している。

## 2) 画像相関によるステレオ対応点の自動探索手法

写真測量の分野において従来、主に適用されてきた画像相関手法は面積相関と呼ばれるものである。それは各ステレオ画像上にそれぞれ一定の大きさ・形状を持つ相関窓を設定し、相関窓間の類似度（相関係数、共分散、絶対差の和等）が最大になった位置をステレオ対応点とするものである。

<sup>(25)(26)(17)(27)</sup>  
この手法は画像の視差が小さく、ゆるやかに変化しておりしかも

テクスチャに富んでいるケースには一般に良好な結果を得ているが地形等の起伏の変化が急であったり、不連続であったりあるいは視差により見えない

部分(隠ぺい部分)が存在する場合に於いては相関精度が低下する。

これは、相関窓画像間の視差による歪が大きくなるため、相関窓の形状を固定しては類似度を求めるとステレオ対応点の位置が必ずしも類似度が最大値をとらないためである。

視差による精度の低下を防ぐためには相関窓の形状を予想される視差の分布にあわせて変化させることが考えられる。Panton<sup>(27)</sup>や服部<sup>(17)</sup>らに於いては探索の終了した周辺の対応結果や画像の低周波成分に対する探索結果から視差分布の概略値を与え地形起伏に応じて相関窓の形状を変化させることにより良好な結果を得ている。また Ackerman<sup>(23)</sup>は視差による窓形状の変化をアフィン変換等で近似しその変換のパラメータをくり返し最小二乗法によって求めることにより良好な結果を得ている。しかしながら、これらの手法も地形起伏の急変や視差による隠ぺい部分の存在による精度の低下を十分には克服できていない。

一方、近年、人工知能の分野で人間の实体視の能力を忠実にシミュレートすることによりステレオ対応点を得る手法が進展を見せている。

これらの手法<sup>(29)(30)</sup>は実験室内に限られた画像に対して適用されているものが  
多いが、Ohta<sup>(31)</sup>らのように航空写真に対して適用した例も見られる。こうした  
手法は今般研究の途上であり、航空写真上のステレオ対応点の自  
動探索においては実用上の観点から前述のような面積相関手法が  
主に検討されている。

衛星搭載のリニアレイセンサによる画像は地上解像力が高々 $10\text{m} \times 10\text{m}$   
であり、一般の航空写真に比べかなり低いことから人工構造物や急斜  
面等による地表面の起伏の急激な変化がはらされる傾向にあり、また  
 $B/H$ 比の大きさ $(0.0 \sim 1.0)$ から見て視差による隠ぺいが広範囲にわ  
たって生ずることはないと考えられる。したがってリニアレイセンサ画像によ  
るステレオ対応点の自動探索は面積相関により比較的良好な精度  
を得られることが期待できる。

本研究では2種類の大きさの相関窓による探索結果を比較することによ  
り大きな探索誤差の発生をテックし探索精度の向上をいよっている。

### 3) 探索結果の後処理手法

自動探索によって得られたステレオ対応点の探索結果そのものや探索結果と画像センサの標定データより求まる地表の3次元座標値に対して主に以下のような目的から後処理が行われる。

(1) 探索誤差の除去

(2) データの利用性を向上させるための編集

探索誤差のうち比較的小さなランダムノイズ的誤差については一般的に近傍平均等が用いられる。しかし、自動探索における迷走などの結果生ずる大きな誤差（グロスエラー (gross error)）は近傍平均では十分除去できない。そのため、地形勾配の大きさ等に関する一般的な制約条件を考慮することにより、これらの条件を満足しない座標値を大きな誤差として排除する方法が開発されている。こういった処理は自動探索時に同時に行われる場合<sup>(17),(22)</sup>もある。

しかしながら、これらの方法は個々のケースにおいては有効であるとされた場合でも対象が異なる場合には誤差の除去が十分でなかったり逆に正しい値を

でもエラーと判定してしうケースもあるなどうも機能しない場合がある。

このように誤差の除去については十分に一般性を持った頑健な方法が得られているとは言えず、今後の研究課題である。

データの編集手法についてはデータの利用目的によって様々な手法が考えられるが、ここでは格子配列の数値地形モデルの作成という最も基本的な編集方法について述べる。

すなわちステレオ対応点の自動探索においては、探索アルゴリズムの単純化のために、ステレオ画像上の格子点について3次元座標値が求められる。その結果、3次元座標値の計測された地表点は地表上にランダムに配列されることになるため、これらを内挿によって格子状に並べ直す必要が生ずる。ランダム配置→格子配置の实用的アルゴリズムの例としては、建石<sup>(39)</sup>によるものがあるが、データの利用目的に応じてアルゴリズムを選択する必要はある。

### 1.3 研究の特色

本研究の特色をまとめると以下の通りである。

- 1) リニアアレイセンサのステレオ画像から数値地形モデルを自動作成するために必要な一連の手法を独自の考えで開発しようとした。
- 2) 衛星搭載のセンサの位置、姿勢の変化が時間(ライン番号)の多項式で表わされることを示し、多項式のパラメータを共線条件式、及び衛星の位置・姿勢の直接計測データの併用により求める手法を開発した。その結果、外部標定要素(多項式のパラメータ)を少ない地上基準点で精度良く求めることが可能になった。
- 3) リニアアレイセンサ画像を擬似共役直線(Quasi-Epipolar Line)にとって並べかえることにより、ステレオ対応点の自動探索を効率化する手法を開発した。
- 4) リニアアレイセンサのシミュレーション画像を用いて数値地形モデル



の自動作成を行い、画像のB/H比や地上基準点数等の要因が数値地形モデルの精度に与える影響を明らかにした。その結果、最も条件の良い場合においては地上解像力が10m×10mのステレオ画像から標高精度(平均二乗誤差)が7~8m程度の数値地形モデルを自動作成することが可能であることがわかった。

以上の結論の詳細はオ7章で述べられる。

## 2章 リニアアレイセンサによるステレオ画像の作成

本章では 衛星に搭載されたリニアアレイセンサが地表を走査する状態を数値地形データ(D.T.M)と地表輝度データ(LANDSAT MSS 画像)等を用いたシミュレーションモデルとして再現し、リニアアレイセンサによるステレオ画像を作成する。

## 2.1 画像作成シミュレーションの構成要素

実際に得られるであろうリニアアレイセンサ画像をシミュレーションによってできるだけ忠実に再現するためには考慮すべき多くの要因がある。

しかし、そのうちリニアアレイセンサ画像を用いた三次元測定の精度に影響を与える要素は表2.1に示すとおりである。同表にはこれらの要素を本研究においてどのように与えているかについてもまとめられている。

表 2-1 リニアアレイセンサ画像作成シミュレーションの構成要素

| 節     | 項目            | 本シミュレーションにおける扱い                                                                                                                            | 備考            |
|-------|---------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
| 2-1-1 | センサ諸元と B/H 比  | <ul style="list-style-type: none"> <li>センサの地上解像力 : 10m × 10m</li> <li>センサの雑音 : 無</li> <li>B/H 比 : 0.5, 1.0</li> </ul>                      |               |
| 2-1-2 | センサ搭載方式       | <ul style="list-style-type: none"> <li>前後方式, 左右方式</li> </ul>                                                                               |               |
| 2-1-3 | 衛星位置及び姿勢の時間変化 | <ul style="list-style-type: none"> <li>位置 : 時間の 1 次式</li> <li>姿勢変化 : " の 3 次式</li> </ul>                                                   | ロール, ピッチ, ヨー角 |
| 2-1-4 | 地球の自転         | <ul style="list-style-type: none"> <li>衛星位置を時間の 1 次式で表わすことにより考慮される。</li> </ul>                                                             |               |
| 2-1-5 | 地形及び地表輝度      | <ul style="list-style-type: none"> <li>地形 : 数値地形モデル</li> <li>地表輝度 : LANDSAT MSS 画像 (5 バンド)</li> </ul> <p>[ 但し, 撮影方向の差による輝度の変化は考慮しない。 ]</p> | 日本アルプス周辺      |
| 2-1-6 | 大気の影響         | <ul style="list-style-type: none"> <li>屈折 : 屈折量が小さく, また実際の場合には補正が容易であることから考慮しない。</li> <li>地表からの反射エネルギーの大気による減衰 : 考慮しない</li> </ul>          |               |

2.1.1 リニアアレイセンサ諸元 および B/H 比  
(Base/Height 比)

リニアアレイセンサは撮像面に CCD (Charge Coupled Device) による光検知素子を高い密度 (素子の中心間隔は  $15\mu\text{m}$  程度) で直線状にならべたセンサである。図 2-1 に示すように リニアアレイセンサはプラットフォームが移動するのにしたがって、ほうきで掃くように地表面を走査する。

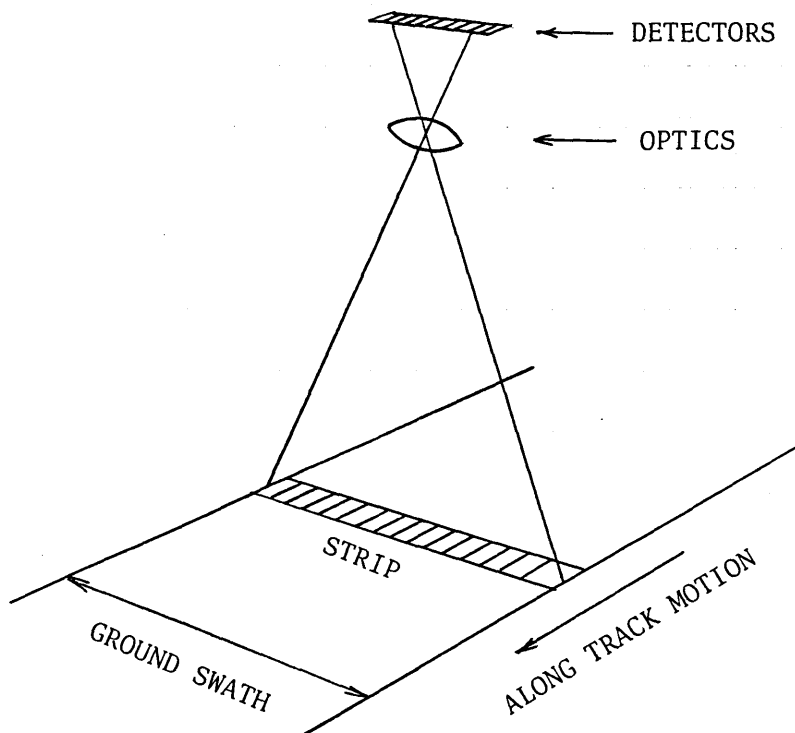


図 2.1 リニアアレイセンサによる地表面の走査

表2.2に衛星に搭載が予定されているリニアレイセンサの諸元を示す。このように、最も地上解像力の高いSPQTおよびMAPSATで地上瞬間視野は約10mであることから、本研究ではリニアレイセンサの地上解像力が10m×10mになるように焦点距離および素子間隔を高度およびB/H比から適当に定めた。

表2.2 搭載予定のリニアレイセンサの諸元

| 衛星     | STEREOSAT <sup>(1)</sup> | MAPSAT <sup>(2)(3)</sup> | SPOT <sup>(4)</sup> |
|--------|--------------------------|--------------------------|---------------------|
| 地上瞬間視野 | 15 m                     | 10 - 60 m                | 10 m                |
| 走査巾    | 61 km                    | 175 km                   | 60 km               |
| 平均高度   | 705 km                   | 919 km                   | 832 km              |

ここで B/H 比は 0.5 および 1.0 とした。また、センサの雑音は再現が困難であるため シミュレーションでは考慮しない。これは、LANDSAT MSS 画像の雑音除去に開発された手法<sup>(5)(6)</sup>が、リニアアレイセンサにも適用可能であると考えられることから、センサ雑音は三次元測定上 特に大きな問題にはならないと判断されるためである。

## 2.1.2 リニアアレイセンサの搭載方式

リニアアレイセンサの搭載方式には前後方式と左右方式がある。

### 1) 前後方式 (図2-2(a) 参照)

衛星は、進行方向に対して前方斜め下向きと後方斜め下向きのセンサを搭載する。(前方斜め下向きのセンサを前視センサ、後方斜め下向きのセンサを後視センサと呼ぶこととする。) 同じ地域をまず前視センサで、次に後視センサで走査することにより、地表のステレオ画像をえる。

前後には MAPSAT, STEREO SAT がある。<sup>(1)(2)</sup>

### 2) 左右方式 (図2-2(b) 参照)

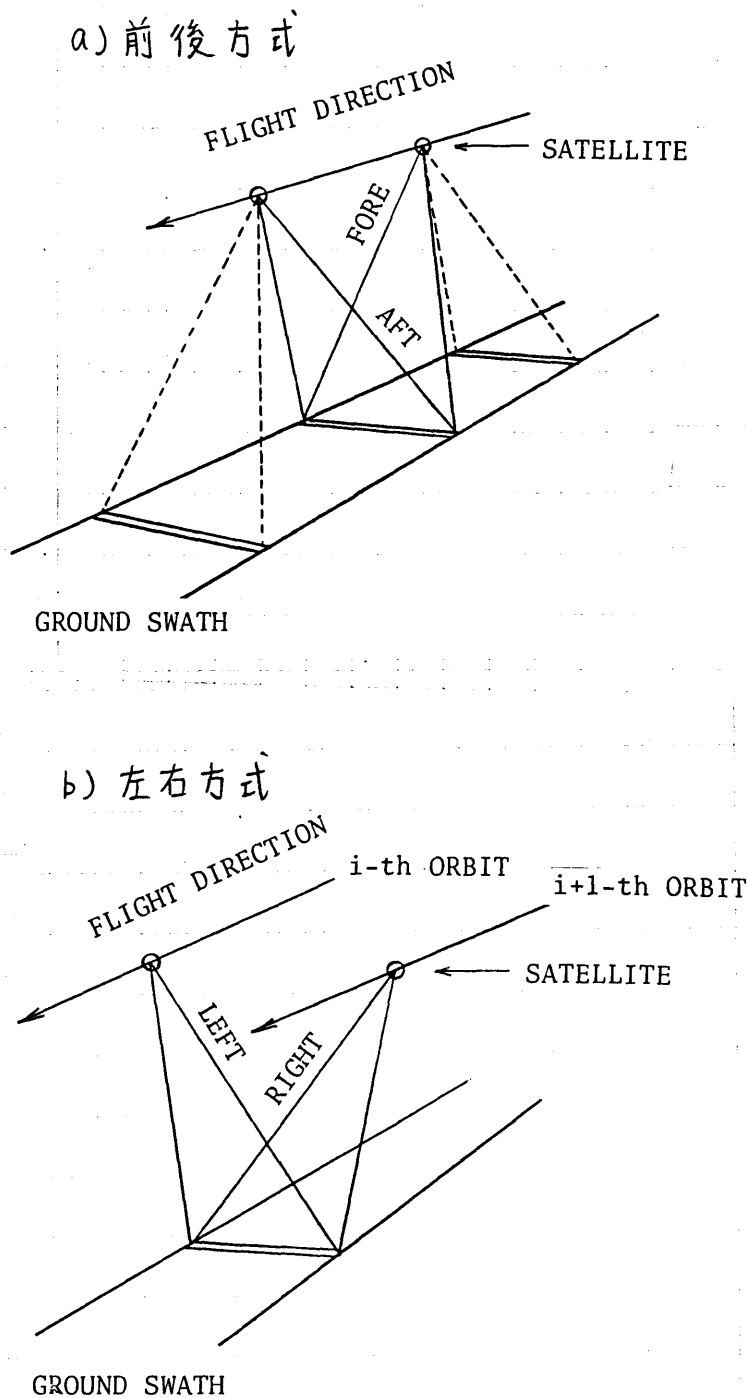
衛星は進行方向に対して垂直な平面内に左下向きと右下向きの2つのセンサを搭載する。同じ地域をまずどちらかのセンサで走査し、次に隣接した軌道から反対向きのセンサで走査する。このように、平行な2つの軌道にはさまれた地域についてステレオ画像を得る。

左右方式には SPOT がある。<sup>(4)</sup>



本研究では 以下两种方式によるステレオ画像を作成し、地形の三次元測定の方法および精度について検討する。

図 2.2 リニアレイセンサによるステレオ撮影



### 2.1.3 衛星(フラットフォーム)の軌道および姿勢

MARSAT等のリニアアレイセンサを搭載する衛星は現在のLANDSATに比べ、姿勢安定性などの面で、大きく進歩していることが予想される。

これまでのLANDSAT 1~3号については1シーン(走査長にして約185km, 時間にして約26~27秒)の範囲で位置及び姿勢の時間変化はそれぞれ時間 $t$ の1次式及び3次式で表わされると報告されている。<sup>(7)</sup>

LANDSAT 4~5号は1~3号が進歩した衛星(MMS; Multimission Modular Spacecraft)とされており、姿勢安定性等の面で大きく改善されると言われている。ちなみにSTEREOSATについてもMMSが利用される計画である。図2.3, 2.4はLANDSAT 4号の位置(緯度, 経度, 高度)及び姿勢(ロール, ピッチ, ヨー角)の時間変化の一例を示したものである。

表2.2は120点(約4.1秒間に1回の測定, 120点は約492秒間に相当)のLANDSAT 4号の位置, 姿勢データを10点(41秒間), 20点(82秒間), 30点(123秒間), 40点(164秒間), 60点(164秒間), 120点(492秒間)にそれぞれ区切り, 時間 $t$ の多項式(1~3次式)による近似

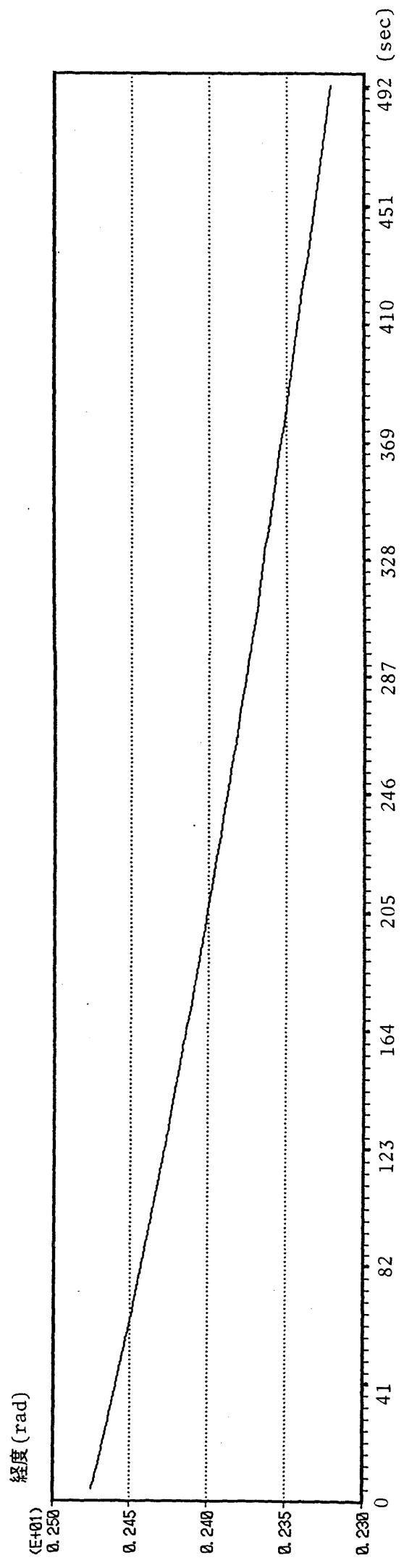
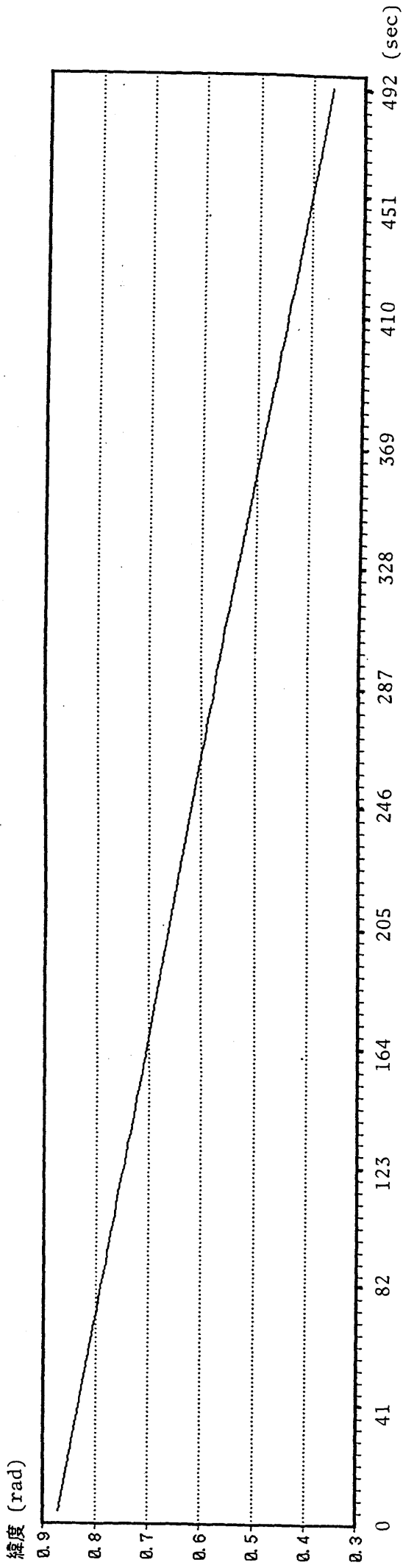


図 2.3 (その1) 衛星位置の時間変化の例 (ランドサット 4号)

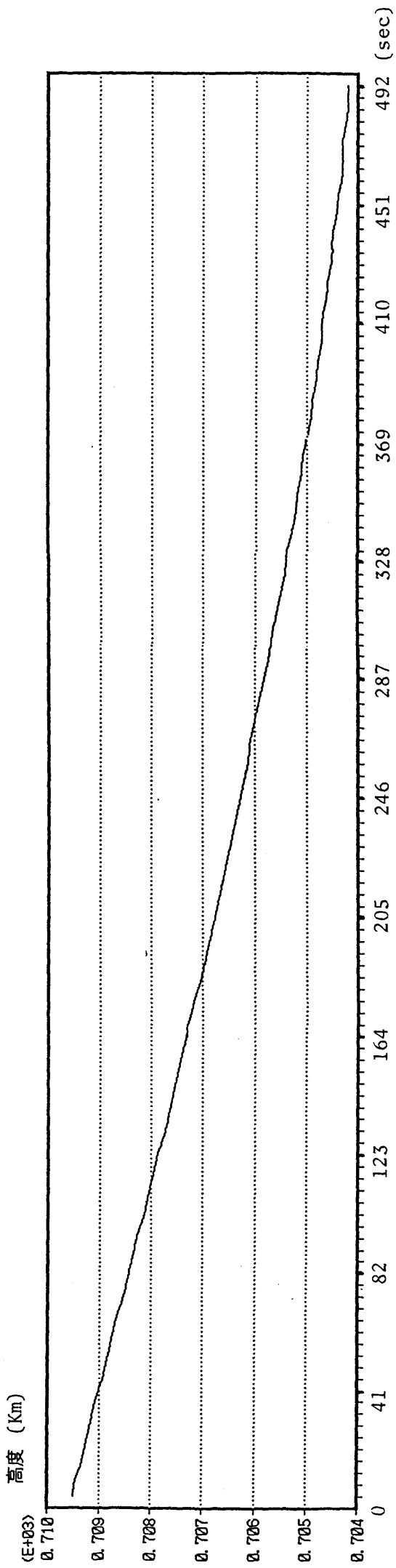


図 2.3 (その2)

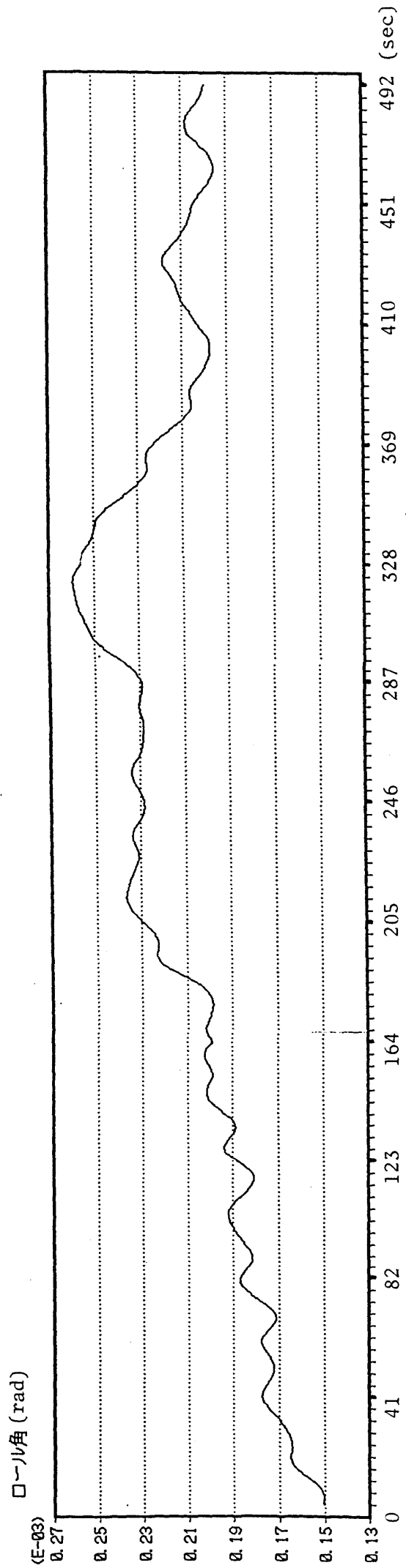


図 2.4 (その1) 衛星姿勢の時間変化の例 (ランドサット4号)

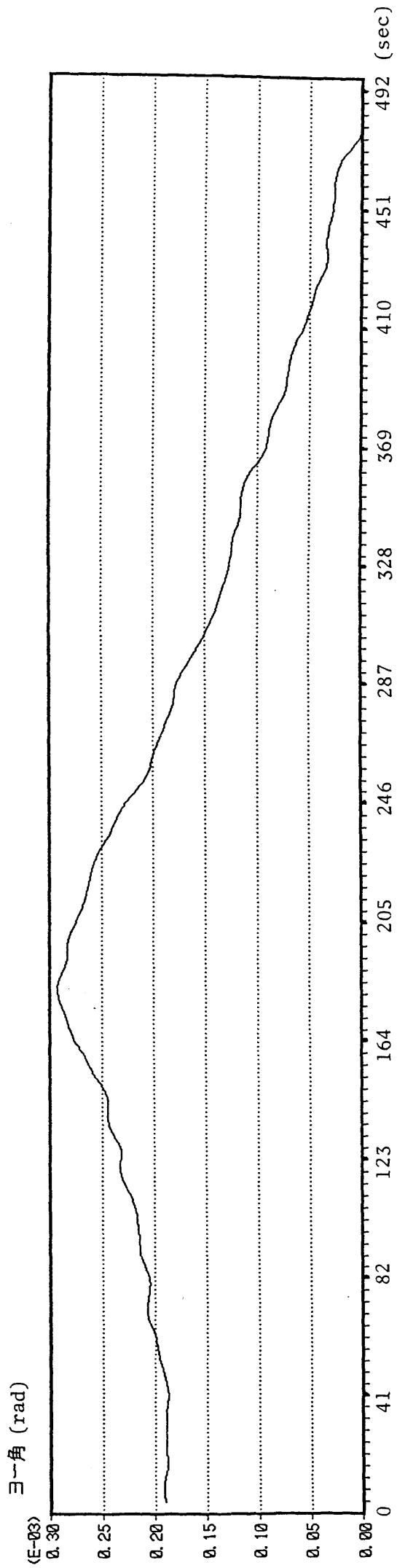
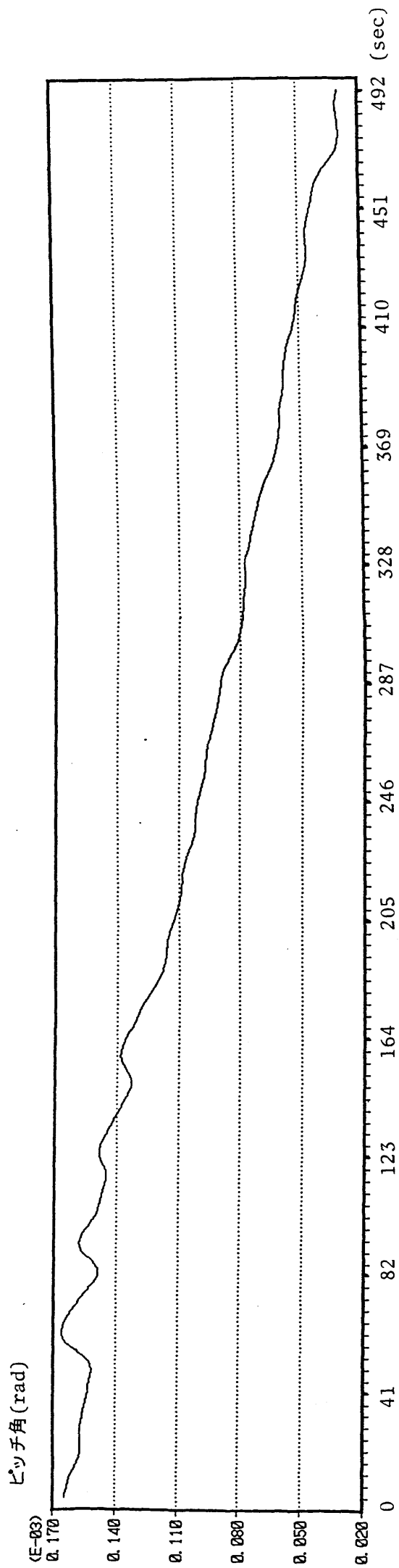


図 2.4 (その2)

表 2.2 時間 $t$ の多項式による位置・姿勢の近似誤差(平均二乗誤差)  
(軌道長)

| 緯度( $10^{-5}$ rad) | 41秒間 | 82秒間 | 123秒間 | 164秒間 | 246秒間 | 492秒間 |
|--------------------|------|------|-------|-------|-------|-------|
| 1次式                | 2.41 | 4.31 | 6.14  | 8.10  | 12.78 | 36.84 |
| 2次式                | 1.62 | 3.04 | 4.09  | 5.31  | 6.52  | 10.94 |
| 3次式                | 1.01 | 2.45 | 3.53  | 4.41  | 5.83  | 8.95  |

経度( $10^{-5}$ rad)

|     |      |      |       |       |       |        |
|-----|------|------|-------|-------|-------|--------|
| 1次式 | 2.65 | 9.31 | 18.83 | 38.03 | 85.36 | 325.16 |
| 2次式 | 0.70 | 1.39 | 1.98  | 2.73  | 6.62  | 49.11  |
| 3次式 | 0.42 | 1.05 | 1.50  | 1.86  | 2.41  | 6.31   |

高度(m)

|     |      |      |       |       |       |        |
|-----|------|------|-------|-------|-------|--------|
| 1次式 | 1.46 | 5.06 | 10.70 | 18.78 | 42.64 | 178.34 |
| 2次式 | 0.28 | 0.55 | 0.94  | 1.54  | 3.87  | 28.19  |
| 3次式 | 0.19 | 0.39 | 0.54  | 0.67  | 0.77  | 2.45   |

傾角( $10^{-5}$ rad)

|     |      |      |      |      |      |      |
|-----|------|------|------|------|------|------|
| 1次式 | 0.43 | 0.61 | 0.80 | 0.85 | 1.03 | 2.19 |
| 2次式 | 0.36 | 0.50 | 0.68 | 0.74 | 1.00 | 1.20 |
| 3次式 | 0.30 | 0.43 | 0.56 | 0.57 | 0.84 | 1.15 |

ピッチ角( $10^{-5}$ rad)

|     |      |      |      |      |      |      |
|-----|------|------|------|------|------|------|
| 1次式 | 0.21 | 0.27 | 0.29 | 0.32 | 0.43 | 0.52 |
| 2次式 | 0.14 | 0.25 | 0.28 | 0.29 | 0.31 | 0.50 |
| 3次式 | 0.13 | 0.21 | 0.27 | 0.26 | 0.30 | 0.41 |

ヨー角( $10^{-5}$ rad)

|     |      |      |      |      |      |      |
|-----|------|------|------|------|------|------|
| 1次式 | 0.32 | 0.45 | 0.87 | 0.70 | 1.25 | 5.18 |
| 2次式 | 0.25 | 0.35 | 0.42 | 0.48 | 1.04 | 2.57 |
| 3次式 | 0.22 | 0.32 | 0.41 | 0.40 | 0.58 | 1.94 |

|         |          |          |          |           |           |           |
|---------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|
| (軌道長)   | (287 km) | (574 km) | (861 km) | (1148 km) | (1722 km) | (3444 km) |
| (データ点数) | (10点)    | (20点)    | (30点)    | (40点)     | (60点)     | (120点)    |
| (ヶ-ス数)  | (12ヶ-ス)  | (6ヶ-ス)   | (4ヶ-ス)   | (3ヶ-ス)    | (2ヶ-ス)    | (1ヶ-ス)    |

精度を示したものである。衛星位置の測定精度は現時点で140m程度<sup>(1)</sup>

(2)  
(経緯度で $15 \sim 20 \times 10^{-5} \text{rad}$ )、姿勢で4秒程度(約 $2 \times 10^{-5} \text{rad}$ , 1σ値)であると考えられる

ることから、表2.2の平均二乗誤差が、これらの測定誤差より小さくなる

範囲を多項式近似の可能な範囲とすると、衛星位置は1次式で

82秒まで、2次式で246秒まで、3次式で492秒まで近似可能である。

また、衛星姿勢は1次式で246秒、2次、3次式では492秒まで近似可能である。

実際の画像処理にあたってはデータ量や価格の制約から数シーンごとが最大の処理単位であると考えられる。これは最も画像の大きなMAPSATでも高々400~500km(57~71秒間)である。

本研究ではLANDSAT1~3号及び4~5号の結果を勘案し、衛星位置については1次式、姿勢については3次式を採用する。

(衛星位置：軌道の曲率を考慮する場合)

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \alpha_0 + \alpha_1 \cdot t \\ \beta &= \beta_0 + \beta_1 \cdot t \\ H &= H_0 + H_1 \cdot t \end{aligned} \right\} (2-1)$$

$\alpha$  = 経度  
 $\beta$  = 緯度  
 $H$  = 衛星高度  
 $t$  = 時刻 (ライン番号)

$(\alpha_0, \alpha_1, \beta_0, \beta_1, H_0, H_1)$   
はパラメータ

したがって

$$\left. \begin{aligned} X &= (R+H) \cos \beta \cdot \cos \alpha \\ Y &= (R+H) \cos \beta \cdot \sin \alpha \\ Z &= (R+H) \sin \beta \end{aligned} \right\} (2-2)$$

$X$  = 衛星位置  $X$  座標

$Y$  = "  $Y$  "

$Z$  = "  $Z$  "

(図2-5 参照)

$R$  = 地球半径

(衛星位置：軌道の曲率を無視する場合)

$$\left. \begin{aligned} X &= X_0 + X_1 t \\ Y &= Y_0 + Y_1 t \\ Z &= Z_0 + Z_1 t \end{aligned} \right\} (2-3)$$

$X$  = 衛星位置  $X$  座標

$Y$  = "  $Y$  "

$Z$  = "  $Z$  "

(但し、飛行方向を  $X$  軸方向にとる。)



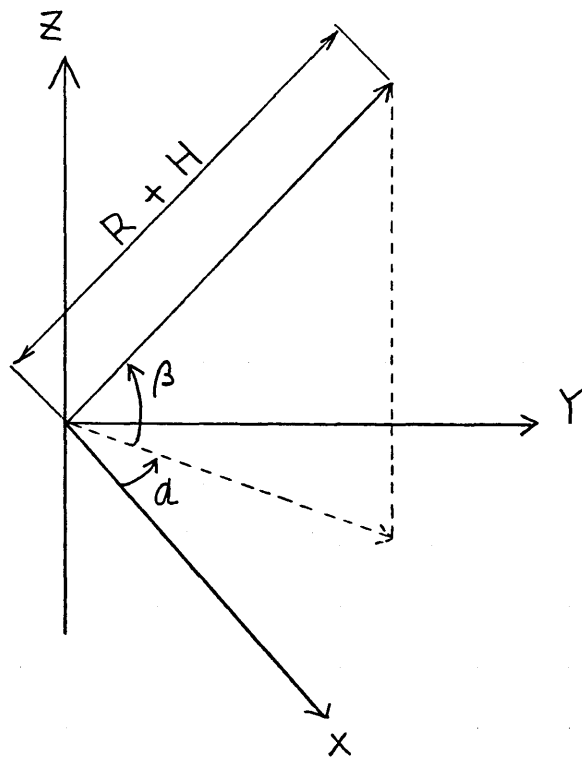


圖 2-5 XYZ座標系と経緯度座標系

(衛星姿勢)

$$\left. \begin{aligned} \omega &= \omega_0 + \omega_1 \cdot t + \omega_2 \cdot t^2 + \omega_3 \cdot t^3 \\ \varphi &= \varphi_0 + \varphi_1 \cdot t + \varphi_2 \cdot t^2 + \varphi_3 \cdot t^3 \\ \kappa &= \kappa_0 + \kappa_1 \cdot t + \kappa_2 \cdot t^2 + \kappa_3 \cdot t^3 \end{aligned} \right\} (2-4)$$

$\omega$  = 衛星三軸姿勢 (ロール角)  
 $\varphi$  = " (ピッチ角)  
 $\kappa$  = " (ヨー角)  
( $\omega_{0,3}, \varphi_{0,3}, \kappa_{0,3}$  はパラメータ)

走査長が 180 km 程度までのケースを考えると実際に地形の三次元測定を精度よく行う上で軌道の曲率の大きさは無視できない。

しかしながら、曲率を考慮した三次元測定手法と考慮していない手法は手法そのものとして同じものであることから、シミュレーション計算を単純化するために曲率を考慮しないケースにしたがってシミュレーションを行う。

## 2.1.4 地球の自転 および曲率

### 1) 地球の自転

リニアアレイセンサを搭載した衛星が地表を走査する間に、地表が地球の自転によって西から東へ移動し、画像にはスキュー歪と呼ばれる幾何歪が加わる。(図2-6 参照)

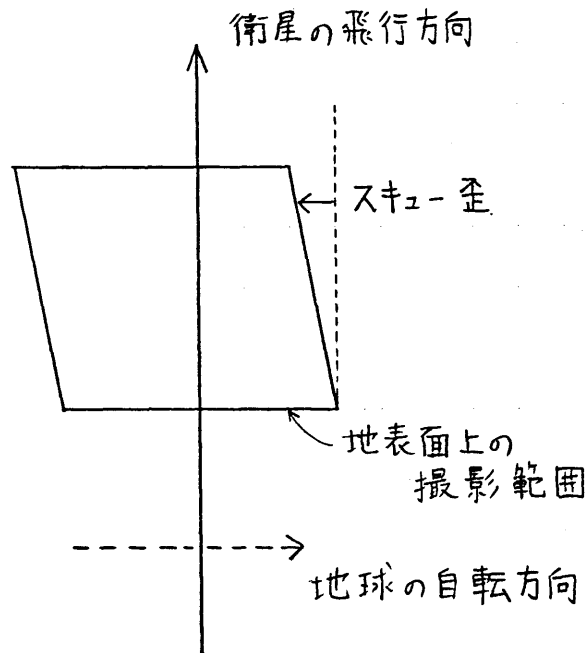


図 2-6 地球の自転によるスキュー歪

地表に固定された座標系からは 衛星に 東から西へ 等角速度の速度ベクトルが付け加えられたように見える。すなわち、前節の衛星位置を示す緯度の時間変化式(2.4)において

$$\beta = \beta_0 + (\beta_1 + \beta_{skew})t$$

$\beta_{skew} =$  スキューによる見かけ上の角速度

となる。

したがって、スキューを考慮しても 衛星位置の緯度が時間の1次式で表わされることに変わりはない。

また、走査長が短いケースにおいても、その区間における スキューは Y方向に見かけ上 等速度ベクトルが付加されることにより表わされるため、同様に スキューを考慮しても、衛星位置  $(X, Y, Z)$  が時間の1次式で表わされることに変わりはない。

したがって 自転の影響は、この場合 明示的に考慮する必要はない。

## 2) 地球の曲率

走査長が 10km を越えると 地球の曲率を考慮しないことにより

生ずる鉛直方向の誤差は 5~10m になり、リニアレイセンサの解像力から見て無視できない大きさとなる。したがって シミュレーション画像により 実際の衛星から得られるであろう画像を忠実に再現するためには地球の曲率は無視できない。しかし、曲率を考慮することによって地表が弓なりにカーブしても、地形の三次元測定の精度には全く影響がないので シミュレーション計算を単純化するため 本研究では地球の曲率はないものとする。

## 2.1.5 地形および地表輝度データ

リニアアレイセンサにより走査される地表面のモデルには地形のデータと地表面の輝度のデータよりなっている。

地形のデータについては、北アルプス周辺に約 $58 \times 46 \text{ km}$ のスタディエリアを設定し、国土数値情報による標高データ(約 $250 \text{ m}$ メッシュ)を約 $60 \text{ m}$ メッシュに内挿後、さらにセンサの地上解像度 $10 \text{ m}$ に合わせて $1/6$ に縮小し、数値地形モデル(D.T.M)を得た。(表2-3参照)

地表輝度データについては、上述のスタディエリアのLANDSAT画像(5バンド)を幾何補正ののち、 $60 \text{ m}$ メッシュに内挿し、 $1/6$ に縮小の後、数値地形モデル(D.T.M)に重ね合わせて用いた。LANDSAT画像を用いた理由は、それが容易に入射可能な画像の中で画質などが衛星からのリニアアレイセンサ画像に比較的近いと予想され、しかもほぼ正射画像であり、数値地形モデルへの重ね合わせが容易であったためである。

また、リニアアレイセンサによる地形の測定に用いられる波長は可視光域( $\lambda = 0.5 \sim 0.8 \mu\text{m}$ )に属するため、それに近い波長域( $\lambda = 0.6 \sim$

0.7 $\mu$ m) をもつ 5バンド (MSS 5) をえらんだ。

表 2.3 シミュレーションに用いた地形データと地表輝度データ

| 項 目                | 地形データ                        | 地表輝度データ                                |
|--------------------|------------------------------|----------------------------------------|
| スタディエリア            | 北アルプス周辺(南北58km, 東西47km)      | 同 左                                    |
| 対応する地形図<br>(5万分の1) | 立山, 高山, 上高地,<br>大町, 信濃池田, 松本 | 同 左                                    |
| 原 データ              | 国土数値情報<br>(約250mメッシュ)        | LANDSAT MSS画像<br>(5バンド, 高山, 1975.9.11) |
| データ内挿間隔            | 約60m間隔に内挿後<br>スケールを1/6に縮小    | 約60m間隔に内挿後<br>スケールを1/6に縮小              |
| 内挿方法               | 共三次式                         | 最近隣内挿                                  |

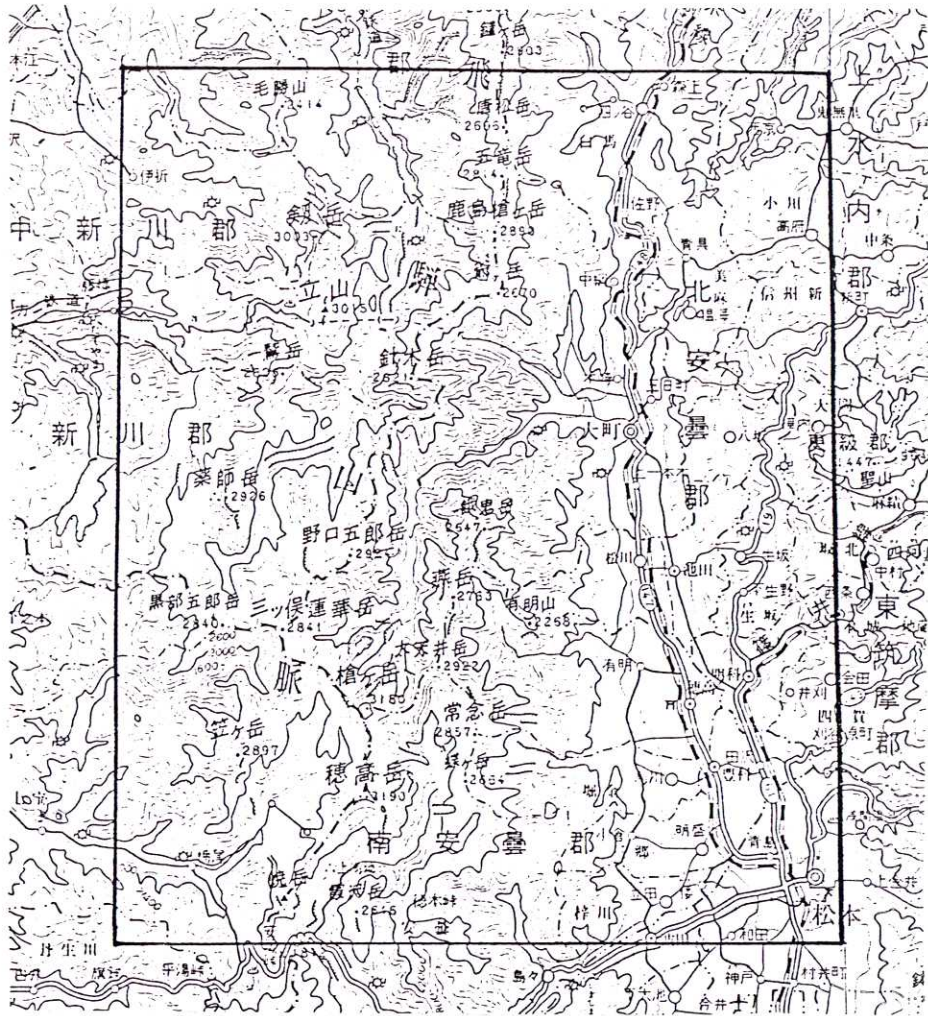


図 2.7 スタティエリア地形図 (全域)  
 (50万分の1, 中部・近畿; 58 km x 47 km)



写真 2.1 スタティエリア MSS 5 画像 (一部)



なお、地表輝度は太陽光線の入射方向及び反射方向(撮影方向)により異なるため、同一地点の画像でも撮像方向が異なればその輝度は等しくならない。しかし、その変化の大きさは地形や植生など地表の状況に大きく依存し、シミュレートすることが困難である。また、地上解像力(10m)や B/H比(0.5と1.0)を考えると大縮尺の航空写真等と比べ輝度の変化はそれほど大きくないと予想されることからシミュレーションでは考慮しない。

## 2.1.6 大気の影響

### 1) 屈折

センサに入射する光束は大気の密度差によって屈折している。一般にステレオ画像による三次元測定を行う場合には、大気の屈折の補正が必要となる。図2-8は光線の屈折の概念図である。

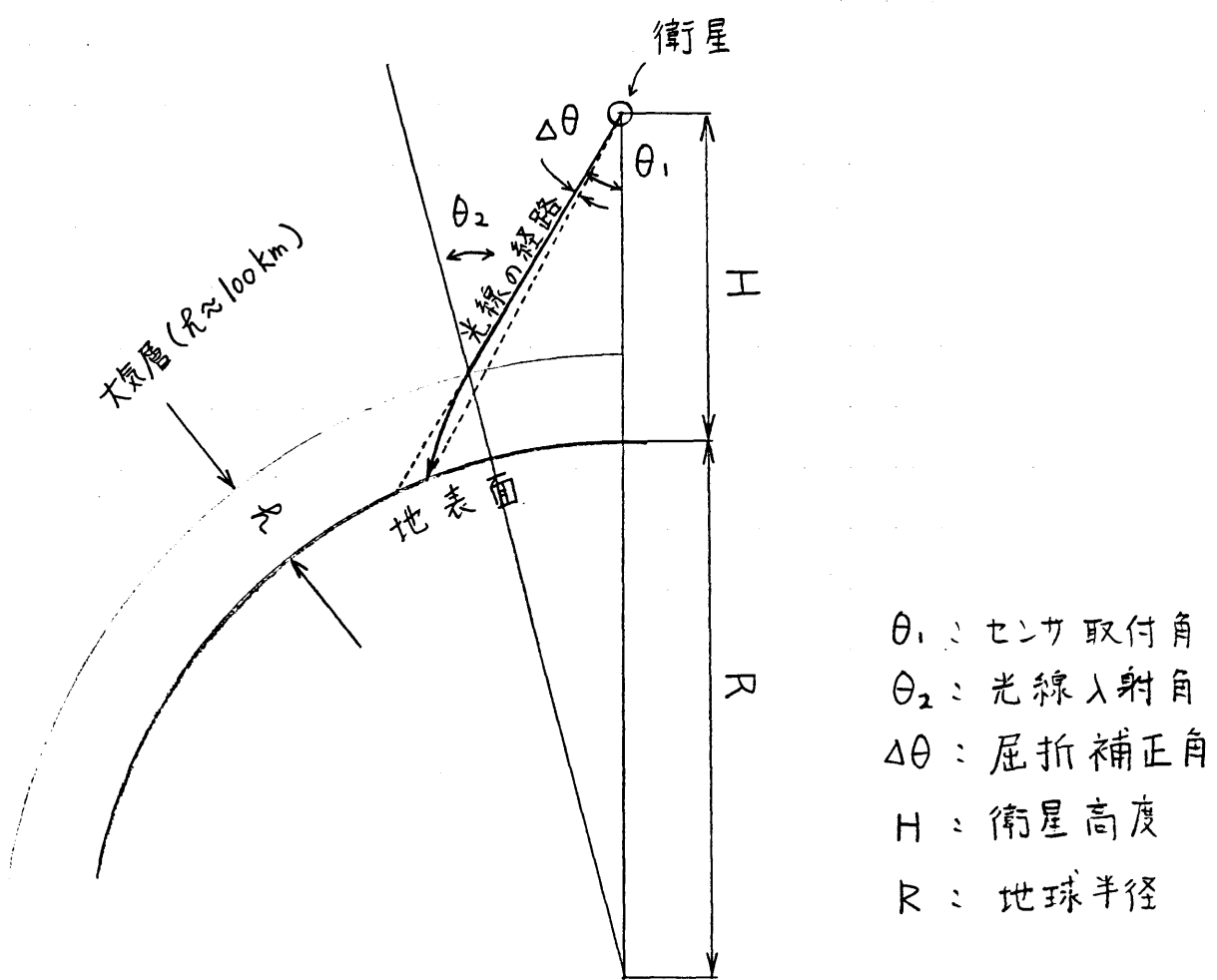


図2-8 大気による光線の屈折

$\theta_1$ は センサ取付角,  $\theta_2$ は 光線が 大気層と 宇宙空間の境界に入射する角度,  $\Delta\theta$ は 大気屈折の補正量,  $H$ は 衛星高度,  $h$ は 大気層の厚さ,  $R$ は 地球の半径である。

$H = 600 \text{ km}$ ,  $\theta_1 = 45^\circ$ , 標準大気組成 ( $50^\circ \text{N}$ ) を仮定して  $\Delta\theta$  を Saatsamoinen の方法<sup>(9)</sup> により求めると  $5 \sim 6 \times 10^{-6} \text{ rad}$  となる。

これは 地上で 約  $6 \text{ m}$  にあたり、予想される リニアレイセensaの地上解像力  $10 \text{ m}$  に比べ 無視できない。しかしながら、第3章で述べるように 屈折による歪は 画像取得後、容易に補正することができるので、シミュレーションでは 屈折を考慮しない。

## 2) 大気による地表からの反射エネルギーの減衰, 吸収等

地表からの反射エネルギーは センサに入射する前に 大気中の 水蒸気等により 減衰や吸収等を受ける。こういった減衰等は 画質の劣化を通じて 三次元測定の精度に影響を与える。しかし、この影響は、画質低下がそれほど大きくない場合であれば 画像の前処理等により ある程度 少なくすることが可能。

さらに、こうした 大気による影響は その時々の大気の状態に大きく依存している<sup>(8)</sup>ことから シミュレートすることが困難である。よって本研究では、シミュレーションにおいて 大気による減衰、吸収等は 考慮しないこととした。

## 2.2 ステレオ画像の作成シミュレーション

### 2.2.1 ステレオ画像の作成方法

ステレオ画像の作成方法の流れを図2-9に示す。

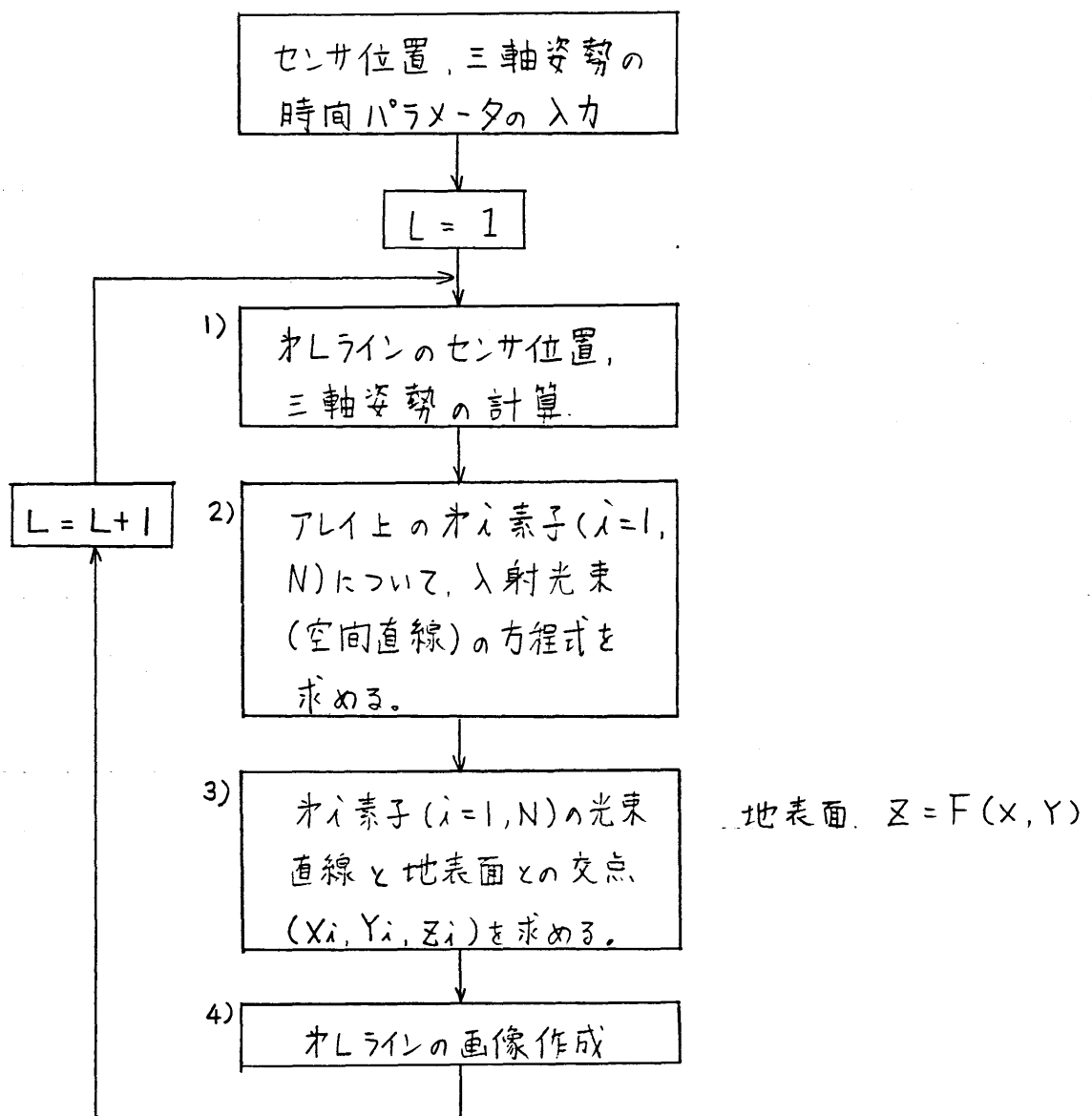


図2-9 ステレオ画像作成のフロー

1) オールラインのセンサ位置, 三軸姿勢の計算

式(2.1) ~ (2.5)に基づき, オールラインにおけるセンサ(衛星)位置, および三軸姿勢を求める。

2) 入射光束(空間直線)の方程式の計算

センサ位置, および三軸姿勢に基づいて アレイ上の各素子に入光する光束の空間直線方程式を求める。

3) アレイ上のオ $i$ 素子 ( $i=1 \sim N$   $N$ :アレイ上の素子数)の光束直線と地表面との交点  $(X_i, Y_i, Z_i)$ の計算

各素子について地表面 ( $Z=f(X, Y)$  数値地形モデル) と光束直線との交点をくり返し収束計算により求める。交点が数値地形モデルの格子上にこない場合、標高は一次式で内挿して与える。

4) オールライン画像の作成

各交点  $(X_i, Y_i, Z_i)$  ( $i=1 \sim N$ ) に対応する地表輝度  $R(X_i, Y_i)$  を最近隣内挿により求め、その値をそのままオ $i$ 素子が検知した地表輝度の値とする。(大気による減衰や撮影方向の変化による輝度の変

化等は考慮しないため。)

## 2.2.2 テストスタディ

高度 ( $H$ ) = 600 km,  $B/H$  比 = 1.0 により作成したステレオ画像の例を示す。

図2.10はテストスタディ地区の地形図, 写真2.2は同地区の LANDSAT 画像 MSS 5, 写真2.3は数値地形モデル, 写真2.4(a), (b), 2.5(a), (b) はそれぞれ前後方式, 左右方式のリニアアレイセンサーによるステレオ画像である。



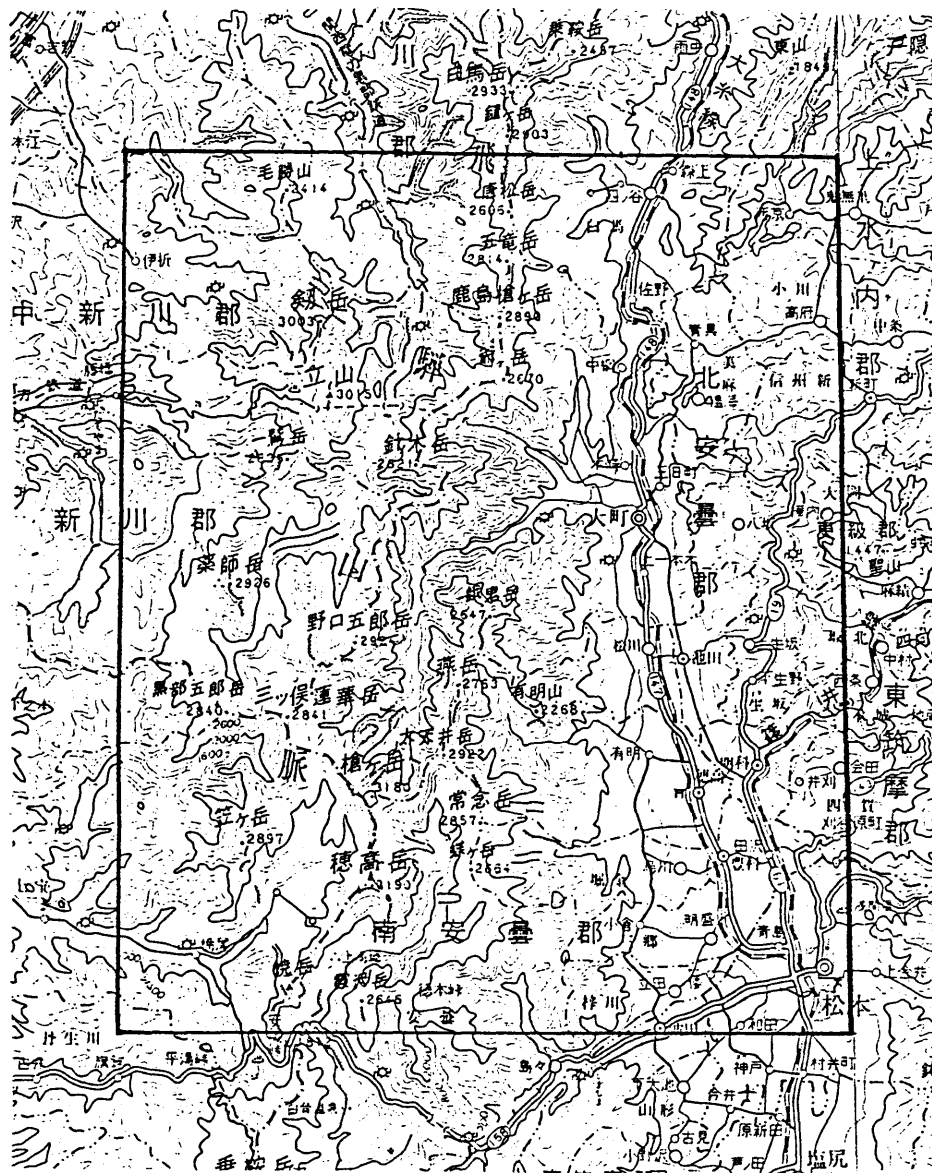


図 2-10 テストステイ地区地形図 (全域)  
 (50万分の1: 中部・近畿, 南北 58km, 東西 47km)  
 (図 2-7 再掲)

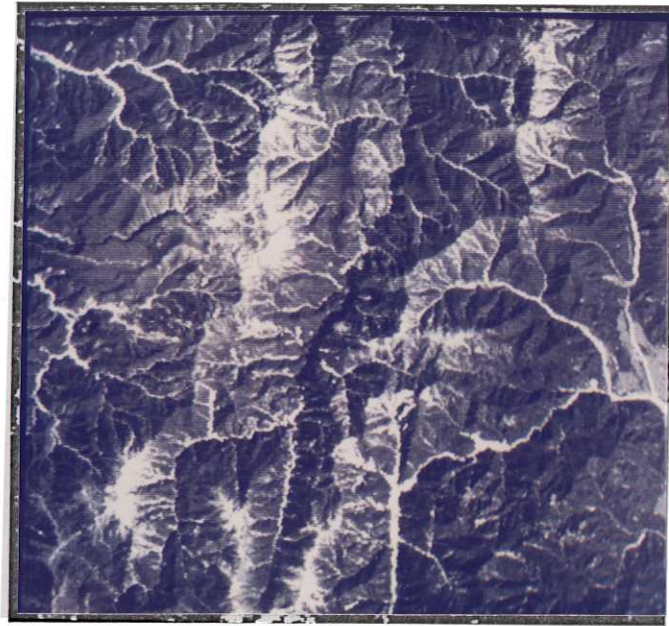
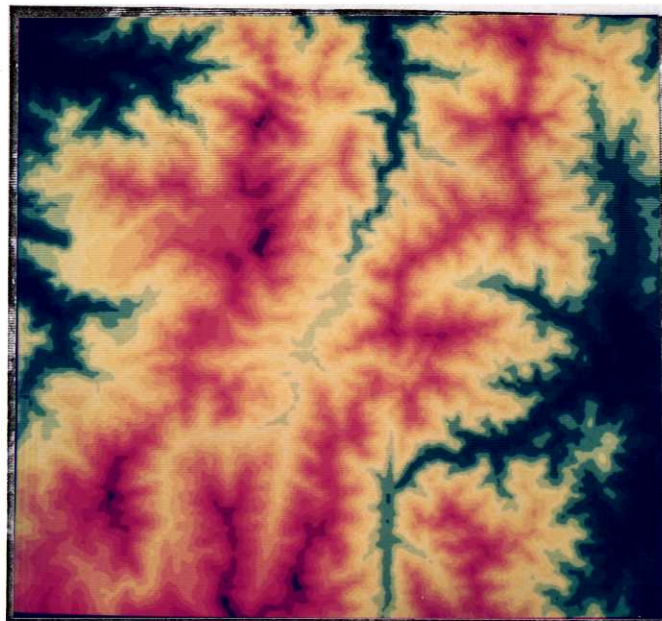


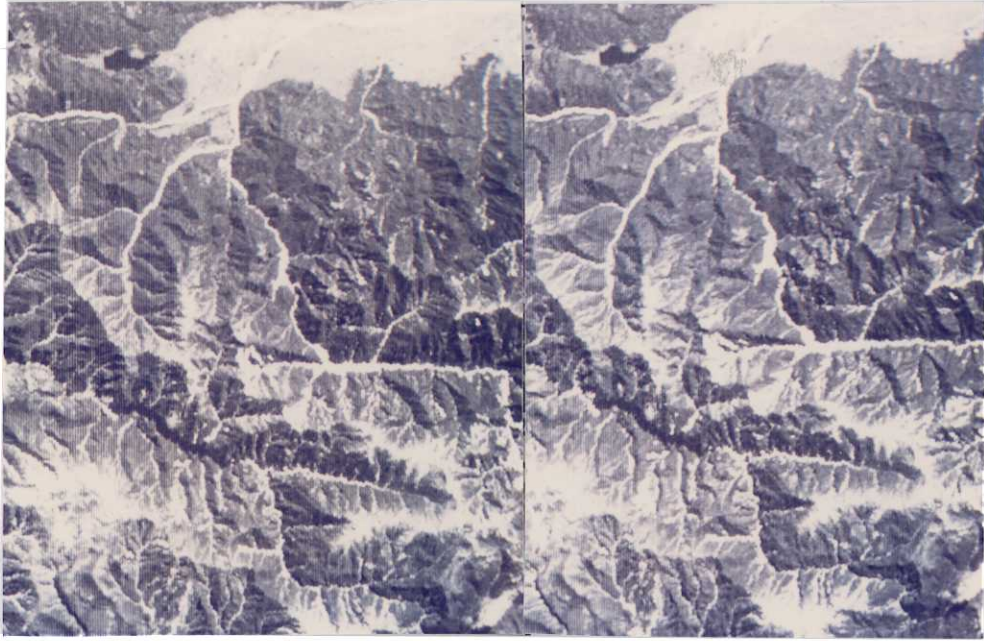
写真 2.2 テストスタディ地区 ランドサット画像 MSS5  
(一部)



(等高線間隔)  
25m

写真 2.3 テストスタディ地区 数値地形モデル (一部)  
(原モデルを 1/6 に縮小したもの, 表 2.3 参照)

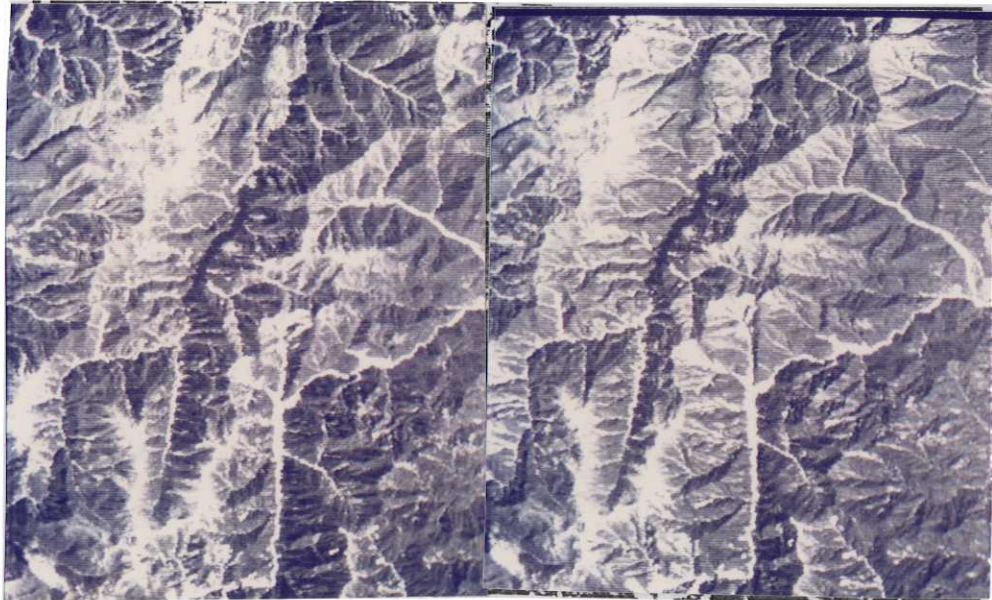




a) 前視画像

b) 後視画像

写真 2.4 シミュレーションステレオ画像 (一部)  
(前後方式,  $B/H = 1.0$ )



a) 左視画像)

b) 右視画像

写真 2.5 シミュレーションステレオ画像 (一部)  
(左右方式,  $B/H = 1.0$ )

### 3章 リニアアレイセンサ画像の幾何補正

### 3.1 はじめに

ステレオ画像を用いて地形の三次元測定を精度よく行うためには、ステレオ画像が得られた時のセンサと対象地形の空間的位置関係を、精確に再現する必要がある。そのためには画像中に含まれる様々な幾何学的歪（大気による屈折，光学系の歪，センサの位置・姿勢による歪等）をとり除くことが必要である。

画像の幾何学的歪は内部歪と外部歪に分けられる。内部歪はレンズ歪，アレイ素子の配列歪などセンサに起因する歪であり、外部歪とは、センサの位置，姿勢による歪や光束の屈折による歪などセンサ外部に起因する歪である。

内部歪と外部歪の一部（光束の屈折による歪）はセンサの室内検定結果等をもとにして画像座標を変換することにより補正できる。（3.2節）

外部歪は内部歪等の補正後外部標定を行うことによりセンサ投影中心位置，および三軸姿勢を時間あるいはライン番号の関数として求めることにより補正できる。（3.3節）

本章では これらの歪の補正方法について述べる。

## 3.2 リニアライゼンサの幾何学.

### 3.2.1 座標系

リニアライゼンサの幾何補正に必要な座標系を以下に示す。

#### 1) 測地座標系 $(E, N, H)$ と 平面直角座標系 $(X, Y, Z)$

測地座標系と平面直角座標系の関係を図3-1に示す。  $E, N$  は座標原点より地球曲面に沿った距離、  $H$  は法線方向の距離である。

#### ライゼンサの外部

標定に利用される基準点の座標や、センサにより測定される地形の三次元座標  $(X, Y, Z)$  は直角平面座標系によっている。

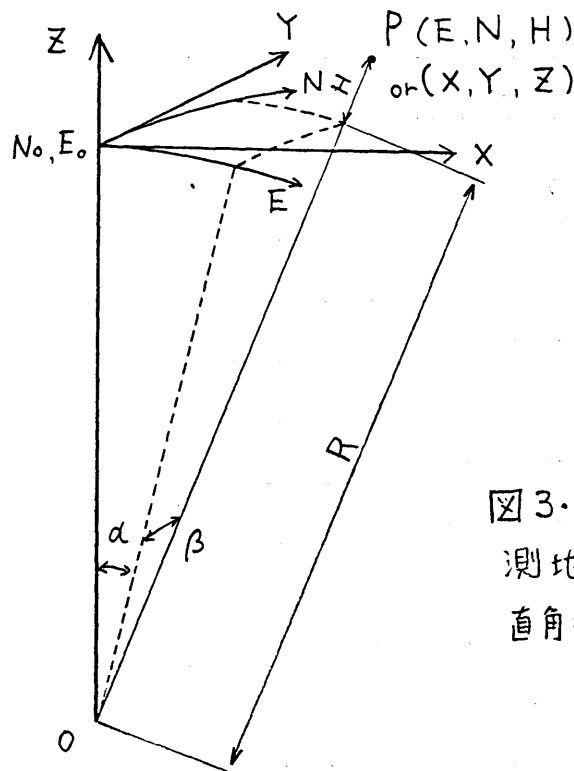


図3.1

測地座標系  $(E, N, H)$  と  
直角平面座標系  $(X, Y, Z)$

一方 地図等に利用されている座標系は測地座標系である。そのため、地図などより測定される基準点の座標を直角平面座標系へ、また

リニアアレイセンサにより測定された地形の座標値を、測地座標系へ変換する必要がある。

測地座標系  $(E, N, H)$  と 直角平面座標系  $(X, Y, Z)$  の座標変換式は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} X &= (R+H) \cos \beta \cdot \sin \alpha \\ Y &= (R+H) \sin \beta \\ Z &= (R+H) \cos \beta \cdot \cos \alpha - R \end{aligned} \quad \left. \begin{aligned} & \\ & \\ & \end{aligned} \right\} (3-1)$$
$$\begin{aligned} \therefore \alpha &= \frac{E - E_0}{R} \\ \beta &= \frac{N - N_0}{R} \end{aligned}$$

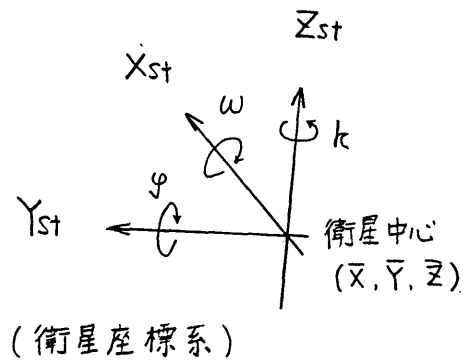
$$\begin{aligned} E &= R \cdot \alpha + E_0 \\ N &= R \cdot \beta + N_0 \\ H &= \frac{R+Z}{\cos \alpha \cdot \cos \beta} - R \end{aligned} \quad \left. \begin{aligned} & \\ & \\ & \end{aligned} \right\} (3-2)$$
$$\begin{aligned} \therefore \alpha &= \tan^{-1} \left( \frac{X}{R+Z} \right) \\ \beta &= \tan^{-1} \left( \frac{Y \cos \alpha}{R+Z} \right) \end{aligned}$$



## 2) 衛星座標系 $(X_{st}, Y_{st}, Z_{st})$

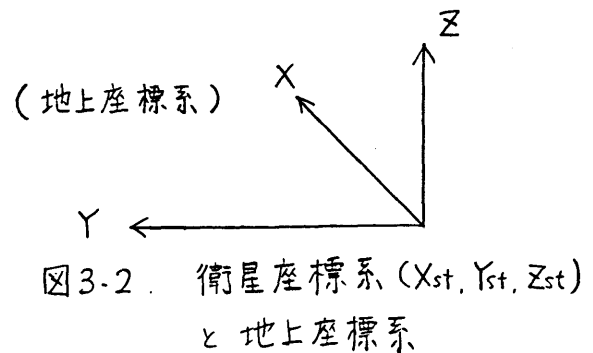
衛星座標系は原点を衛星上におき、座標軸を衛星に<sup>\*</sup>固定させた座標系である。衛星の三軸姿勢  $(\omega, \varphi, \kappa)$  は、地上座標系に対して衛星座標系の三軸の回転角を測定

したものである。衛星座標系と地上座標系の関係を図3-2に示す。



衛星座標系  $(X_{st}, Y_{st}, Z_{st})$  と  
直角平面座標系  $(X, Y, Z)$  の関係

は次式で与えられる。



$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X_{st} \\ Y_{st} \\ Z_{st} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \bar{X} \\ \bar{Y} \\ \bar{Z} \end{pmatrix} \quad (3-3)$$

\* 一般に衛星の進行方向に  $X_{st}$  軸を、天頂方向に  $Z_{st}$  軸を直角方向に  $Y_{st}$  軸をとる。

$$\begin{pmatrix} X_{st} \\ Y_{st} \\ Z_{st} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} X - \bar{X} \\ Y - \bar{Y} \\ Z - \bar{Z} \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} a_{11} & a_{21} & a_{31} \\ a_{12} & a_{22} & a_{32} \\ a_{13} & a_{23} & a_{33} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X - \bar{X} \\ Y - \bar{Y} \\ Z - \bar{Z} \end{pmatrix} \quad (3-4)$$

$\begin{pmatrix} \bar{X} \\ \bar{Y} \\ \bar{Z} \end{pmatrix}$  : 直角平面座標系に於る 衛星位置

$w$  : 衛星の ロール角

$\varphi$  : " ピッチ角

$k$  : " ヨー角

$$\{a_{ij}\} = R_{w,k,\varphi} = R_w \cdot R_k \cdot R_\varphi$$

$R_w, R_\varphi, R_k$  は ロール角 (X軸回り), ピッチ角 (Y軸回り), ヨー角 (Z軸回り) の 回転行列である。

$R_w, R_\varphi, R_k, R_{w,k,\varphi}$  は 式 (3-5), (3-6), (3-7), (3-8) で表わされる。

$$R_w = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos w & -\sin w \\ 0 & \sin w & \cos w \end{pmatrix} \quad (3-5)$$

$$R_y = \begin{pmatrix} \cos y & 0 & \sin y \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin y & 0 & \cos y \end{pmatrix} \quad (3-6)$$

$$R_k = \begin{pmatrix} \cos k & -\sin k & 0 \\ \sin k & \cos k & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3-7)$$

$$R_{w,k,y} = R_w \cdot R_k \cdot R_y = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix}$$

$$a_{11} = \cos k \cdot \cos y$$

$$a_{21} = \sin k \cdot \cos y \cdot \cos w + \sin w \cdot \sin y$$

$$a_{31} = \sin w \cdot \sin k \cdot \cos y - \sin y \cdot \cos w$$

$$a_{12} = -\sin k$$

$$a_{22} = \cos w \cdot \cos k$$

$$a_{32} = \cos k \cdot \sin w$$

$$a_{13} = \cos k \cdot \sin y$$

$$a_{23} = \cos w \cdot \sin k \cdot \sin y - \sin w \cdot \cos y$$

$$a_{33} = \sin w \cdot \sin k \cdot \sin y + \cos w \cdot \cos y$$

(3-8)

3) センサ座標系  $(x, y, z)$

センサ座標系は センサ投影中心に  
原点をとり、アレイを  $yz$  平面に含む  
直交座標系である。(図3-3)

衛星座標系に対する センサの取付角を  
三軸まわりの回転角  $\bar{w}, \bar{y}, \bar{k}$  で表わすと、

センサ座標系は 衛星座標系に対して、

$Y_{st}$  軸まわりに  $\bar{y}$ ,  $Z_{st}$  軸まわりに  $\bar{k}$ ,

$X_{st}$  軸まわりに  $\bar{w}$  回転している。

センサ座標系  $(x, y, z)$  と 衛星座標系  $(X_{st}, Y_{st}, Z_{st})$  との関係は

次式で 与えられる。

$$\begin{pmatrix} X_{st} \\ Y_{st} \\ Z_{st} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{a}_{11} & \bar{a}_{12} & \bar{a}_{13} \\ \bar{a}_{21} & \bar{a}_{22} & \bar{a}_{23} \\ \bar{a}_{31} & \bar{a}_{32} & \bar{a}_{33} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} X_{st} \\ Y_{st} \\ Z_{st} \end{pmatrix} \quad (3-9)$$

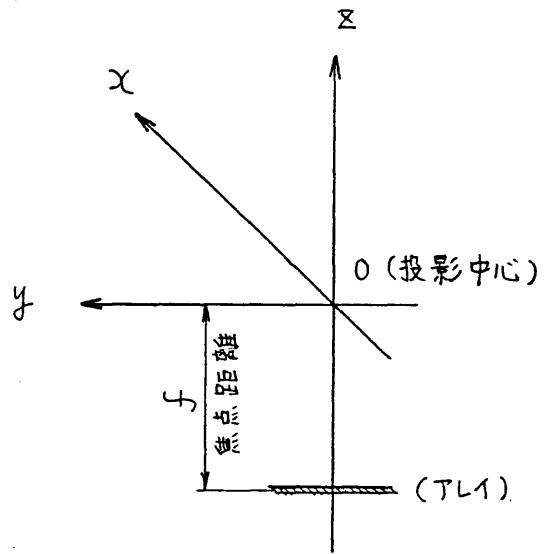


図3-3 センサ座標系

$$\begin{aligned}
\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} \bar{a}_{11} & \bar{a}_{12} & \bar{a}_{13} \\ \bar{a}_{21} & \bar{a}_{22} & \bar{a}_{23} \\ \bar{a}_{31} & \bar{a}_{32} & \bar{a}_{33} \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} X_{st} - \bar{X}_{st} \\ Y_{st} - \bar{Y}_{st} \\ Z_{st} - \bar{Z}_{st} \end{pmatrix} \\
&= \begin{pmatrix} \bar{a}_{11} & \bar{a}_{21} & \bar{a}_{31} \\ \bar{a}_{12} & \bar{a}_{22} & \bar{a}_{32} \\ \bar{a}_{13} & \bar{a}_{23} & \bar{a}_{33} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X_{st} - \bar{X}_{st} \\ Y_{st} - \bar{Y}_{st} \\ Z_{st} - \bar{Z}_{st} \end{pmatrix} \quad (3-10)
\end{aligned}$$

$(\bar{X}_{st}, \bar{Y}_{st}, \bar{Z}_{st})$  は 衛星座標系によるセンサ投影中心の座標

$$\{\bar{a}_{ij}\} = R_{\bar{w}, \bar{k}, \bar{f}} = R_{\bar{w}} \cdot R_{\bar{k}} \cdot R_{\bar{f}}$$

$\{R_{\bar{w}}, R_{\bar{f}}, R_{\bar{k}}\}$  の定義は 式 (3-8) による。

ここで  $\bar{X}_{st}, \bar{Y}_{st}, \bar{Z}_{st}$  は 高々数  $m$  の大きさであるため、衛星の高度等と比べ 十分小さい。そこで 外部標定においては 衛星座標の中心とセンサの投影中心が一致する、すなわち  $\bar{X}_{st} = \bar{Y}_{st} = \bar{Z}_{st} = 0$  とすることができる。

$$\text{故に} \quad \begin{pmatrix} X_{st} \\ Y_{st} \\ Z_{st} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{a}_{11} & \bar{a}_{12} & \bar{a}_{13} \\ \bar{a}_{21} & \bar{a}_{22} & \bar{a}_{23} \\ \bar{a}_{31} & \bar{a}_{32} & \bar{a}_{33} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (3-11)$$

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{a}_{11} & \bar{a}_{21} & \bar{a}_{31} \\ \bar{a}_{12} & \bar{a}_{22} & \bar{a}_{32} \\ \bar{a}_{13} & \bar{a}_{23} & \bar{a}_{33} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \bar{X}_{st} \\ \bar{Y}_{st} \\ \bar{Z}_{st} \end{pmatrix} \quad (3-12)$$

4) センサ座標系  $(x, y, z)$  と地上座標系  $(X, Y, Z)$  の間の座標変換式

センサ座標系  $(x, y, z)$  と地上の直角平面座標系  $(X, Y, Z)$  の関連は、

式(3.11)を式(3.3)に代入することにより次式で与えられる。

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \bar{a}_{11} & \bar{a}_{12} & \bar{a}_{13} \\ \bar{a}_{21} & \bar{a}_{22} & \bar{a}_{23} \\ \bar{a}_{31} & \bar{a}_{32} & \bar{a}_{33} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \bar{X} \\ \bar{Y} \\ \bar{Z} \end{pmatrix} \quad (3-13)$$

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{a}_{11} & \bar{a}_{21} & \bar{a}_{31} \\ \bar{a}_{12} & \bar{a}_{22} & \bar{a}_{32} \\ \bar{a}_{13} & \bar{a}_{23} & \bar{a}_{33} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_{11} & a_{21} & a_{31} \\ a_{12} & a_{22} & a_{32} \\ a_{13} & a_{23} & a_{33} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X - \bar{X} \\ Y - \bar{Y} \\ Z - \bar{Z} \end{pmatrix} \quad (3-14)$$

$(x, y, z)$ : センサ座標系

$(X, Y, Z)$ : 地上座標系

$(\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z})$ : 地上座標系によるセンサ中心位置の座標

ここで

$$\{b_{ij}\} = R_w \cdot R_k \cdot R_g \cdot R_w \cdot R_k \cdot R_g = \{a_{ij}\} \cdot \{\bar{a}_{ij}\} \text{ とおくと、}$$

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \bar{X} \\ \bar{Y} \\ \bar{Z} \end{pmatrix} \quad (3-15)$$

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{21} & b_{31} \\ b_{12} & b_{22} & b_{32} \\ b_{13} & b_{23} & b_{33} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X - \bar{X} \\ Y - \bar{Y} \\ Z - \bar{Z} \end{pmatrix} \quad (3-16)$$

また、センサ座標系  $(x, y, z)$  の直角平面座標系に対する回転角を

$w', g', k'$  とすると、

$$\{b_{ij}\} = R_{w \cdot k' \cdot \varphi'} = R_{w'} \cdot R_{k'} \cdot R_{\varphi'} \text{ とも表現できる。}$$

外部標定は 地上基準点等を用いて センサの地上座標系に対する位置, 三軸姿勢を求める操作であるので, 式(3-15), (3-16)が外部標定における座標変換の基本式となる。

### 3.2.2 共線条件

対象地点  $G$  が リニアレイセンサ画像の フォトライン, フォトピクセルに映っている時、センサ投影中心  $O$  と フォトレイ素子,  $P$  点の三点は同一光束(直線)上にある。異なる三点が 同一直線上にあるための条件(共線条件)を センサ座標系で導く。

#### 1) フォト素子の センサ座標

レイ上の素子の総数を  $N$ , 素子間隔を  $\Delta$ , センサの焦点距離を  $f$  とする。ここでは  $N$  を

奇数とし、レイ中央のフォト素子  $\frac{N-1}{2}$

素子で センサ座標系の  $Z$  軸

とレイが交わるとする。

素子番号は  $Y$  軸の方向に

増加するようにつける。

(図3-4 参照)

センサ座標系による

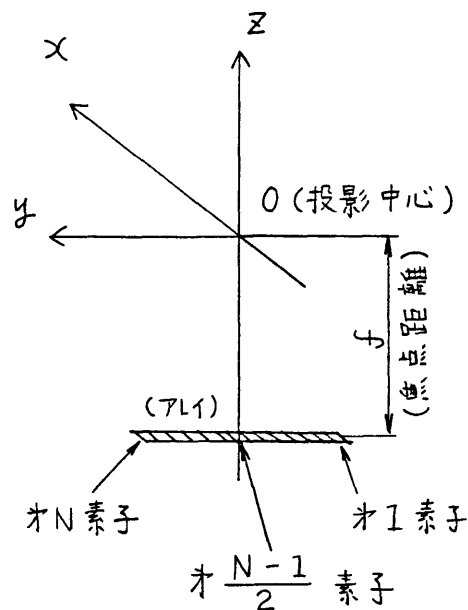


図3.4 レイの素子番号とセンサ座標系



素子 $i$ の座標  $(x_i, y_i, z_i)$  は次式で与えられる。

$$\begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta x_i \\ (i - NN) \cdot \delta + \Delta y_i \\ -f \end{pmatrix} \quad (3-17)$$

$$NN \stackrel{\text{def}}{=} \frac{N-1}{2}$$

$\Delta x_i$  : 素子 $i$ の $x$ 方向の内部歪補正量

$\Delta y_i$  : "  $y$ 方向の " "

$f$  : (補正済の) 焦点距離

$\delta$  : 素子間隔

2) 地上点  $G (X_G, Y_G, Z_G)$  のセンサ座標

次に 地上の点の座標  $(X_G, Y_G, Z_G)$  — 地上の直角平面座標系 —

をセンサ座標系で表わす。センサ座標系における点 $P$ の座標を

$(x_G, y_G, z_G)$  とする。  $(X_G, Y_G, Z_G)$  は式(3-16)を用いて

式(3-18)のように与えられる。  $\bar{X}(L), \bar{Y}(L), \bar{Z}(L), w(L), \varphi(L), k(L)$  は

$L$  ラインにおけるセンサ投影中心位置, 三軸姿勢(地上座標系)である。

$$\begin{pmatrix} x_G \\ y_G \\ z_G \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{21} & b_{31} \\ b_{12} & b_{22} & b_{32} \\ b_{13} & b_{23} & b_{33} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X_G - \bar{X}(L) \\ Y_G - \bar{Y}(L) \\ Z_G - \bar{Z}(L) \end{pmatrix} \quad (3-18)$$

$$\{ b_{ij} \} = R^{-1} w(L), k(L), \varphi(L)$$

$$\{b_{ij}\} = R_{g(L)}^t \cdot R_{k(L)}^t \cdot R_{w(L)}^t$$

$$(\equiv R_{w(L), k(L), g(L)}^t)$$

### 3) 共線条件

センサ座標系において、投影中心  $O(0, 0, 0)$ 、 $i$  素子  $(x_i, y_i, z_i)$ 、  
点  $G(x_G, y_G, z_G)$  が同一直線上にあるという条件(共線条件)は  
次式で表わされる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{x_G - x_i}{z_G - z_i} - \frac{x_i}{z_i} &= 0 \\ \frac{y_G - y_i}{z_G - z_i} - \frac{y_i}{z_i} &= 0 \end{aligned} \right\} (3-19)$$

式(3-17), (3-18)を式(3-19)へ代入すると、共線条件は以下のように書ける。

$$\frac{b_{11}(X_G - \bar{X}(L)) + b_{21}(Y_G - \bar{Y}(L)) + b_{31}(Z_G - \bar{Z}(L))}{b_{13}(Z_G - \bar{Z}(L)) + b_{23}(Y_G - \bar{Y}(L)) + b_{33}(Z_G - \bar{Z}(L))} + \frac{\Delta x_i}{f} = 0 \quad (3-20)$$

$$\frac{b_{12}(X_G - \bar{X}(L)) + b_{22}(Y_G - \bar{Y}(L)) + b_{32}(Z_G - \bar{Z}(L))}{b_{13}(Z_G - \bar{Z}(L)) + b_{23}(Y_G - \bar{Y}(L)) + b_{33}(Z_G - \bar{Z}(L))}$$

$$+ \frac{(i - NN)\delta + \Delta y_i}{f} = 0 \quad (3-21)$$

となる。

但L

$$b_{11} = \cos k(L) \cdot \cos \varphi(L)$$

$$b_{21} = \sin k(L) \cdot \cos \varphi(L) \cdot \cos w(L) + \sin w(L) \cdot \sin \varphi(L)$$

$$b_{31} = \sin w(L) \cdot \sin k(L) \cdot \cos \varphi(L) - \sin \varphi(L) \cdot \cos w(L)$$

$$b_{12} = -\sin k(L)$$

$$b_{22} = \cos w(L) \cdot \cos k(L)$$

$$b_{32} = \cos k(L) \cdot \sin w(L)$$

$$b_{13} = \cos k(L) \cdot \sin \varphi(L)$$

$$b_{23} = \cos w(L) \cdot \sin k(L) \cdot \sin \varphi(L) - \sin w(L) \cdot \cos \varphi(L)$$

$$b_{33} = \sin w(L) \cdot \sin k(L) \cdot \sin \varphi(L) + \cos w(L) \cdot \cos \varphi(L)$$

(3-22)

### 3.3 内部歪等の補正方法

#### 3.3.1 内部歪等の種類

(1) 焦点距離のずれ ;  $\Delta f$

焦点距離の公称値と撮影時の値が異なる。

(2) 主点位置のずれ ;  $(\Delta x_0, \Delta y_0)$

画像中心と主点とはわずかな位置ずれが存在する。

(3) レンズ歪

主に放射方向にわ曲収差が存在する。

(4) アレイ素子の配列歪

アレイ素子の配列にずれが存在する。

(5) アレイ軸と光軸の直交性のずれ

アレイ軸と光軸が直交していない。

(6) 収れん角のずれ

リニアアレイセンサの収れん角にずれが存在する。

## (7) 大気による屈折

光線が大気の密度差により屈折する。

### 3.3.2 補正方法

#### (1) 焦点距離の検定

室内のセンサ検定により  $\pm 1 \sim 5 \mu\text{m}$  ぐらいの精度で焦点距離を求めておく。検定は衛星がおかれる宇宙での状態と同じ環境条件で行われることが望ましい。

焦点距離を未知数として基準点により解析的に求めるには、

基準点が撮影高度の 10% ぐらいの起伏を有することが必要である。(1)

しかし、地表の起伏は撮影高度 (約 600 ~ 800 km) に比べ、

ほとんど平坦であるため、解析的に求めることはできない。

#### (2) アレイ素子のセンサ座標の変換

室内の測定により各々の素子の位置を、主点を原点とする座標系 (センサ座標系) で厳密に定める必要がある。素子番号  $i$  に

対応する 正確な センサ座標系を与える 変換テーブルを作成しておけば、このテーブルを参照することにより、アレイセンサ画像の 正確な センサ座標を 必要な度に 容易に 得ることが できる。この方法により、主点位置のずれ、アレイ素子の配列歪、アレイ軸と光軸の直交性のずれを 補正できる。

### (3) レンズ歪の検定

放射方向の レンズ歪曲収差は レンズ中心からの 距離、すなわち センサ座標の  $y$ 座標の関数である。あらかじめ 室内で 収差を測定しておき、 $y$ の値に対して 補正量を与える 変換テーブルを作成することにより、収差を 補正できる。

### (4) 収れん角の検定 (センサの衛星への取り付け角)

室内で 前視および 後視センサの 収れん角を 測定しておく。<sup>\*</sup>

### (5) 大気による 屈折の補正

光束は大気の密度差により、図3.5に示すように 屈折する。この光束を 直進したと想定することにより、生じる 位置ずれ  $\Delta r$  を求めて 補正する。

屈折接線角  $\Delta \alpha$  は 大気の組成・高度の関数である。<sup>(2)</sup>  
(H)

\* 3.4.2 節で述べるように 取り付け角は 外部測定時に 解析的に 求めることもできる。

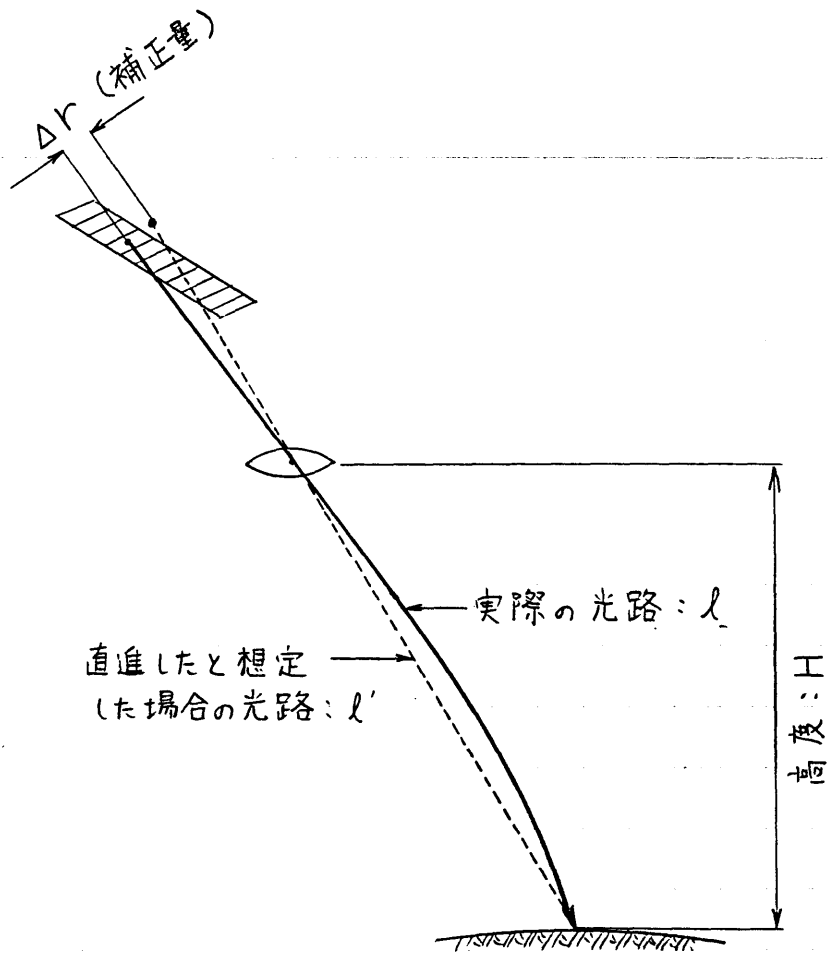


図3.5 大気による屈折の補正

### 3.4 リニアアレイセンサの外部標定方法

本節では、地上基準点と衛星の位置・姿勢の計測データを用いてセンサ投影中心位置、三軸姿勢を時間（あるいは画像のライン番号）として求める外部標定方法について述べる。

#### 3.4.1 地上基準点のみを利用する外部標定方法

リニアアレイセンサの投影中心位置  $(X, Y, Z)$  (=衛星位置) および三軸姿勢  $(w, \varphi, k)$  は、衛星軌道の区間長を限定すれば 画像のライン番号  $L$  の関数として、以下のように表わすことができる。(2.1.3節参照)

$$\begin{cases} X = X_0 + X_1 \cdot L \\ Y = Y_0 + Y_1 \cdot L \\ Z = Z_0 + Z_1 \cdot L \end{cases} \quad (3-23)$$

$$\begin{cases} w = w_0 + w_1 \cdot L + w_2 \cdot L^2 + w_3 \cdot L^3 \\ \varphi = \varphi_0 + \varphi_1 \cdot L + \varphi_2 \cdot L^2 + \varphi_3 \cdot L^3 \\ k = k_0 + k_1 \cdot L + k_2 \cdot L^2 + k_3 \cdot L^3 \end{cases} \quad (3-24)$$

$L$  : ライン番号  
 $(X, Y, Z)$  : センサ投影中心位置 (衛星位置)  
 $(w, \varphi, k)$  : センサ三軸姿勢 (ロール角, ピッチ角, ヨー角)  
 $X_0, X_1$  等 : パラメータ



以上をより一般的な形でまとめると センサ投影中心位置

$(X, Y, Z)$ , センサ三軸姿勢  $(w, \varphi, k)$  はそれぞれ ライン番号  $L$  と

いくつかのパラメータの関数として 下式のように表現される。

$$X = X(L; X_i) \quad i = 1 \cdot n_x$$

$$Y = Y(L; Y_i) \quad i = 1 \cdot n_y$$

$$Z = Z(L; Z_i) \quad i = 1 \cdot n_z$$

$$w = w(L; w_i) \quad i = 1 \cdot n_w$$

$$\varphi = \varphi(L; \varphi_i) \quad i = 1 \cdot n_\varphi$$

$$k = k(L; k_i) \quad i = 1 \cdot n_k$$

$L$  : ライン番号

$X_i, Y_i$  等 :  $i$  番目のパラメータ

$n_x, n_y$  等 : パラメータの数

リニアライセンサの外部標定とは 地上基準点等を用いて 以下のパラメータ  $(X_i, Y_i, Z_i, w_i, \varphi_i, k_i)$  を求めることである。

本節では、地上基準点だけを用いた外部標定方法について 以下に述べる。

ある地点  $G$  (地上座標  $(X_G, Y_G, Z_G)$ ) が画像上に点  $G'$  (センサ座標<sup>1)</sup>

$(X_g, Y_g, f)$ ) として映っている場合、投影中心  $O$  と点  $G'$ , 点  $G$  が、同一

直線(光線)上に存在していることから 式(3-20, 21)と同様に 共線条件

式が成立する。(式3-27, 28)

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{b_{11}(X_G - X) + b_{21}(Y_G - Y) + b_{31}(Z_G - Z)}{b_{13}(X_G - X) + b_{23}(Y_G - Y) + b_{33}(Z_G - Z)} + \frac{x_g}{f} = 0 \quad (3-27) \\ \frac{b_{12}(X_G - X) + b_{22}(Y_G - Y) + b_{32}(Z_G - Z)}{b_{13}(X_G - X) + b_{23}(Y_G - Y) + b_{33}(Z_G - Z)} + \frac{y_g}{f} = 0 \quad (3-28) \end{array} \right.$$

注) 内部歪は補正済であるとする。

$(x_g, y_g, -f)$ : 式(3-17)における点G'のセンサ座標

$\{b_{ij}\} = R^T$  w.k.y : 式(3-22)による回転行列

地上座標  $(X_G, Y_G, Z_G)$  を全て与えると, センサ座標  $(x_g, y_g, -f)$

と共線条件式は外部標定要素を未知変数とする方程式と考えられる。

この場合、一つの基準点に対して2本の方程式が成立するので求める標定要素数が  $N$  であれば、地上座標の全て与えられた基準点は最低  $N/2$  点あればよいことがわかる。

センサ座標は全て与えられているが、地上座標の3つの座標値のうち2つしか与えられていない基準点についてはその共線条件式と標定要素及び未知座標値(例えば  $Z_G$ )を未知変数とした方程式と考えればよい。

この基準点を加えることによって新たに未知変数が1つ増加するが、方程式数は2つ増加するので、標定要素を求める方程式の数は実質的に1つ増加する。

また、地上座標のうち2つ以上が与えられていない基準点については、ステレオペアになっている複数の画像のそれぞれにおいて、そのセンサ座標が与えられていなければ、2ないし3の地上座標の未知数増に対して方程式の数は各ステレオペアについて2本、全体で4本増えるので標定要素を求める方程式数は実質的に1~2本増加する。これを式を用いて以下に説明する。点Gがステレオペアになっ

ている画像1および2に共通して映っているとすると、光線  $l_1, l_2$  について  
(ステレオ画像1,2上の)

それぞれ共線条件式が以下のように成立する。(図3-6参照)

$$\frac{b_{11}^i (X_G - X^i) + b_{21}^i (Y_G - Y^i) + b_{31}^i (Z_G - Z^i)}{b_{13}^i (X_G - X^i) + b_{23}^i (Y_G - Y^i) + b_{33}^i (Z_G - Z^i)} = -\frac{x_g^i}{f} \quad (3-29)$$

$$\frac{b_{12}^i (X_G - X^i) + b_{22}^i (Y_G - Y^i) + b_{32}^i (Z_G - Z^i)}{b_{13}^i (X_G - X^i) + b_{23}^i (Y_G - Y^i) + b_{33}^i (Z_G - Z^i)} = -\frac{y_g^i}{f} \quad (3-30)$$

$i=1, 2$  : ステレオペアの画像番号

( $i=1$  は  $l_1$  に対する共線条件式)  
 $i=2$  は  $l_2$  に " " )

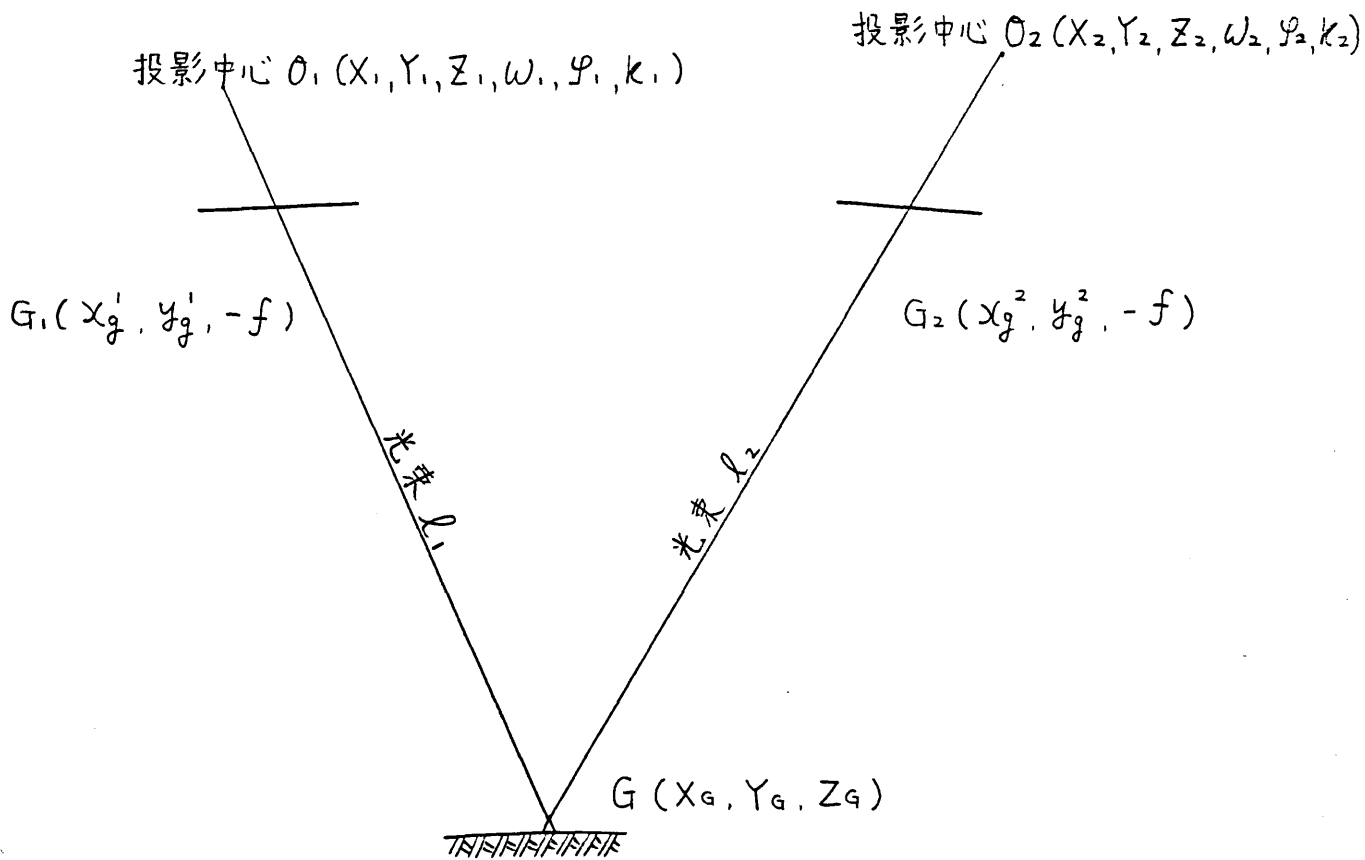


図 3.6 点  $G$  における光束  $l_1, l_2$  の交差.

$(X^i, Y^i, Z^i)$  : 画像  $i$  における センサ位置

$\{ b_{k\ell}^i \}$  : 画像  $i$  における 回転行列

$(x_g^i, y_g^i)$  : 画像  $i$  における 画像座標

ここで  $X_G, Y_G, Z_G$  の全  $n$  が 未知数であっても、新たに付け加わる  
方程式数は  $n$  であり、未知数の数より 1つ多いことから、(式 3-29) と  
式 (3-30) は 外部標定要素を求める方程式として 有効であることが  
わかる。これは 写真測量における 相互標定の条件式と 原理的  
に 同じものである。

(式 3-27~30) の 共線条件式は 未知数 (外部標定要素 および 与えら  
れない 基準点座標) について 非線形であるので、各未知数について  
テイラー展開し、最小二乗法により 逐次近似解を求める必要がある。  
テイラー展開式、偏微係数、および 逐次近似計算における 初期値の  
与え方について 以下に示す。

(テイラー展開式)

$$F + \sum_{i=1}^{n_x} \frac{\partial F}{\partial X_i} \Delta X_i + \sum_{i=1}^{n_y} \frac{\partial F}{\partial Y_i} \Delta Y_i + \sum_{i=1}^{n_z} \frac{\partial F}{\partial Z_i} \Delta Z_i$$

$$+ \sum_{i=1}^{n_w} \frac{\partial F}{\partial w_i} \Delta w_i + \sum_{i=1}^{n_y} \frac{\partial F}{\partial y_i} \Delta y_i + \sum_{i=1}^{n_k} \frac{\partial F}{\partial k_i} \Delta k_i = 0 \quad (3-31)$$

∴

$$F \equiv F(X_i, Y_j, Z_k, w_l, y_m, k_n)$$

$$\equiv \frac{b_{11}(X_G - X) + b_{21}(Y_G - Y) + b_{31}(Z_G - Z)}{b_{13}(X_G - X) + b_{23}(Y_G - Y) + b_{33}(Z_G - Z)} + \frac{y_g}{f} \quad (3-32)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} i = 1, n_x \\ j = 1, n_y \\ k = 1, n_z \\ l = 1, n_w \\ m = 1, n_y \\ n = 1, n_k \end{array} \right. \quad (n_x, n_y \text{等は各未知パラメータの個数})$$

$$G + \sum_{i=1}^{n_x} \frac{\partial G}{\partial X_i} \Delta X_i + \sum_{i=1}^{n_y} \frac{\partial G}{\partial Y_i} \Delta Y_i + \sum_{i=1}^{n_z} \frac{\partial G}{\partial Z_i} \Delta Z_i$$

$$+ \sum_{i=1}^{n_w} \frac{\partial G}{\partial w_i} \Delta w_i + \sum_{i=1}^{n_y} \frac{\partial G}{\partial y_i} \Delta y_i + \sum_{i=1}^{n_k} \frac{\partial G}{\partial k_i} \Delta k_i = 0 \quad (3-33)$$

∴

$$G \equiv G(X_i, Y_j, Z_k, w_l, y_m, k_n)$$

$$\equiv \frac{b_{12}(X_G - X) + b_{22}(Y_G - Y) + b_{32}(Z_G - Z)}{b_{13}(X_G - X) + b_{23}(Y_G - Y) + b_{33}(Z_G - Z)} + \frac{y_g}{f} \quad (3-34)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} i = 1, n_x \\ j = 1, n_y \\ k = 1, n_z \\ l = 1, n_w \\ m = 1, n_y \\ n = 1, n_k \end{array} \right. \quad (n_x, n_y \text{等は各未知パラメータの個数})$$

(各未知パラメータに対する偏微係数)

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial F}{\partial X} = -\frac{1}{f} \cdot \frac{b_{11} \cdot f + b_{13} x_g}{b_{13}(X_G - X) + b_{23}(Y_G - Y) + b_{33}(Z_G - Z)} \\ \frac{\partial F}{\partial X_i} = \frac{\partial F}{\partial X} \cdot \frac{dX}{dX_i} \end{array} \right. \quad (3-35)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial F}{\partial Y} = -\frac{1}{f} \cdot \frac{b_{21} \cdot f + b_{23} x_g}{b_{13}(X_G - X) + b_{23}(Y_G - Y) + b_{33}(Z_G - Z)} \\ \frac{\partial F}{\partial Y_i} = \frac{\partial F}{\partial Y} \cdot \frac{dY}{dY_i} \end{array} \right. \quad (3-36)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial F}{\partial Z} = -\frac{1}{f} \cdot \frac{b_{31} \cdot f + b_{33} \cdot x_g}{b_{13}(X_G - X) + b_{23}(Y_G - Y) + b_{33}(Z_G - Z)} \\ \frac{\partial F}{\partial Z_i} = \frac{\partial F}{\partial Z} \cdot \frac{dZ}{dZ_i} \end{array} \right. \quad (3-37)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial F}{\partial W} = \frac{\partial F}{\partial Z} (Y_G - Y) - \frac{\partial F}{\partial Y} (Z_G - Z) \\ \frac{\partial F}{\partial W_i} = \frac{\partial F}{\partial W} \cdot \frac{dW}{dW_i} \end{array} \right. \quad (3-38)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial F}{\partial \varphi} = -1 - \left(\frac{x_g}{f}\right)^2 \\ \frac{\partial F}{\partial \varphi_i} = \frac{\partial F}{\partial \varphi} \cdot \frac{d\varphi}{d\varphi_i} \end{array} \right. \quad (3-39)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial F}{\partial k} = -\frac{\cos \varphi}{f} \cdot y_g - \frac{x_g \cdot y_g}{f^2} \cdot \sin \varphi \\ \frac{\partial F}{\partial k_i} = \frac{\partial F}{\partial k} \cdot \frac{dk}{dk_i} \end{cases} \quad (3-40)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial F}{\partial X_G} = -\frac{\partial F}{\partial X} \\ \frac{\partial F}{\partial Y_G} = -\frac{\partial F}{\partial Y} \\ \frac{\partial F}{\partial Z_G} = -\frac{\partial F}{\partial Z} \end{cases} \quad (3-41)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial G}{\partial X} = -\frac{1}{f} \cdot \frac{b_{12} \cdot f + b_{13} \cdot y_g}{b_{13}(X_G - X) + b_{23}(Y_G - Y) + b_{33}(Z_G - Z)} \\ \frac{\partial G}{\partial X_i} = \frac{\partial G}{\partial X} \cdot \frac{dX}{dX_i} \end{cases} \quad (3-42)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial G}{\partial Y} = -\frac{1}{f} \cdot \frac{b_{22} \cdot f + b_{23} \cdot y_g}{b_{13}(X_G - X) + b_{23}(Y_G - Y) + b_{33}(Z_G - Z)} \\ \frac{\partial G}{\partial Y_i} = \frac{\partial G}{\partial Y} \cdot \frac{dY}{dY_i} \end{cases} \quad (3-43)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial G}{\partial Z} = -\frac{1}{f} \cdot \frac{b_{32} \cdot f + b_{33} \cdot y_g}{b_{13}(X_G - X) + b_{23}(Y_G - Y) + b_{33}(Z_G - Z)} \\ \frac{\partial G}{\partial Z_i} = \frac{\partial G}{\partial Z} \cdot \frac{dZ}{dZ_i} \end{cases} \quad (3-44)$$



$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial G}{\partial w} &= \frac{\partial G}{\partial Z} (Y_G - \bar{Y}) - \frac{\partial G}{\partial Y} (Z_G - \bar{Z}) \\ \frac{\partial G}{\partial w_i} &= \frac{\partial G}{\partial w} \cdot \frac{dw}{dw_i} \end{aligned} \right. \quad (3-45)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial G}{\partial \varphi} &= - \frac{x_g \cdot y_g}{f^2} \\ \frac{\partial G}{\partial \varphi_i} &= \frac{\partial G}{\partial \varphi} \cdot \frac{d\varphi}{d\varphi_i} \end{aligned} \right. \quad (3-46)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial G}{\partial k} &= - \frac{\cos k (X_G - X) + \cos w \cdot \sin k (Y_G - Y) + \sin w \cdot \sin k (Z_G - Z)}{b_{13}(X_G - X) + b_{23}(Y_G - Y) + b_{33}(Z_G - Z)} \\ &\quad - \sin \varphi \left( \frac{y_g}{f} \right)^2 \\ \frac{\partial G}{\partial k_i} &= \frac{\partial G}{\partial k} \cdot \frac{dk}{dk_i} \end{aligned} \right. \quad (3-47)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial G}{\partial X_G} &= - \frac{\partial G}{\partial X} \\ \frac{\partial G}{\partial Y_G} &= - \frac{\partial G}{\partial Y} \\ \frac{\partial G}{\partial Z_G} &= - \frac{\partial G}{\partial Z} \end{aligned} \right. \quad (3-48)$$

(初期値の与え方)

i) センサ位置

地上局からの三辺測量により得られる衛星位置の時系列データ

$(X(t), Y(t), Z(t))$ ;  $t$ : 時間を地球の自転も考慮して地上座標系に直し、各  $X, Y, Z$  に関する時間パラメータ  $(X_i, Y_j, Z_k)$ ;  $i=1, n_x, j=1, n_y, k=1, n_z$  を最小二乗法等により求め初期値とする。

ii) センサ三軸姿勢

ロール角については絶対値が小さいため時刻にかかわらずゼロとなるようにパラメータ  $W_i, i=1, n_w$  を定める。

ピッチ角についてはセンサの衛星に対する取付角(鉛直下方を  $0^\circ$  とする)付近で小さく変化しているため、時刻にかかわらず取付角に等しくなるようにパラメータ  $P_i, i=1, n_p$  を定める。

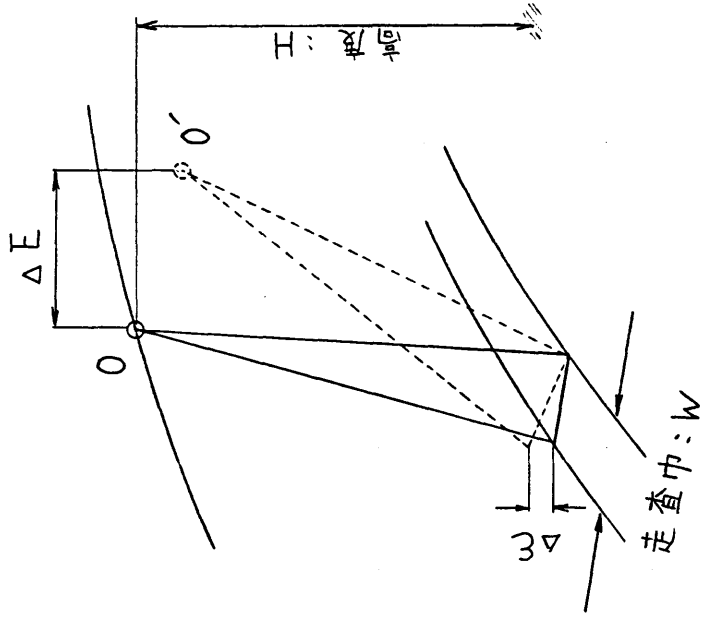
ヨー角については絶対値が小さいため、時刻にかかわらず、ゼロとなるようにパラメータ  $K_i, i=1, n_k$  を定める。

### 3.4.2 地上基準点 および衛星の位置・姿勢の計測データを併用した外部標定方法

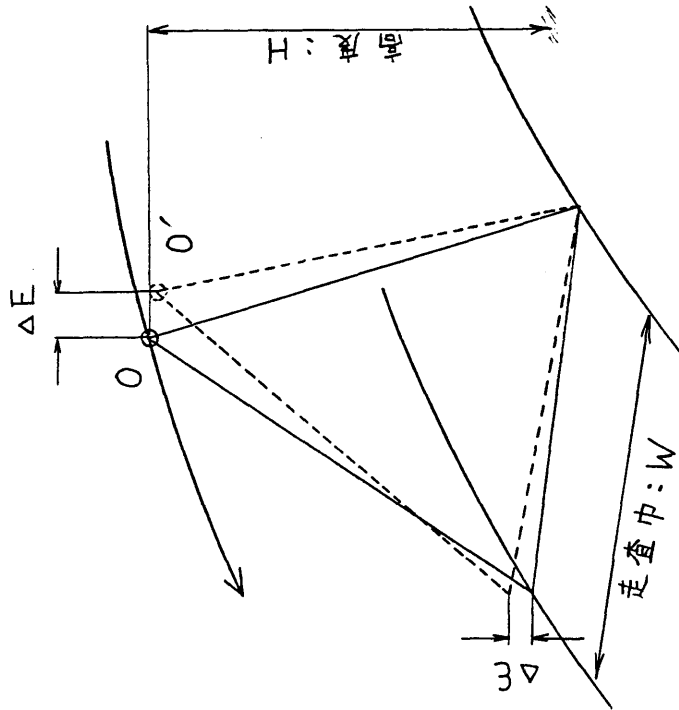
前節で述べたように、リニアアレイセンサの外部標定要素は、十分な数の地上基準点があれば、共線条件式より求めることができる。しかし、一般に衛星搭載のリニアアレイセンサの場合、衛星の高度に対して走査巾が小さいこと、(例えば SPQT 衛星では 高度約 800km に対して走査巾は約 60km)、また平行投影画像であること等の理由により、センサの光束で形成される幾何モデル(標定モデル)は一般の航測カメラの場合等と比較して不安定であり、図 3.7 に示すように基準点の地上座標と画像座標のわずかな計測誤差( $\Delta \varepsilon$ )が、標定要素の決定精度( $\Delta E$ )を大きく低下させることが考えられる。

一方、衛星の位置および三軸姿勢は現在のところ地上局による三辺測量や衛星に搭載された計測機器等により直接計測されている。さらに将来はこれらの計測精度が一段と向上することが期待されている。

すなわち、衛星の位置は 1980 年代後半より稼働する GPS (Global Positioning



a) 安定性の高い場合  
(走査巾 / 高度が大)



b) 安定性の低い場合  
(走査巾 / 高度が小)

図3.7 外部標定における光束の幾何モデル(標定モデル)の走査巾 / 高度比による安定性の比較

O: 実際の衛星の位置  
O': 標定により求められた衛星の位置

$\Delta E$ : 地上基準点の座標誤差

$\Delta E$ : 衛星位置の標定誤差

System) を用いることにより約10m(1σ値)の精度で計測可能であり、<sup>(3)</sup>

また三軸姿勢はスタートラッカー (Star Tracker) 等の利用により数 arc-  
(4),(5)

sec (1σ値)の精度で計測できると期待されている。計測精度から

みてこれらの計測値をそのまま外部標定要素として用いることはできないが、

制約条件として付加することにより先に述べた光束の幾何モデルの不安定性

を減少させ標定の頑健性 (robustness) の向上や、また必要な地上基準点

の数の減少を図ることが出来る。

すなわち、画像のオララインにおいて衛星の位置、三軸姿勢の計測値

がそれぞれ  $(X_L, Y_L, Z_L, W_L, \varphi_L, k_L)$  であったとすると、以下のような

条件式が成立する。以下、測点方程式と呼ぶこととする。

$$X_L = X(L; X_i) \quad i=1, n_x$$

$$Y_L = Y(L; Y_i) \quad i=1, n_y$$

$$Z_L = Z(L; Z_i) \quad i=1, n_z$$

$$W_L = W(L; W_i) + W_0 \quad i=1, n_w$$

$$\varphi_L = \varphi(L; \varphi_i) + \varphi_0 \quad i=1, n_\varphi$$

$$k_L = k(L; k_i) + k_0 \quad i=1, n_k$$

(3-49)

$X_i, Y_i$  等 ; パラメータ

$n_x, n_y$  等 ; パラメータの個数

$W_0, Y_0, K_0$  : 衛星の三軸姿勢を計測する座標系 (衛星座標系) と センサ座標系 との間の回転角

ここで、衛星本体の大きさは 高々数  $m$  であるので、衛星位置は すなわち センサ投影中心位置と考えて差しつかえない。 衛星座標系と センサ座標系 との間の 回転角 (取り付け角) ( $W_0, Y_0, K_0$ ) が 与えられている場合には、上式 (測点条件式) と 共線条件式 (式 3-27~30) を同時に解くことにより、外部 標定要素 ( $X_i, Y_j, Z_k, W_l, Y_m, K_n$ ) を求めることができる。

回転角 ( $W_0, Y_0, K_0$ ) が 計測されていない場合には、 $W_0, Y_0, K_0$  を 新たな 標定要素として追加すればよい。

また、測点条件式 (式 3-49) と 共線条件式 では 期待される 残差の分散の大きさが異なることから、最小二乗法の適用にあたっては、各  $X_L, Y_L, Z_L, W_L, Y_L, K_L$  の計測誤差の分散  $\sigma_x^2, \sigma_y^2, \sigma_z^2, \sigma_w^2, \sigma_\psi^2, \sigma_\kappa^2$  の逆数、および 共線条件式の誤差分散  $\sigma_0^2$  の逆数による 重みづけを行う必要がある。

これらの衛星位置、姿勢の計測データを利用した 外部標定手法の有効性については 次章で示す。

---

## 4章 リニアアレイセンサの外部標定シミュレーション

本章では、2章で作成したステレオ画像を用いて リニアアレイセンサ  
の外部標定のシミュレーションを行い、様々な要因が 標定精度に 与え  
る影響について検討する。したがって、ここでは センサの内部歪 および  
大気の屈折は すでに補正されているとし それらの影響は考慮しない。



#### 4.1 シミュレーションで検討する要因の抽出

外部標定とは 3章で述べたとおり、地上基準点や衛星の位置・姿勢の観測データより画像を撮影した時のセンサの位置・姿勢を求めることである。

したがって、外部標定の精度に影響する要因は表4.1のとおりである。

表4.1 外部標定の精度に影響する要因

- 1) 衛星(センサ)の位置および姿勢の関数のあてはめの精度
- 2) 地上基準点の数・分布およびその地上座標や画像座標の精度
- 3) 衛星の位置・姿勢の観測データの数・精度
- 4) リニアレイセンサの標定における幾何モデル(標定モデル)の幾何学的な安定性

3章で 衛星の位置・姿勢の時間変化が時間  $t$  の三次式等で表わされることを示したが、1)はたとえば 衛星の位置・姿勢が何らかの原因によって時間

元の三次式で表わせない変化をしているにもかかわらず、三次式をあてはめて  
標定したために生ずる標定したために生ずる標定誤差のことを示している。

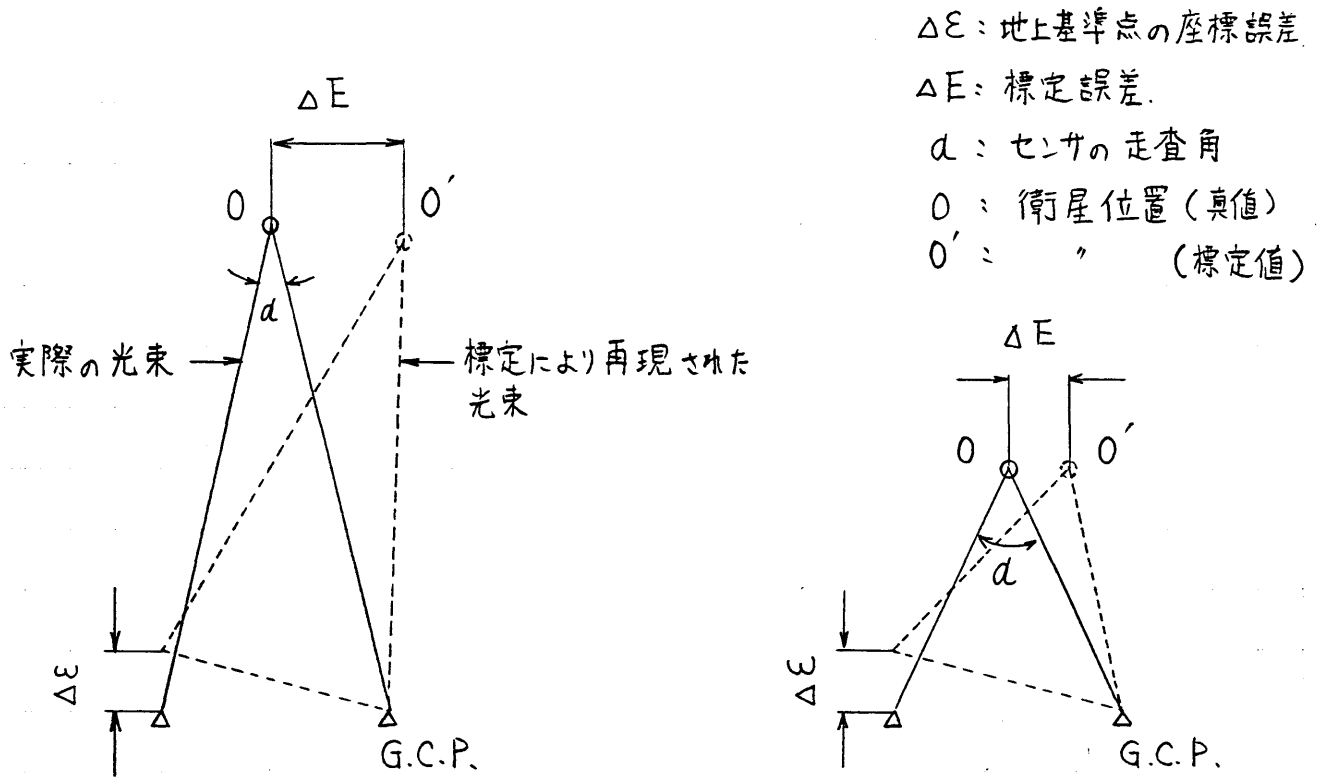
2)については、地上基準点の数が増加し、分布が画像全体に対して、一様  
になり、地上座標及び画像座標の精度が向上するに伴い、標定精度は向  
上すると予想される。

3)については、観測データの数の増加及び精度の向上に伴い、標定精  
度は向上すると予想される。

4)において、標定モデルの幾何学的に安定している場合とは 図4.1に示  
すように、たとえば センサの走査角( $\alpha$ )が十分大きく、地上基準点の地上座  
標や画像座標の誤差が外部標定の精度に大きな悪影響を与えない場合で  
ある。すなわち、標定モデルの幾何学的な安定性はそれ自体が標定誤  
差の原因となるのではなく、地上基準点の座標誤差等の標定精度への影響の  
度合を決定する役割を果たしている。

衛星搭載のリアライセンサの場合、走査角は  $4\sim 5^\circ$  程度と一般の航  
測カメラの画角に比べ、非常に小さいなどの理由により、標定モデルの安定性はかなり

低いと考えられる。そのため、外部標定においては地上基準点に加え衛星の位置・姿勢データ等も利用して標定モデルの不安定性による悪影響を除くことが重要になると予想される。



a) 安定性の小さい場合  
(例: 走査角( $\alpha$ )が小さい)

b) 安定性の大きい場合  
(例: 走査角( $\alpha$ )が大きい)

図4-1 標定モデルの幾何学的安定性と外部標定の精度

本研究では標定精度に影響を与える以上のような要因のうち、SPOTやSTEREOSAT画像の

外部標定を行うにあたって、費用・時間等の面からみて、<sup>特に</sup>重要な要因についてシミュレーションにより外部標定の精度への影響を検証する。シミュレーションにより検討する要因(操作変数)は表4.2のとおりである。

表4.2 シミュレーションによる検討項目

- |                              |
|------------------------------|
| 1) 地上基準点の数、および分布             |
| 2) 衛星の位置・姿勢データの利用の有無、及びデータ精度 |

表4.1の項目より表4.2の項目を選択した理由を簡単に述べる。

まず、表4.1であげた要因1)については、外部標定を行う画像に対応した軌道区間内における衛星の位置および姿勢の時間変化は時間 $t$ に関する多項式を用いることにより、十分な精度で再現できること(第2章で示されている)ので、本シミュレーションでは考慮しないこととした。したがって、ここでは、画像作成時に与えた衛星位置・姿勢の時間変化を表わす3次式等の関数のパラメータが外部標定によりどの程度精確に再現されるかを評価すればよいことになる。

次に、地上基準点の数・分布(表4.1の2))は外部標定を実際に行

うにあたって 標定精度ばかりでなく 費用等の面でも 重要な要因となると考えられるので、シミュレーションにより検討する。基準点の地上座標や画像座標の誤差は 標定精度にやはり大きな影響を与えると考えられるが、計測精度を落としても 一般に 計測も含めた 標定費用が どの程度節約されないことから、計測精度を落として 基準点数を増やして 標定するケースは

あまり多くないと考えられるので シミュレーションでは 基準点の計測精度を常に一定に保つ、標定精度への影響の検討は行わないこととする。

衛星の位置・姿勢の観測データ(表4.1の3))については、衛星データの利用によって 標定モデルが幾何学的に不安定であるという衛星搭載のリアルタイムセンサの欠点が改善されると期待されることから、衛星データの利用の有無、及び衛星データの計測精度が 標定精度に与える影響について シミュレーションで考察する。

センサの標定モデルの幾何学的な不安定性(表4.1の4))についてはこれがセンサの走査角、収束角等によりユーザーにとって与件と考えられることから シミュレーションでは 固定条件として扱う。

## 4.2 外部標定シミュレーションの方法

外部標定シミュレーションでは表4.2の各項目について、いくつかのケースを設定し、2章で作成したシミュレーション画像を用いて外部標定の精度を比較・検討する。

本節では、シミュレーションを行うにあたって想定する必要がある条件、すなわち固定条件と操作条件(表4.2参照)についてまとめ、さらに外部標定の精度の評価方法について述べる。

### 1) 固定条件

#### (1) 衛星の位置・姿勢の時間変化

シミュレーションにおいて衛星の位置は時間 $t$ の1次式、姿勢は3次式で表わされる。これは2章においてシミュレーション画像の作成時に想定した条件と対応している。

#### (2) 地上基準点の地上座標及び画像座標の精度

基準点の地上座標は正しいものとした。また、画像座標については最大0.5画素分の量子化誤差以外の誤差はないとした。

(3) 衛星の位置・姿勢の観測データの数、精度

現状の技術レベルより想定した。

(4) 検証のためのテスト地区及びシミュレーション画像

検証に用いたテスト地区の場所、及びシミュレーション画像作成の諸元は図4.2 表4.3 に示す通りである。

(5) その他

センサの諸元等については第2章2.1.1節で示したとおりである。

また、センサの搭載方式は前後方式'を例として行う。これは左右

方式、前後方式'とも標定(方法)に関しては区別する必要がないためである。

2) 操作条件 (表4.2参照)

(1) 地上基準点の数および分布

(2) 衛星の位置・姿勢データの利用の有無、及びデータの計測精度

3) 外部標定の精度の評価方法

表 4.3 シミュレーションに用いたデータ諸元

a) 地形及び地表輝度データ

| 項 目                | 地形データ                        | 地表輝度データ                                |
|--------------------|------------------------------|----------------------------------------|
| スタディエリア            | 北アルプス周辺(南北58km, 東西47km)      | 同 左                                    |
| 対応する地形図<br>(5万分の1) | 立山, 高山, 上高地,<br>大町, 信濃池田, 松本 | 同 左                                    |
| 原 データ              | 国土数値情報<br>(約250mメッシュ)        | LANDSAT MSS画像<br>(5バンド, 高山, 1975.9.11) |
| データ内挿間隔            | 約60m間隔に内挿後<br>スケールを1/6に縮小    | 約60m間隔に内挿後<br>スケールを1/6に縮小              |
| 内挿方法               | 共三次式                         | 最近隣内挿                                  |

b) センサ諸元

| 項 目    | 諸 元           |
|--------|---------------|
| 瞬間地上視野 | 10m           |
| ステレオ角  | 45° 60°       |
| (B/H比) | (0.83) (1.15) |



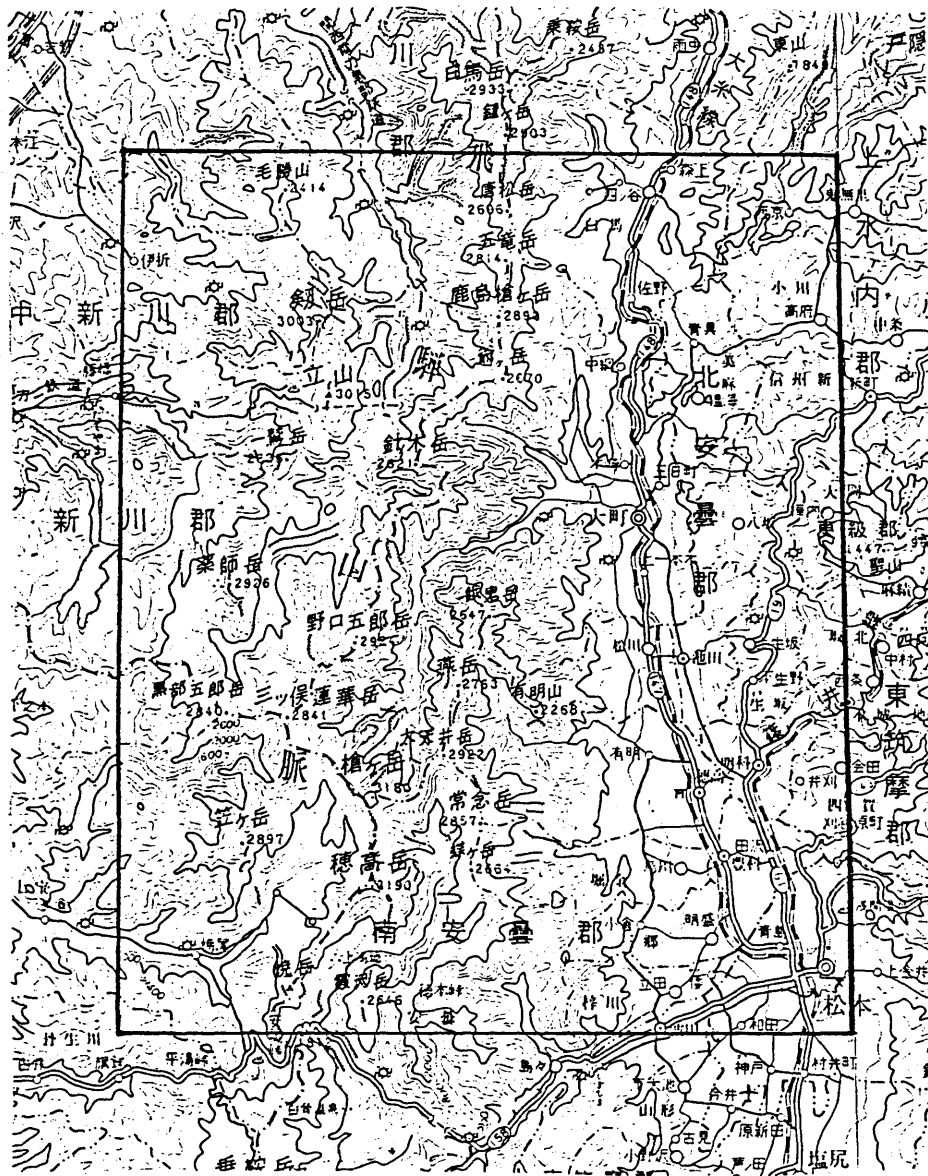


図4.2 テスタエリアの地形図 (図2.10再掲)  
 (50万分の1, 中部・近畿)

画像作成の際に与えた衛星の位置・姿勢の時間変化式のパラメータ(標定要素の真値)と外部標定により推定された標定要素の比較を行う。また、検証点の地上座標を外部標定で得られた標定要素から求め、真値と比較する。

検証点の三次元座標の計算には標定要素のほかに、ステレオ対応点の画像座標が必要であるが、シミュレーション画像では画像上の各画素に対応した地上座標がわかっているので、検証点の画像座標は、その地上座標から、画素化による量子化誤差を除いて正確に求めることができる。そのため、検証点の三次元座標の計測精度は、外部標定の精度、すなわち画像撮影時のセンサの位置・姿勢及び光束の状況がどれだけ精度よく再現されているかという事を表わしていると考えられる。

この評価方法によれば地形の三次元測定精度の向上という観点から外部標定の精度を評価できる。

## 4.3 外部標定シミュレーションの結果

### 4.3.1 地上基準点の数に関する検討

#### 1) シミュレーション結果

衛星の位置

$(X, Y, Z)$  の時間変化を時間  $t$  の 1 次式で表わし、三軸姿勢  $(\omega, \varphi, \kappa)$  の時間変化を時間  $t$  の 3 次式で表わす場合には、外部標定要素は全部で 18ヶになる。したがって地上座標のわかっている地上基準点は最低 9 点あればよい。

ここでは、三次元地上座標が全て与えられている地上基準点の点数を 10 点から 22 点まで 4 点きざみに変化させ外部標定の精度に対する影響を検討する。

図 4.3 にシミュレーションに用いた地上基準点の DTM 内における分布を示す。標定においては、この中から必要点数をできるだけ一様な分布になるように抽出して用いた。残りの点については標定結果より求められた三次元座標値と真の座標値を比較するチェックポイントとして利用した。

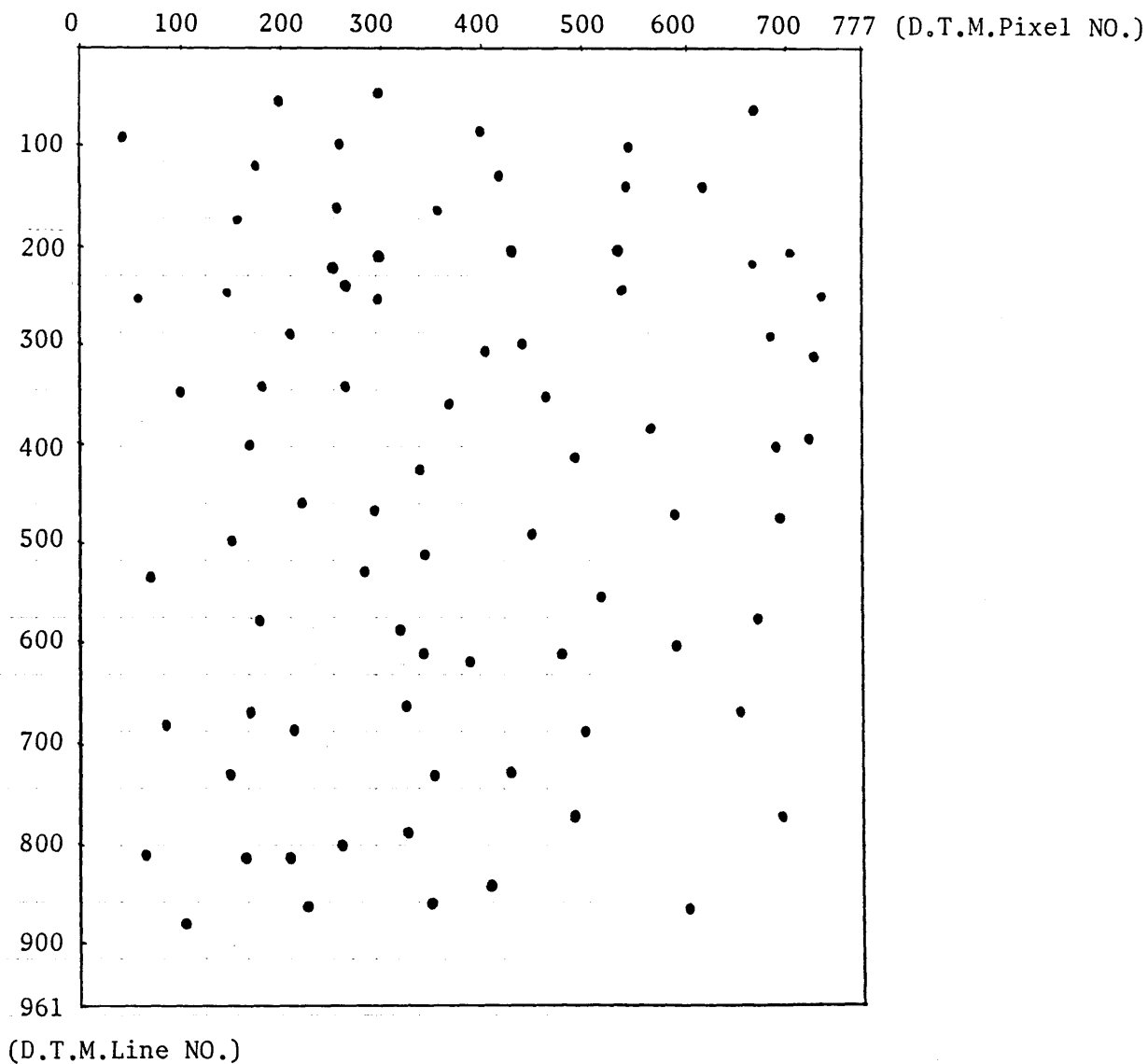
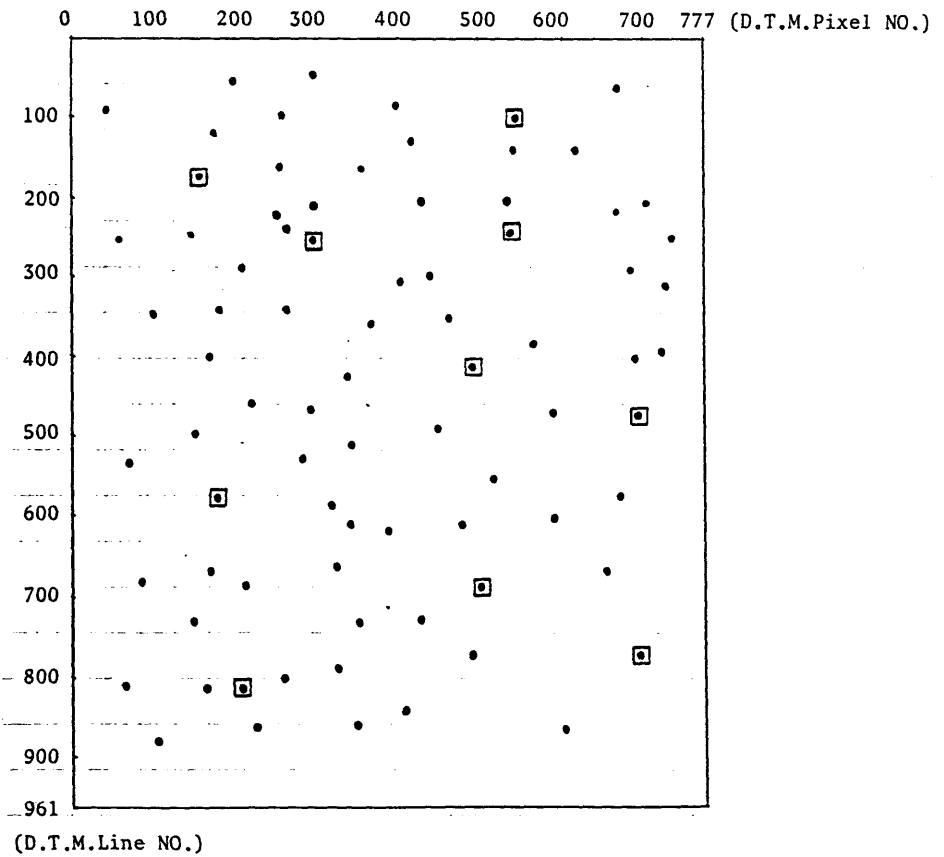


図4-3 a) 地上基準点の分布 (候補点の分布) (図中・点)  
(合計79点)

図4.3 b) 標定に用いた地上基準点の分布 (図中□点)  
 (N:地上基準点数)

i) N = 10点



ii) N = 14点

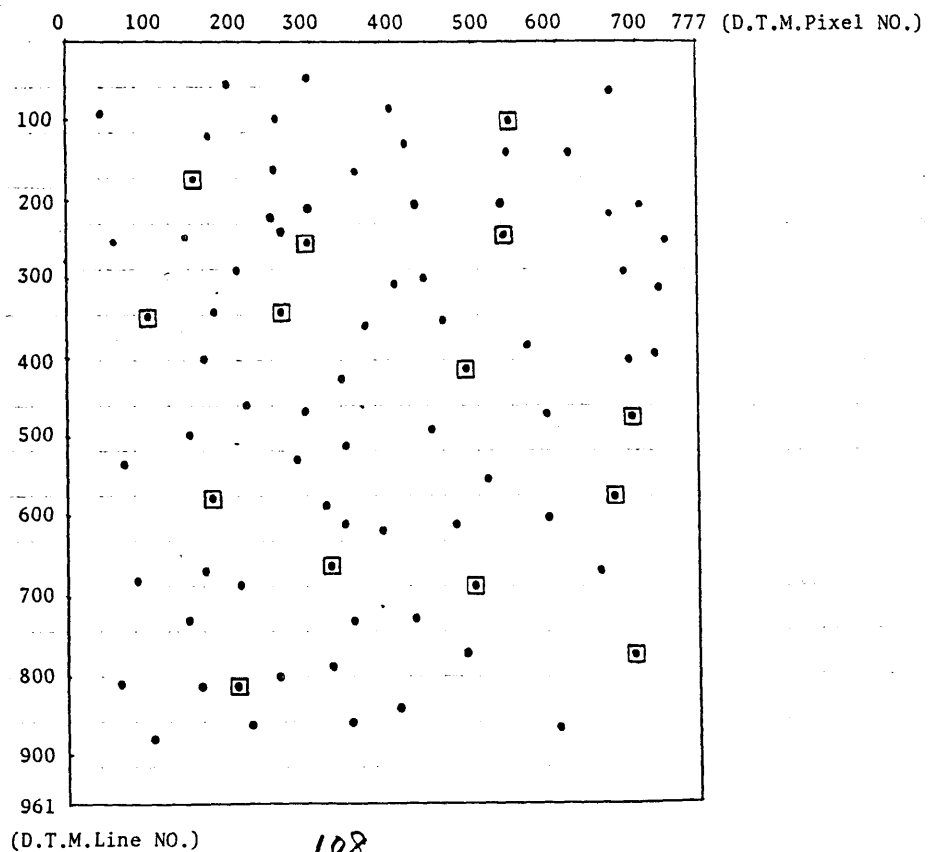




表4.4は、検証点(ケースによりやや異なるが、約50点)における三次元測定の精度を表わしている。基準点の増加に伴い、精度が向上するのびわかる。

図4.4は 衛星位置の時間変化について 標定の結果と真値とを比較したものである。基準点の増加に伴い、標定結果が真値に接近するのびわかる。

## 2) 考察結果

(1) 基準点の増加に伴い、標定精度は大きく向上する。また、ステレオ対応点の画像座標誤差が小さいとした場合の三次元測定の精度も著しく向上する。その誤差は基準点数が22点の場合、平面位置で約0.35画素、標高で約0.4~0.6画素である。

(2) 標定要素について、標定結果と真値を比較すると基準点数が10点の場合、衛星の平面位置で約6°(地上より衛星位置の誤差を見込む

角), 高度で約5%の誤差がある。

基準点数を22点に増加させても、なお平面位置で約1°, 高度で約3%の誤差がある。これは衛星搭載のリアライセンサの場合、高度に比べて走査巾が狭い等の理由により、標定の幾何モデルが著しく不安定なためと考えられる。

表4.4 三次元測定の精度 (平均二乗誤差, 単位 = m)

| 基準点数(N) | ステレオ角 = 45° (B/H = 0.83) |      | ステレオ角 = 60° (B/H = 60°) |      |
|---------|--------------------------|------|-------------------------|------|
|         | 平面位置                     | 標高   | 平面位置                    | 標高   |
| N = 10  | 8.70                     | 9.79 | 10.1                    | 14.1 |
| N = 14  | 3.73                     | 6.89 | 4.27                    | 4.19 |
| N = 18  | 3.16                     | 6.99 | 3.86                    | 4.27 |
| N = 22  | 3.44                     | 6.22 | 3.58                    | 3.95 |



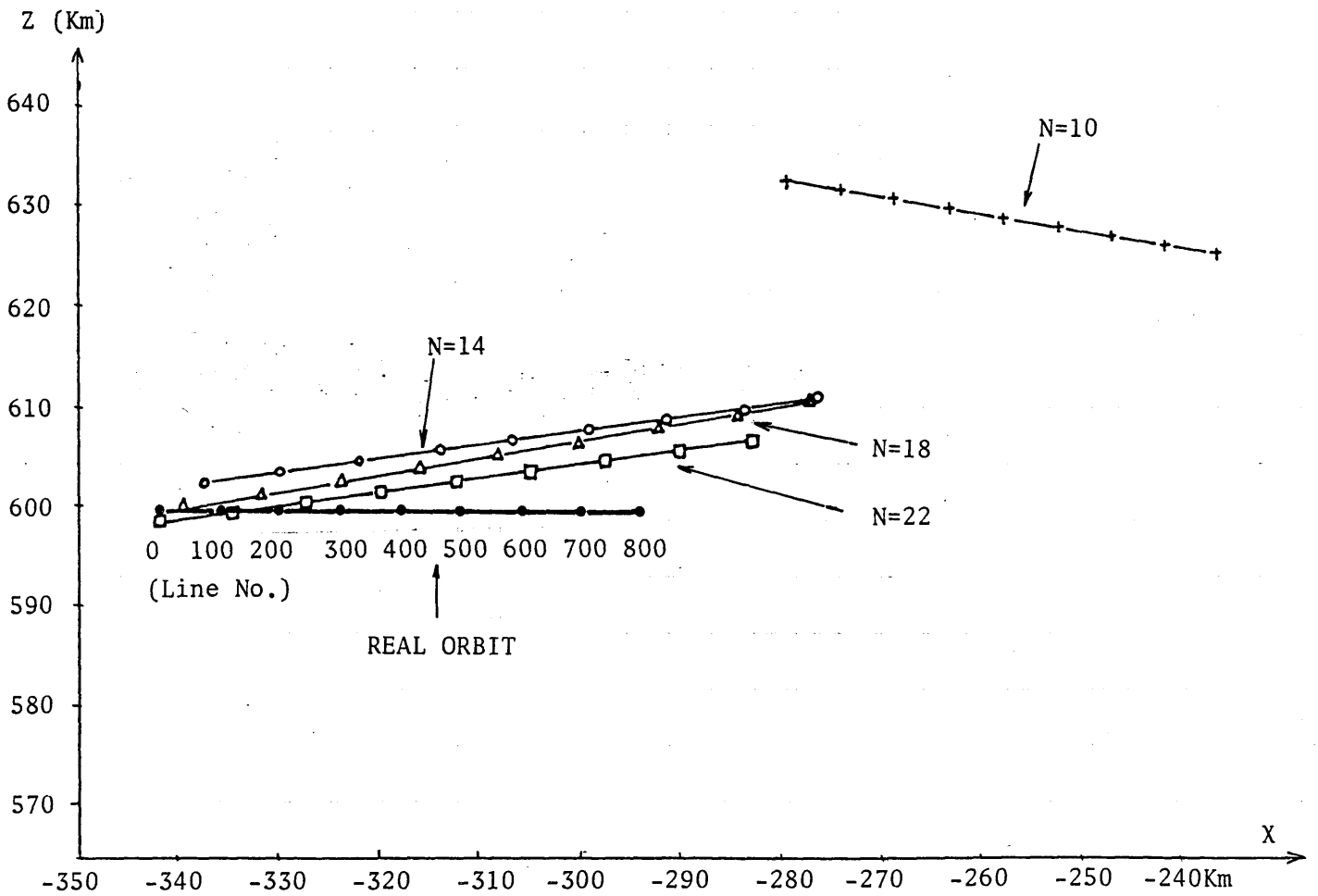


図4.4. 標定により求められた衛星軌道と実際の軌道の比較  
(その1, X・Z平面)

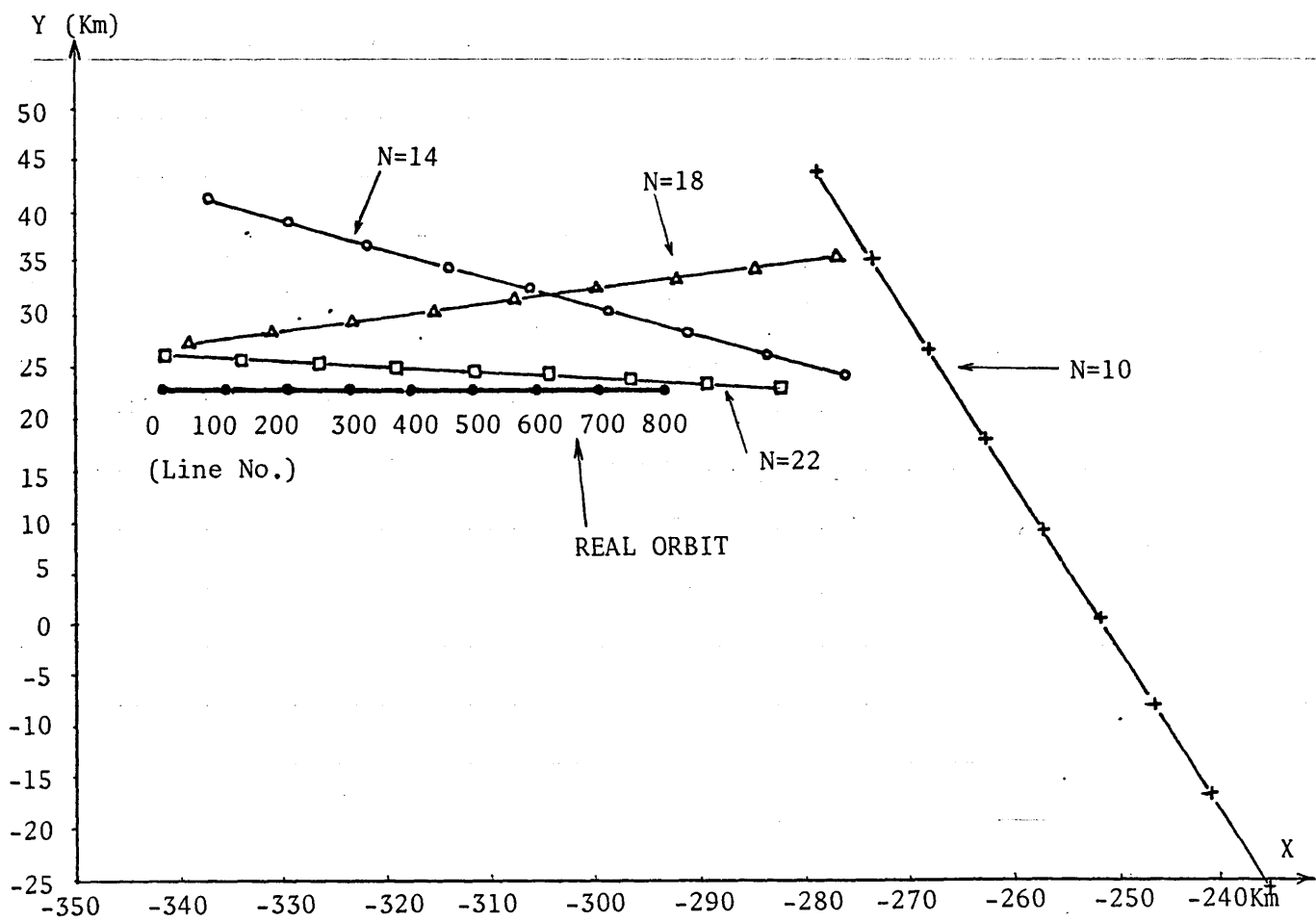


図 4.4 (その2, X-Y平面)

## 4.3.2 地上基準点の分布に関する検討

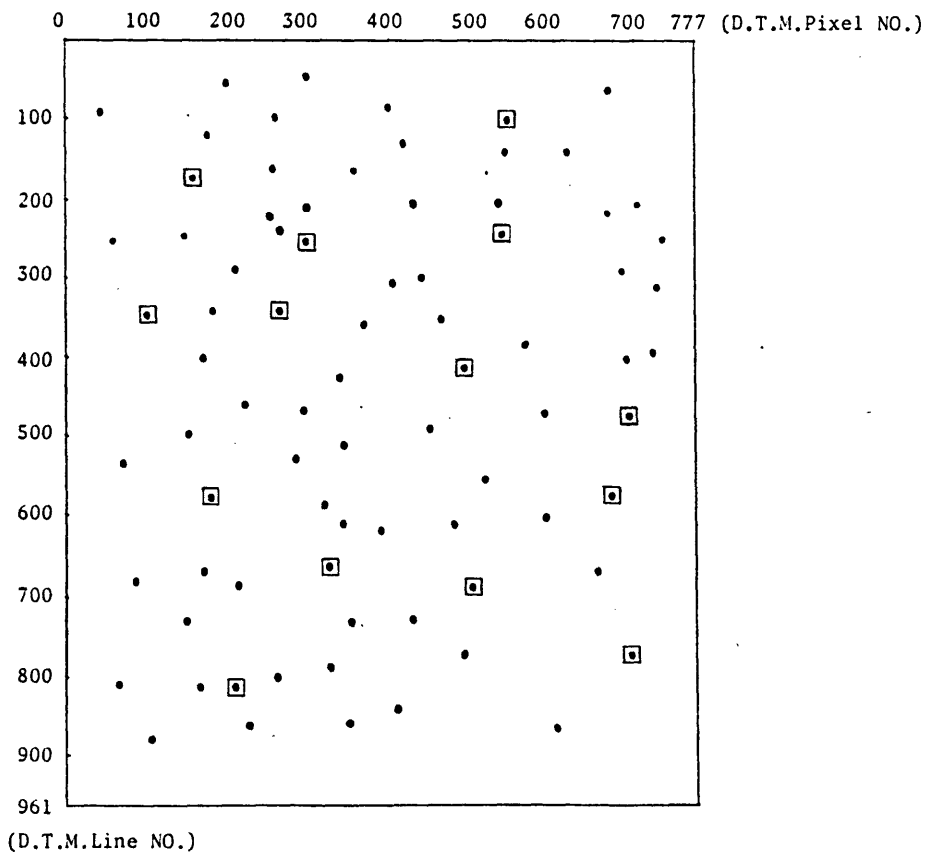
### 1) シミュレーション結果

地上基準点の画像内分布が標定精度に与える影響について表4.5に示す。

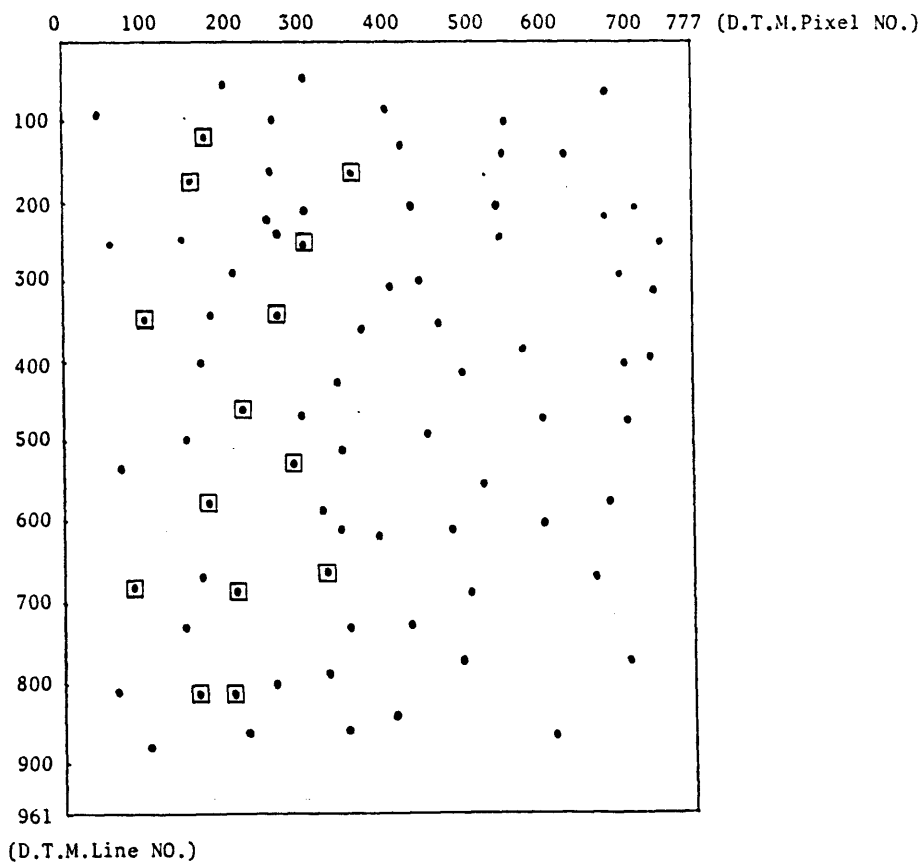
基準点の分布ケース(3ケース)は図4.5に示すとおりである。

図4.5 基準点の画像内分布ケース

a)  $N = 14$  (一様分布)



b)  $N = 14$  (偏在ケース1, 左半分に偏在)



c)  $N = 14$  (偏在ケース2, 中央に偏在)

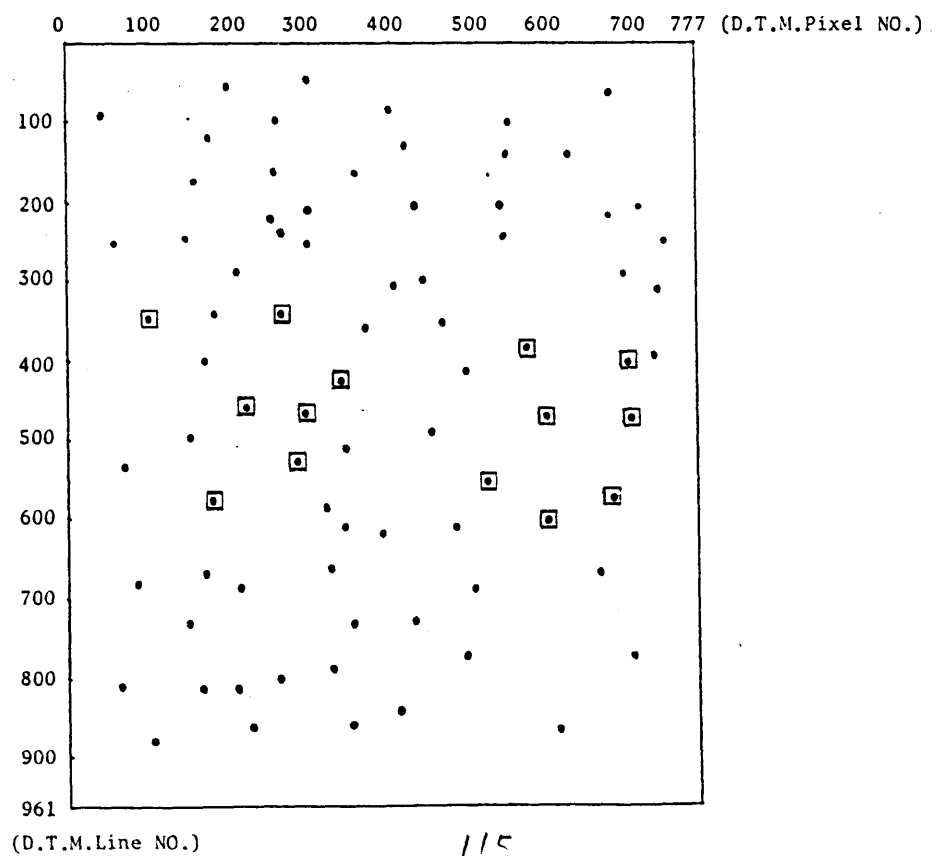


表 4.5 測定点の三次元測定誤差 (平均二乗誤差)

(単位:m)

| 基準点の分布 | 三次元測定誤差 |       |
|--------|---------|-------|
|        | 平面位置    | 標高    |
| 一様分布   | 4.40    | 4.57  |
| 偏在ケース1 | 11.6    | 13.3  |
| 偏在ケース2 | 168.0   | 194.0 |

注) ステレオ角 = 60°

## 2) 考察結果

i) 基準点の分布は 標定精度 および 三次元測定の精度に 非常に大きく影響する。

画像全体に 一様に基準点が分布している場合が 最も精度がよい。

また、画像の片側に偏在している場合 (ピクセル方向に偏在, ライン方向に一様分布) と、画像の中央部に集中している場合 (ピクセル方向に一様分布, ライン方向に偏在) と比較すると、後者の精度がかなり低い。

これは、リニアレイセンサの位置, および三軸姿勢が ライン番号の関数

として決定されることから、画像のライン方向の広い範囲にわたって基準

点が点在してはじめて 画像全体について 十分な精度で標定を行いうる

ためである。 すなわち、基準点がピクセル方向に偏在しているか、ライン方

向には 広い範囲で存在する場合は、画像全体について ある程度以上

の精度で 共線条件が再現されるか、ライン方向に偏在している場合は、

基準点のない画像部分での再現精度は 非常に低くなる。

### 4.3.3 衛星の位置・姿勢データの併用に関する検討

衛星による地形図作成が特に有効な地域では、一般に基準点の選点は困難であることが予想されることから、センサを搭載した衛星によって得られる位置・姿勢データを利用することによって標定モデルを安定させる必要な地上基準点を減少させることは極めて有用であると考えられる。

本節では衛星の位置・姿勢データの利用による地上基準点の必要点数の減少の可能性について検証する。

#### 1) シミュレーション結果

シミュレーションで想定した衛星の位置・姿勢データの精度および観測回数  
は表4.6のとおりである。

衛星位置の計測精度については現在のLANDSAT衛星におけるもの<sup>(1)</sup>(ケース1)とG.P.S (Global Positioning System)の利用を仮定したもの<sup>(1)</sup>(ケース2.3)を採用している。また衛星姿勢の精度及び観測回数については、ランドサット4,5号に用いられているM.M.S. (Multimission Modular Spacecraft)におけるもの<sup>(1)</sup> (ケース1,2)とより計測技術が進歩する

と予想されている。マップサット<sup>(2)</sup>におけるもの(ケース3)を、いっぺん修正して用いている。

表4-6 衛星データの精度によるシミュレーションのケース(1~3)

| ケース  | 1 σ 値 |     |     |         |         |         | 備 考                    |
|------|-------|-----|-----|---------|---------|---------|------------------------|
|      | ΔX    | ΔY  | ΔZ  | ΔW      | Δφ      | Δk      |                        |
| ケース1 | 80m   | 80m | 80m | 0.01°   | 0.01°   | 0.01°   | ランドサット4.5号程度           |
| ケース2 | 10m   | 10m | 10m | 0.01°   | 0.01°   | 0.01°   | G.P.Sを利用したランドサット4.5号程度 |
| ケース3 | 10m   | 10m | 10m | 0.0025° | 0.0025° | 0.0025° | 衛星姿勢測定技術の進歩(MAPSAT程度)  |

注) 画像上の基準点回りの中等誤差は0.3ピクセルと経験的に想定する。



シミュレーションにおいて与えられる衛星の位置・姿勢の観測データは、表4.1の計測精度(1σ値)に等しい分散を持つ正規乱数を真値に加えることによって得られる。

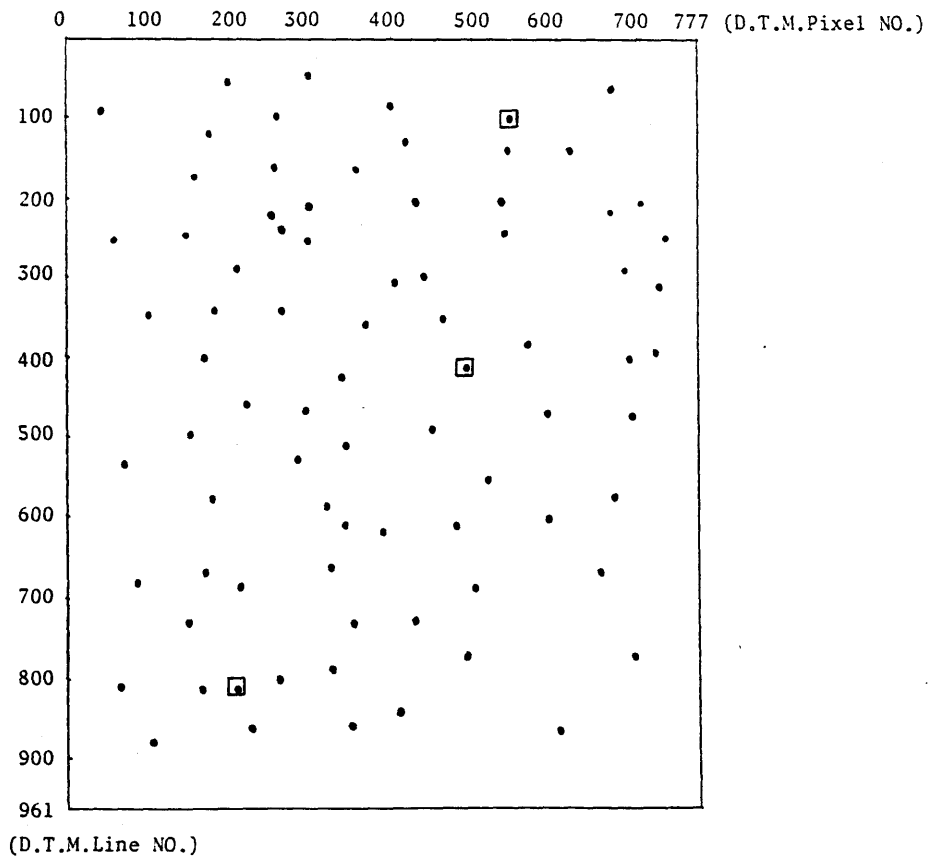
また、画像上の基準点回りの中等誤差は基準点だけを用いた標定の結果より0.3画素としている。表4.1の計測精度(1σ値)および基準点回りの中等誤差の逆数を重みとして標定を行う。

図4.6に地上基準点の数および分布を示す。

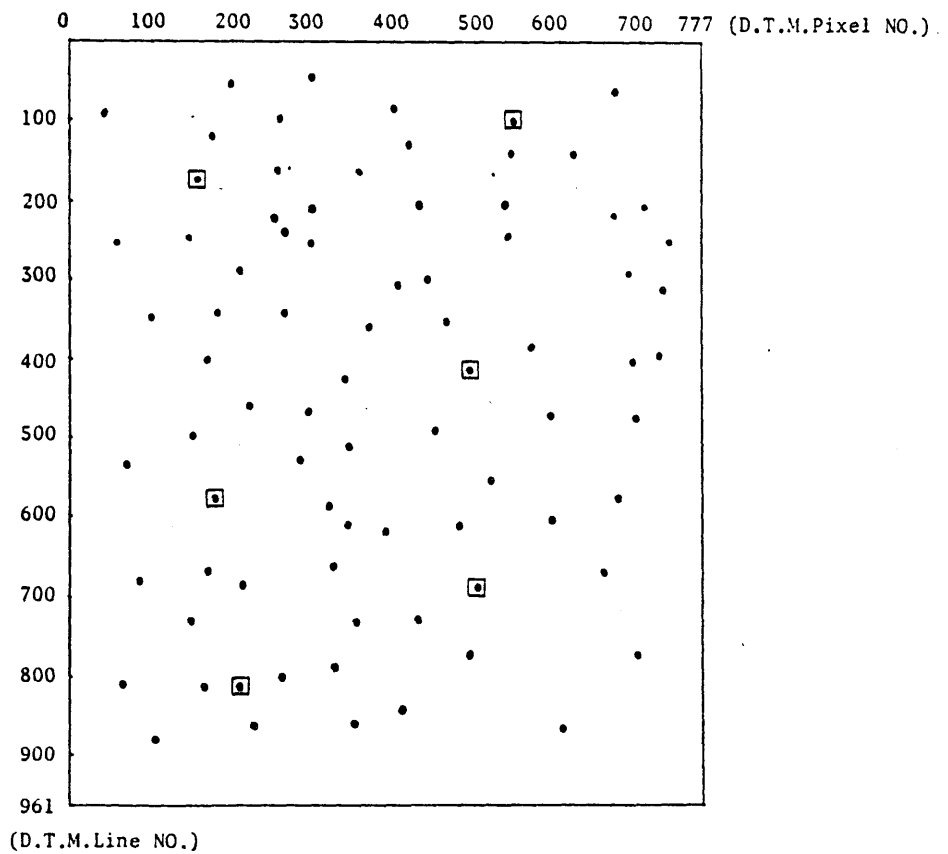
表4.7は地上の検証点(点数は各ケースにより若干異なるが約50点)における三次元測定の誤差を衛星データの利用の有無について比較したものである。これによると衛星データの利用により少ない基準点数でも十分な精度をあげられることがわかる。

图4-6 地上基準点分布 (基準点数: N)

a)  $N = 3$



b)  $N = 6$



c)  $N = 10$

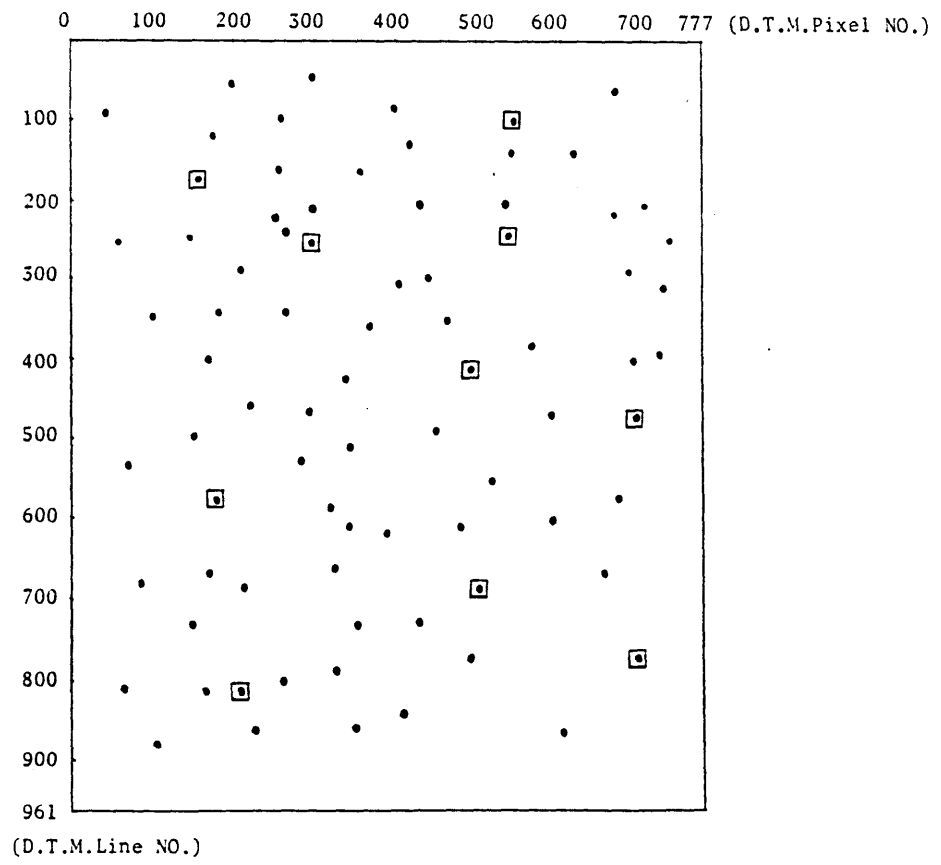


表 4.7 衛星データの計測精度による三次元測定精度の変化  
(平均二乗誤差)

| 基準点数   | ケース1 |      | ケース2 |      | ケース3 |      |
|--------|------|------|------|------|------|------|
|        | 平面位置 | 標高   | 平面位置 | 標高   | 平面位置 | 標高   |
| N = 0  | 60.9 | 165. | 42.7 | 154. | 20.0 | 39.8 |
| N = 3  | 16.4 | 96.6 | 19.0 | 81.4 | 6.15 | 21.4 |
| N = 6  | 4.92 | 6.27 | 4.55 | 5.87 | 3.72 | 5.08 |
| N = 10 | 3.52 | 5.31 | 3.26 | 5.05 | 3.13 | 4.10 |

(単位: m)

注) ステレオ角 = 60°

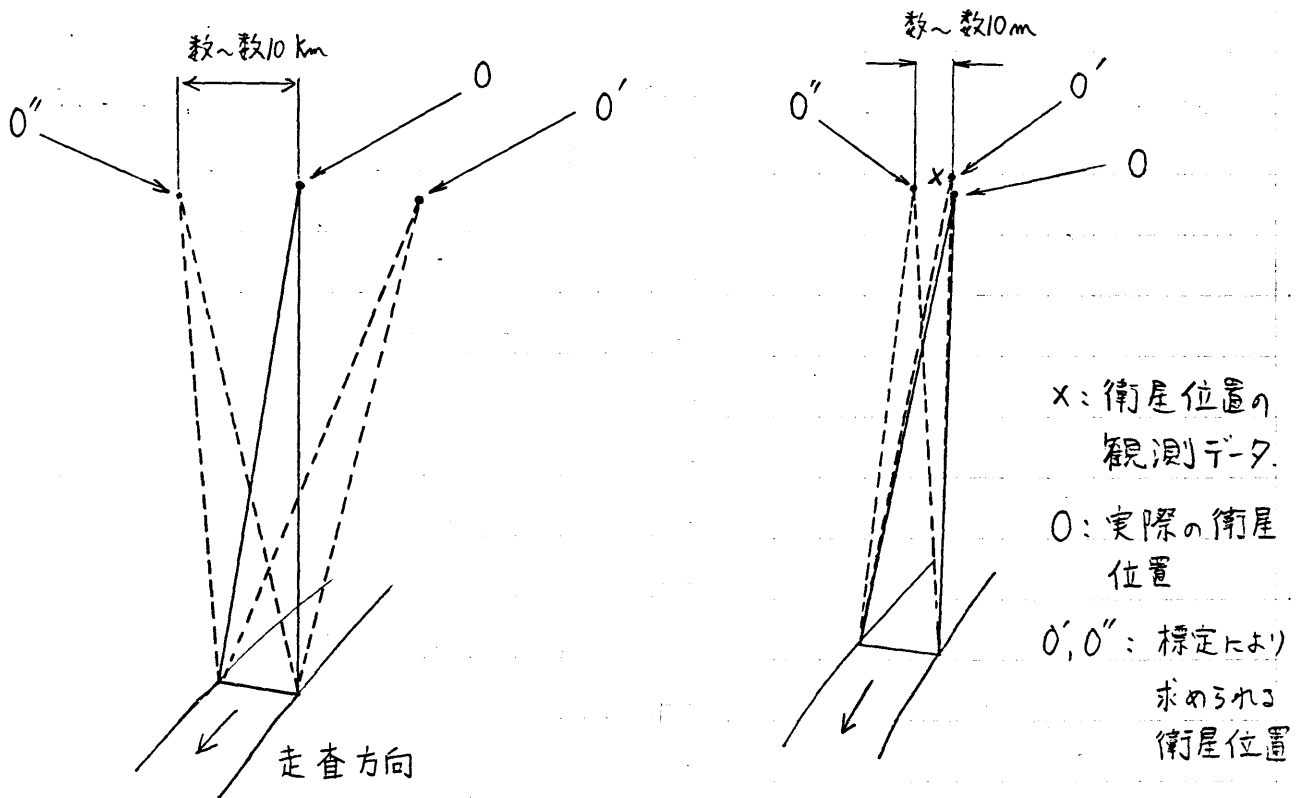
## 2) 考察結果

1) 衛星の位置、姿勢データを地上基準点と併用することにより、標定の精度は大きく向上する。向上度は特に基準点数が少ない場合に著しい。これは、衛星搭載のリニアライセンサが走査角が狭く、また平行投影方式であるといった特性を持ったため、標定モデルが幾何学的に非常に不安定であり、地上基準点のみを用いた標定では精度の良く標定要素を求めることが困難であるのに対し、衛星データを制約条件として与えることにより、図4に示すように標定モデルの安定性が大きく向上し、安定的な解を得られるようになったためである。(したがってこの効果は基準点数が少なく標定モデルが特に不安定な時に有効である。)

2) 衛星の位置、姿勢データの計測精度が向上するに伴って、標定の精度も向上する。その向上度は地上基準点が少ない場合に大きく、地上基準点が多くなるにつれて小さくなる傾向がある。これは基準点数が少ない場合には標定モデルが不安定であり、標定精度が衛星デー

タの計測精度に影響されやすいためである。

図 4.7 衛星データの併用による標定モデルの安定化と  
標定精度の向上



a) 地上基準点のみを用いた場合の  
標定モデルの不安定性と  
標定精度の低下

b) 衛星データの併用による標定  
モデルの安定化と標定精度  
の向上

#### 4.4 まとめ

1) 本研究では 開発された 外部標定手法により、リニアアレイセンサの外部標定を精度良く行えることが 標定シミュレーションにより 確認された。

2) 標定精度は 地上基準点の数を増加させるに伴い 向上する。

また、基準点の分布の影響をうけやすく、分布が一様な場合に最も精度が良い。

3) 衛星の位置・姿勢データと地上基準点を併用して 標定を行うことにより、精度を保ちながら 基準点の数を大幅に減少させることができる。これは、衛星データの併用により リニアアレイセンサの標定モデルの安定性が 増加するためである。

## 第5章 画像相関を用いたステレオ対応点の自動探索



## 5-1 はじめに

一般にステレオ画像を用いて三次元測定を行うためには、画像センサ(航測カメラやCCDセンサ等)の撮影時の位置、傾きと各ステレオ画像上の測定対象点(ステレオ対応点)の画像座標を知ることによって、撮影時の光束の位置関係を再現し、それらの交点を求める必要がある。

画像センサの位置、傾きの計測方法(外部標定方法)については才3,4章で述べた通りである。一方、従来の写真測量においてはステレオ対応点の探索(ステレオ対応点の認識と画像座標の測定)は一般に図化機を用いて目視により行われている。しかしながら、衛星搭載のリニアアレイセンサ画像による三次元測定では以下のような理由から図化機に比べ画像相関を用いた自動探索が有利であると考えられることから、本研究では自動探索手法の検討を行う。

- 1) 写真が中心投影画像であるのに対しリニアアレイセンサ画像は平行投影画像であるため、一般の図化機は利用できない。
- 2) 衛星搭載のリニアアレイセンサ画像はデジタル画像であり、一般の写真のよう

に A/D 変換の必要がないため計算機によるデジタル処理に適した形態  
とよんでいる。また、画像相関による自動探索を行うことができれば、これまでの  
衛星リモートセンシング画像の場合と同様に汎用電子計算機により  
処理でき、処理場所等の制約が少なくなる。

3) 衛星画像は、一般の航空写真に比べて縮尺が小さいため建物等によ  
る地表面の不連続な起伏が相対的に小さくなっており画像相関が比  
較的適用し易いと予想される。さらに、航空写真において自動探索及び  
三次元計測を用いる場合には樹木にかくれた地表面の標高を樹冠標  
高(樹木頂部の標高)と区別して測定することが一般に困難であるが、衛  
星画像においては予想される標高測定の精度(10m程度)からみて、地表  
面の標高と樹冠標高の差をそれほど厳密に考える必要がなく樹冠標高か  
ら予想される樹木の高さを差し引く程度の簡単な処理でよいと考えられる  
こと等の理由により探索の自動化が比較的容易であると考えられる。

画像相関を用いたステレオ対応点の探索アルゴリズムは一般的に図5.1の  
ようにまとめられる。

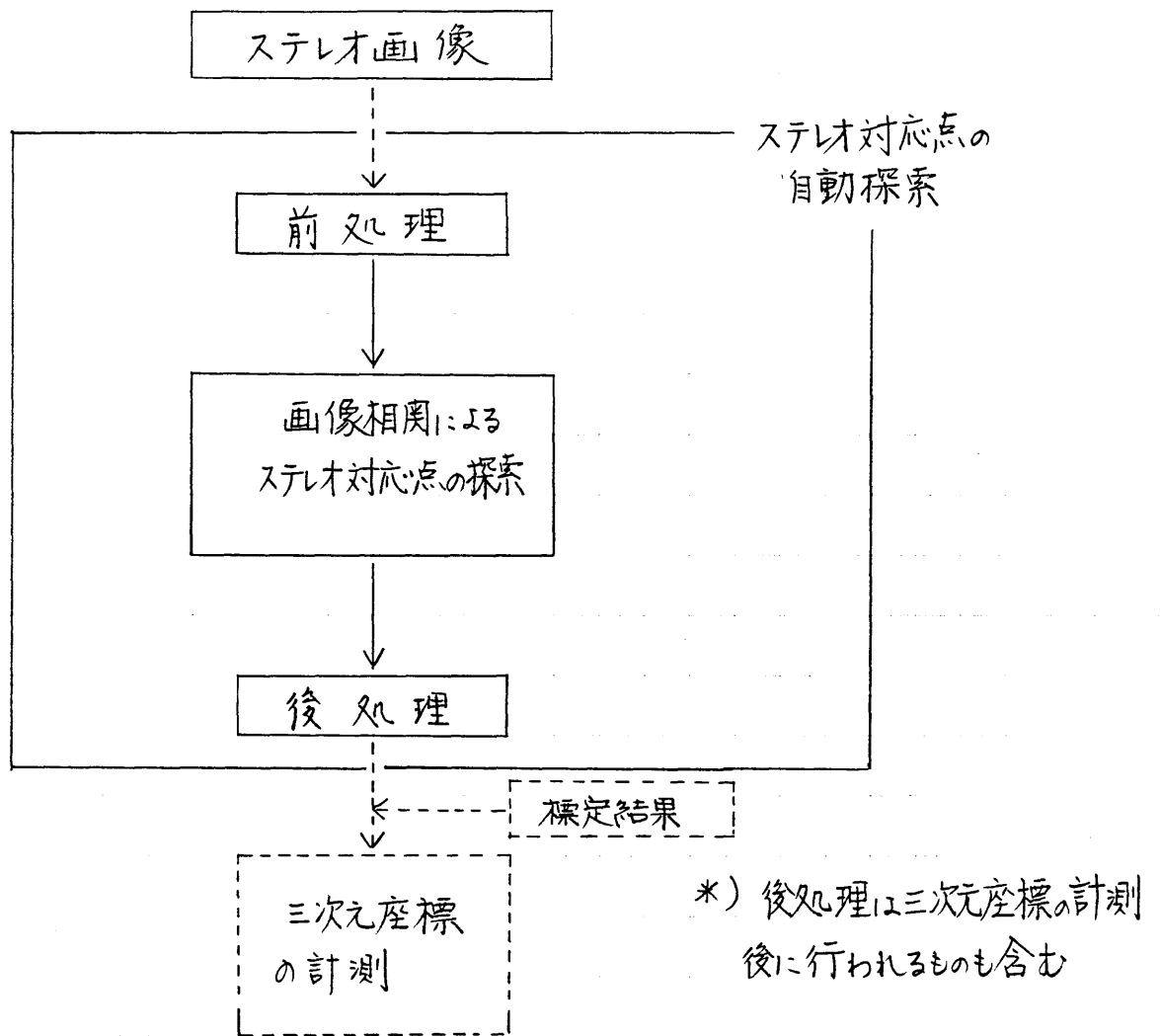


図 5. 1 ステレオ対応点の自動探索アルゴリズムのフロー

本研究では、アルゴリズムの基本的な検討を、前処理、ステレオ対応点の探索、後処理の各ステージについて行う。

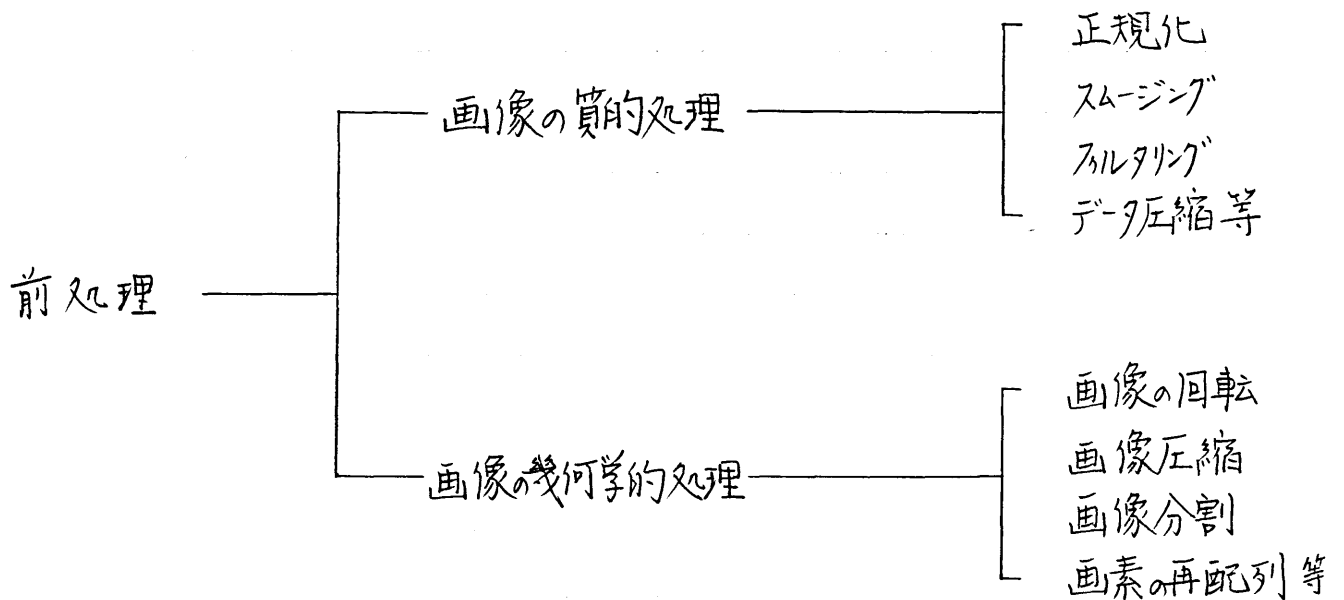
## 5-2 画像の前処理

### 5.2.1 既存の前処理手法

ここでいう画像の前処理とはステレオ対応点の自動探索の精度や速度を向上させるために、自動探索に先だって画質の改善や画素の並べかえ等を行うものである。

前処理は画像の質的处理 (photometric preprocessing) と画像の幾何学的な処理 (locational pre processing) に分けられる。<sup>(1)</sup> 本節では、既存の画像前処理手法について航空写真における例を中心としてまとめる。

図 5-2 画像の前処理の分類



## (1) 画像の質的处理

画像相関によるステレオ対応点の自動探索精度は画像の画質により大きな影響をうける。例えば、画像の雑音、地形の起伏によって生ずる陰影、積雪や雲などセンサのダイナミックレンジを超えて飽和している部分などは自動探索の精度を低下させる大きな要因である。したがって対応点の自動探索を行う前に画像の前処理により雑音等を除去することが重要となる。

表 5-1 に自動相関の誤り (ミスマッチ) を引き起こす画質上の要因と、それらの要因除去のために考えられる前処理方法について示す。

表 5-1 画像の自動相関精度の低下要因とその前処理手法

|            | 精度の低下要因                                                                                         | 前処理手法                                                                                                                                                                                                                  |
|------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| センサに起因するもの | <ul style="list-style-type: none"> <li>画像(センサ)のノイズ</li> <li>センサの検知素子の感度特性の差によるラインノイズ</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>高周波成分の除去<br/>(近傍平均, ローパスフィルタ<sup>(2)(3)(4)</sup>等)</li> <li>各検知素子のキャリブレーション</li> <li>累積頻度曲線を利用したラインノイズの除去<sup>(5)</sup></li> <li>ランダムノイズ付加によるラインノイズの除去<sup>(6)</sup></li> </ul> |

|                     |                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|---------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>撮影条件に起因するもの</p>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>光学系の周辺減光</li> <li>太陽光の反射</li> <li>地形の起伏等による陰影</li> <li>撮影時間、方向の違いによる画像間の輝度レベルの差</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li><math>\cos^4 \theta</math> 補正, シェイプング曲面の作成による補正<sup>(7)</sup>等</li> <li>同上, あるいはサンスポット部分の抽出・除去<sup>(7)</sup></li> <li>陰影部の抽出・除去<sup>(8)</sup></li> <li>正規化等<br/>斜面の方向の違い等によって生ずる局所的な輝度レベルの差は画像の自動相関を行う際にある程度考慮<sup>(9)</sup>し、その影響を減少させる例がある</li> </ul> |
| <p>地表の状態に起因するもの</p> | <ul style="list-style-type: none"> <li>規則的な輝度の変化 (テクスチャ)</li> <li>積雪、雲など一様な輝度の分布</li> </ul>                                       | <ul style="list-style-type: none"> <li>規則的な変化パターンに対応する周波数成分の除去等</li> <li>ローパスフィルタ (相関窓の拡大等)</li> <li>一様部分の除去<sup>(8)</sup></li> </ul>                                                                                                                                                          |
| <p>その他</p>          | <ul style="list-style-type: none"> <li>自動相関精度を<sup>向上</sup>目的としたエッジ強調</li> </ul>                                                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>ラプラシアン等によるエッジ強調<sup>(1), (17)</sup></li> </ul>                                                                                                                                                                                                          |

## (2) 画像の幾何学的処理

画像の幾何学的処理とはステレオ対応点の無駄な探索や、画像の歪による

自動相関のエラーを減らすために、画像(画素)の再配列や画像の圧縮等を行うことである。代表的な幾何学的処理の例を以下にあげる。

1) 共役直線に沿った画素の再配列 <sup>(2), (8), (9), (10), (11), (12)</sup>

これはレンズカメラによるステレオ写真において一般的に用いられる手法である。

共役直線とは図 5.3 に示すように投影中心  $(O, O')$  を含む共役手面と投影面との交線である。右写真(左写真)の共役直線上の地点は左写真(右写真)とも同じ共役直線上に存在するため、探索範囲を共役直線上に限定することができる。

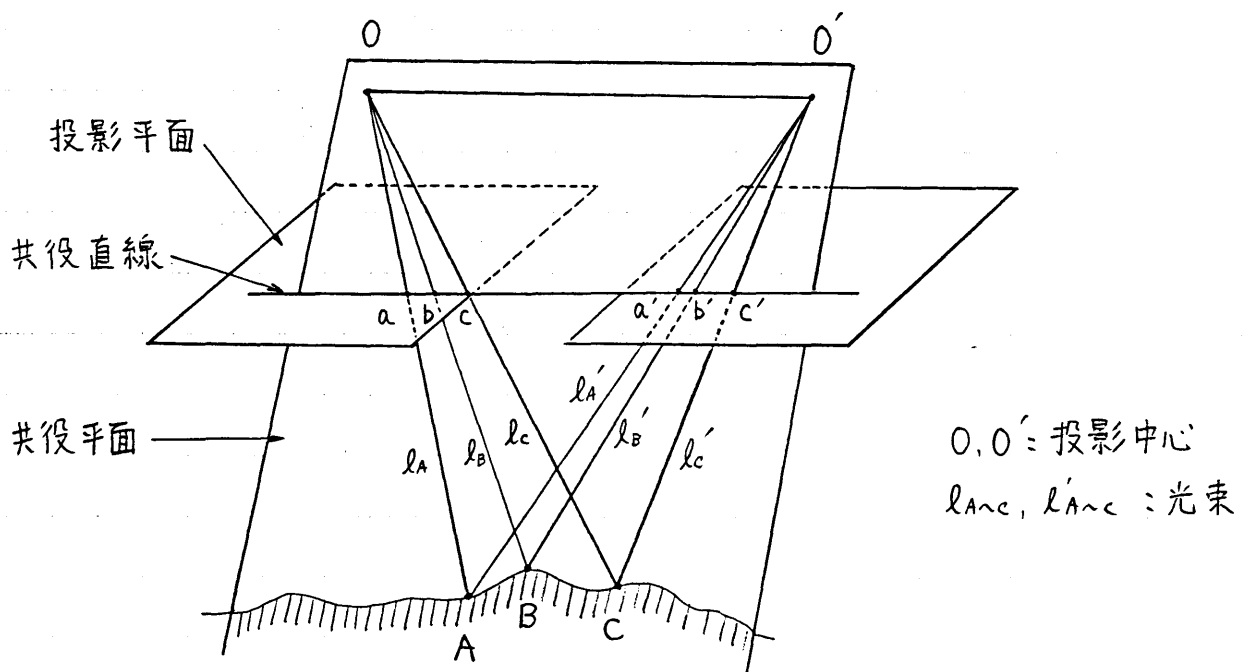


図 5.3 共役直線と共役平面

さらに、画像のライン、あるいはピクセル方向が共役直線に一致するように共役直線に沿って画素の再配列を行うことにより、探索アルゴリズムを単純化できる。

## 2) 画像の圧縮による階層構造化 <sup>(2), (8), (13)</sup>

画像に、近傍平均セローパスフィルタをほどこし高周波成分を除去した上で、間隔をあげてリサンプリングを行うことにより画像を圧縮し、この圧縮を順次くり返すことにより画像を階層化する。(図5.4参照)

対応点の探索はまずレベル上位の画像( $S$ の値の大きいもの)で行なわれる。

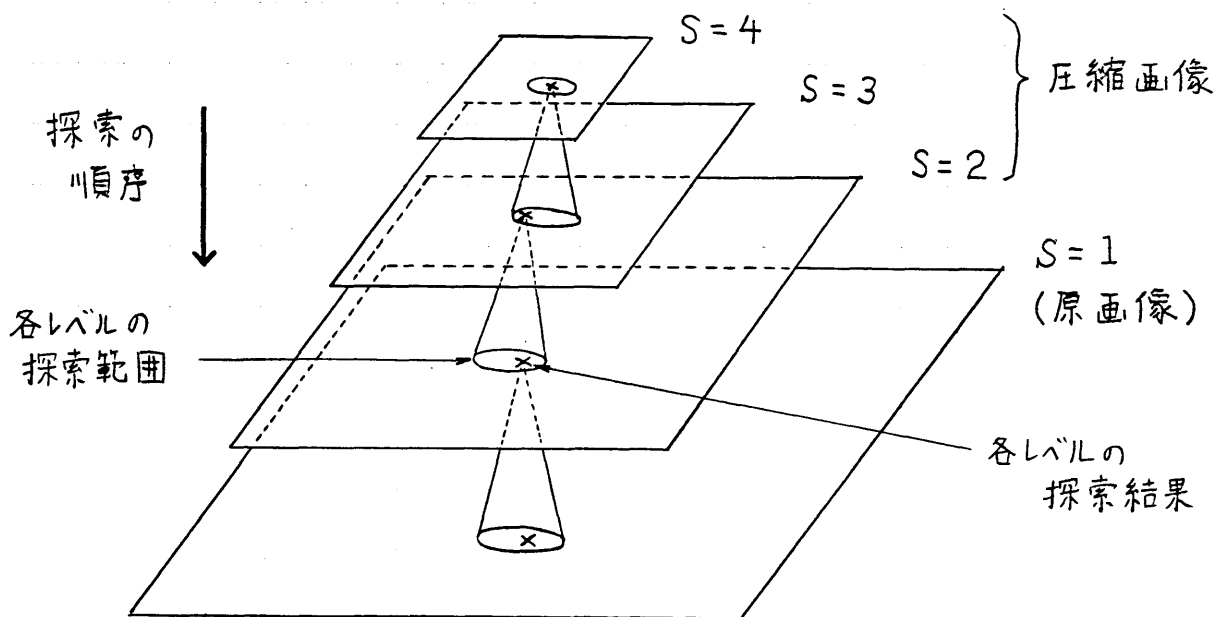


図5.4 画像の階層化と対応点の探索



次にその結果にもとづいてレベルが1つ下の画像で探索を行い、順次、最低レベルまで続ける。レベルが上位の画像の1画素は下位の画像の何画素分かに相当すること、また低周波成分からなる画像においては画像相関の精度が安定的であることから、上位画像に行ける探索は下位画像の探索に対して信頼性の高いマッチング予想点を効率良く与えることができる。これによって、探索結果の信頼性の向上、計算速度の向上が可能になる。

## 5.2.2 本研究における前処理方法

### 1) 画像の質的处理

本研究では、シミュレーション画像に対して質的处理は行っていない。これは本研究で作成したリアレイセンサのステレオ画像にはセンサに起因する雑音や撮影方向の差による輝度の変化等が含まれていないこと、またテストエリアには地形の起伏による陰影や雪や雲等による一様輝度の部分がそれほど多くないこと等によっている。

なお、既往の前処理手法の検討例からみて、画像の自動相関を後述する面積相関手法により行う場合には、リアレイセンサ画像についても表5.1にあげたような既存の手法を適用することによって効果を上げることができると考えられる。

### 2) 画像の幾何学的処理

リアレイセンサ画像は平行投影画像であり、1枚の画像の中で投影中心が移動するため、中心投影のステレオ画像(例:ステレオ航空写真)におけるような共役平面、共役直線が存在しない。そのため、リアレイセンサのステレオ画像では、共役直線によってステレオ対応点の探索を行うことにより、探索範囲を2次元から

1次元に減少させることができない。そこで本研究では リニアレイセンサ画像を  
 水平面に投影し、近似的な共役直線(擬似共役直線 (quasi-epipolar line))  
 (図5.5参照)  
 によって画像を再配列することによって 2次元の探索領域をほぼ1次元にする方法を  
 開発した。

その方法をセンサの搭載方式(前後方式, 左右方式)別に以下に述べる。

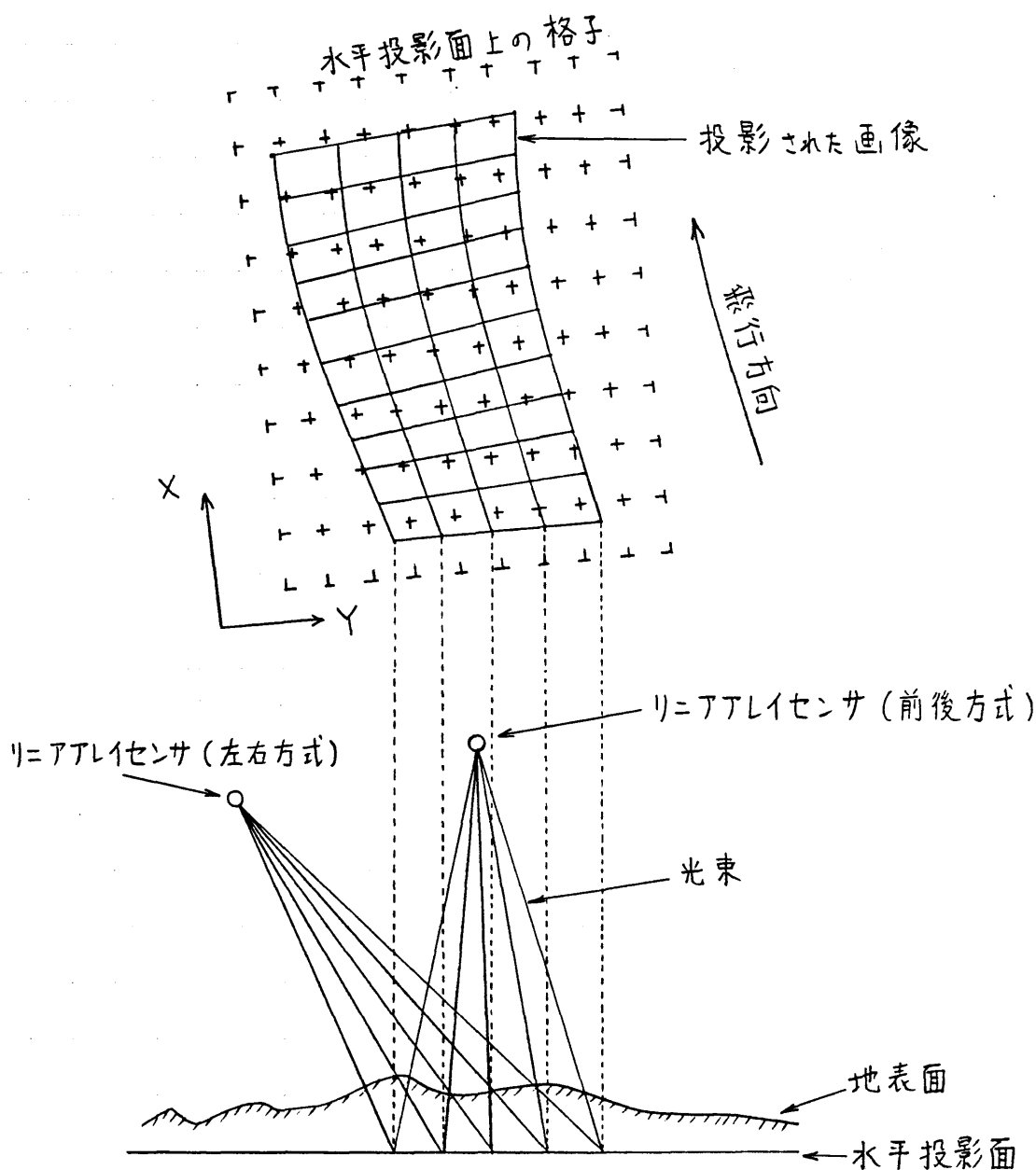


図 5.5 水平面への投影によるリニアレイセンサ画像の再配列

a) 前後方式 (STEREOSAT, MAPSAT型) (図 5.6 参照)

i) 計測対象の地表面にできるだけ近く水平投影平面 ( $Z = \text{一定}$ ) を設定する。

ii) ステレオ画像 (画像1及び2) に対応する衛星軌道区間 (図中の太線)

を抽出する。

iii) 各軌道区間両方に対して残差ができるだけ小さくなるように直線  $l$  を

とる。(各軌道区間はほぼ直線であることから、各軌道区間の中点をとり、直

線で結んで  $l$  とすればよい)

iv)  $l$  を含み、水平投影面に垂直な平面を設定し、その平面と水平投影面

との交線を求める。その交線 (擬似共役直線) を  $X$  軸とし、それに垂直な方

向を  $Y$  軸とする座標系を設定する。

v) リニアレセンサ画像を水平投影面に投影し、各画素の画像座標を上

記の  $X-Y$  座標系に変換するとにより画像の再配列を行う。

擬似共役直線の  $Y$  視差は図 5.6 中の画像1上の点  $G_1$  とそのステレオ対

応点である画像2上の点  $G_2$  の間の  $Y$  座標の差 ( $\Delta y$ ) であり以下の式で表

わられる。

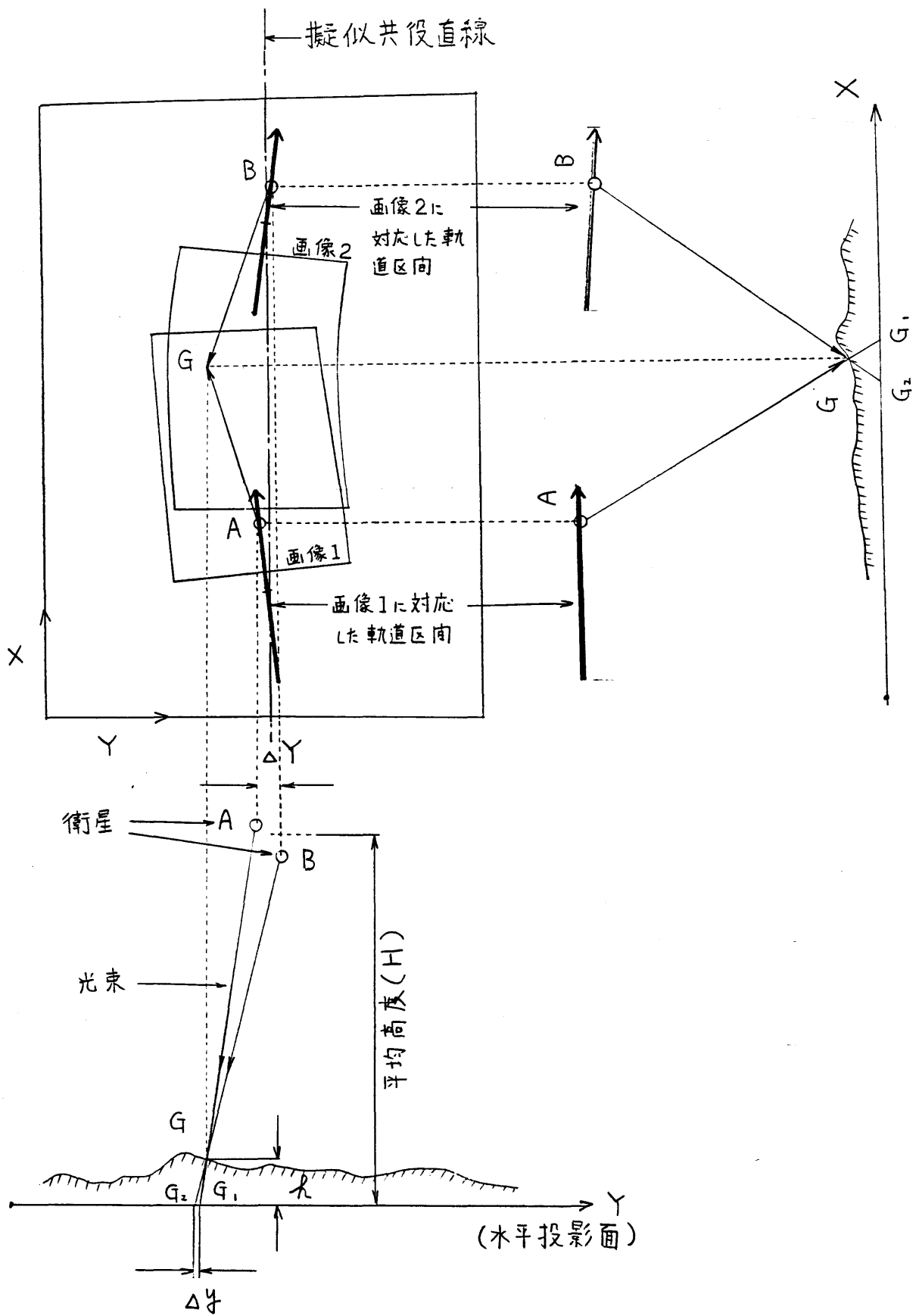


図 5.6 リニアアレインサ画像の水平面投影による再配列  
(前後方式)

$$\Delta y \approx \frac{h}{H-h} \cdot \Delta Y \quad (\text{式 5.1})$$

$$\approx \frac{h}{H} \Delta Y$$

( $\because H \gg h$ )

$\Delta Y$ : 点Gを走査した時の衛星位置(A点, B点)のY方向の差

$h$ : 点Gと水平投影面との標高差

衛星の平均飛行高度(H)を約 600 km とすると、画像 1, 2 の各軌道区間の間  
(及び B/H 比を 1.0)

の距離は約 600 km となる。約 600 km の軌道長であれば衛星位置は時

間の1次式を用いて、650 m 程度の精度で表わされることから  $\Delta Y$  はその2倍

程度の値をとると考えられる。したがって  $h$  を約 1000 m と仮定すると、(式 5.1) より

$\Delta y$  は  $(1/600) \times \Delta Y$ 、すなわち 2 m 程度の大きさとなり、地上での画素の大きさ

(10 m x 10 m) からみて十分小さいといえる。さらに、画像を水平面に投影する時

に用いる衛星の位置、姿勢の時間変化データは標定結果より与えられるが、その

精度は地上で 0.3 ~ 0.4 画素であること、および再配列に伴う量子化誤差を

考慮して  $\Delta y$  (擬似共役直線のY視差) は 1画素以内におさまると

考えられる。このことより、ステレオ対応点の自動探索は擬似共役直線上とその両側

1画素程度の範囲を行えばよいことがわかる。

注) 表 2.2 によると、82 秒間の飛行時間(軌道長約 570 km)で衛星位置(経度)を時間の1次式により近似した場合、6ヶ所の平均二乗誤差は  $9.3 \times 10^{-5}$  rad でありこれは、約 650 m に相当する。

b) 左右方式 (SPOT 型) (図 5.7 参照)

i) 地表面近くに水平投影平面 ( $Z = \text{一定}$ ) を設定する。

ii) ステレオ画像 (画像 1, 2) のオーバーラップ部に映っている地表上の点  $G$  を適当に何点か選び、外部標定の結果を用いて点  $G$  を通る光束 ( $l_1, l_2$ ) と水平投影面との交点  $G_1, G_2$  を求める。直線  $G_1, G_2$  群の平均的な傾きと等しい傾きを持つ直線を擬似共役直線とする。

iii) 擬似共役直線の方角を  $Y$  軸, それに垂直な方向を  $X$  軸とする座標系を水平投影面上に設定する。その上でリンアレイセンサ画像を投影面上に投影し各画素の画像座標を  $X-Y$  座標系に変換 (再配列) する。

擬似共役直線の  $X$  視差は図 5.7 中の点  $G'_1, G'_2$  の  $X$  座標の差 ( $\Delta X$ )

で表わされる。  $\Delta X$  は近似的に以下の式で与えられる。

$$\Delta x \approx \frac{h}{H-h} \cdot \Delta X$$

$$\approx \frac{h}{H} \cdot \Delta X \quad (\text{式 5.2})$$

$\Delta X$  : 点  $G'$  を走査した時の衛星位置 ( $O'_1, O'_2$ ) の  $X$  軸方向の差

$H$  : 衛星の平均飛行高度  
 $h$  : 点  $G'$  と水平投影面との標高差

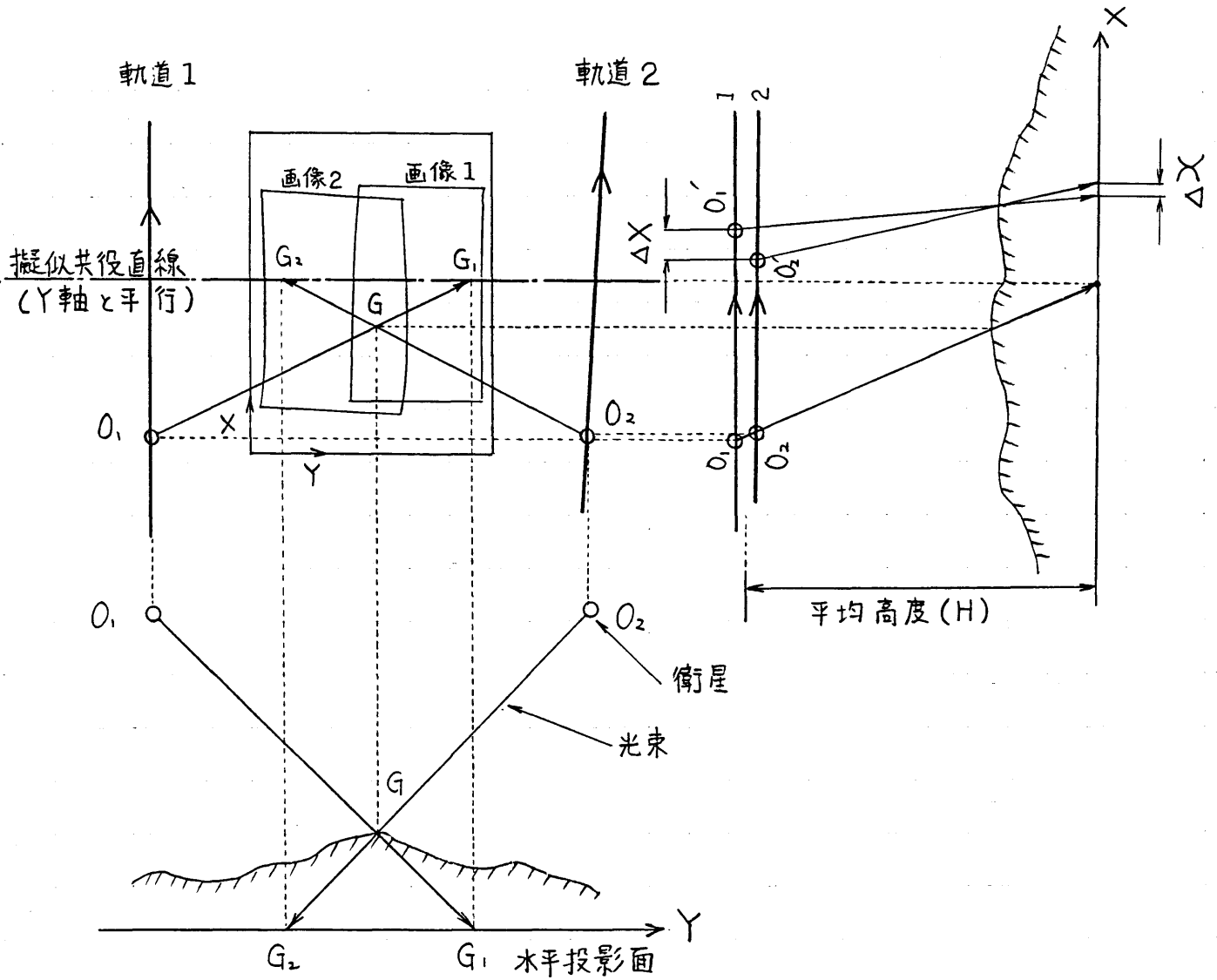


図5.7 a) リニアレイセンサ画像の水平面への投影による再配列  
(左右方式)



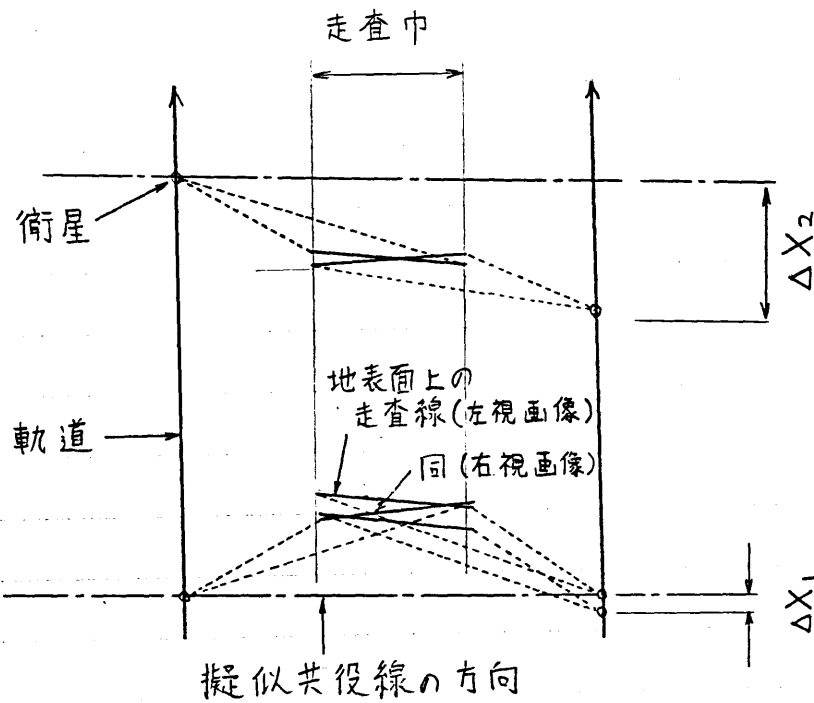


図5.7 b) 左右方式における  $\Delta X$  の変化

$\Delta X_1$  : 隣接軌道間のヨ-角の差によるもの  
(地表面上の走査線のなす角によるもの)

$\Delta X_2$  : 隣接軌道間のピッチ角の変化の差によるもの

$R \approx 1000\text{m}$ ,  $H \approx 800\text{km}$  と想定すると  $\Delta X$  が高々数  $m$  のオーダーになるためには,  $\Delta X$  は  $2000\text{m}$  程度以内になる必要がある。

ここで  $\Delta X$  は その発生要因に従って大きく 2つ ( $\Delta X_1$ ,  $\Delta X_2$ ) にわけられる (図 5.7b) 参照)。  $\Delta X_1$  は 例えば 左画像の

一走査線と交わる, すなわち ステレオ対応点を持つ 右画像の 走査線の ライン数 (右軌道上の 衛星位置の中) のことであり,

左画像と右画像の各走査線のなす角に 走査中を乗ずる

ことにより 近似できる。走査線のなす角は 左右の軌道間の

ヨー角の差にほぼ等しいと考えられる。ヨー角は ランドサット4号を

例とすると  $0.0 \sim 0.30 \cdot 10^{-3}\text{rad}$  (約 490 秒角) の角を変動して

いる。これから, SPOT 衛星では隣接軌道

間のヨー角の差は高々  $10^{-2}\text{rad}$  のオーダーと推察される。これにより

$\Delta X_1$  は  $1000\text{m}$  程度と求められる。

次に  $\Delta X_2$  は 画像走査中に生ずるピッチ角の変動によるものであり, ピッチ角の変動に高度を乗ずることで近似的に求め

られる。SPOT衛星の姿勢安定性は  $6 \cdot 10^{-4}$  deg/sec (MAX) と

言われており、ピッチ角の時間変動の中が  $1.25 \times 10^{-3}$  rad ( $\Delta X_2 = 1000$  m)

になるのに少なくとも 120 秒 (走査長 = 840 km) がかかることから、 $\Delta X_2$

= 1000 m 以内という想定は実用上 十分な走査長に対して

成立していると考えられる。

### 5.3 画像相関によるステレオ対応点の自動探索アルゴリズム

ステレオ対応点の自動探索は、

- 1) 探索結果の精度
- 2) " の信頼性
- 3) 探索速度

の3点で評価される。このうち3)については近年のハードウェア技術の進歩から見て、オフラインシステムにとってはそれほど大きな制約条件ではないと考えられ、1)、2)が自動探索のアルゴリズムを考える上で重要な目標となる。

一方、ステレオ対応点の探索アルゴリズムは与えられた範囲の中にあるステレオ画像上の対応点を画像相関等により探す部分(ステレオ相関ルーチン)と画像全体の多数の点について無駄な探索等ができるだけ少なくなるように探索範囲を設定しステレオ相関ルーチンをコントロールする(狭義の)探索手順の部分にわかれる。

本研究では前者について画像相関(面積相関)手法を利用してステレオ対応点の相関・精度及びその基本的な影響要因を検討した上で、2種類

の相関窓の併用による相関手法を提案している(5.3.1節)。また後者に対しては小数の既知の対応点からスタートし、次第に対応点の密度をあげながら探索を行っていく手順を提案している。(5.3.2節)

### 5.3.1 ステレオ対応点の相関精度に関する検討

#### 5.3.1-1 検討すべき要因の抽出

ステレオ対応点の相関精度に影響する要因は大きく

① 画像相関手法に関するもの ----- 相関の仕方、相関窓の大きさ等

② 画像そのものに関するもの ----- 画質、視差等

に分けられる。特に画像そのものに関する要因は、さらに

i) 雑音等による画質の低下

{ センサに起因するもの ----- スキャンラインノイズ等  
撮影条件に起因するもの ----- サンスポット等

ii) 地形等の起伏による画像の歪の大きさ

{ 視差による幾何的歪(視差), 隠ぺい等  
光線の反射方向の違いによる輝度の変化

iii) その他、地表面の状態等

{ 積雪, 雲, 陰影 ----- センサのダイナミックレンジを越える領域  
テクスチャなどの規則的な輝度のパターン

に分けることができる。ステレオ対応点の自動相関においては、そのステレオ画像の性質を(i)~(iii)に従って評価し、相関手法を適切に検討、選択する必要がある。

ステレオ対応点の自動相関手法については近年人間の実体視の能力を忠実にシミュレートすることによりステレオ対応点を得る方法が、人工知能の分野で進展を見せているもの<sup>(14),(15),(16)</sup>、今だ研究の途上<sup>(14),(15),(16)</sup>にあり、写真測量の分野では面積相関による手法が主に検討されてきている。これは、各ステレオ画像からある大きさを持った相関窓を切り出し、相関窓相互の類似度(相関)が最大となるペアをステレオ対応点とする方法である。

前者の手法は、主に実験室の中等の極めて限定された条件下では、対象物の起伏の不連続性等にもよく追従できる特長を持っている。一方、後者の手法はテクスチャやコントラストに富み、また光線<sup>(14),(15),(16)</sup>の方向等もその度に異なるような屋外画像(自然地形の画像など)に対して実用的観点から見て、ある程度の精度をあげてはいるケースもあるものの、標高の急激な変化や視差による隠れ(occlusion)等にうまく対応できないという欠点を持っている。そこで

人工知能分野で得られた成果を従来の手法に応用することによりこの欠点を改善しようという試みがなされている。<sup>(17)(23)(24)</sup>

衛星からのリニアレイセンサ画像は、地上解像力が一般の航空写真に比べかなり低いため、地形や人工構造物による起伏の急激な変化がみられる傾向にあり、また B/H 比の大きさ (0.0 ~ 1.0) から見て視差による隠れが広範囲にわたって生ずることはいはれ考えられる。したがって、本研究では面積相関による方法について検討する。

面積相関手法において相関の精度に影響する基本的な要因は

- i) 相関窓の間の相関度 (類似度)……相関係数、絶対差の和等
- ii) 相関窓の大きさ、形状
- iii) 探索範囲の大きさ

がある。

したがって本研究では日本アルプス周辺をテストエリアにして作成したリニアレイセンサのシミュレーション画像を用いて表 5.2 に示したような要因について、相関精度に与える影響について検討する。なお、ここで検討対象から (i) 雑音



等による画質の低下、(ii) 地形等の起伏による光線の反射方向の違いから生ずる輝度の変化が除かれているが、それはそれぞれ以下のような理由による。

① 雑音等は 5.2 節で示した方法によりかなりの程度除去することが可能であると考えられる。また、これらの雑音をシミュレーションで再現することは困難であり、本研究におけるシミュレーション画像においても雑音は考慮されていない。

② リニアレイセンサによる衛星画像は地上解像力が高々  $10\text{m} \times 10\text{m}$  程度であるため、一つの画素の中に様々な反射率や向きを持つ対象物が混在している。そのため、画素全体として見た場合、地表面は乱反射面に近くなっており、光線の反射方向（撮影方向）によって生ずる輝度の変化は相対的に小さくなると考えられる。

表 5.2 ステロ対応点の自動相関手法について本研究で検討する要因

|                               |                                                                                                            |
|-------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>画像相関<br/>手法に関する<br/>もの</p> | <ul style="list-style-type: none"> <li>◦ 画像相関度(類似度)のとり方</li> <li>◦ 相関窓の大きさ等</li> <li>◦ 探索範囲の大きさ</li> </ul> |
| <p>画像そのものに<br/>関するもの</p>      | <ul style="list-style-type: none"> <li>◦ 地形の起伏による画像の幾何的歪(視差)</li> <li>◦ 地表面の状況等<sup>注)</sup></li> </ul>    |

注). テストエリアはテクスチャA:富んぶ山地部とテクスチャB:乏しい平野部(田畑, 市街地等)よりなっており, その範囲内で検討する。

## 5.3.1.2 各要因の検討結果

### 1) 画像相関(類似度)のとり方に関する検討

画像の相関のとり方については相関係数をはじめとしていくつかの方法が提案され、また比較されてきている。現在のところ、一般的な画像全てについて優れているという評価をうけているものはないが、写真測量の分野では相関係数(2), (8), (11), (12)や相互相関による例が比較的多いようである。

本研究では、相関係数による手法と、各画素値の絶対差の総和による(19)など手法をマッチング精度及び計算時間について比較した。

#### a) 相関係数を用いた手法

画像間の相関度を相関係数で評価し、相関係数が最大となる点を対応点とする。相関係数の定義を式 5-3 に示す。

< 画像 A, 画像 B の相関係数;  $r_{AB}$  >

$$r_{AB} = \frac{S_{ab}}{\sqrt{S_{aa} \cdot S_{bb}}} \quad (5-3)$$

$$S_{ab} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (a_{ij} - \bar{a})(b_{ij} - \bar{b})$$

$$S_{aa} = \sum_{\text{det}} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (a_{ij} - \bar{a})^2$$

$$S_{aa} = \sum_{\text{det}} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (a_{ij} - \bar{a})^2$$

$$S_{bb} = \sum_{\text{det}} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (b_{ij} - \bar{b})^2$$

$$\bar{a} = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M a_{ij}$$

$$\bar{b} = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M b_{ij}$$

$$\begin{aligned} \{a_{ij}\} &: \text{画像 A} \\ \{b_{ij}\} &: \text{画像 B} \end{aligned} \quad \left( \begin{array}{l} 1 \leq i \leq N \\ 1 \leq j \leq M \end{array} \right)$$

## b) 画像間の絶対差の総和を用いる方法

画像間の相関を画素の値の絶対差の総和で評価し、その総和が最小になる点を対応点とする。総和に対して一定のしきい値を設けておき、ある画像についての絶対差の和がそのしきい値をこえると、そこで計算を打ちきる。これにより計算時間を短縮できる。

< 画像 A, 画像 B の絶対差 ;  $S$  >

$$S = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M |a_{ij} - b_{ij}| \quad (5-4)$$

$\{a_{ij}\}$  : 画像 A. ( $1 \leq i \leq N$   
 $1 \leq j \leq M$ )

両手法の比較条件を以下に示す。

a) 対応点の自動認識を二次元画像で行う。(T=T'は探索範囲は、ライン方向のみである。)

b) 絶対差による方法については、しきい値を設定した。

すなわち、ある点の探索のしきい値には、それ以前の探索で得られた絶対差の総和の中の最小値を選ぶ。したがって全点の探索の終了時にはしきい値は、探索範囲内の絶対差の和の最小値に等しくなっている。

c) 計算時間を相関パッチのサイズ、探索範囲の広さを変えて比較した。

図 5.8 にテストエリア画像を示す。

(比較結果)

(1) 相関精度の比較結果 (表 5.3 参照)

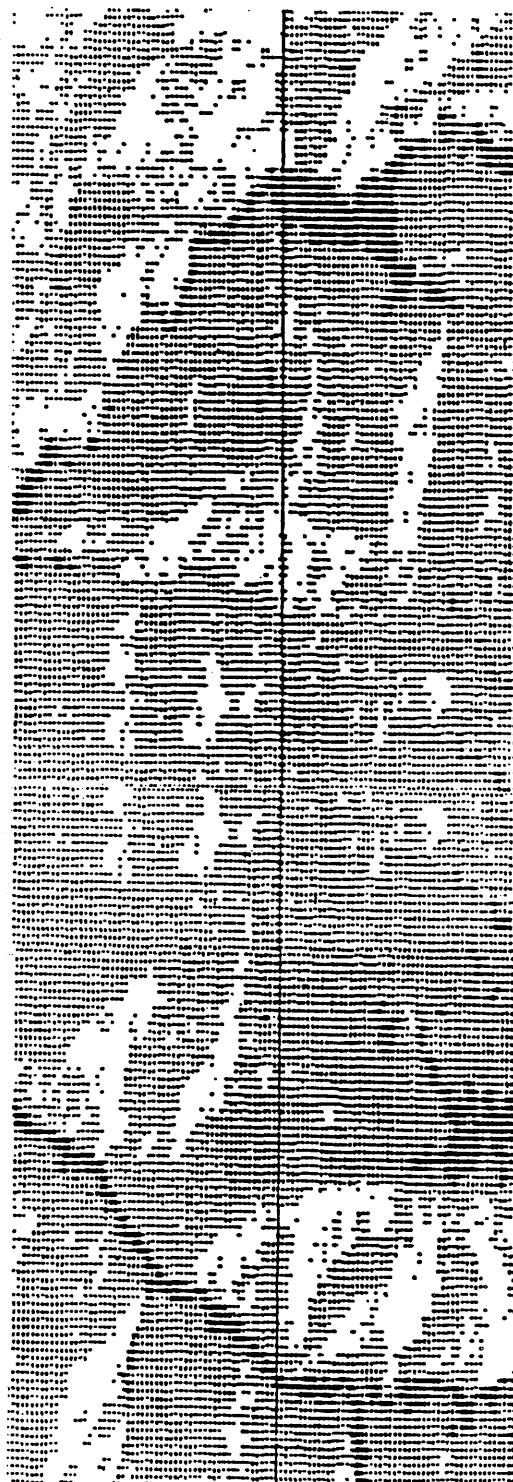
図 5-8 比較テストのテストエリア (ステレオ角 = 60°)

a) 前視画像

b) 後視画像



↑  
探索ライン



↑  
探索ライン

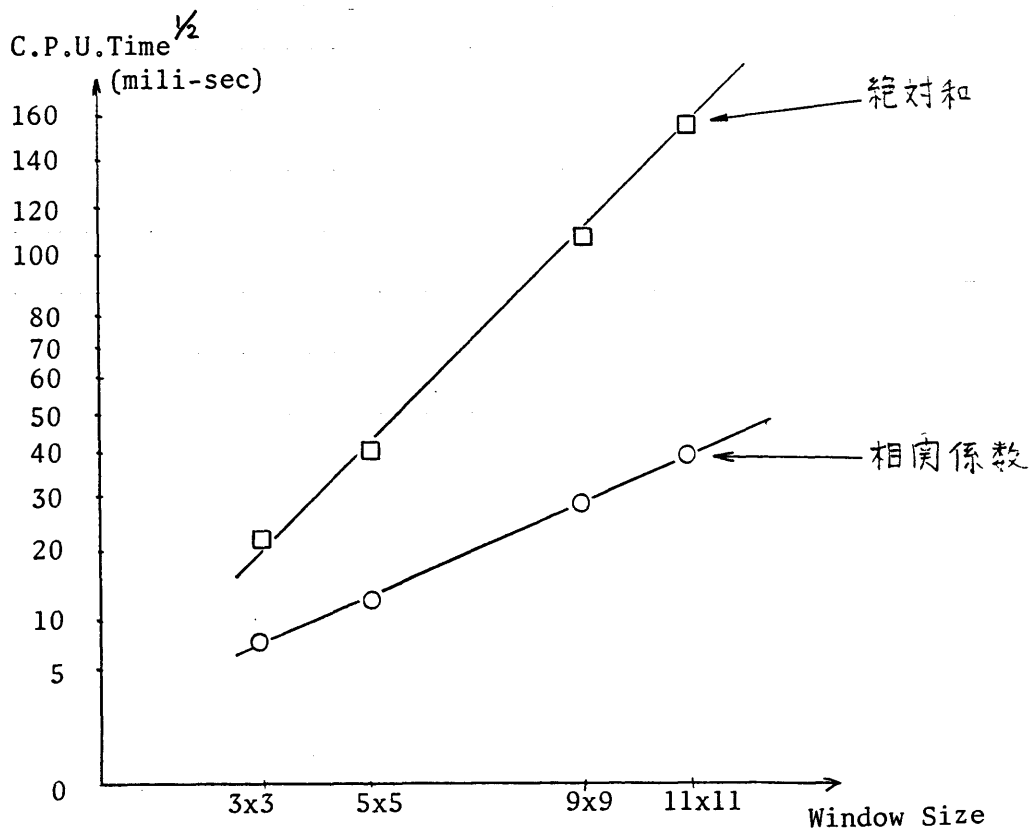
表 5.3 相関精度の比較 (R.M.S.E. 単位: ピクセル)

| パッチサイズ  | 相関係数 | 絶対差の和 |
|---------|------|-------|
| 5 x 5   | 1.88 | 3.85  |
| 9 x 9   | 1.59 | 1.64  |
| 11 x 11 | 1.60 | 2.56  |
| 33 x 33 | 4.25 | 4.26  |

(サンプル数 = 100)

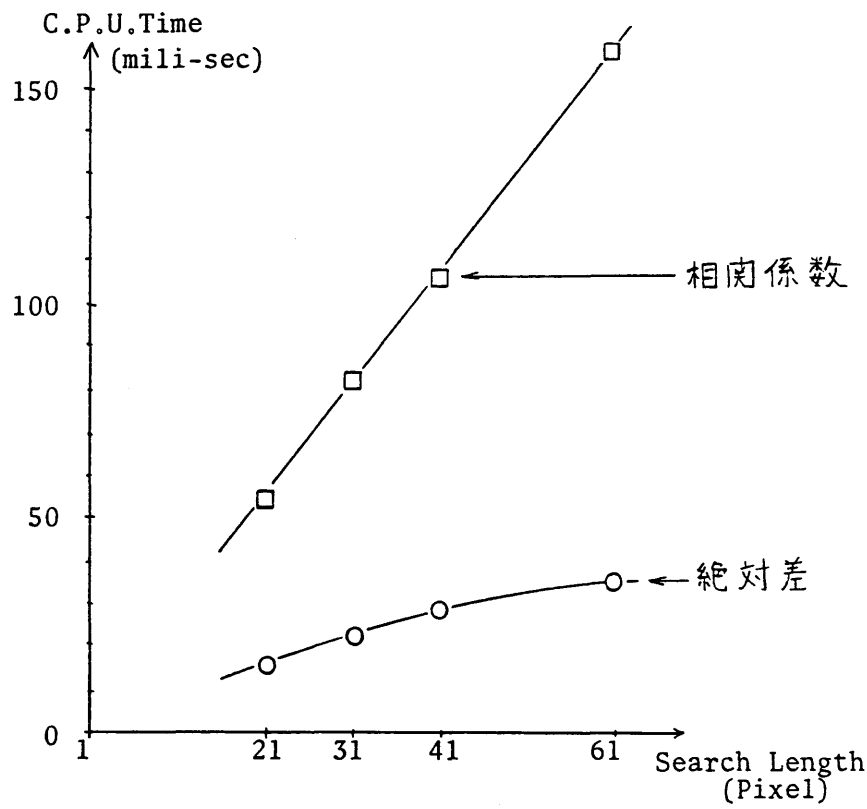
(2) 計算時間の比較結果 (図 5.9 5.10 参照)

図 5.9 計算時間<sup>注)</sup>と相関窓のサイズ



- 注) 1. FACOM M-160ADによる  
2. 探索区間長は41ピクセル

注)  
 図 5.10 計算時間と探索長



注) 相関窓のサイズは  
 9×9.

これらと比べると、以下のとおりである。

- i) 相関係数による方法と絶対差による方法を相関精度について比較すると前者が優れているものの差は小さい。
- ii) 相関係数による方法では、相関パッチの大きさ、探索する長さに関係なく、絶対差による方法の1.5倍の計算時間を要する。

これらの結果から、本研究では絶対差の総和による方法を利用するものとする。



## 2) 相関窓の大きさ、形状に関する検討

### (1) 相関窓の形状

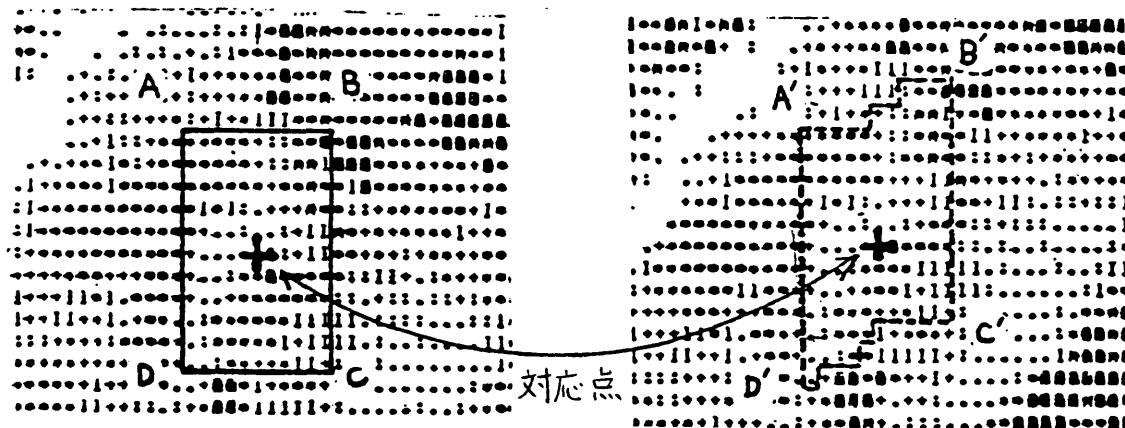
ステレオ画像では地形の起伏のために視差が生じているので(たとえば図5.11a)に示すように、前視画像上の正方形の相関窓に対応する後視画像は、地形の起伏に合わせて歪んでいる。視差の大きさは  $B/H$  比と地形の標高差の積に比例するので、図5.11b)に示すように平坦な地域では、視差による歪は小さい。

面積相関手法では、ステレオ画像のそれぞれから相関窓を切り出し、相関窓間の相関が最大になる点を対応点とするが、前視画像の相関窓と後視画像の相関窓を同じ形状とすると、視差による画像の歪を無視して相関をとることになり、正しい対応を示さなくなる可能性がある。それを防ぐためには、後視画像上の相関窓の形状を視差の大きさ(地形起伏の大きさ)に合わせて変えてやればよいが、そのためには画像相関に先だって地形起伏の大きさを与える必要がある。パントン<sup>(12)</sup>や版部<sup>(2)</sup>らも、すでに終了した周辺の探索結果や低周波成分画像に基ける探索結果等から地形起伏の概略値を与えて相関

図 5-11 視差による相関窓の歪と地形起伏の大きさ

(パッチサイズ =  $11 \times 11$ )  
 (ステレオ角 =  $60^\circ$ )

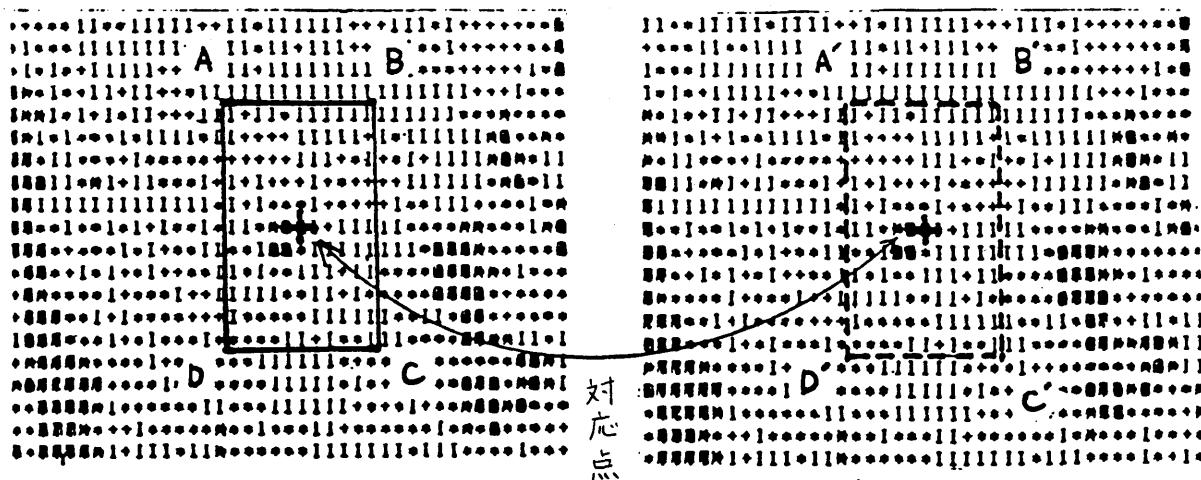
a) 起伏の激しい地域



(前視画像)

(後視画像)

b) 平坦な地域



(前視画像)

(後視画像)

窓の形状を変更する方法を開発し、ケーススタディにおいては良好な結果を得て

いる。しかしながら、地形の起伏の概略値の与え方は画像特

性に大きく依存することが予想されることから、本研究では相関窓の形状を

正方形に固定して精度の検証を行っている。

## (2) 相関窓の大きさ

図 5.12 に示すように、相関窓の大きさ ( $L$ ) が大きいほど相関窓に対応した  
地表部分の標高差 ( $\Delta h$ ) は大きくなる確率が高いため、(式 5.5) で与えられる

相関窓間の視差に上

る歪 ( $\Delta L$ ) は大きくな

る傾向がある。

$$\Delta L = 2 \cdot \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \cdot \Delta h$$

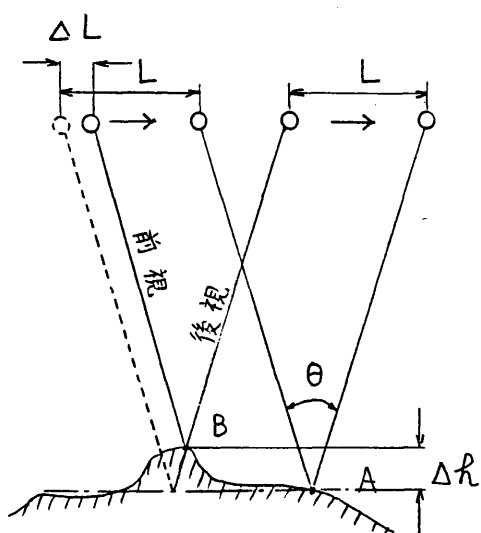
…… (式 5-5)

$\theta$  = ステロ角

$\Delta h$  = 地点 A、B 間の標高差

$\Delta L$  = 視差による窓画像間の歪の大きさ

図 5.12 リニアアレイセンサーによるステレオ画像のステロ視差 ( $\Delta L$ )  
(例) 前後方式



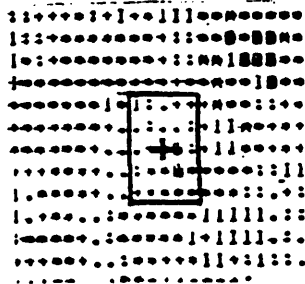
らなみに、シミュレーション画像上で視差による相関窓間の歪を窓の大きさ別に例示したものが図 5.13 である。

しかしながら、相関窓が大きいくほど、視差による歪も含めた雑音に対する相関の変化がゆるやかになり相関精度も安定化することと考えられる。したがって画像の視差が小さければ、相関窓は大きい方が相関精度上好ましいが、視差の大きな画像では、相関窓内の視差の大きさによる精度低下と窓の大きさによる雑音への安定化効果がトレードオフ関係にあると予想される。

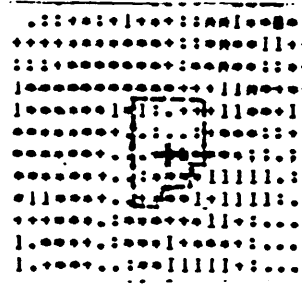
本研究では地形起伏の大きな地域及び小さな地域をそれぞれテストエリアとし、相関窓の大きさと相関精度との関連を求めた。なお、相関の真値は LPI に出カしてグレイマップを用いて肉眼により求めた。テストエリア画像及びテスト結果を図 5.14~17 に示す。サンプル数は各エリアについてそれぞれ約 100 である。

図 5.13 視差による相隣窓の歪と相隣窓の大きさ (同一地点, ステータ角=60°)  
 — 起伏の激しい地域 —

a) 窓の大きさ 5×5

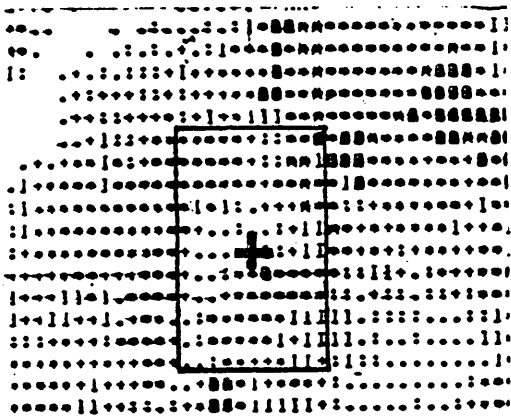


(前視)

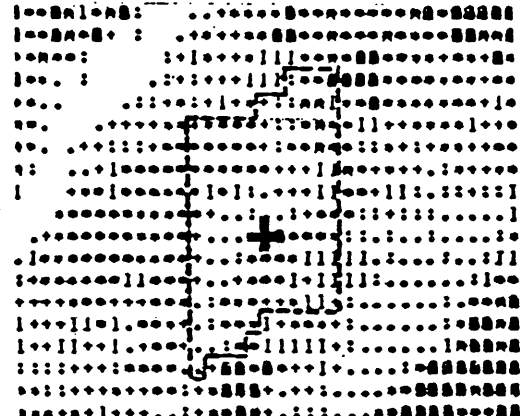


(後視)

b) 窓の大きさ 11×11

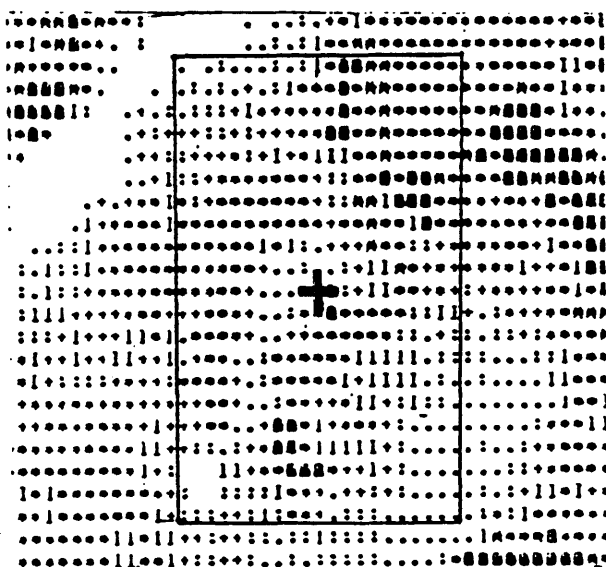


(前視)

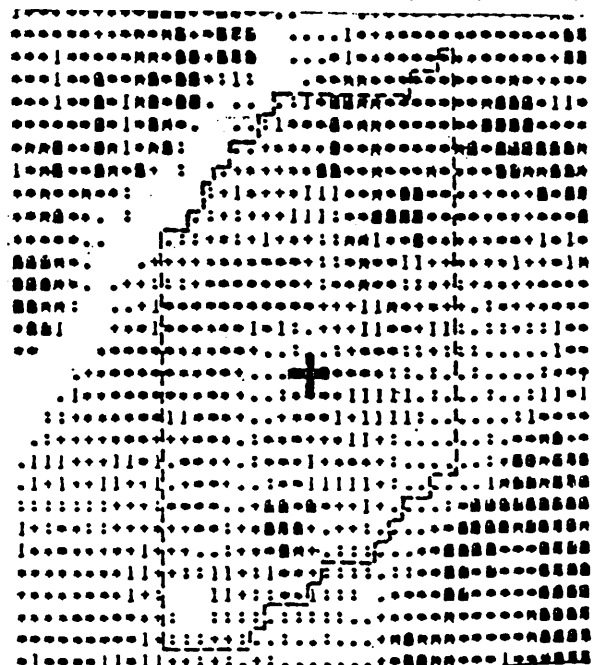


(後視)

c) 窓の大きさ 21×21



(前視)



(後視)

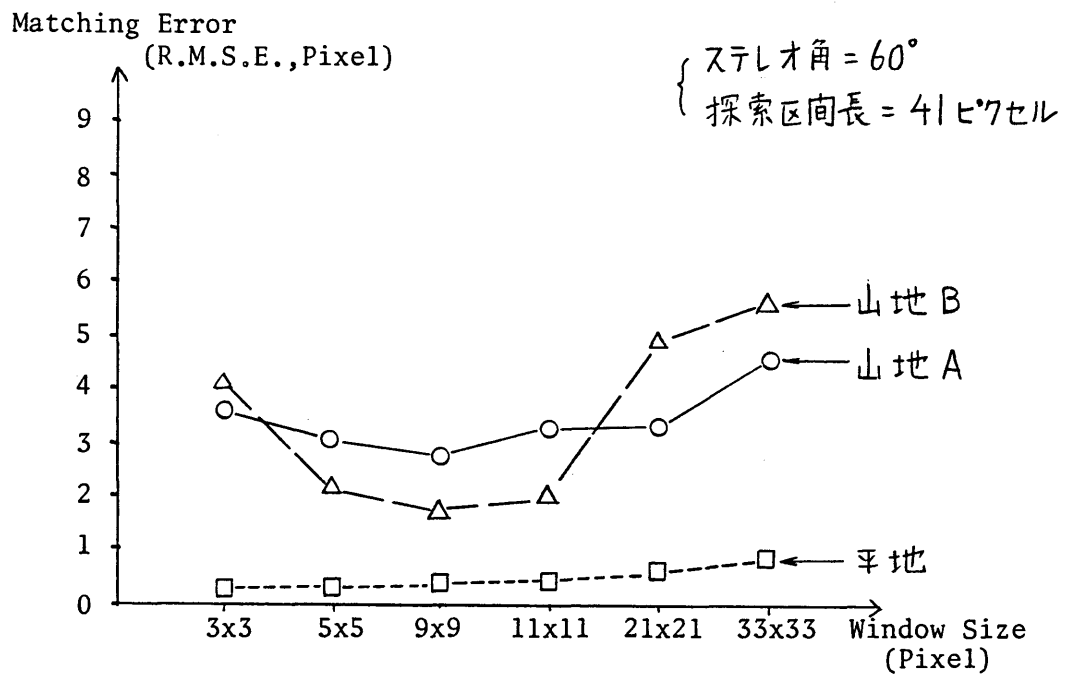


図 5.14 相関窓の大きさと相関精度

図 5.15 テストエリア画像 (山地 A, ステロ角 = 60°)  
 (前視) (後視)

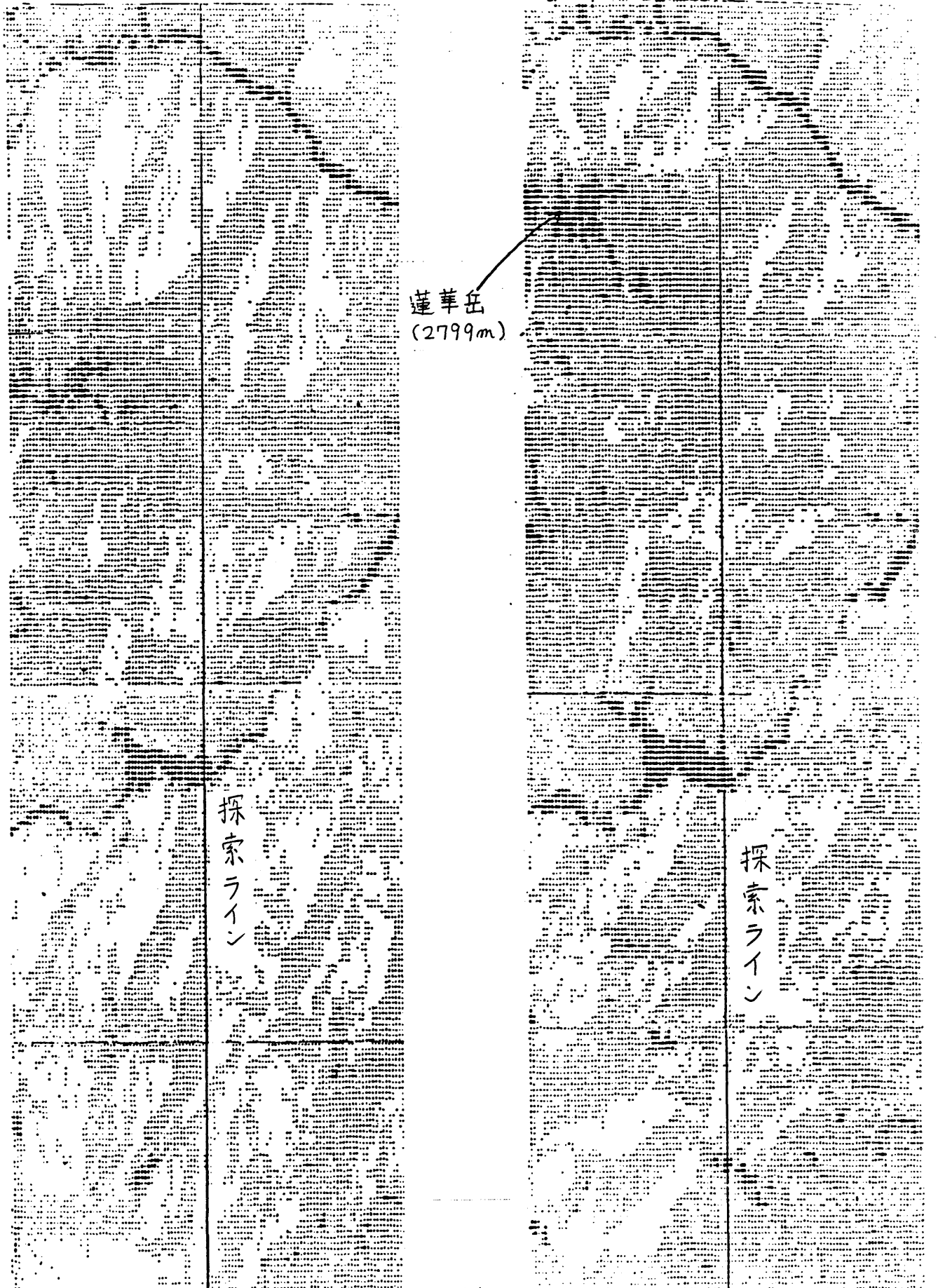


図 5.16 テストエリヤ画像 (山地 B, ステロ角 = 60°)

(前 視)

(後 視)

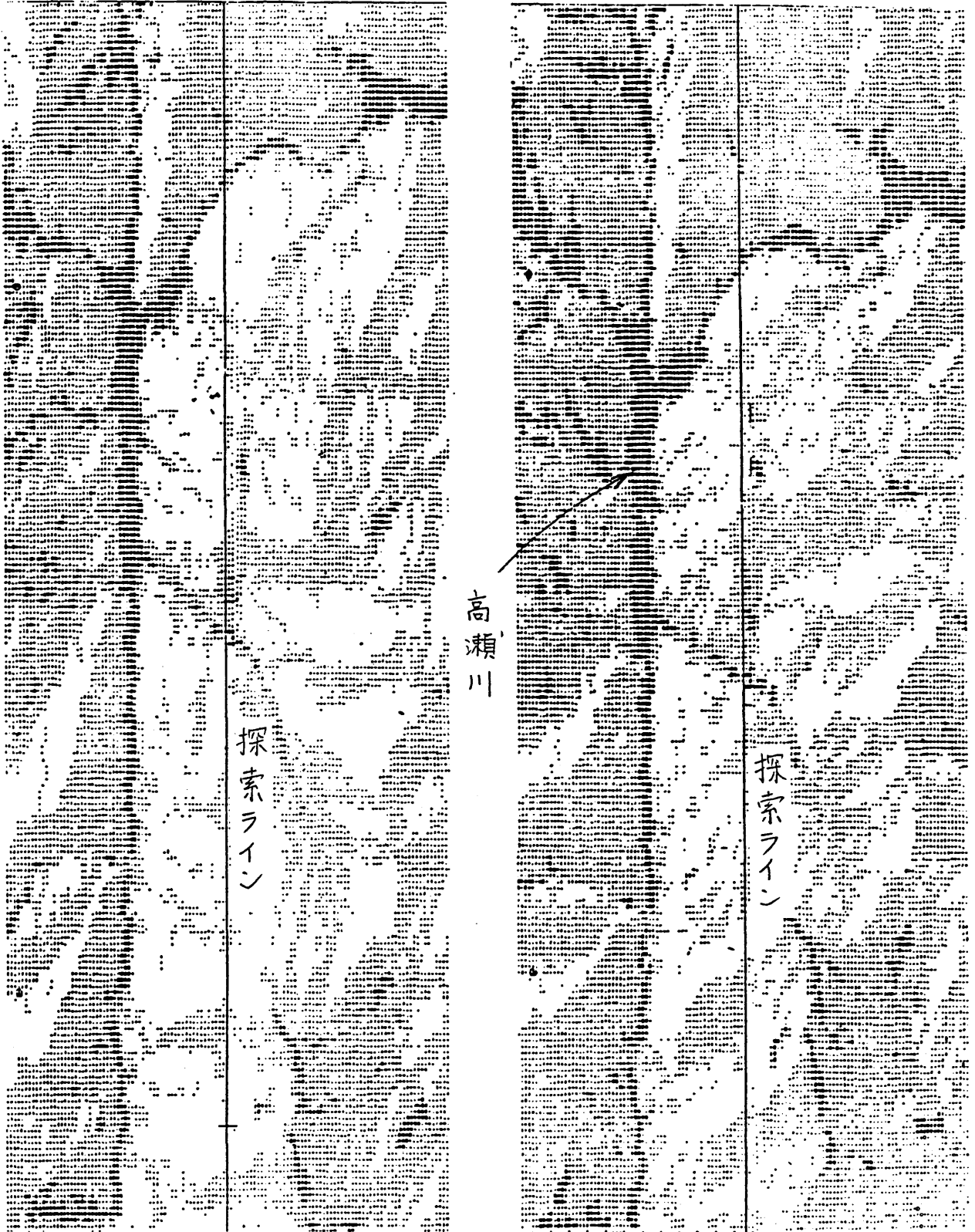
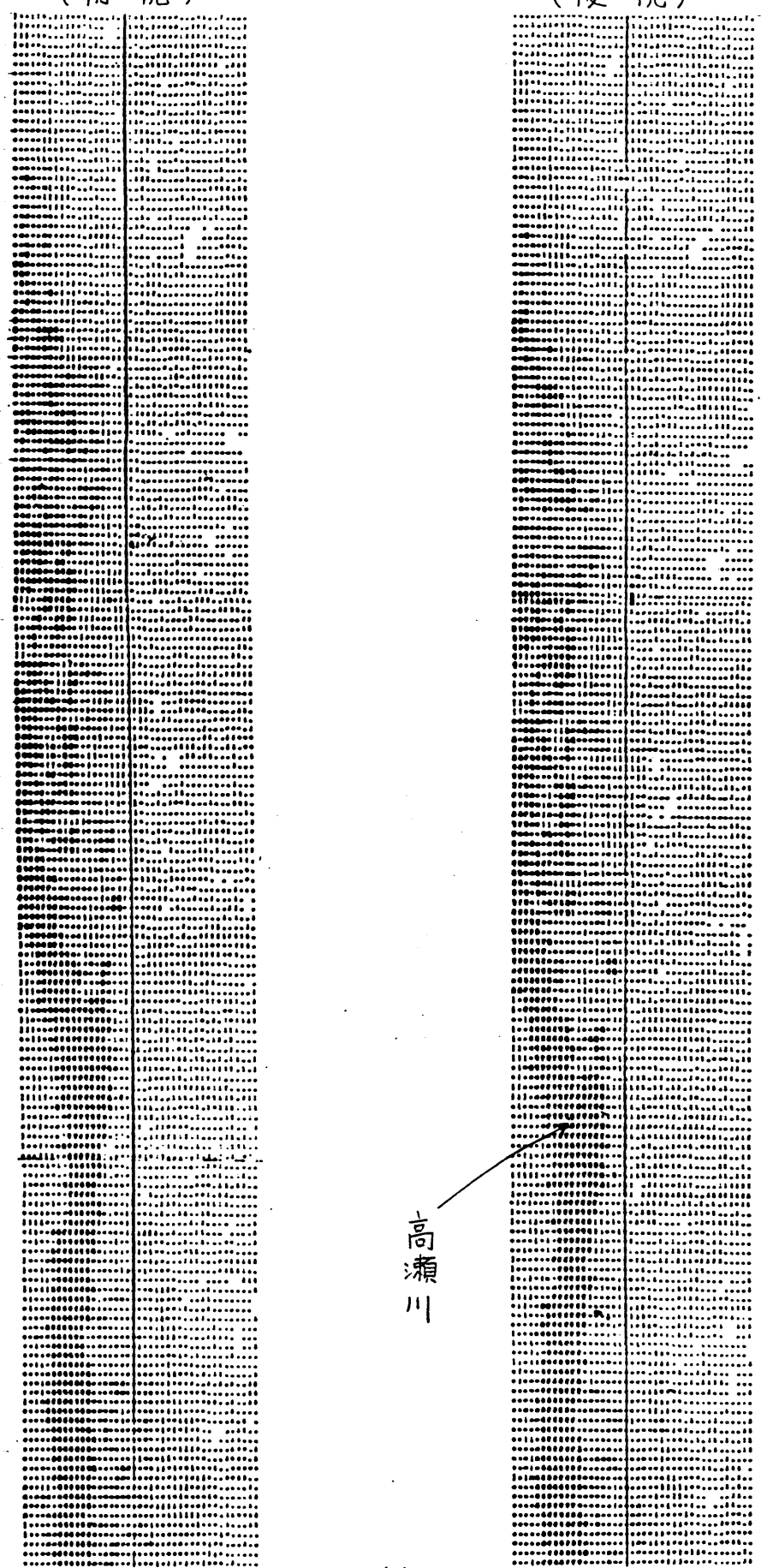




図 5.17 テストエリア画像 (平地, ステロ角 = 60°)

(前視)

(後視)



高瀬川

## (検討結果)

1) 視差による画像の大きさ歪が存在する地域(起伏に富んだ山地)

では相関窓の大きさが $11 \times 11$ をこえると相関誤差は増加し、 $5 \times 5$ 以下

でも同様に誤差は増える。(ステレオ角 =  $60^\circ$ , 探索長 = 41ピクセルの

場合)

さらに、誤差の頻度分布をみると窓の大きさが $11 \times 11$ 以上の場合に生じる

誤差の頻度分布はなだらかに変化する傾向がある。しかし、窓の大きさが

$5 \times 5$ 以下の場合には多数の小さい誤差と極端に大きな誤差が生ず

る。(図5.18参照)前者は、視差による歪が大きいものの窓が大きいた

めに安定化効果が働かず、極端に大きな誤差が生じにくくなっているた

めであり、後者は視差による歪が小さいため一般には相関誤差は小

さいが、窓が小さいため相関度を求めるためのサンプル数が少なく、歪の発

生状況によっては相関度が大きく変動し大きな誤差が発生することが

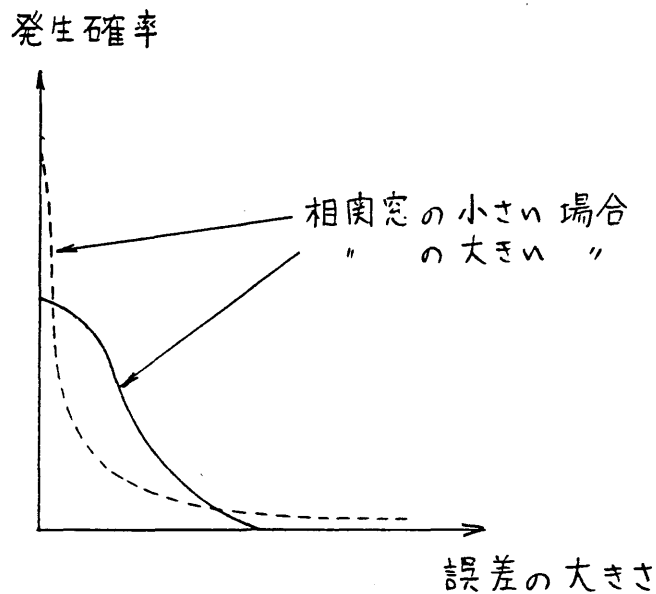
あるためと考えられる。この結果は版部<sup>(20)</sup>らが画像濃度値を定常確率場

からの標本であると考えて導いた相関窓の大きさと相関精度との関連に似て

一致した傾向を示している。

ii) 視差による画像の歪がほとんどない平坦な地域では、窓の大きさによらず認識精度は良好である。これはテスト画像に視差による歪以外の雑音が含まれていないためである。

図 5.18 相関窓の大きさによる相関誤差分布の違い (概念図)

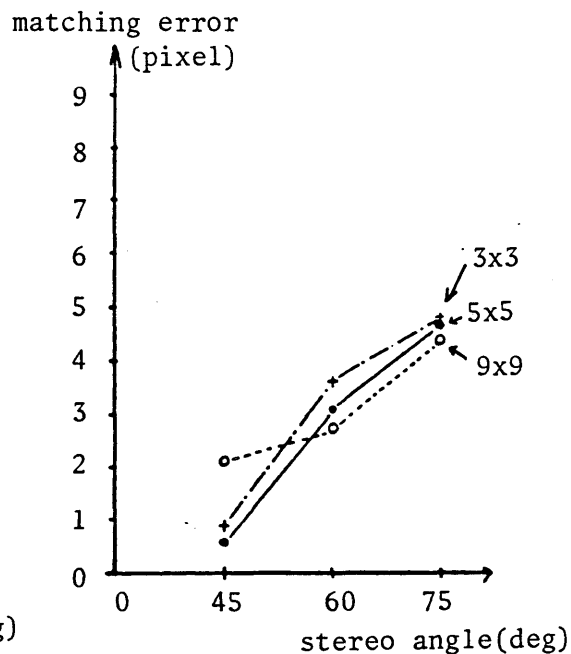
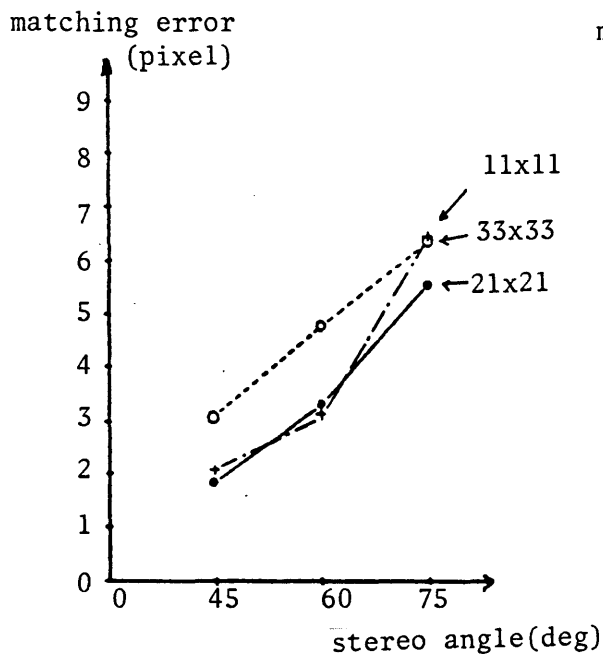


3) ステオ角 (B/H 比) の大きさ

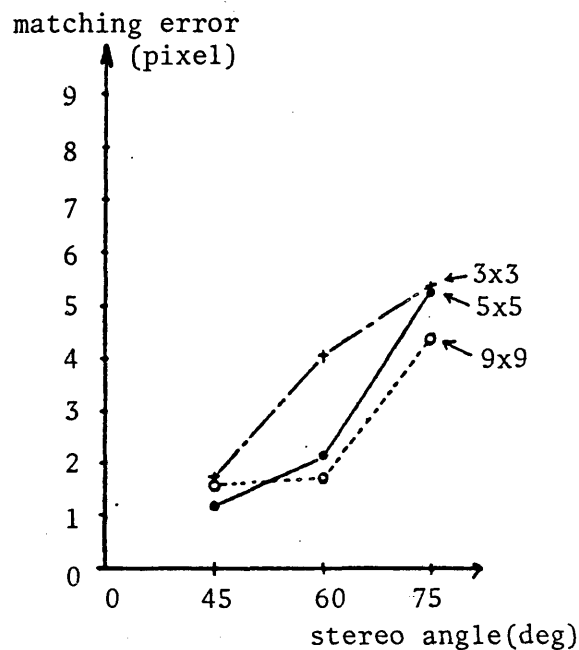
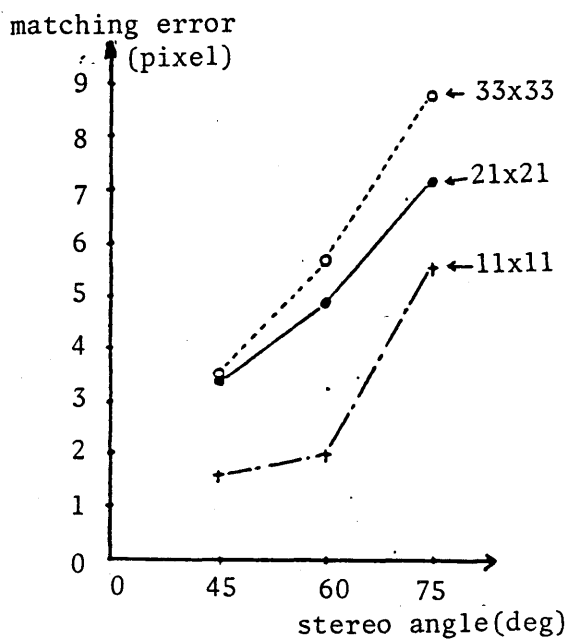
ステオ角 (B/H 比) の増大により同じ標高差に対しても視差が増大することにより、相関精度が低下することが考えられる。図 5.19 は前節と同じ3つのテストエリア (山地 A, 山地 B, 平地) について、ステオ角を  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  ( $B/H = 0.54, 0.83, 1.15$ ) とした画像を作成し、画像相関を行った結果を示している。なお探索範囲は真の対応点を中心として  $41 \times 41$  セルである。

図 5.19 ステレオ角と画像相関精度

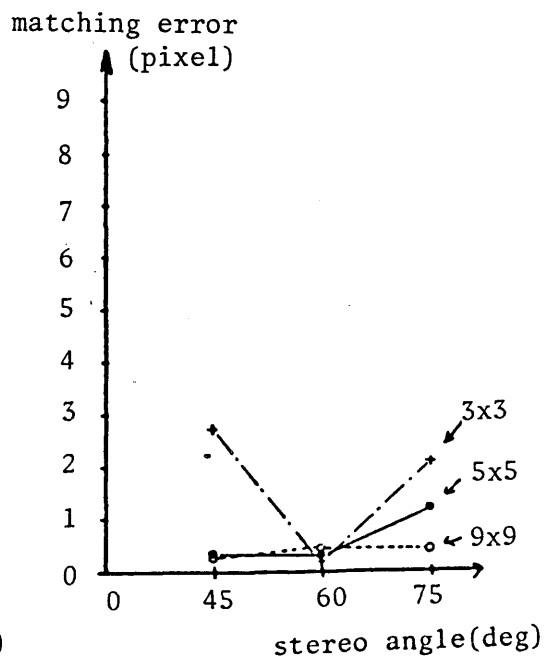
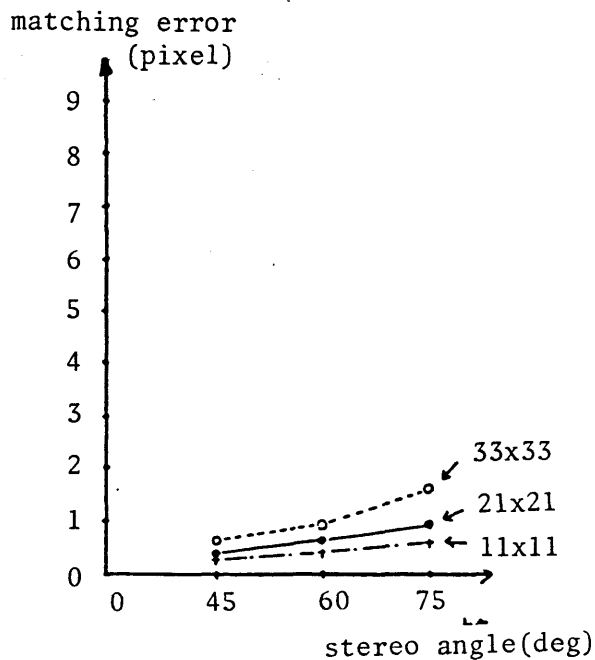
a) 山地A



b) 山地B



c) 平地



( 検討結果 )

i) 起伏に富む地域 ( 山地 A, 山地 B ) ではステレオ角が大きければ画像相関の精度は低下する。

精度低下の程度は相関窓の大きさにより大きさは異なる。しかし、大きな相関窓については図 5-20 に示すように、誤差の分布型がはたごらかに横へたがるのに対し、小さな相関窓については離散的な大きな誤差の頻度が増加する傾向がある。これは小さな相関窓の場合、相関の値が視差等の歪の状況によって変動しやすく相関精度が不安定であるためと考えられる。

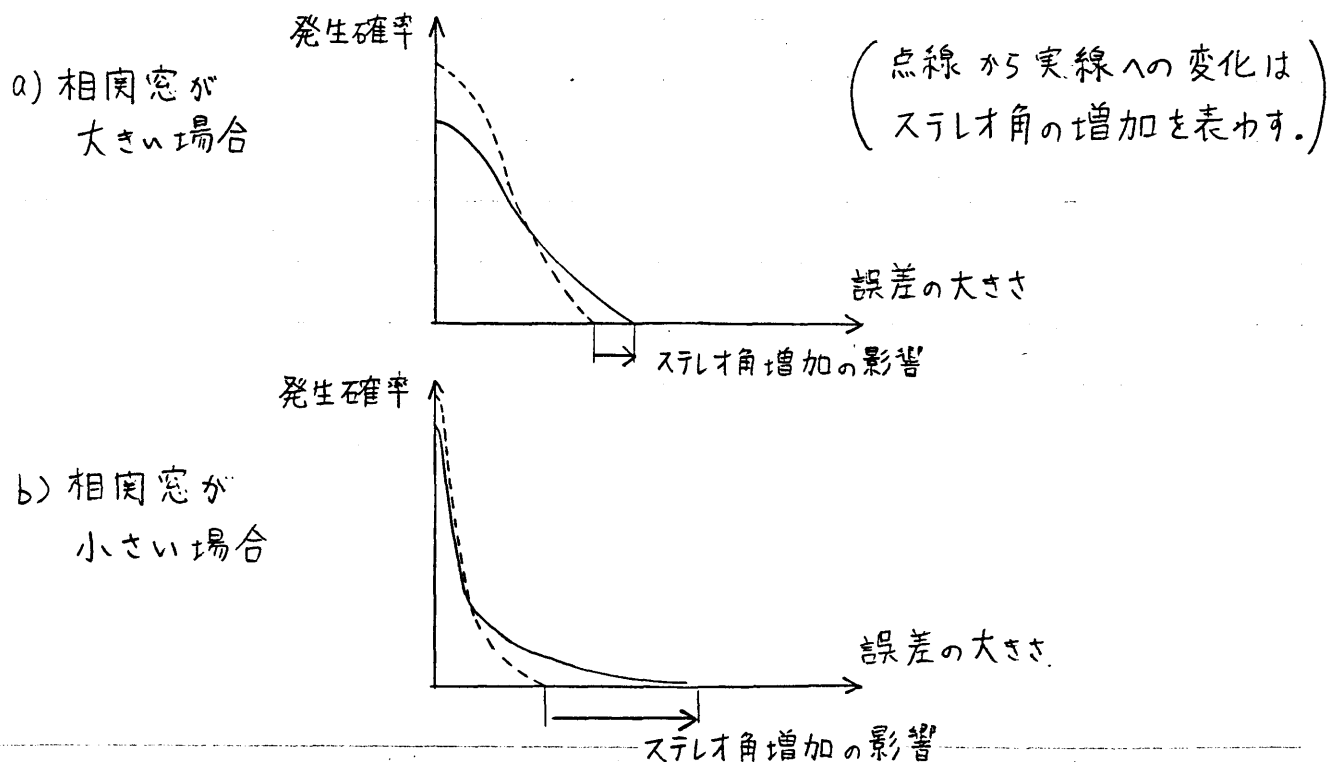


図 5.20 ステレオ角の増加による相関誤差の発生確率分布の変化 ( 概念図 )

ii) 平坦な地域(平地)では視差が小さいためステレオ角の変化による認識精度の変化は小さい。

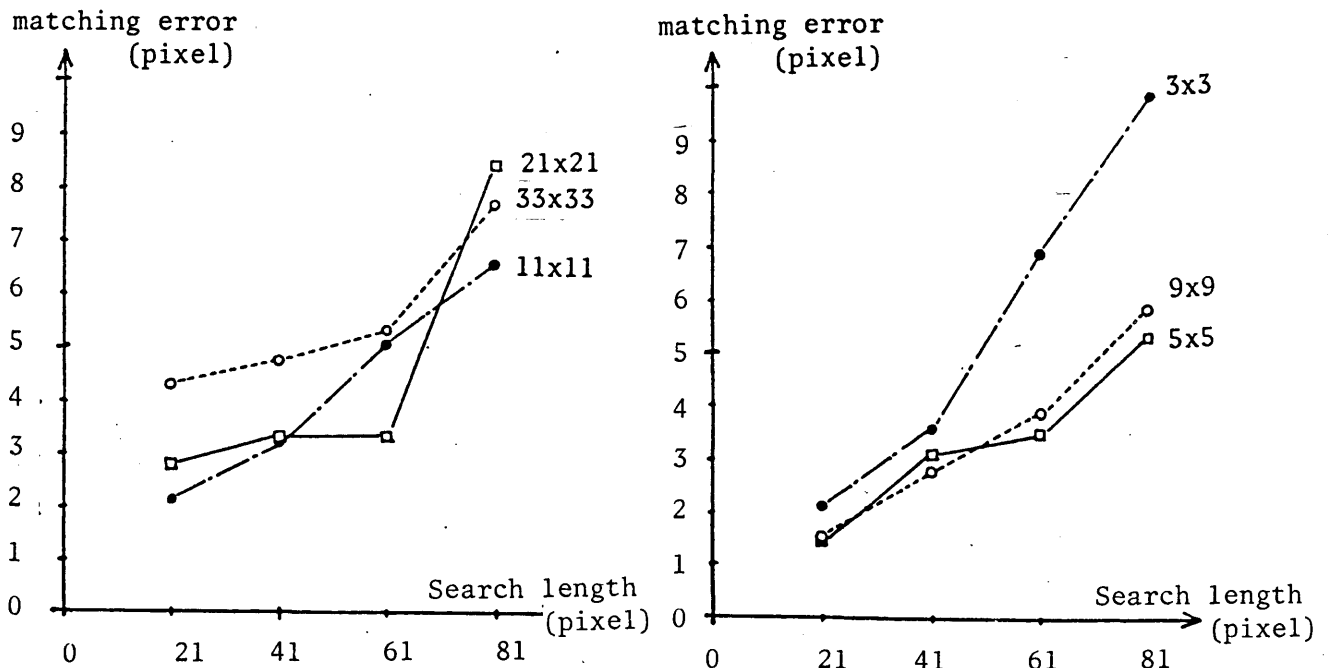
#### 4) 探索範囲の大きさ

探索範囲を広げると相関エラーが発生しやすくなると予想される。また探索に要する時間も比例的に大きくなると考えられる。

図 5.21 は山地 A 及び平地について探索長と相関の精度を示したものである。

また図 5.22 は探索長と計算時間との関連を示している。

図 5.21 探索長と相関精度(平均二乗誤差)



b) 平地

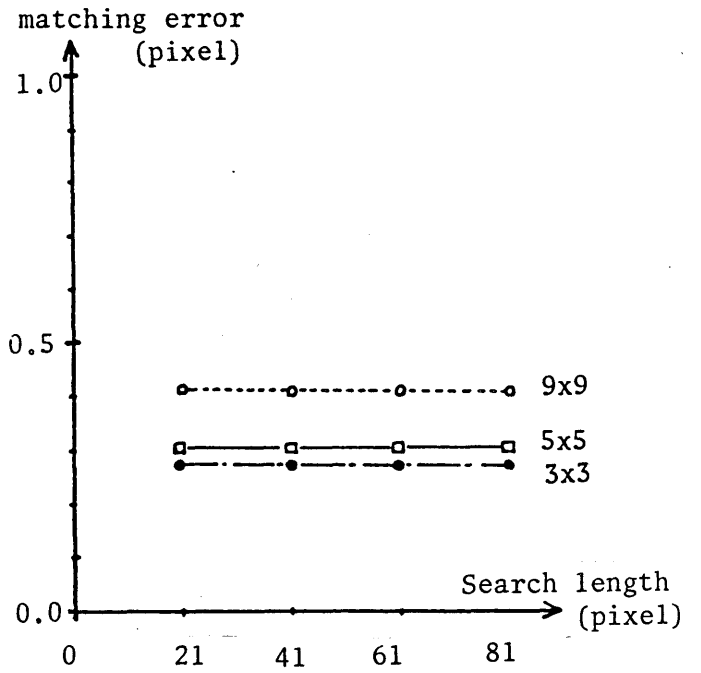
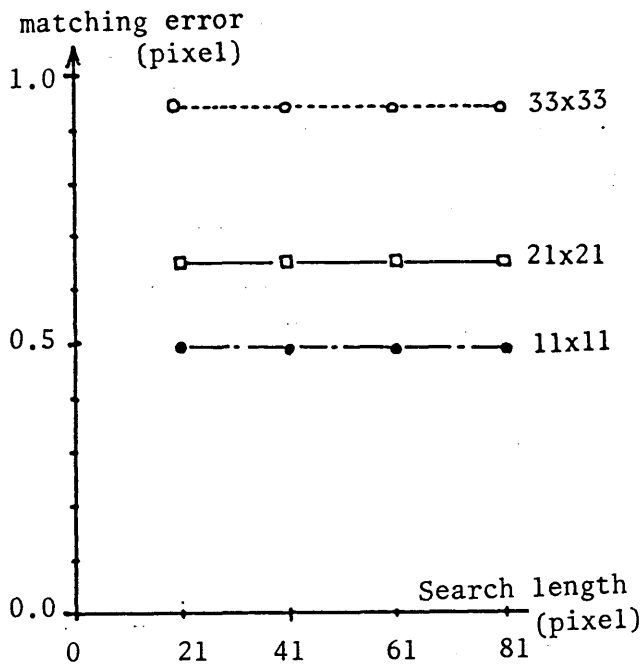
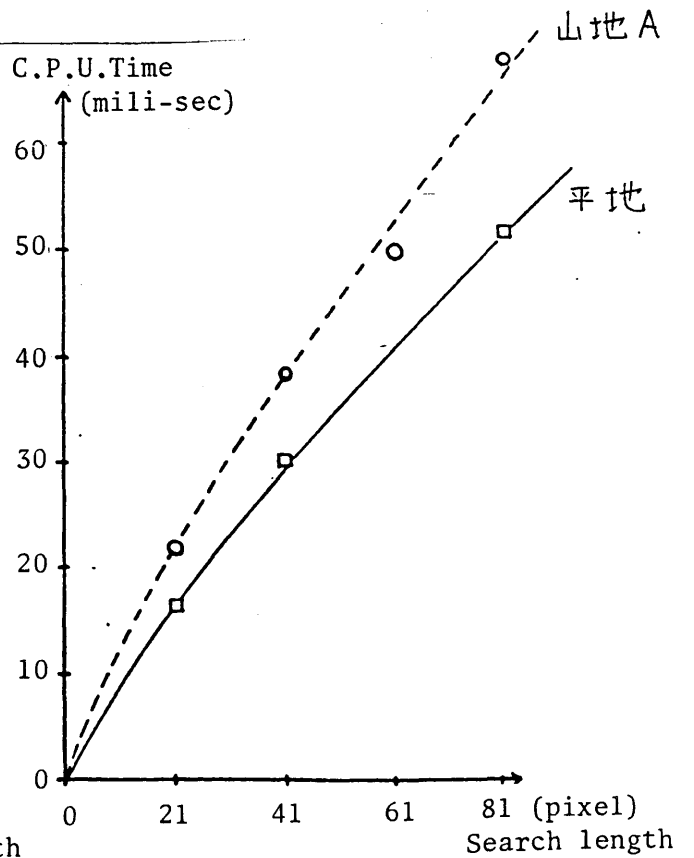
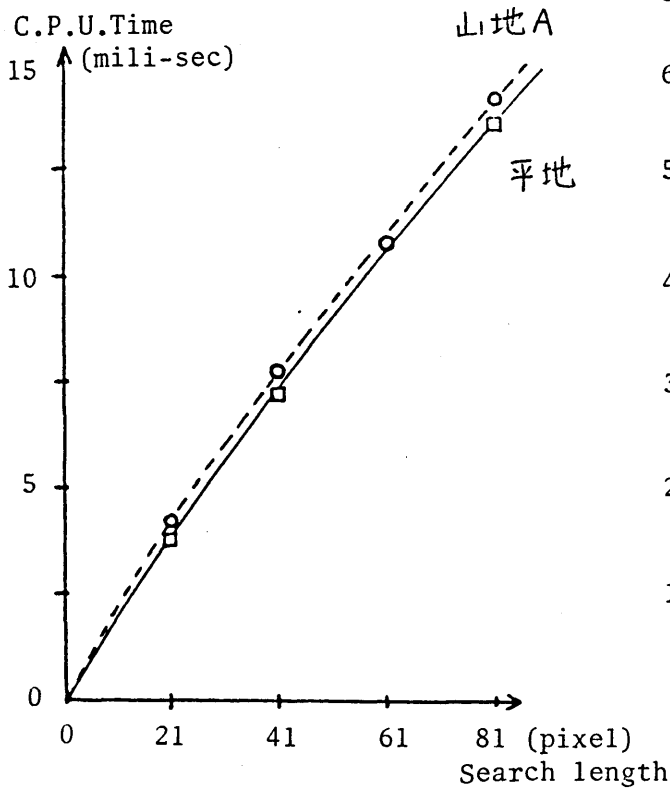


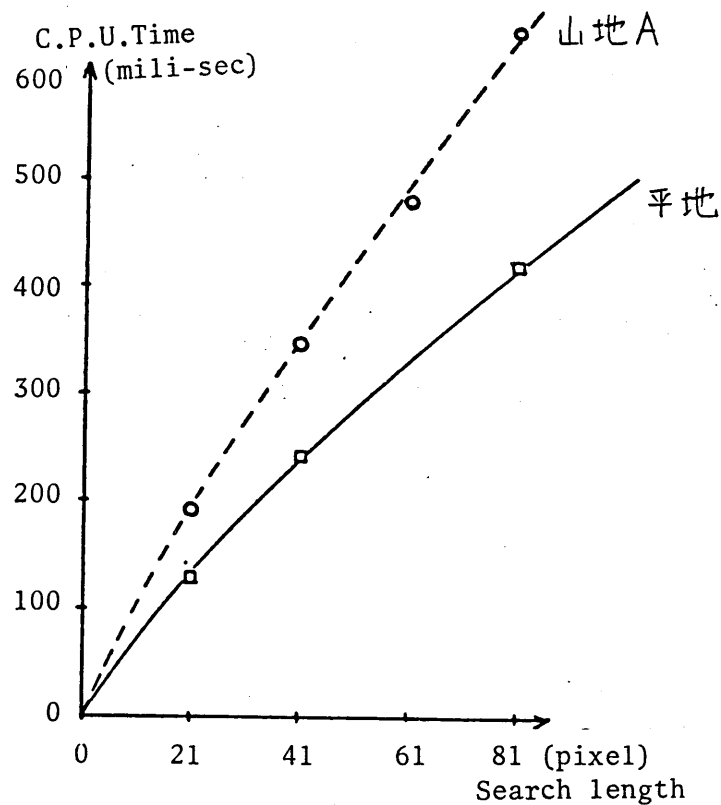
図 5.22 探索長と計算時間

a) 相関窓: 3x3

b) 相関窓: 11x11



c) 相関窓 33 x 33



(検討結果)

i) 山地のように視差による画像の歪が大きき地域では探索長の増加に伴い、相関精度は悪化する。これは探索長の増大にともなう偽の相関度ピークを持つ点の混入確率がふえることにより mismatches の回数が増加するからと考えられる。

ii) 平地のように視差による画像の歪がほとんどない地域では、相関の精度



は、探索長の影響をほとんど受けない。

iii) 山地について探索長が 21 ~ 81 ピクセルと増加するにつれ認識の精度はどのサイズのパッチについても悪化するが、特に 3x3 のパッチについては誤差が 1.5 倍になっている。これは 3x3 のパッチでは、中に含まれる画素の数が少なく、画像相関の為のローフが生じたためであると考えられる。

iv) 自動認識に必要な計算時間は、山地、平地とも探索長が増加するにつれ増加する。山地では両者は 1:1 比例関係にあるが、平地では計算時間が探索長に対して逆増減傾向にある。これは平地では視差の影響がないため対応点における絶対差の和の最小値が他の地点の値に比べ非常に小さくなり、小さい値による計算打ち止りの効果が大きいため、すなわち探索範囲が拡大しても計算回数が増えないためと考えられる。

### 5.3.2 ステレオ対応点の自動探索アルゴリズム

本節では、前節で得られた画像相関の精度とその影響要因に関する結果にもとづいてステレオ対応点の自動探索アルゴリズムを提案する。

自動探索アルゴリズムは大きく以下の2つの部分にわけられる。

i) 与えられた探索範囲の中でステレオ対応点を探索するアルゴリズム (ステレオ相関アルゴリズム)

ii) すでにマッチングの終了した対応点等をもとに、次の対応点の予想位置を求め、その予想位置を含んだある範囲を探索範囲として画像相関ルーチンに与えるアルゴリズム (探索手順アルゴリズム)

#### 1) ステレオ相関アルゴリズム

前節の検討結果によると、小さな相関窓を用いる場合、大部分のケースでは相関誤差は小さいものの、時々、極めて大きな誤差が生ずること、また、大きな相関窓では、誤差分布はなめらかであり、誤差の小さいケースが少ないかわりに、大きな誤差も生じにくく、こまごまわかった。

そこで、本研究では、大小2種類の相関窓を併用することによって、小さな相

関窓を用いる場合に生ずる大きな誤差を除く相関手法を提案する。すなわち、同一の探索範囲に対して大小2種類の相関窓を用いてそれぞれ対応点の探索を行い、その結果の差があるしきい値以下である場合に小さい相関窓による対応結果を採用するものである。しきい値を越える場合には、近傍の点で再び探索をやり直すか、もしくは、その点の自動探索を打ち切り周辺の対応結果から補間することとする。図 5.23 に2種類の窓の併用による精度向上の例を示す。これによると  $3 \times 3$  の相関窓のみを用いた場合約 0.6 ピグセル (R. M. S. E) であった相関精度が、 $11 \times 11$  の相関窓のフィルターを通過することにより、3 ピグセル以上のエラーが全て除かれ、相関精度も約 0.6 ピグセル (R. M. S. E) と大きく向上している。

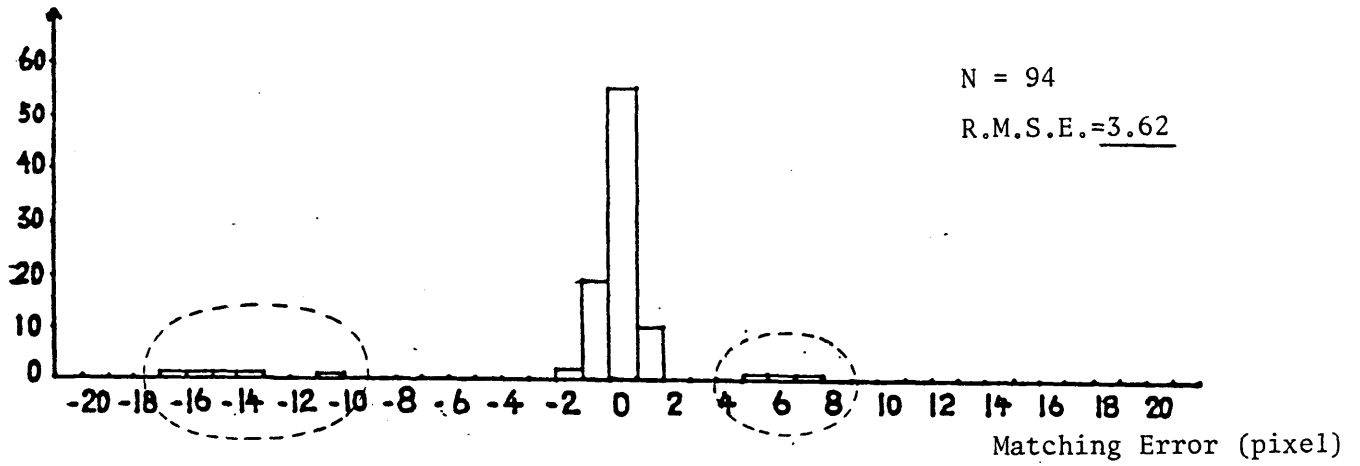
## 2) 探索の手順

前節の検討結果によると探索範囲が広くなるにつれ、相関精度が低下し、計算時間も長くなる。したがって探索手順においては、次の対応点の予想位置をできるだけ精度よく与えることが重要である。

図 5.23 大小の相関窓の併用による相関精度の向上の一例

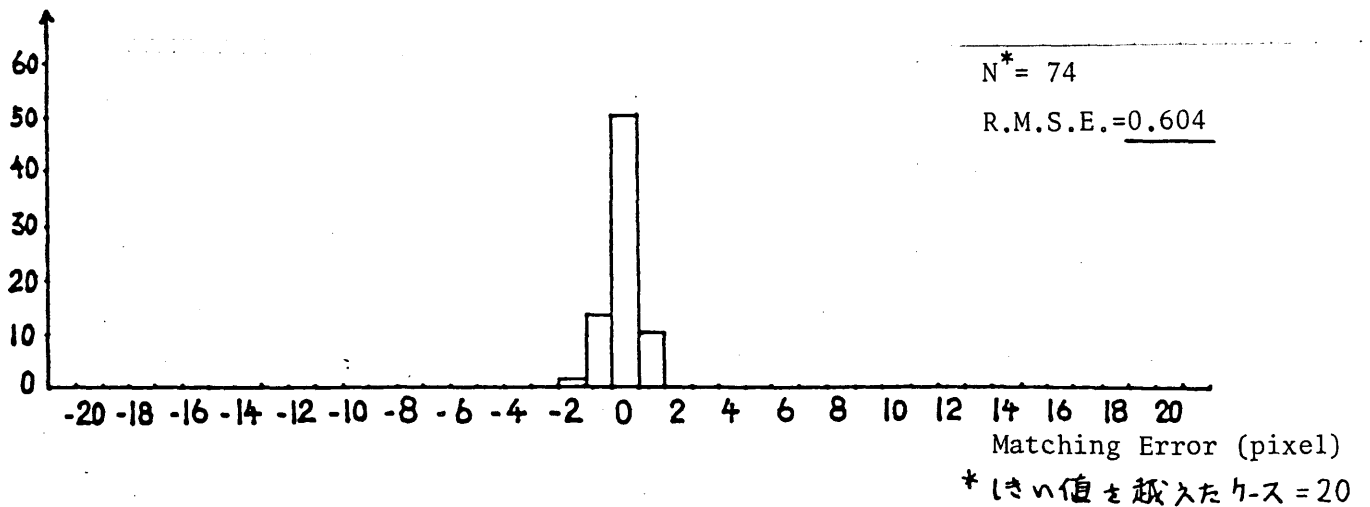
a)  $3 \times 3$  のみを用いた場合

Frequency



b)  $3 \times 3$  と  $11 \times 11$  を併用した場合 (しきい値 = 2)

Frequency



従来の研究における対応点の予想位置の与え方は大きく2つに分けられる。

- i) 隣接する既知の対応点より外挿して与える方法<sup>(12)</sup> (図 5.24 参照)
- ii) 低周波成分だけからなる画像上での画像相関の結果等を対応点の予想位置として与えより高い周波数を含む画像での探索を順次行っていく方法 (Coarse to Fine 法)

(i)の方法はアルゴリズムが単純で探索速度も速いと考えられるが、予想位置を与えるために用いられる既知対応点にエラーが含まれている場合、次の対応点予想位置が大きく狂い易く、迷走が生ずる危険が入る。

一方、(ii)の方法は 図 5.24 隣接点より外的に対応の予想位置と与える方法 (隣り合う2点より予想するケース)

アルゴリズムも複雑であり、

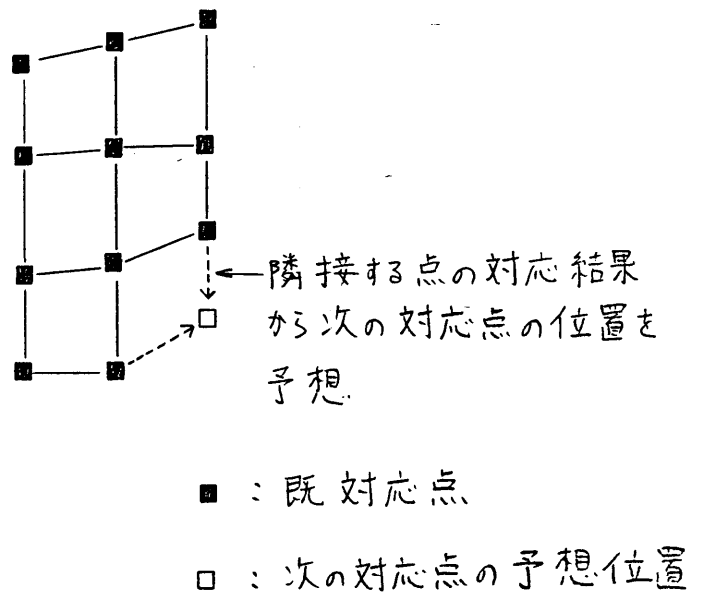
探索にあたって決めおく

必要のあるパラメータの

数も多いが、それらが

適当に決められてい

れば探索結果の



精度、信頼性が高いとされている。<sup>(2)</sup>

本研究では以下のような単純な探索手順を採用した。前後方式のリニアレイセンスステロ画像を例として以下に説明する。(図 5.25 参照)

i) 前処理済のステロ画像の片方(前視画像とする)から三次元測定を

行う領域(長方形)を抽出し、4隅にそれぞれ1点ずつ点を選ぶ。

その4点に対応する点の精確な、もしくは概略の位置を残りのステロ

画像(後視画像とする)上に求めておく。概略値の場合にはその

位置を中心として探索を行い、対応点の位置を精確に求めておく。

ii) 前視画像上の4点の重心を求める。同様に後視画像についても

4点の重心を求め、その点を中心として前視画像の重心に対応する点の

探索を行う。(図 5.26(i) 参照) 以下同様に前視画像及び後視

画像上でさらに4点の重心を求め、後視画像上の重心を前視画像上の

重心に対応する点の予想位置として探索をくり返し行う(図 5.26(ii) 参

照)。また、周辺に4点存在しない場合には上下または左右の2点

の中心を用いる(図 5.26(iii) 参照)。このように、ステロ対応点の



数と密度を順次増加させていく。

この方法の特長は以下のようにまとめられる。

- i) 2つの大きさを持つ相関窓を利用して画像相関を行うため、相関の信頼性が高い。
- ii) ステレオ対応点の予想位置を主に周辺の4点から内挿して与えているため、外挿法に比べ既存の対応点の誤差による対応点位置の予想への影響が少なく迷走も生じにくくなっている。そのため、探索範囲も狭くする事ができ、信頼性や精度が向上すると考えられる。
- iii) アルゴリズムが単純である。



## 5.4 対応結果の後処理

自動探索によって得られたステレオ対応点の対応結果、あるいは対応結果と画像センサの標定結果より得られる各地表点の3次元座標に対して以下のような目的で後処理が行われる。

- 1) 誤差の除去
  - 2) データの利用性を向上させるためのデータ編集
- 1) 誤差の除去

除去すべき誤差のうち、一般的なランダムノイズ的誤差の除去については近傍平均などが多く用いられる。しかし、迷走などの結果生ずる大きな誤差（グロスエラー; gross error）については、近傍平均等では十分除去できないため、地形勾配に関する制約条件等を考慮して、これらの条件を満足しないものを大きな誤差として排除するなどの方法がとられている。

こういった処理は自動探索時に同時に行われる場合もある。しかしながら、これらの方法は個々のケースにおいては有効であるものの、対象地域によっては十分うまく機能しない場合や、後処理アルゴリズムのパラメータの設定に

よって保存すべき真の値までも、誤差として除去してしまったり、逆に真値を変えることと避け得ても大きな誤差を十分除去できなかつたりする場合もあり、十分に一般性を持つ頑健な方法が得られているとは言えず、今後の研究課題である。本研究においても、後処理による誤差の除去は行っていない。

## 2) データ編集

自動探索においては多くの場合、ステレオ画像の片方に格子状に点を設定し、残りのステレオ画像上で各格子点の対応点を探索することが行われている。この方法によれば、探索アルゴリズムを簡単なものとすることができるが、対応結果から得られる三次元座標点は地表上にランダムに配列されることになり、数値地形モデルとして利用する上で不便である。そのためランダム配置の三次元座標点を格子配列に並べ直す必要がある。(図 5.26 参照)

本研究では図 5.27 に示すように各格子点の周囲の  $N$  点の標高に、その格子点からの平面上の距離  $(= (\Delta x^2 + \Delta y^2)^{1/2})$  の二乗の逆数を重みとして与えて重み付平均し、格子点の標高とする方法<sup>(20)</sup>により、ランダム配置

の三次元座標点から格子配置の数値地形モデルを得る。

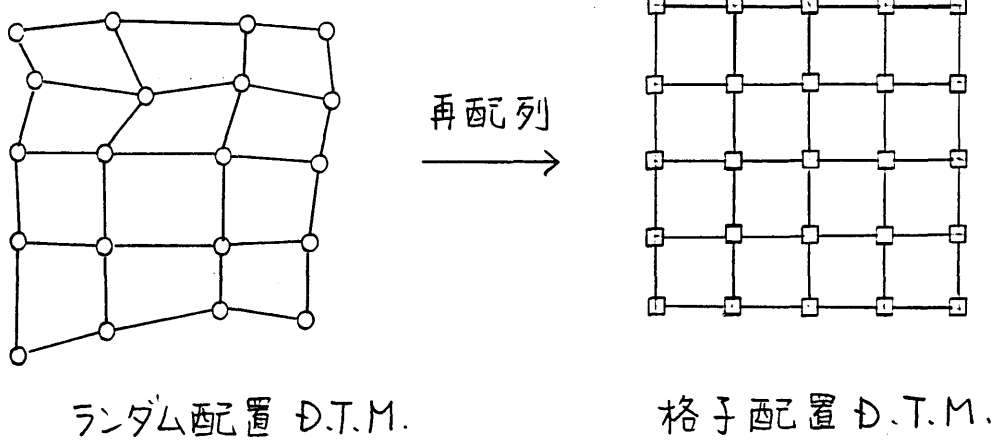
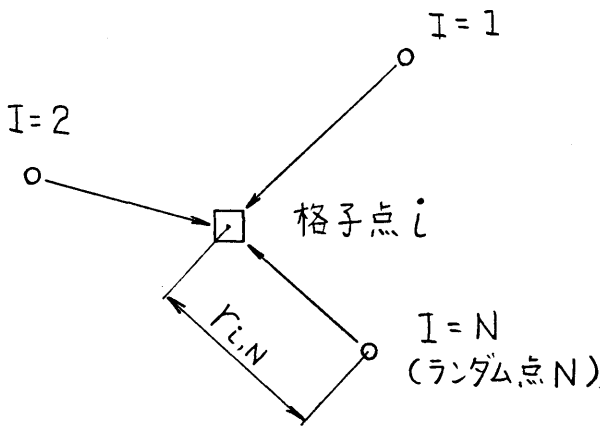


図 5.26 ランダム点 → 格子点の並びかえ



$$H_i = \sum_{I=1}^N w_I \cdot \tilde{H}_I$$

$$w_I = (1/r_{i,I})^2 / \sum_{I=1}^N (1/r_{i,I})^2$$

$\tilde{H}_I$ : ランダム点 I の標高

$H_i$ : 格子点 i の標高

$r_{i,I}$ : 点 i, I 間の距離

図 5.27 ランダム点 → 格子点の内挿アルゴリズム<sup>(20)</sup>

---

6 章 数値地形モデルの自動作成精度  
に関する検証

## 6.1 精度の検証に於いて検討すべき要因の抽出

リアアレイセンサのステレオ画像から格子配列の数値地形モデルを作成する

フローをまとめると図 6.1 の通りである。

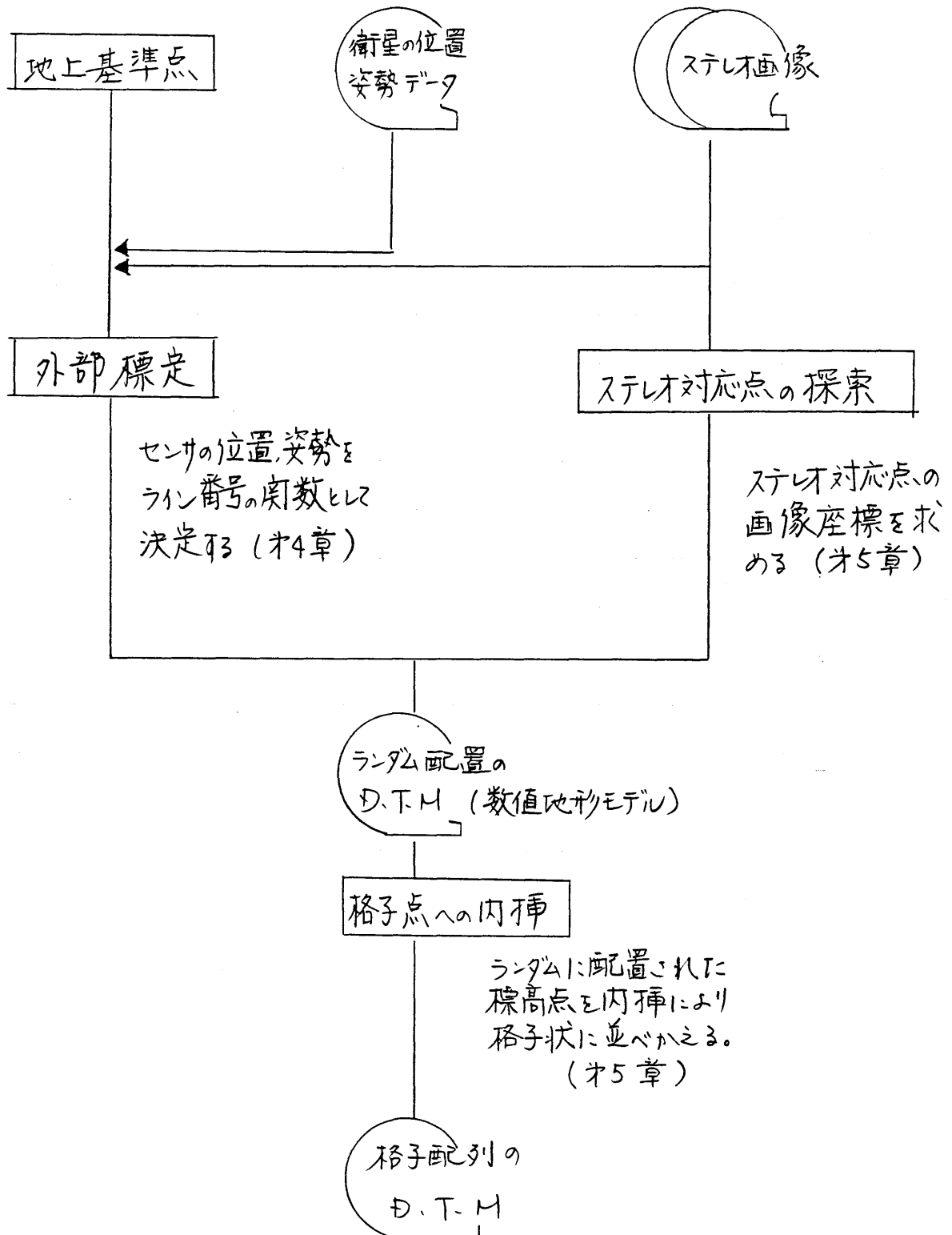
数値地形モデルの精度に影響を与える主な要因をまとめると以下のよう

になる。

- 1) 外部標定の精度
- 2) ステレオ対応点の探索精度
- 3) B/H比

なお、ランダム配置の標高点を格子配列に内挿するプロセスにおいても内挿誤差が発生するが、本研究において内挿間隔を十分密にとっているため無視できるものと考えられる。(ランダム標高点はほぼ20mメッシュに対応する密度で存在し、それらから10mメッシュの格子標高点に内挿している。)

図 6.1 数値地形モデルの自動作成フロー



## 6.2 自動作成精度の検証方法

数値地形モデルの作成精度の検証では、画像作成に用いた数値地形モデル(真値)と、ステレオのシミュレーション画像から図 6-1 に示した手順で作成した数値地形モデル(観測値)を比較し、各標高点について真値と観測値との差を作成誤差としている。

実際には標定誤差やステレオ対応点の自動探索誤差等のためにランダム配置の数値地形モデルには図 6.2 に示すような水平方向及び標高方向の誤差(各々  $\Delta r$ ,  $\tilde{\Delta z}$ )が生じている。しかしながら、これらの誤差の評価には画像の各ピクセルに対応する地表点の三次元座標  $(x, y, z)$  を求めて比較する必要があり、作業が極めて繁雑となる。また、実際の数値地形モデル(格子配列)の利用にあたっては一般に各格子点の標高値が問題となることから、各格子点間の標高差  $(\Delta z)$  を用いて精度検証を行うこととしている。したがって格子点間の標高差  $(\Delta z)$  は、水平位置の誤差  $(\Delta r)$  によって生ずる標高誤差  $(\Delta r$  に地形の傾斜を乗じて得られる)が  $\tilde{\Delta z}$  に合成されたものと考えられる。

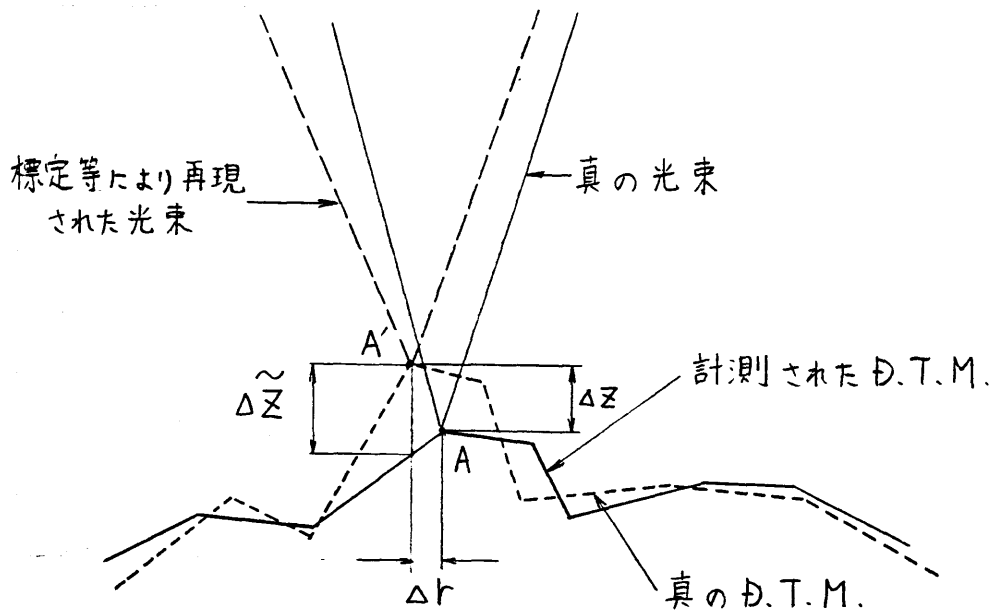


図 6.2 数値地形モデルの  
精度検証の方法

$\Delta Z$ : 点AのZ方向計測誤差  
 $\tilde{\Delta Z}$ : 点A'におけるD.T.M.  
 の標高誤差  
 $\Delta r$ : 点Aの水平方向計測誤差

なお、精度検証のケースは以下のよう設定した。

1) リニアレイセンサの搭載方式

i) 前後方式 (STEREOSAT, MAPSAT 型)

ii) 左右方式 (SPOT 型)

2) B/H 比

0.5 及び 1.0

3) 標定方法

地上基準点数: 10点, 25点

{ 但し、軌道データは併用して標定する。データの精度は G.P.S を利用し、  
 場合のランドサット 4.5 号程度 (表 4.14 ケース 2) を想定する }



---

#### 4). ステレオ対応点の探索方法

- i) 2種類の相関窓の併用
- ii) 1 " のみの相関窓

### 6.3 検証結果

#### 1) 標定方法及び B/H 比による標高精度の検証

表 6.1 標定方法及び B/H 比による標高精度 (平均二乗誤差) の比較

##### a) 前後方式 (STEREOSAT, MAPSAT 型)

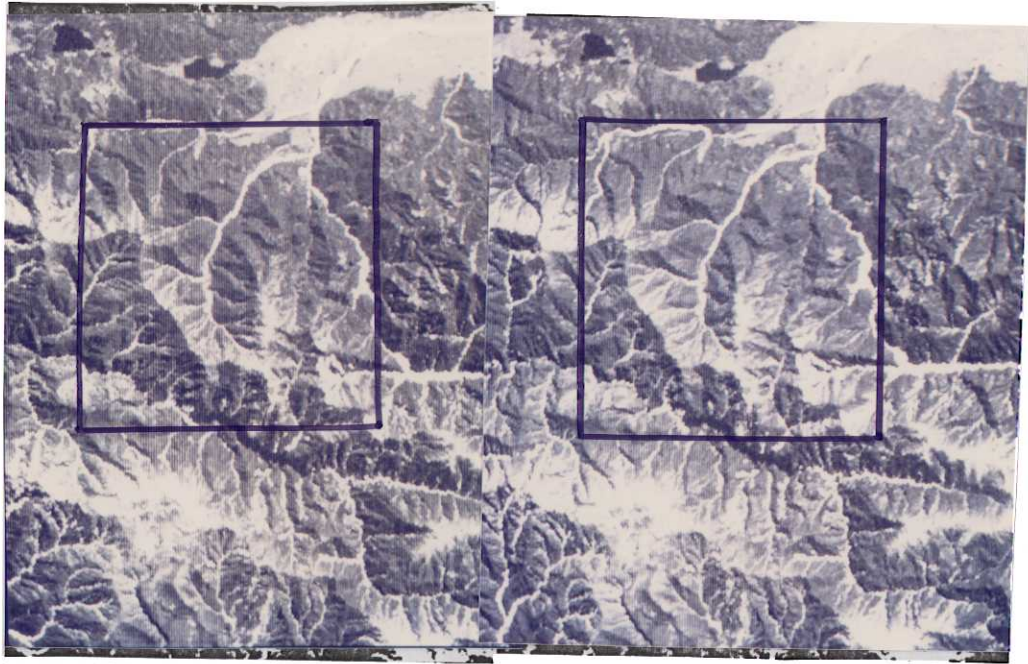
| 標定方法           | B/H 比 |       |
|----------------|-------|-------|
|                | 0.5   | 1.0   |
| 地上基準点<br>= 10点 | 7.5 m | 7.4 m |
| 地上基準点<br>= 25点 | 7.3 m | 7.2 m |

##### b) 左右方式 (SPOT 型)

| 標定方法           | B/H 比 |       |
|----------------|-------|-------|
|                | 0.5   | 1.0   |
| 地上基準点<br>= 10点 | 8.5 m | 8.3 m |
| 地上基準点<br>= 25点 | 8.3 m | 8.5 m |

注 1) 標定にあたっては衛星データを利用している。衛星データの計測精度は G.P.S を利用した場合のラドナット 4, 5号程度を想定している。

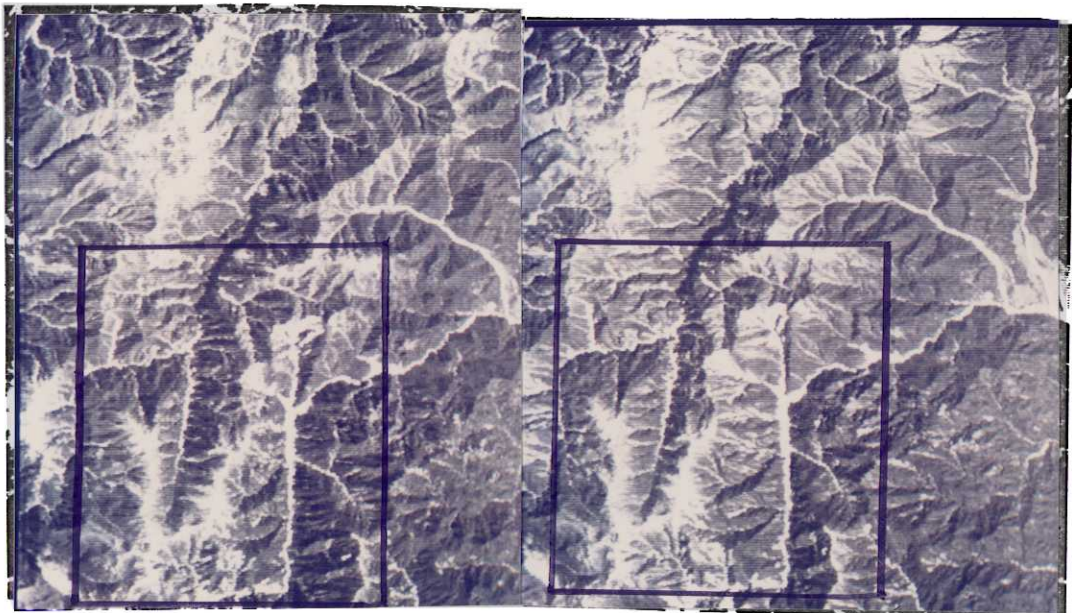
2) ステロ対応点の探索は 2種類の相関窓の併用により行っている。  
(9×9 及び 3×3)



a) 前視画像

b) 後視画像

写真 6.1 DTM作成に使用したステレオ画像の例 (その1)  
(前後方式,  $B/H=1.0$ , わく内がテストエリア)



a) 左視画像

b) 右視画像

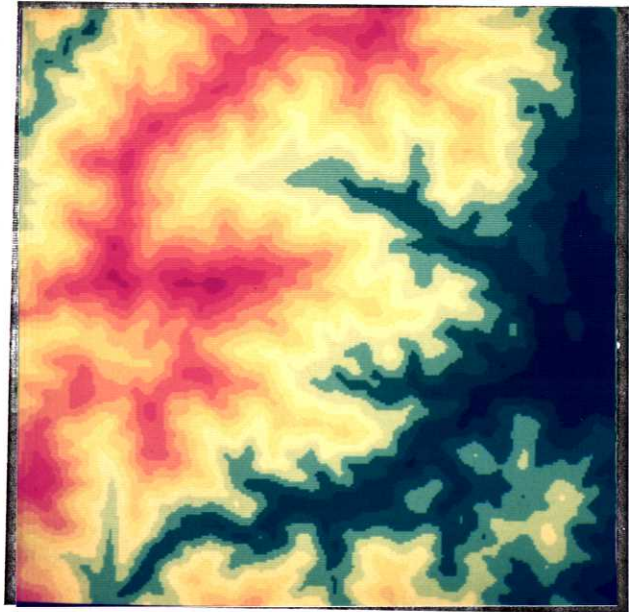
写真 6.2 DTM作成に使用したステレオ画像の例 (その2)  
(左右方式,  $B/H=1.0$ , わく内がテストエリア)



写真 6.3 自動作成されたD.T.M.と真のD.T.M.の比較 (前後方式)

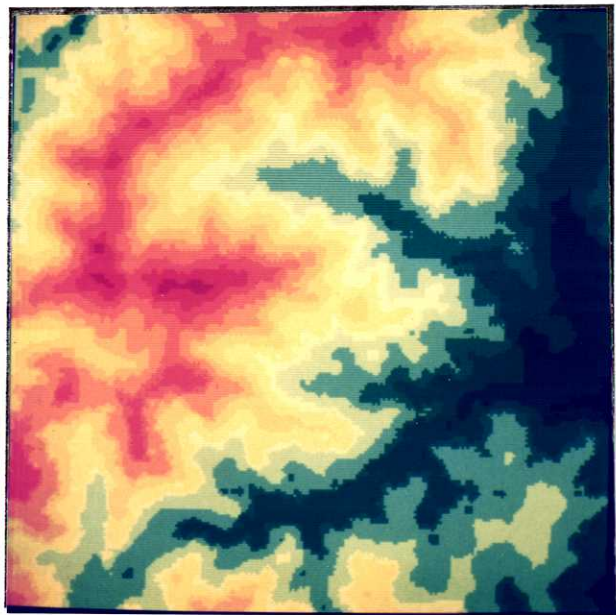
— B/H比による比較 —

a) 真のD.T.M.



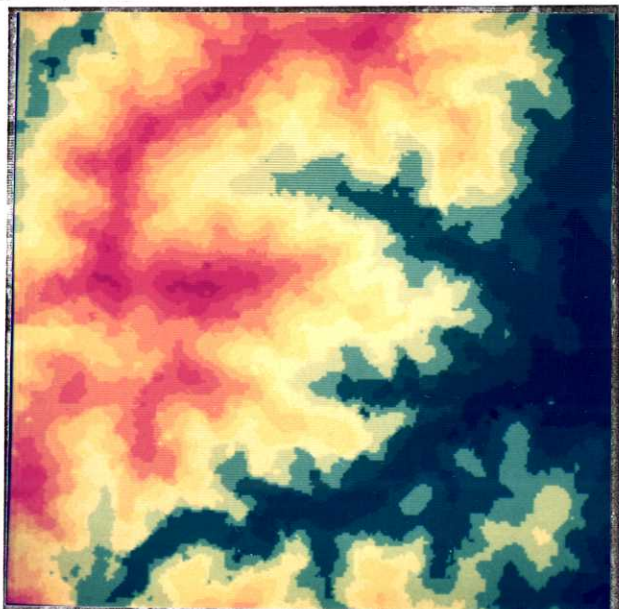
b) 自動作成DTM

{ B/H = 0.5  
前後方式



c) 自動作成D.T.M.

{ B/H = 1.0  
前後方式

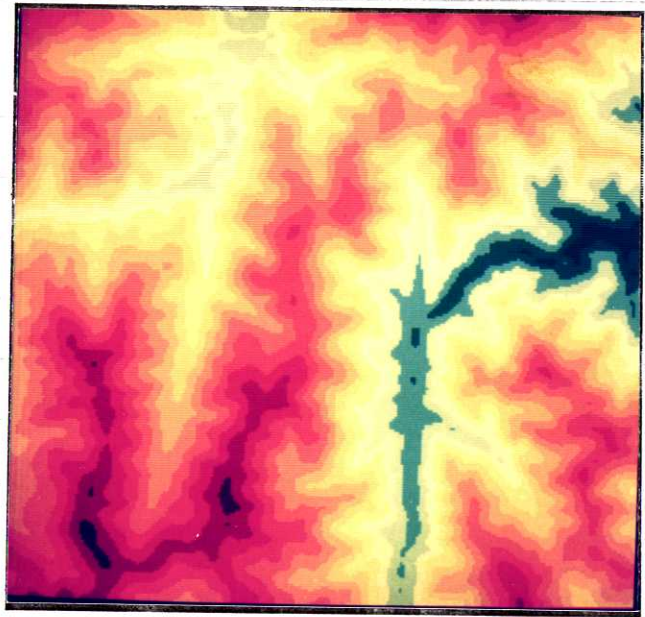


等高線間隔 = 25m

写真 6.4 自動作成されたD.T.M.と真のD.T.M.の比較(左右方式)

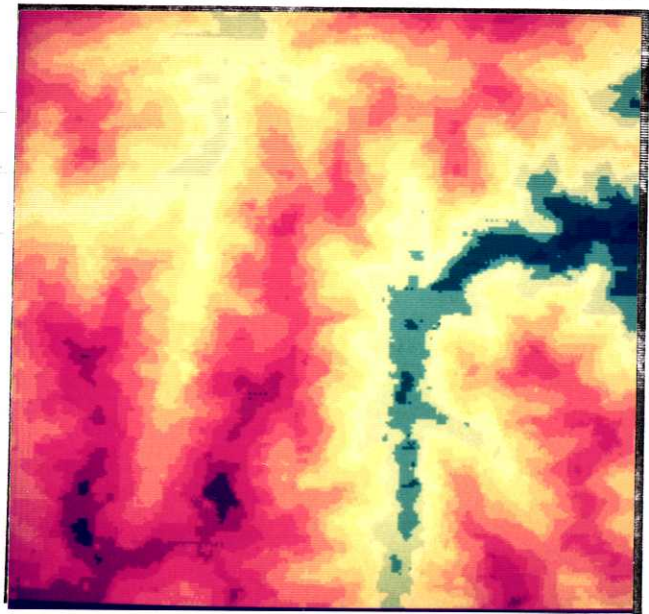
— B/H比による比較 —

a) 真のD.T.M.



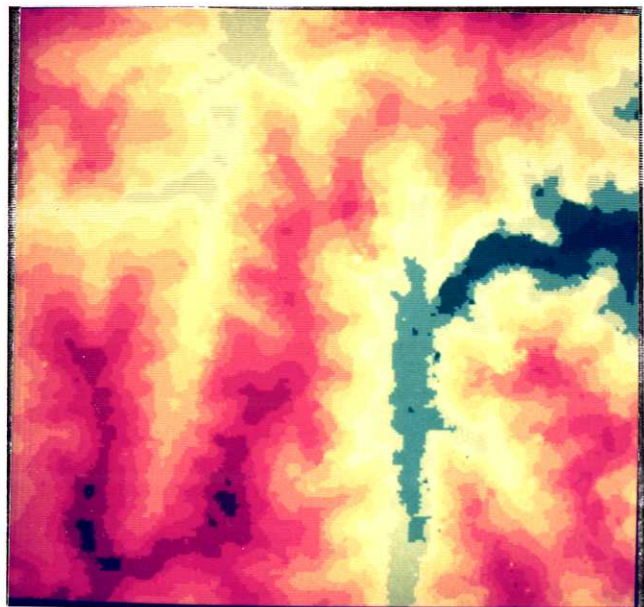
b) 自動作成D.T.M.

{ B/H = 0.5  
左右方式



c) 自動作成D.T.M.

{ B/H = 1.0  
左右方式



等高線間隔 = 25m

2) ステレオ対応点の探索手法及びB/H比による標高精度の検証

表6.2 ステレオ対応点の探索手法及びB/H比による標高精度の比較

a) 前後方式 (STEREOSAT, MAPSAT 型)

| 探索方法<br>(相関窓の大きさ)     | B/H 比              |                    |
|-----------------------|--------------------|--------------------|
|                       | 0.5                | 1.0                |
| 3 × 3 } 併用<br>9 × 9 } | 7.3 m<br>( 52 m)   | 7.2 m<br>( 110 m)  |
| 3 × 3                 | 9.7 m<br>( 109 m)  | 9.6 m<br>( 137 m)  |
| 9 × 9<br>(ピクセル)       | 11.0 m<br>( 169 m) | 11.5 m<br>( 145 m) |

{ 上段: 平均二乗誤差.  
下段カッコ内: 最大誤差

b) 左右方式 (SPOT 型)

| 探索方法<br>(相関窓の大きさ)     | B/H 比             |                    |
|-----------------------|-------------------|--------------------|
|                       | 0.5               | 1.0                |
| 3 × 3 } 併用<br>9 × 9 } | 8.3 m<br>( 65 m)  | 8.5 m<br>( 116 m)  |
| 3 × 3                 | 9.8 m<br>( 191 m) | 21.2 m<br>( 282 m) |
| 9 × 9<br>(ピクセル)       | 12.5 m<br>( 71 m) | 12.6 m<br>( 110 m) |

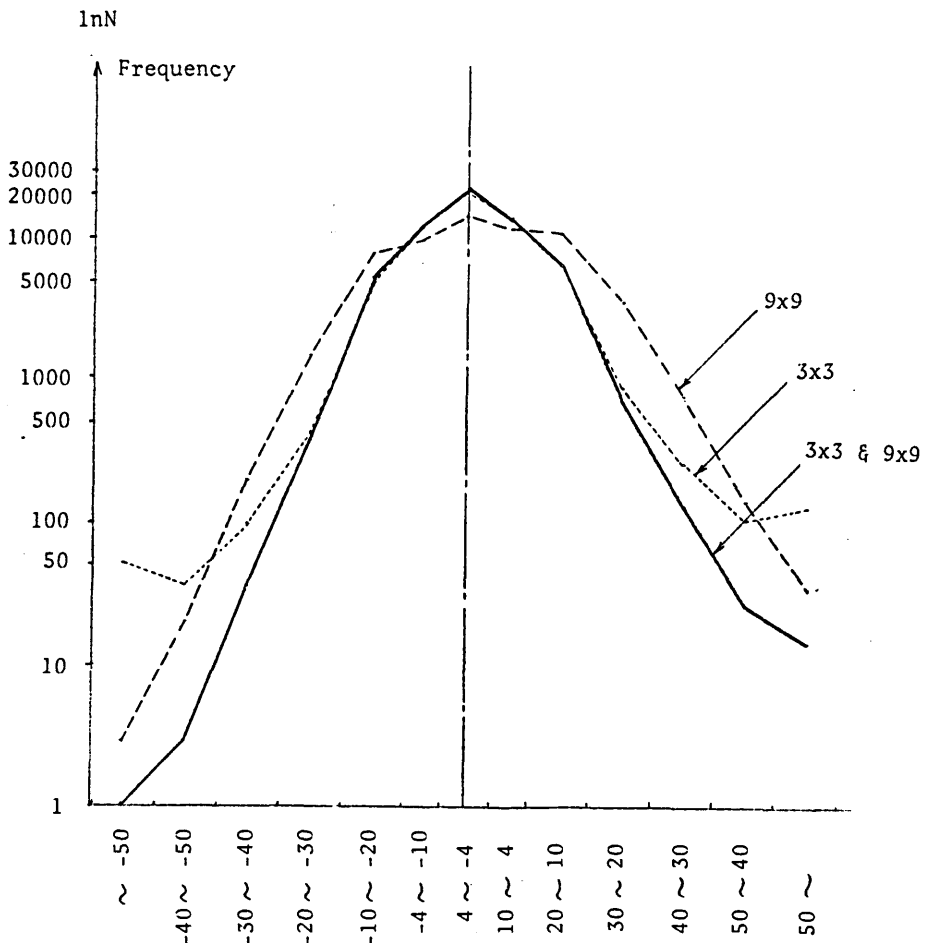
{ 上段: 平均二乗誤差  
下段カッコ内: 最大誤差

注 1) 標定は地上基準点 25 点と衛星データの同時利用に  
よっている。衛星データの計測精度は G.P.S を利用した場合の  
ランドサット 4.5 号程度を想定している。

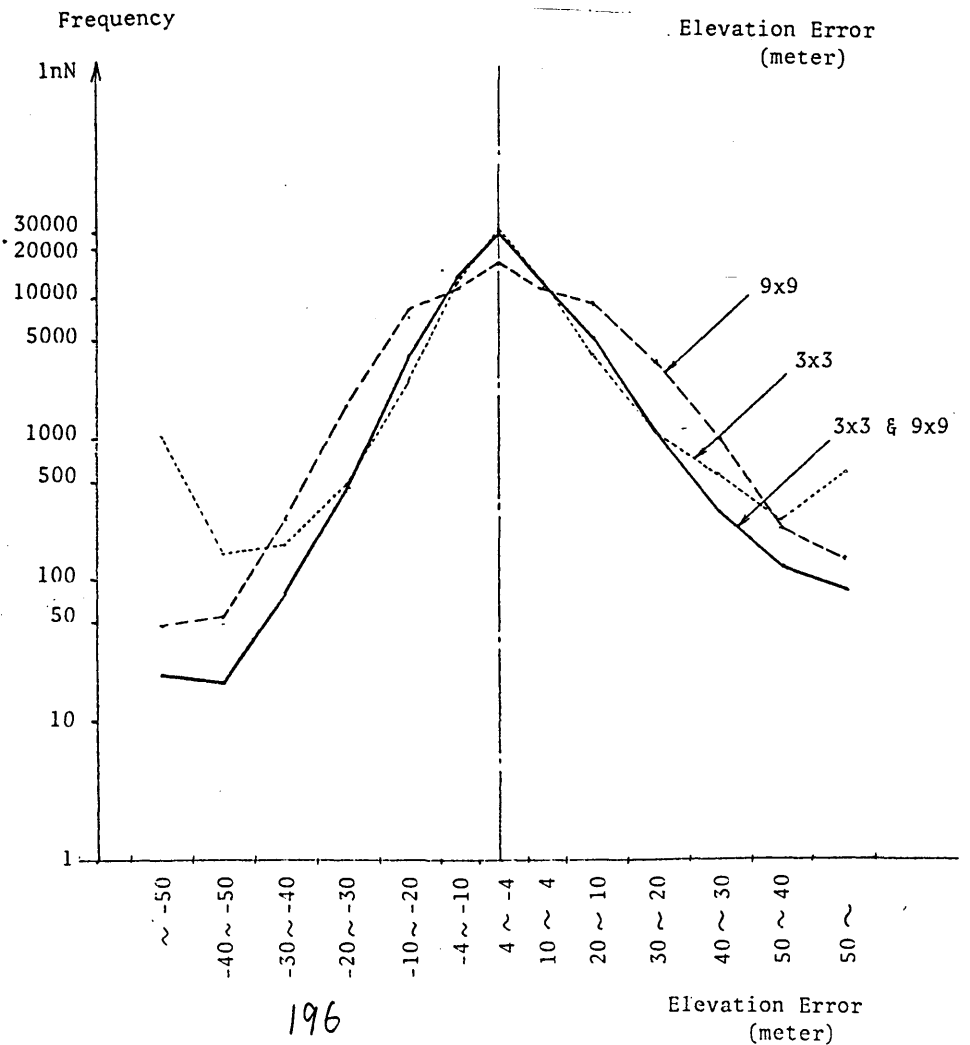
c) 誤差の頻度分布の比較<sup>注)</sup>

(図 6.3)

i)  $B/H = 0.5$



ii)  $B/H = 1.0$



注) 左右方式

表 6.3 ステロ探索時間(一点あたり)の比較

| 相関窓の大きさ<br>(ピクセル)   | 対応点一点あたり<br>計算時間 |
|---------------------|------------------|
| 3 × 3               | 0.93 ミリ秒         |
| 9 × 9               | 4.25 ミリ秒         |
| 3 × 3 } 併用<br>9 × 9 | 17.58 ミリ秒        |

注 1) 計算は HITAC-M280H による

2) センサ搭載方式は左右方式 (SPOT方式)

3)  $B/H = 1.0$

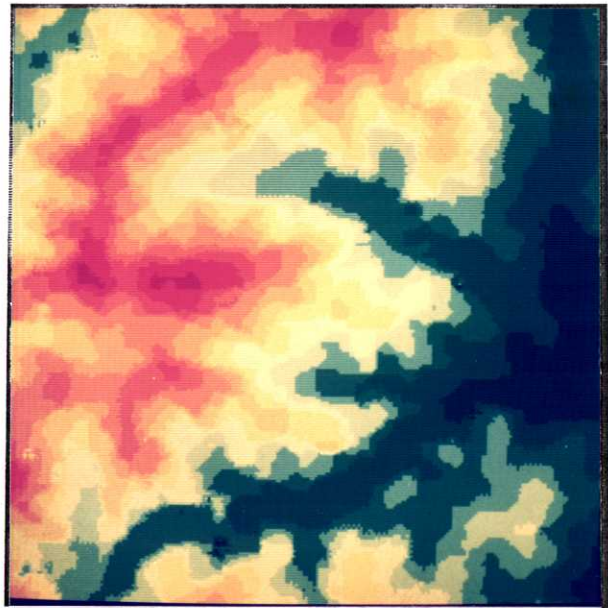


写真 6.5 自動作成 D.T.M. の比較 (B/H=1.0, 前後方式)

— ステレオ探索手法による  
比較<sup>注)</sup> —

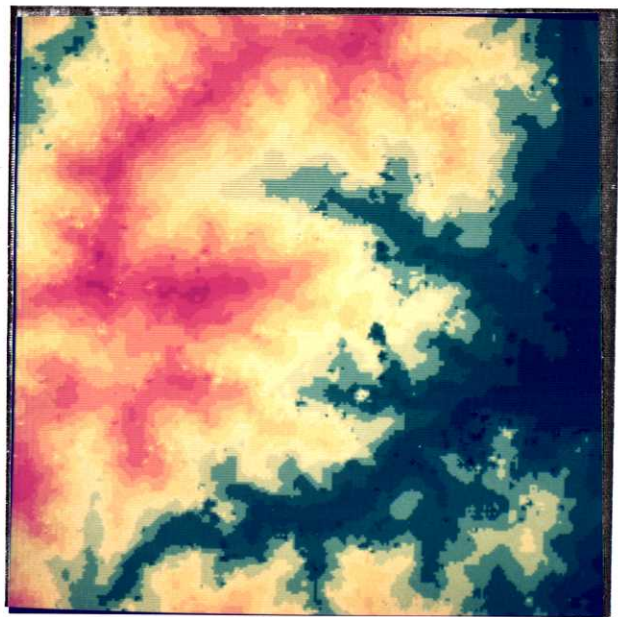
a) 単一相関窓による  
D.T.M.

(窓サイズ =  $9 \times 9$ )



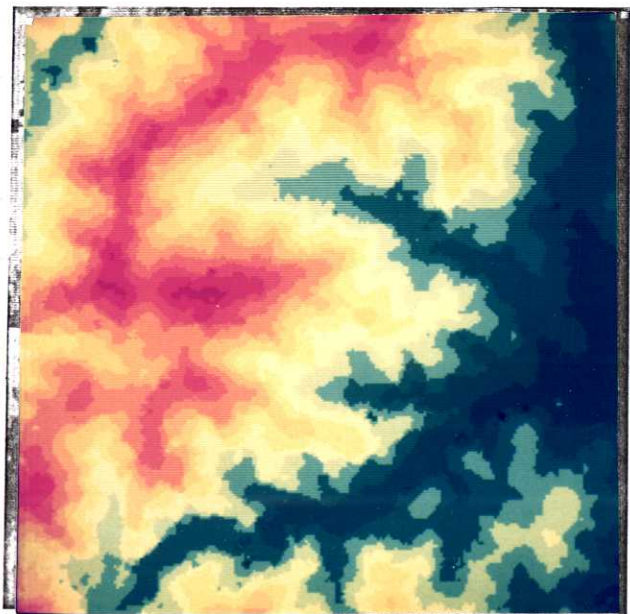
b) 単一相関窓による  
D.T.M.

(窓サイズ =  $3 \times 3$ )



c) 二種類の相関窓  
の併用による D.T.M.

(窓サイズ =  $3 \times 3$   
及  $9 \times 9$ )



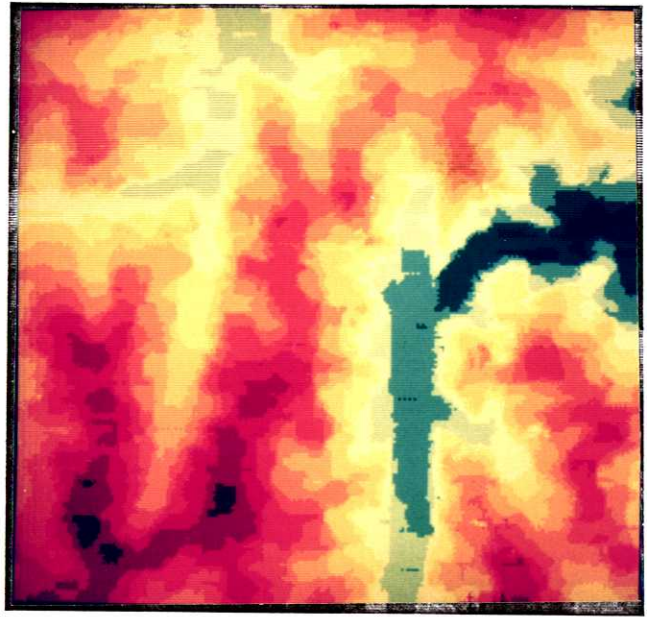
等高線間隔 = 25m

写真 6.6 自動作成 D.T.M. の比較 (B/H=1.0, 左右方式)

ステレオ探索手法による  
比較

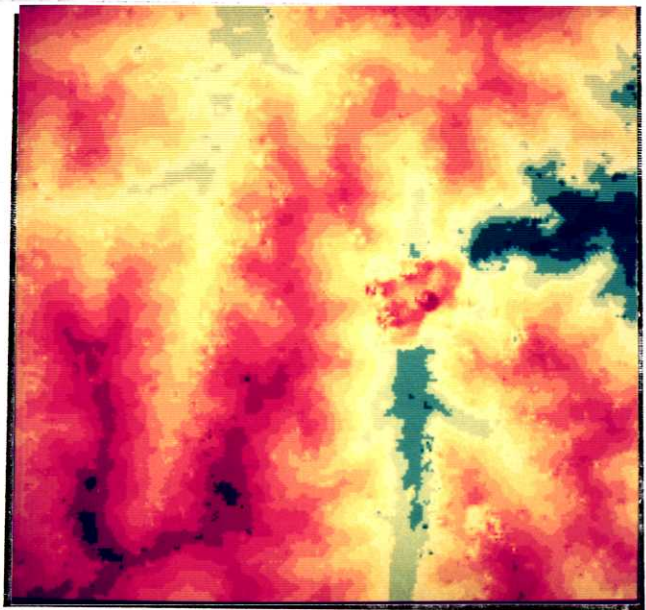
a) 単一相関窓による  
D.T.M.

(窓サイズ =  $9 \times 9$ )



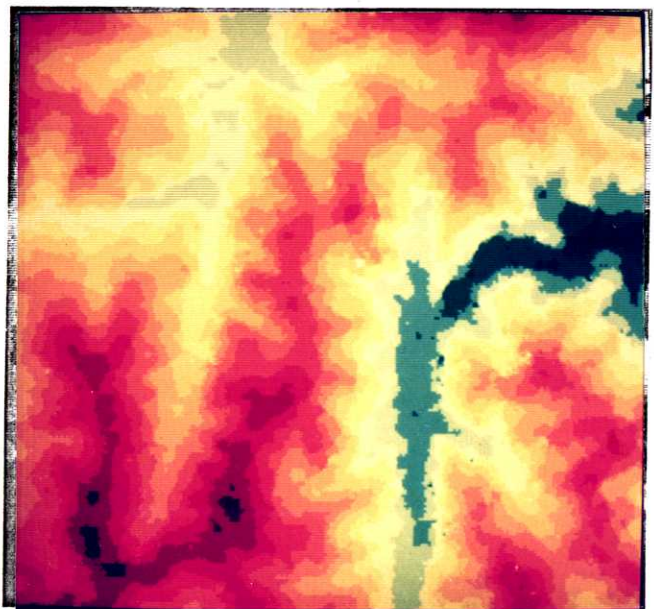
b) 単一相関窓による  
D.T.M.

(窓サイズ =  $3 \times 3$ )



c) 二種類の相関窓の  
併用による D.T.M.

(窓サイズ =  $3 \times 3$   
及び  
 $9 \times 9$ )



等高線間隔 = 25 m



## 6.4 考察結果

### 1) 標定方法による標高精度の変化について

標定において地上基準点数を25点から10点に変化させることにより、生ずる標高精度の減少は僅かである。これは衛星データを利用することによって、標定精度をさほど低下させることなく、地上基準点の点数を減少できることを示している。

### 2) ステレオ対応点の自動探索手法による標高精度の変化について

ステレオ対応点の探索において2種類の相関窓の併用が計算時間では不利であるが精度向上に有効であることが確認された。

すなわち、標高誤差の分布を見ると3×3の相関窓のみを用いた場合、

非常に大きな誤差が生ずることがあるが、3×3と9×9の窓を併用するこ

とによって、大きな誤差のみを除去し、同時に探索が迷走を生ずることを防止することができる。

### 3) B/H比による標高精度の変化について

B/H比は標高誤差/水平方向の誤差の比を示していることから、水平方向の誤差が等しければ、B/H比が大きくなるほど標高精度は向上

するはずである。第4章において、ステレオ対応点の探索誤差が低い場合に標定誤差が三次元測定に与える影響を  $B/H$  比ごとに見たケースでは  $B/H$  比の高いものほど良好な精度であり、また  $B/H$  比による精度

の差は大きいことが示された。しかしながら、標定誤差に加えてステレオ

対応点の探索誤差の影響も検討した今回のケースでは数値地形モデ

ルの自動作成精度の  $B/H$  比の差による違いは小さく、時には逆転

しているケースもある。これは、 $B/H$  比が増大するにつれ、視差による画像

の歪が大きくなり、ステレオ対応点の探索精度が低下した結果、 $B/H$

比の差による三次元測定精度の違いが相殺されたためと考えられる。

標高誤差の最大値は  $B/H$  比 = 1.0 に比べて 0.5 の場合の

方が小さいが、このことも  $B/H$  比の増大による視差歪の拡大に

よって探索に迷走が生じ易くなっていることに対応していると

考えられる。

このように、 $B/H$  比の増大によって探索精度が低下することを

考慮すると標高精度向上をはかる上では  $B/H$  比に上限が存在すると

考えられる。またこの上限値は山地部のように起伏の激しい地

域では平地部に比べ遙くはるゝと予想される。

#### 4) その他

最も精度のよいケース（前後方式については  $B/H = 1.0$ 、基準点数 = 25  
点、左右方式については  $B/H = 0.5$ 、基準点数 = 10点）では標高の平  
均 = 乗誤差 は  $7.2\text{m} \sim 8.3\text{m}$  である。したがってその3倍程度、すなわ  
ち約  $25\text{m}$  間隔の等高線の描画が可能であると判断される。

# 7 章 結 論

本研究の結論をまとめると以下の通りである。

- 1) リニアレイセンサのステレオ画像 (SPOT型, STEREOSAT型) から数値地形モデルを自動作成するために必要な一連の手法を開発しようとした。

これらのうち、主なものをあげると以下の通りである。

- (1) リニアレイセンサ画像の外部標定手法

リニアレイセンサ画像はセンサの外部標定要素 (位置, 姿勢) が時間毎 (画像のライン毎) に変化するため、従来の写真測量の手法をそのまま適用することはできなかつた。本研究では衛星搭載のセンサの位置・姿勢の変化が時間 (ライン番号) の多項式で表わされることを示し、多項式のパラメータを共線条件式及び衛星の位置, 姿勢の直接計測データより求める手法を開発した。その結果外部標定要素 (多項式のパラメータ) を少ない地上基準点で精度良く求めることが可能に方った。

すなわち、地上基準点のみを用いる場合に比べて同じ標定精度を得

るのに必要な地上基準点の点数を大幅に減少させることができたことが示された。

リニアレイセンサの外部標定要素の時間変動を時間の多項式で表わし、そのパラメータを地上基準点及び衛星の位置・姿勢の計測値の併用により求める方法は本研究により初めて得られたものである。

## (2) 画像相関によるステレオ対応点の自動探索手法

リニアレイセンサ画像を擬似共役直線 (Quasi-Epipolar line) にして並びかえることにより、ステレオ対応点の自動探索を効率化する手法を開発した。また画像相関手法については、大小二種類の相関窓を併用する手法を提案し、探索精度の向上に有効であることを示した。

2) ラドサットMSS画像等から作成したリニアレイセンサのシミュレーション画像を用いて数値地形モデルの自動作成を行い、画像の $B/H$ 比や地上基準点数等の要因が数値地形モデルの精度に与える影響を明らかにした。この結果、地形の3次元測定精度等に関して以下のようことが明らかとなった。



(1) 最も条件の良い場合においては 地上解像力が  $10\text{m} \times 10\text{m}$  のリニア  
アレイセンサーによるステレオ画像から、標高精度 (平均二乗誤差) が  $7 \sim 8$   
 $\text{m}$  程度の数値地形モデルを自動作成することが可能であると考えられ  
る。  $8\text{m}$  程度の標高誤差であれば 約  $25\text{m}$  間隔の等高線の描画  
が可能である。

(2) 自動作成された数値地形モデルの標高精度 (平均二乗誤差) は  $B/H$   
比が  $0.5$  の場合に 約  $7.3 \sim 8.3\text{m}$ 、 $1.0$  の場合に 約  $7.2 \sim 8.4\text{m}$  である。  
すなわち  $B/H$  比が 2 倍に増加した場合でも誤差の減少は僅かであ  
る。  $B/H$  比は (水平方向の誤差) / (標高方向の誤差) を表  
われていることから、水平方向の誤差を一定のもとで  $B/H$  比を 2 倍に則  
れば、標高方向の誤差は  $1/2$  倍になるはずである。しかしながらシミュ  
レーションにおいて  $B/H$  比の増大に伴う誤差の減少量が  
小さく、時にはマイナスとなったのは、 $B/H$  比の増大に伴って  
ステレオ画像間の視差が増大し、ステレオ対応点の自動探索誤差  
(水平方向の誤差) が増加したため  $B/H$  比を大きくしてこれによる有利

きが相殺された結果である。

- (3) このように、リアレンジ画像より数値地形モデルをステレオ対応点の自動探索により作成する場合には  $B/H$  比の増加による精度の向上は次第に逓減し、さらには精度の低下が生ずると考えられる。標高精度の向上に関する  $B/H$  比の上限値は採用される自動探索手法や画質などにより変化すると考えられるが、これらの条件が同じであれば対象地域の地形起伏が大きい場合には低下し、小さい場合には増加すると考えられる。

## 参考文献

## 才1章 参考文献

- (1) Engel, J.L. : Thematic Mapper - An Interim Report on Anticipated Performance, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1980
- (2) American Society of Photogrammetry : Manual of Photogrammetry, 4th Edition, Satellite Photogrammetry, Chap. XVII.
- (3) Chevrel, M., Courtois, M., Weill, G. : The SPOT Satellite Remote Sensing Mission, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, vol. 47, No. 8, 1981, PP.1163-1171.
- (4) Rivereau, J.C. : SPOT Imagery, Future Products And Potential Applications, I.S.P.R.S. Congress, Rio de Janeiro, Com. VII, PP.452-469, 1984
- (5) Itek Optical System : Conceptual Design of an Automated Mapping Satellite System (MAPSAT), Final Report Expert System Overview, Feb. 3, 1981.
- (6) Colvocoresses, A.P. : An Automated Mapping Satellite System (MAPSAT), Photogrammetric Engineering & Remote Sensing & Remote Sensing, vol. 48, No. 10, 1982, PP.1585-1591
- (7) Welch, R. : Impact of Geometry on Height Measurements from MLA Digital Image Data, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, vol. 49, No. 10, 1983, PP.137-144

- (8) Welch, R., Marko, W. : Cartographic Potential of a Spacecraft Line-Array Camera System : STEREOSAT, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, vol. 47, No. 8, 1981, PP. 1173 - 1185
- (9) Murai, S., Shibasaki, R. : Geometric Correction of Linear Array Sensor, Proceedings of International Symposium on Advances in the Quality of Image Data, Com. I, Canberra, Australia, Apr., 1982
- (10) 村井俊治, 柴崎亮介 : リニアアレイセンサによる数値地形モデルの自動作成に関するシミュレーション, 写真測量とリモートセンシング vol. 23, No. 3, 1984, PP. 13 - 20
- (11) Murai, S., Shibasaki, R. : A Study on Simulation of Three Dimensional Measurement with Use of Stereo Linear Array Sensor, I. S. P. R. S. Congress, Rio de Janeiro, Com. III, 1984, PP. 759 - 767.
- (12) Hofman, O. : Investigations of the Accuracy of the Digital Photogrammetry System DPS, A Rigorous Three Dimensional Compilation Process for Push Broom Imagery, I. S. P. R. S. Congress, Rio de Janeiro, 1984, Com. IV/2, PP. 180 - 187
- (13) Hofman, O. : Applications of the Digital Photogrammetry System DPS, A Rigorous Three Dimensional Compilation Process for Push Broom Imagery, I. S. P. R. S. Congress, Rio de Janeiro, 1984, Com. IV/2, PP. 172 - 179

- (14) Ackerman, F. : Use and Benefits of  $X, Y, \Delta Z$  Auxiliary Data for Aerial Triangulation - Results of the Test Mission " Bodensee ", 1982, Discussion Paper for J.S.P.R.S.
- (15) Francois, I.R., Corien, L.J.H. : Applications of Navigation Systems and of Sensor Orientation Systems in Survey Navigation, in Aerial Triangulation and in Establishment of Control, I.S.P.R.S. Congress, Rio de Janeiro, 1984, Com. I, PP 26-51.
- (16) Wu, J. : Triplet Evaluation of Stereo - Push Broom Scanner Data, I.S.P.R.S. Rio de Janeiro, 1984, Com. III, PP. 1164 - 1178
- (17) 森忠次, 服部進, 内田修 : 分割画像ごとの相関法による空中写真からの自動図化, 写真測量とリモートセンシング, vol. 24, No. 1, 1985, pp 13 - 22.
- (18) Ethlers, M. : Increase in Correlation Accuracy of Remote Sensing Imagery by Digital Filtering, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 48, No. 3, March 1982, PP. 415 - 420
- (19) Ethlers, M. : Filter Techniques and Their Application in Digital Correlation, I.S.P.R.S. Congress, Com. III, Hamburg, 1980, PP 193 - 201

- (20) 前田 紘, 村井俊治等: 累積頻度曲線を用いた LANDSAT MSS データの  
ラジオメトリック補正, 写真測量とリモートセンシング,  
vol. 19, No. 4, PP4-9, 1980
- (21) 福江 潔也, 下田 陽久等: ランダムノイズ付加による LANDSAT MSS  
画像の画質向上, 写真測量とリモートセンシング,  
vol. 21, No. 1, 1982, PP10-16
- (22) Zhang, Z.: On the Generation of Parallax Grid by Using  
Off-line Digital Correlation, I.S.P.R.S Congress  
Rio de Janeiro, 1984
- (23) Ackermann, F.: High Precision Digital Image Correlation,  
Discussion Paper for J.S.P. 1983.
- (24) Makarovič, B.: Image Correlation Algorithms, I.S.P.R.S.  
Congress, Com. II, Hamburg, 1980, pp 139-158.
- (25) Keating, J.T., Wolf, P.R., Scarpace, F.L.,: An Improved Method  
of Digital Image Correlation, Photogrammetric Engi-  
neering & Remote Sensing, 1975, PP 993-1002
- (26) Helava, U.V., Chapelle, W.E.,: Epipolar - Scann Correlation, Bendix  
Technical Journal, Spring 1972
- (27) Panton, D.J.: A Flexible Approach to Digital Stereo Mapping,  
Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, vol.  
47, No. 3, 1981, PP 323-333

- (28) Makarovič, B.; Automatic Off-line Generation of Digital Terrain Models, I.S.P.R.S. Congress, Com. II, Hamburg, 1980, pp. 167-176
- (29) Marr, D., Poggio, T.: A Theory of Human Stereo Vision, A.I. Memo No. 451, MIT Artificial Intelligence Lab. 1977
- (30) Grimson, W.E.L.; A Computer Implementation of a Theory of Human Stereo Vision, A.I. Memo, No. 565, MIT Artificial Intelligence Lab. 1980
- (31) Ohta, Y., Kanade, T.: Stereo by Intra- and Inter Scanline Search Using Dynamic Programming, Technical Report, Computer Science Dept. CMU. 1983
- (32) 森忠次, 服部進, 内田修: 隠蔽問題を考慮した多段階くり返し相関によるステレオマッチング, 日本写真測量学会年次学術講演会, 1985.5, pp 57-62
- (33) 建石隆太郎 : 位置の関数で与えられる数値データからの特徴抽出とその画像化に関する研究, 東京大学学位論文, 昭和56年



## 第2章 参考文献

- (1) Welch, R., Marko, W.: Cartographic Potential of a Spacecraft Line-Array Camera System: STEREOSAT, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, vol. 47, No. 8, 1981, PP. 1173-1185
- (2) Itek Optical System: Conceptual Design of an Automated Mapping Satellite System (MAPSAT), Final Report Expert System Overview Feb. 3, 1981
- (3) Colvocoresses, A.P.: An Automated Mapping Satellite System (MAPSAT), Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, vol. 48, No. 10, 1982, PP. 1525-1591
- (4) Chevrel, M., Courtois, M., Weill, G.: The SPOT Satellite Remote Sensing Mission, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 47, No. 8, 1981, PP. 1163-1171.
- (5) 前田 紘, 村井俊治等: 累積頻度曲線を用いた LANDSAT MSS データのラジオメトリック補正, 写真測量とリモートセンシング, vol. 19, No. 4, PP. 4-9, 1980
- (6) 福江 潔也, 下田 陽久等: ランダムノイズ付加による LANDSAT MSS 画像の画質向上, 写真測量とリモートセンシング, vol. 21, No. 1, 1982, PP. 10-16

- 
- (7) 村井俊治, 前田 紘: 地球資源衛星MSSデータの幾何学的補正に関する研究, 東京大学生産技術研究所報告, vol. 27, No. 5, PP161-191, 1978-11.
- (8) 日本リモートセンシング研究会編: リモートセンシングノート - 原理と応用 -
- (9) Saastamoinen, J.: Refraction, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing vol. 38, PP 798-810, 1972

### 第3章 参考文献

- (1) 村井, 奥田, 中村: 非測定用カメラを用いた解析的写真測量に関する研究, 東京大学生産技術研究所報告, vol.29, No.6, 1981,
- (2) Saastamoinen, J.: Refraction, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, vol.38, pp798-810, 1972
- (3) Welch, R., Marko, W.: Cartographic Potential of a Spacecraft Line Array Camera System = STEREOSAT, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing vol.47, No.8, 1981, pp1173-1185
- (4) Itek Optical System: Conceptual Design of an Automated Mapping Satellite System (MAPSAT), Final Report, Expert System Overview Feb. 3, 1981
- (5) American Society of Photogrammetry & Remote Sensing  
: Manual of Photogrammetry (4th Edition),  
Satellite Photogrammetry (Chap XVII)
- (6) 日本写真測量学会編: 解析写真測量, 昭和58年

#### 才4章 参考文献

---

- (1) Welch, R., Marko, W.: Cartographic Potential of a Spacecraft Line Array Sensor Camera System: STEREOSAT, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, vol. 47, No. 8, 1981, pp. 1173 - 1185
- (2) Itek Optical System : Conceptual Design of an Automated Mapping Satellite System (MAPSAT), Final Report, Expert System Overview Feb. 3, 1981

## 第5章 参考文献

- (1) Makarovič, B. : Image Correlation Algorithms, I.S.P.R.S. Congress, Com. II, Hamburg, 1980, pp 139-158.
- (2) 森忠次, 服部進, 内田修 : 分割画像ごとの相関法による空中写真からの自動図化, 写真測量とリモートセンシング, vol. 24, No. 1, 1985, pp 13-22
- (3) Ethlers, M. : Increase in Correlation Accuracy of Remote Sensing Imagery by Digital Filtering, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 48, No. 3, March 1982, pp. 415-420
- (4) Ethlers, M. : Filter Techniques and Their Application in Digital Correlation, I.S.P.R.S. Congress, Com. III, Hamburg, 1980, pp 193-201
- (5) 前田紘, 村井俊治等 : 累積頻度曲線を用いた LANDSAT MSS データの放射メトリック補正, 写真測量とリモートセンシング, vol. 19, No. 4, pp 4-9, 1980
- (6) 福江潔也, 下田陽久等 : ランダムノイズ付加による LANDSAT MSS 画像の画質向上, 写真測量とリモートセンシング, vol. 21, No. 1, 1982, pp 10-16

- (7) 画像の処理と解析, 日本リモートセンシング研究会編,
- (8) Zhang, Z. : On the Generation of Parallax Grid by Using Off-line Digital Correlation, I.S.P.R.S Congress, Rio de Janeiro, 1984
- (9) Ackermann, F. : High Precision Digital Image Correlation, Discussion Paper for J.S.P. 1983.
- (10) Keating, J.T., Wolf, P.R., Scarpace, F.L., : An Improved Method of Digital Image Correlation, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 1975, PP 993-1002
- (11) Helava, U.V., Chapelle, W.E., : Epipolar - Scann Correlation, Bendix Technical Journal, Spring 1972
- (12) Panton, D.J. : A Flexible Approach to Digital Stereo Mapping, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, vol. 47, No. 3, 1981, PP 323-333
- (13) Makarovič, B. ; Automatic Off-line Generation of Digital Terrain Models, I.S.P.R.S. Congress, Com. II, Hamburg, 1980, PP. 167-176
- (14) Marr, D., Poggio, T. : A Theory of Human Stereo Vision, A.I. Memo No. 451, MIT Artificial Intelligence Lab. 1977

- (15) Grimson, W.E.L. : A Computer Implementation of a Theory of Human Stereo Vision, A.I. Memo, No. 565, MIT. Artificial Intelligence Lab. 1980
- (16) Ohta, Y., Kanade, T. : Stereo by Intra- and Inter Scanline Search Using Dynamic Programming, Technical Report, Computer Science Dept. CMU. 1983.
- (17) 森忠次, 服部進, 内田修 : 隠蔽問題を考慮した多段階くり返し相関によるステレオマッチング, 日本写真測量学会年次学術講演会, 1985.5, PP 57-62
- (18) Ehlers, M., : On the Probability of Generalized Correlation Functions, I.S.P.R.S. Congress, Rio de Janeiro Com. III, 1984, PP 139-150
- (19) Barea, D.I., Silverman, H.F., : A Class of Algorithm for Fast Digital Image Registration, IEEE. Trans., vol. C-21, PP. 179-186, 1972.
- (20) 森忠次, 服部進, 内田修 : 投影歪による画像相関の低下に関するスペクトル的考察, 写真測量とリモートセンシング, vol. 22, No. 4, 1983, pp 33-39.
- (21) 建石隆太郎 : 位置の関数で与えられる数値データからの特徴抽出とその画像化に関する研究, 東京大学学位論文, 昭和56年

(22) 森忠次, 服部進, 内田修, 田辺広志: 画像相関を用いた空中写真からの等高線自動図化の方法 — 偏位修正と標高ファイルの作成, 写真測量とリモートセンシング, vol.21, No.2, 1982, pp.4-14.

(23) Opitz, B. K., : Advanced Stereo Correlation Research, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol.49, No.4, 1983, pp533-534

(24) Horn, B. K. P., : Non Correlation Methods for Stereo Matching, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol.49, No.4, 1983, pp535-536