

土木研究所報告

第171号

目 次

- 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.....柴崎亮介
-

昭和62年2月

建設省土木研究所

Copyright © 1987年 by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.W.R.I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複写は土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

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

柴崎 亮介*

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

by Ryosuke Shibasaki*

要 旨 :

近年のセンサ技術の進歩により衛星に搭載したCCDリニアアレイセンサを用いて地上解像力が10~20mのステレオ画像が得られるようになってきている。これらを用いて5万分の1~10万分の1の地形図に対応した精度で地形の三次元計測が可能と言われている。しかしながら、リニアアレイセンサによるステレオ画像を用いた三次元計測手法は検討されていなかった。

本研究は(1)地上基準点と衛星の位置、三軸姿勢の計測値を併用して撮影時のセンサの位置、姿勢の時間変化を時間の多項式として解析的に求める方法と、(2)ステレオ画像でステレオ対応点を面積相関により自動探索する方法を開発し、リニアアレイセンサによるステレオ画像を用いた地形の三次元測定を可能にした。そして、シミュレーション画像を用いて三次元測定の精度を検証し、地上解像力が10mのステレオ画像から7~8mの標高精度(平均二乗誤差)が得られることを示した。これは約25m間隔の等高線が描画できることを意味している。

キーワード: CCDセンサ, リニアアレイセンサ, ステレオ画像, 三次元測定, 衛星リモートセンシング, 外部標定, 面積相関, ステレオマッチング, 数値地形モデル, コンピュータシミュレーション

Synopsis :

In recent years, CCD linear array sensor enables us to obtain stereo image with 10m ground resolution from space. It is said that using these stereo images, three dimensional terrain measurement whose accuracy corresponds to 1:50,000-1:100,000 scale map is possible. However, it has not been investigated how to make three dimensional measurement using stereo linear array sensor data.

This study proposes following methods of three dimensional measurement using stereo linear array sensor data.

- (i) Method of estimating the change of sensor position and attitude analytically using both ground control points and satellite position and attitude data measured with on-board sensors (exterior orientation method for linear array sensor).
- (ii) Method of measuring image coordinates of stereo conjugate points automatically by

* 建設省土木研究所企画部システム課研究員, 工博

Research Engineer, Dr. Eng. System Division, Planning and Research Administration
Department, Public Works Research Inst.

applying image correlation technique (stereo matching for linear array sensor data).

The author obtain digital terrain model whose height error is about 7–8m (root mean square error) by applying the methods proposed here to simulated stereo image data with 10m ground resolution. 7–8m error of height enables to draw contour line with 25m interval.

Key Words : CCD sensor, linear array sensor, stereo image, three dimensional measurement, satellite remote sensing, exterior orientation, area correlation, stereo matching, digital terrain model, computer simulation

目 次

1. 研究の概要	1	4.3 外部標定シミュレーションの結果	28
1.1 研究の背景と目的	1	4.3.1 地上基準点の数に関する検討	28
1.2 従来の研究	2	4.3.2 地上基準点の分布に関する検討	29
1.2.1 リニアアレイセンサの外部標定に関する従来の研究	2	4.3.3 衛星の位置・姿勢データの併用手法の効果に関する検討	32
1.2.2 ステレオ対応点の自動探索に関する従来の研究	4	4.4 まとめ	33
1.3 研究の特色	6	5. 画像相関を用いたステレオ対応点の自動探索	35
2. リニアアレイセンサによるステレオ画像の作成	6	5.1 はじめに	35
2.1 画像作成シミュレーションにおいて考慮すべき要因	6	5.2 画像の前処理	36
2.1.1 リニアアレイセンサ諸元及びB/H比	7	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	39
2.1.2 ステレオ画像の撮影方式	7	5.3.1 ステレオ対応点の相関精度に関する検討	39
2.1.3 衛星(プラットフォーム)の軌道及び姿勢	8	5.3.1.1 検討すべき要因の抽出	39
2.1.4 地球の自転及び曲率	12	5.3.1.2 各要因の検討結果	40
2.1.5 地形及び地表輝度データ	13	5.3.2 ステレオ対応点の自動探索アルゴリズム	52
2.1.6 大気の影響	13	5.4 対応結果の後処理	53
2.2 ステレオ画像の作成シミュレーション	14	6. 数値地形モデルの自動作成精度に関する検証	56
2.2.1 ステレオ画像の作成方法	14	6.1 精度の検証において検討すべき要因の抽出	56
2.2.2 テストスタディ	16	6.2 自動作成精度の検証方法	56
3. リニアアレイセンサ画像の幾何補正	17	6.3 検証結果	57
3.1 はじめに	17	6.4 考察結果	63
3.2 リニアアレイセンサの幾何学	17	7. 結論及び今後の課題	63
3.2.1 座標系	17	(参考文献)	64
3.2.2 共線条件	19		
3.3 内部歪等の補正方法	21		
3.3.1 内部歪等の種類	21		
3.3.2 補正方法	21		
3.4 リニアアレイセンサの外部標定方法	22		
3.4.1 地上基準点のみを利用する外部標定方法	22		
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	24		
4. リニアアレイセンサの外部標定シミュレーション	25		
4.1 シミュレーションで検討する要因の抽出	25		
4.2 外部標定シミュレーションの方法	27		

1. 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号によって得られた MSS 画像や RBV 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, RBV 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), STEREOSAT, MAPSAT および SPOT に搭載されるリニアアレイセンサによれば, 地上解像力が10m～30mのステレオ画像が得られる。Large Format Camera や Metric Camera は従来の航測カメラと同様の構造のものである。一方リニアアレイセンサは撮像面に光検知素子を直線上に並べたものであり, 衛星の移動に伴って, ほうきで掃くように地表面を走査するものである。

これらにより 5万～10万分の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, 特に開発途上国などのように地図

等の適当な地域データの整備されていない地域では, 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。

図1-1は10万分の1より小さい縮尺の地図が全体の50%以下しかカバーしていない国, 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極めて高いことがわかる。

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,

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
U.S.A	LANDSAT	Thematic Mapper ⁽¹⁾ MSS	84年打上げ
	Shuttle	Large Format Camera ⁽²⁾	84年打上げ
	Shuttle	Shuttle Imaging Radar ⁽²⁾	81年打上げ
	MAPSAT	Linear Array Sensor ⁽²⁾	計 画 中
	STEREOSAT	" " "	計 画 中
E.S.A*	Spacelab	Metric Camera ⁽²⁾ (Zeiss RMK 30/23)	1983年 打上げ
France	SPOT	Linear Array Sensor ^{(2), (3), (4)}	85年打上げ 予 定

(*) ESA: European Space Agency

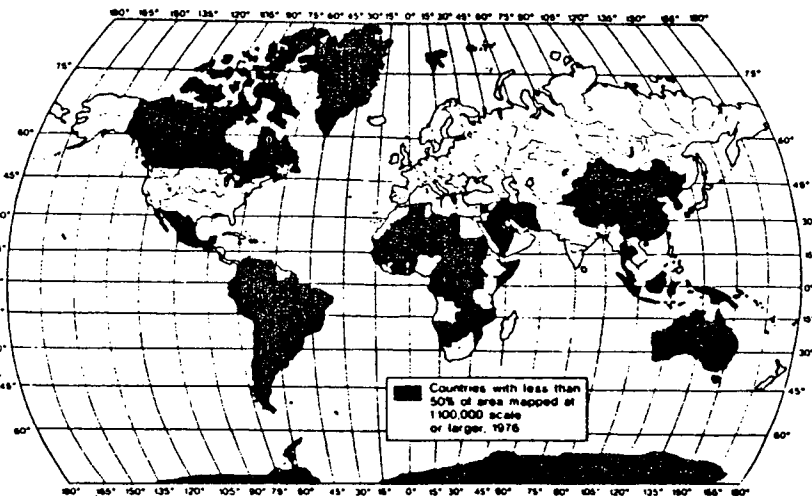


図1. 1 10万分の1より大きい縮尺の地図が全域の50%以下しかカバーしていない国, あるいは地域(黒く塗った部分)

(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。

Large Format Camera 等の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、リニアアレイセンサは、従来のスキャナーに比べ可動部分が少ないため幾何的歪が小さいという秀れた特長を持っているものの、レンズカメラに比べ、表1.2に示すような相違点があるため、三次元測定に利用するためには以上のような課題を解決する必要がある。

(1) リニアアレイセンサではセンサの位置と三軸姿勢がラインごとに変化するためそれら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ない。(リニアアレイセンサの外部標定手法の開発)

(2) リニア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で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。

2) 研究の目的

本研究では1)で述べたような課題を踏まえ、以下の2点を研究の目的とした。

(1) リニア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^{注)}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のある技術的な課題は大きく以下の2つにわけられる。

1) リニアアレイセンサの外部標定に関する課題

2) リニアアレイセンサによるステレオ画像におけるステレオ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 リニアアレイセンサの外部標定に関する従来の研究

リニア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。1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)⁽²⁾や Stellar Sensor⁽²⁾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1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って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⁽⁵⁾ や Colvocoresses⁽⁶⁾, Welch⁽⁷⁾⁽⁸⁾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

注) B/H比 (Base / Height 比) :

ステレオ画像撮影時の基線長(Base)と高度(Height)との比。

一般には、B/Hの値が大きいほど水平方向に対して高さ方向の測定精度が相対的に向上する。

表1.2 三次元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 (階調・色調等)	デジタル (電気信号)
記録媒体	フィルム	MT・ディスクなど
光束の幾何モデル	中心投影	ライン方向, 平行投影 ライン直角方向, 中心投影
外部標定要素	レンズ位置 X_0, Y_0, Z_0 三軸姿勢 $\omega_0, \phi_0, \kappa_0$	センサ位置 $X_0(t), Y_0(t), Z_0(t)$ 三軸姿勢 $\omega_0(t), \phi_0(t), \kappa_0(t)$ t = 時間
図化方法 (三次元座標の計算)	図化機による図化	機械によるステレオ対応点の自動探索と三次元座標の計算

がある。Itek によれば MAPSAT 衛星画像を用いて 7~25mの相対(測地)精度, 50~100mの絶対(測地)精度を得るためには, 10m程度のセンサの位置計測精度及び 4 秒前後 (1σ 値)⁽⁸⁾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の地形図に対応した絶対測地精度が得られてはいない。すなわち, 5万~10万分の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, 衛星に対する要求性能を緩和する代りに, その緩和分を画像処理方法等でカバーした方が得策と考えられる。

後者の, 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方法は, 筆者らにより初めて開発されたものである。^{(9), (10), (11)}それ以降の研究としては Hofman,^{(12), (13)} Wu⁽¹⁶⁾のものがある。

Hofmanは^{(12), (13)}前視, 後視に加えて鉛直下方を向いたリニアアレイセンサを搭載するという3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3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, 姿勢を求めるというものである。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, 姿勢の求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できることができ, 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 Hofman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 Hofman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の方法は⁽¹⁶⁾Hofman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, Hofman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ー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。この意味でWuの方法は筆者らが先に提案した方法にほぼ沿ったものである。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, 航定機のようにプラットフォームの位置, 姿勢変化が複雑で, 時間 t 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, 姿勢変化をよりよく表わ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の点数が増加するという欠点がある。一方, 衛星は位置, 姿勢の変化が安定していることから, それらの変化を多項式で近似する方法が適していると言える。

しかしながら, これらの解析的手法を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, 地上の走査巾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 では走査幅約60kmに対し高度約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, センサの位置, 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る例がある。⁽¹⁴⁾

⁽¹⁵⁾しかしながら, 多くの例ではセンサの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, そ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は, 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

注) σ : 標準偏差

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精度の良い標定を効率的に行うことができる。

本研究は衛星の位置、姿勢の時間変化を多項式近似する解析的標定方法と衛星の位置、姿勢を直接計測する方法を併用することによって、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わけられるので、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わけられる。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べ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。リニアアレイセンサ画像の前処理において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¹⁷⁾²³⁾²⁹⁾³⁰⁾³⁷⁾

(2) 画像の縮約による階層構造化¹⁷⁾²³⁾²⁸⁾

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は必ず同一ライン番号を

表 1.3 画像の自動相関精度の低下原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	○画像(センサ)のノイズ ○センサの検知素子の感度特性の差によるラインノイズ	○高周波成分の除去 (17), (18), (19) (近傍平均, ローパスフィルター等) ○各検知素子のキャリブレーション (20) ○累積頻度曲線を利用したラインノイズの除去 (21) ○ランダムノイズ付加によるラインノイズの除去
撮影条件に起因するもの	○光学系の周辺減光 ○太陽光の反射 ○地形の起伏等による陰影 ○撮影時間、方向の違いによる画像間の輝度レベル差	○$\cos \theta$補正,シェイディング曲面の作成による補正等 ○同上,あるいはサンスポット部分の抽出・除去 ○陰影部の抽出・除去 (22) ○正規化等 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がある (23)
地表面の状況に起因するもの	○規則的な輝度の変化(テクスチャ) ○積雪,雲など一様な輝度の分布	○規則的な変化パターンに対応する周波数成分の除去等 ○ローパスフィルタ(相関窓の拡大等) ○一様部分の除去 (22)
その他	○自動相関精度向上を目的としたエッジ強調	○ラプラシアン等によるエッジ強調 (24) (32)

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できる。

画像の縮約によるヒエラルキー構造化は図1.3に示すように画像縮約を繰り返すことによって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(縮約度の高い)画像から行い、それを順次、最低レベル(原)画像まで続ける。上位レベルの画像における探索結果は下位レベル画像にお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た、大きな探索エラーを防止することができると思われる。

リニア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、一般の写真におけ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。本研究ではこのような近似的共役直線(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。

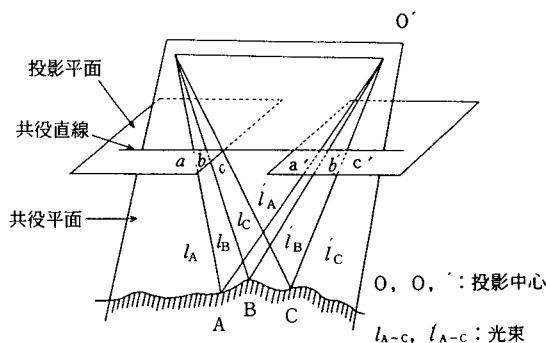


図 1.2 共役直線と共役平面

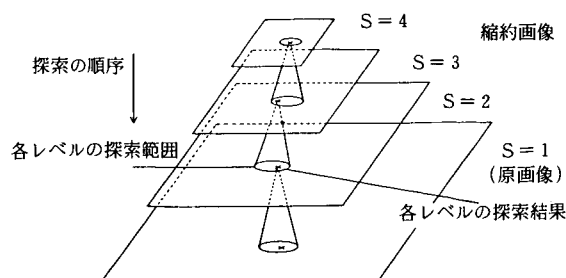


図 1.3 画像の階層化と対応点の探索

2) 画像相関におけ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。²⁹⁾²⁹⁾²⁹⁾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(隠れ部分)が存在する場合にお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たまま類似度を求めるとステレオ対応点の位置で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。Panton²⁹⁾や服部²⁹⁾らは、すでに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Ackerman²⁹⁾ら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れ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手法が進展を見せている。

これらの手法は²⁹⁾²⁹⁾実験室内の限られた画像に対して適用されているものが多いが、Ohta²⁹⁾のように航空写真に対して適用した例も見られる。こうした手法は今だ研究の途上にあり、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。

衛星搭載のリニアアレイセンサによる画像は地上解像力が高々10m×10mであり、一般の航空写真に比べて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ならされる傾向があり、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ないと考えられる。したがってリニアアレイセンサ画像におけるステ

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って大きな探索誤差の発生をチェックし探索精度の向上をはかっている。

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から求められる地表の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、そ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などが開発さねている。こういった処理は自動探索時に同時に行われる場合^{9), 10)}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までもエラーと判定してしまうケースもあるなどうまく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(robust)方法が得られているとは言えず、今後の研究課題である。

データの編集方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→格子配置の実用的アルゴリズムの例としては建石¹¹⁾によるものがあるが、データ利用目的に応じてアルゴリズムを選択する必要がある。

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方法を開発した。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)にそ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。

なお、本研究で得られた結論の詳細は第7章で述べられる。

2. 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した結果について述べる。

2.1 画像作成シミュレーションにおいて考慮すべき要因

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に示すとおりであり、本研究におけるシミュレーションではこれらの要因のみを考慮すればよい。なお、同表には

表2.1 リニアアレイセンサ画像作成シミュレーションにおいて考慮すべき要因

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	• センサの地上解像力: 10 m × 10 m • センサの雑音: 無 • B/H 比: 0.5, 1.0	
2.1.2 センサ搭載方式	• 前後方式, 左右方式	
2.1.3 衛星位置及び 姿勢の時間変化	• 位置 : 時間の1次式 • 姿勢変化: ϕ の3次式	ロール, ピッチ, ヨー角
2.1.4 地球の自転	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。	
2.1.5 地形及び地表 輝度	• 地形 : 数値地形モデル • 地表輝度: LANDSAT MSS 画像 (5 バンド) [但し撮影方向の差による 輝度の変化は考慮しない。]	ケーススタディ地域は日本 アルプス周辺の地域とし た。
2.1.6 大気の影響	• 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。 • 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	

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。

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 μ 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。

表2.2に衛星に搭載が予定されているリニア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 SPOT 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比から定めた。

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⁽⁵⁾⁽⁶⁾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 ステレオ画像の撮影方式

リニアアレイセンサによるステレオ画像の撮影方式には前後方式と左右方式がある。

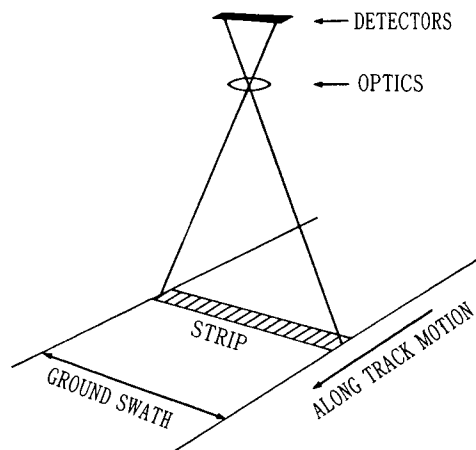


図2.1 リニアアレイセンサによる地表面の走査

表2.2 搭載予定のリニアアレイセンサの諸元

衛 星	STEREOSAT ⁽¹⁾	MAPSAT ⁽²⁾⁽³⁾	SPOT ⁽⁴⁾
地上瞬間視野	15 m	10-60 m	10 m
走査巾	61km	175km	60km
平均高度	705km	919km	832km
B/H 比	0.5, 1.0	0.5, 1.0	0.0-1.0

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のセンサと、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

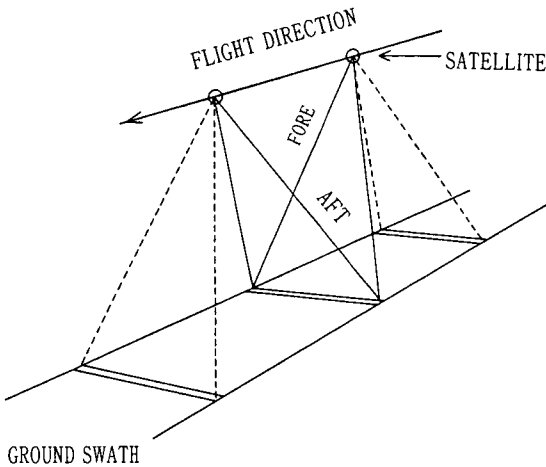
視センサで、次に後視センサで走査することにより、地表のステレオ画像をえる。そのため短い時間間隔でステレオ画像を得ることができる。

前後方式には MAPSAT, STEREOSAT がある。⁽¹⁾
(2)

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。そのため、前後方式に比べて撮影時点は比較的自由に選定できるが、時間間隔は大きくなってしまふ。左右方式には SPOT がある。⁽⁴⁾

a) 前後方式



b) 左右方式

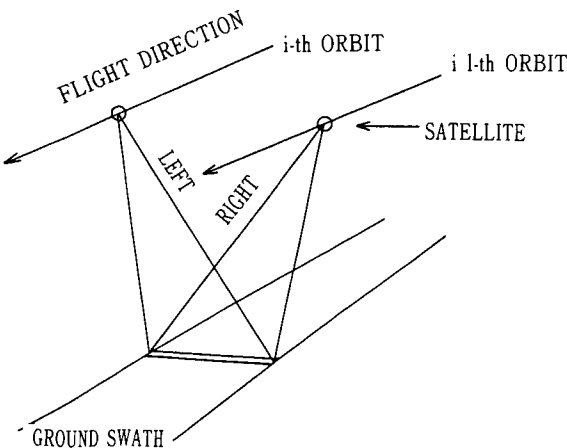


図2.2 リニアアレイセンサによるステレオ撮影方式

本研究ではこれら両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。

2.1.3 衛星 (プラットフォーム) の軌道および姿勢

MAPSAT 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。⁽⁷⁾

LANDSAT 4 ~ 5 号は 1 ~ 3 号から進歩した衛星 (MMS ; Multimission Modular Spacecraft) となっており、姿勢安定性等の面で大きく改善されていると言われている。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 (246 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⁽¹⁾ (経緯度で $15 \sim 20 \times 10^{-5}$ rad, 1σ 値), 姿勢で 4 秒程度⁽²⁾ (約 2×10^{-5} rad, 1σ 値) であると考えられることから, 表 2-2 の平均二乗誤差が, それらの測定誤差より小さくなってい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程度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 でも走査長に直して高々 400 ~ 500km (走査時間 57 ~ 71 秒) に相当するにすぎない。

本研究では LANDSAT 1 ~ 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。

したがって, 衛星の位置及び姿勢は以下のような式 (式 2-1 ~ 2-4) で表わされる。ただし, 衛星位置については円弧を描いている軌道をそのまま表現するか (軌道曲率を考慮する場合), 直線として近似表現するか

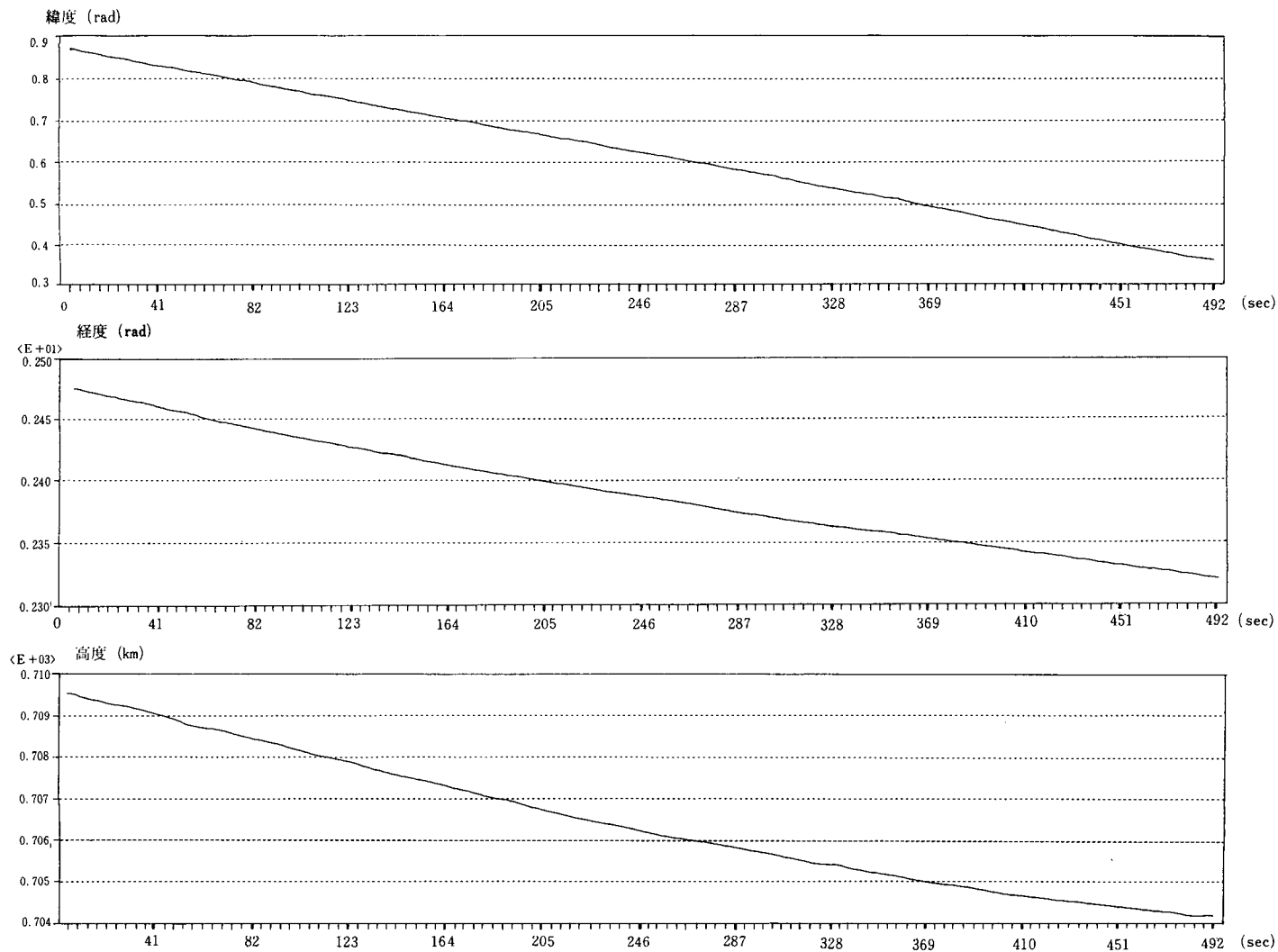


図2.3 (その1) 衛星位置の時間変化の例 (ランドサット4号)

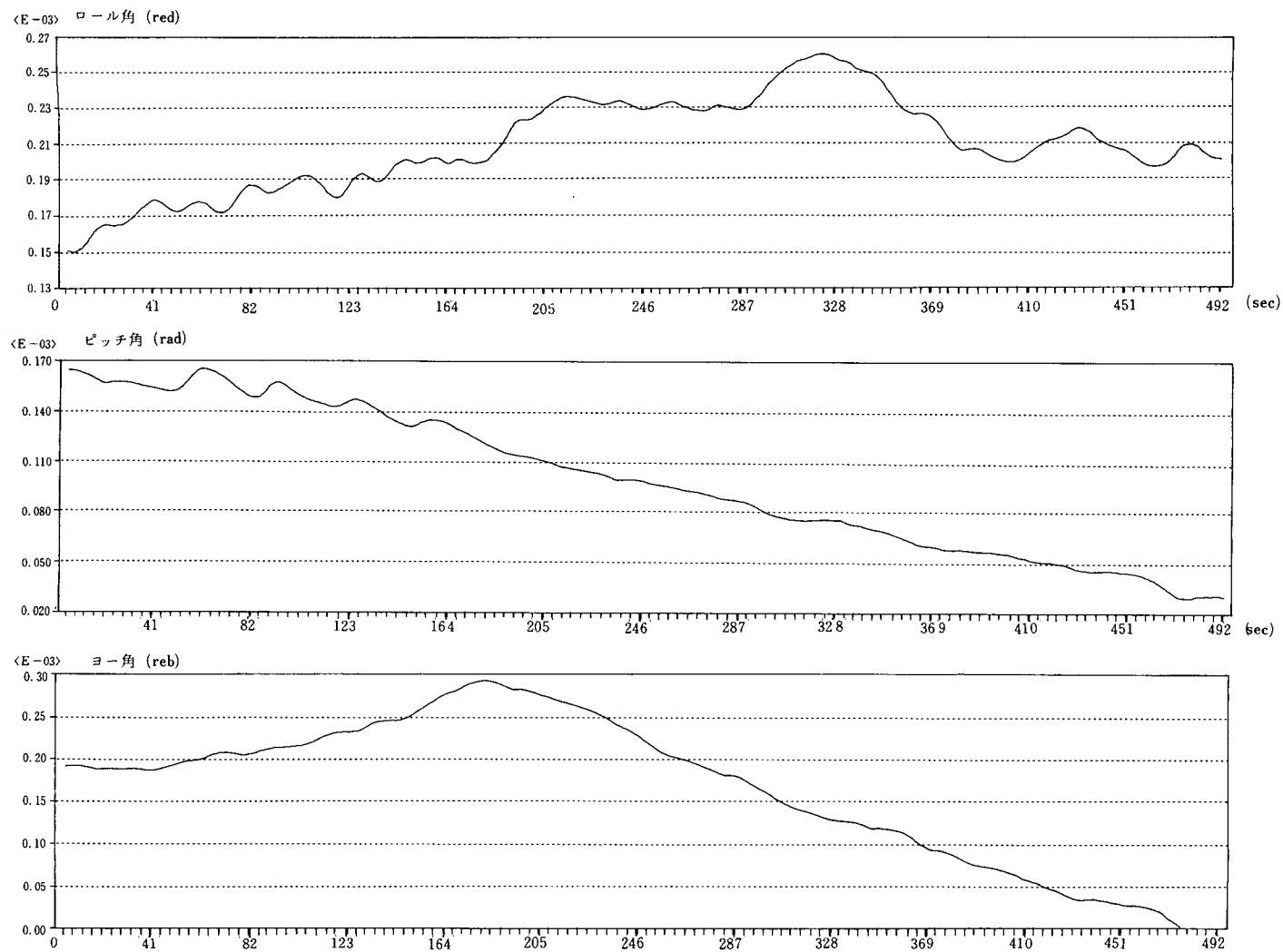


図2.4 (その1) 衛星姿勢の時間変化の例 (ランドサット4号)

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)^(注)
(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
ロール角(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)	(287km)	(574km)	(861km)	(1148km)	(1722km)	(3444km)
(データ点数)	(10点)	(20点)	(30点)	(40点)	(60点)	(120点)
(ケース数)	(12ケース)	(6ケース)	(4ケース)	(3ケース)	(2ケース)	(1ケース)

(注) 誤差の二乗平均の平方根
(Root Mean Square Error)

(軌道の曲率を無視する場合)によって定式化が異なる。

1) 衛星位置

(1) 軌道の曲率を考慮する場合

経緯度座標系によると図2.5に示すように衛星位置は $(\alpha, \beta, R+H)$ と表現できる。ここで α は経度、 β は緯度、 H は高度、 R は地球の半径である。 α 、

β, H の時間変化は時間 t の 1 次式として表現できることから、以下の式が成立する。

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

α : 経度
 β : 緯度

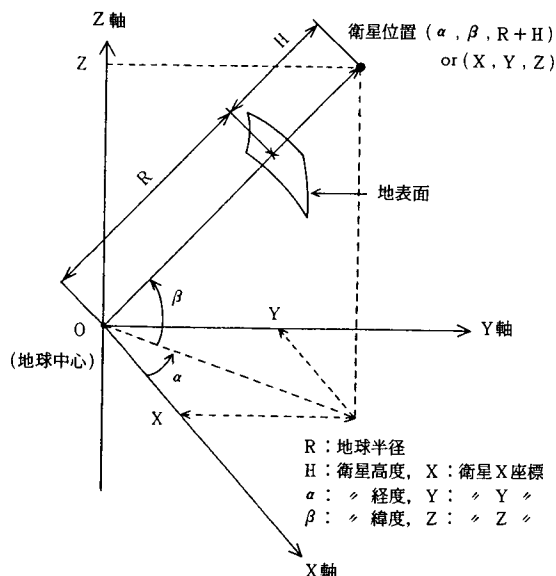


図 2.5 XYZ座標系と経緯度座標系

H: 衛星高度

t: 時刻(ライン番号)

$$\left(\alpha_0, \alpha_1, \beta_0, \beta_1, H_0, H_1 \right)$$

はパラメータ

衛星位置 $(\alpha, \beta, R+H)$ を XYZ 座標系に直すと以下の式で表わされる。

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

X: 衛星位置 X 座標

Y: " Y "

Z: " Z "

R: 地球半径

(2) 軌道の曲率を無視する場合

この時には, XYZ 座標系で表わされた衛星位置座標 (X, Y, Z) が時間 t の 1 次式で表現される (式 2-3 参照)。

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

$(X_0, X_1, Y_0, Y_1, Z_0, Z_1)$
はパラメータ

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。)

2) 衛星姿勢

衛星の三軸姿勢は以下のように時間 t の三次式として表わされる。

$$\left. \begin{aligned} \omega &= \omega_0 + \omega_1 \cdot t + \omega_2 \cdot t^2 + \omega_3 \cdot t^3 \\ \varphi &= \varphi_0 + \varphi_1 \cdot t + \varphi_2 \cdot t^2 + \varphi_3 \cdot t^3 \\ k &= k_0 + k_1 \cdot t + k_2 \cdot t^2 + k_3 \cdot t^3 \end{aligned} \right\} \quad (2-4)$$

 ω : 衛星三軸姿勢(ロール角) φ : " (ピッチ角) k : " (ヨー角) $(\omega_{0-3}, \varphi_{0-3}, k_{0-3})$ はパラメータ

なお, 本研究のシミュレーションにおいては計算の単純化のため, 衛星位置の時間変化を, (2) の曲率を無視する場合 (式 2-3) に従って与えている。

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, 地表面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)。

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経度の時間変化式 (2-2) において

$$\alpha = \alpha_0 + (\alpha_1 + \alpha_{skew})t$$

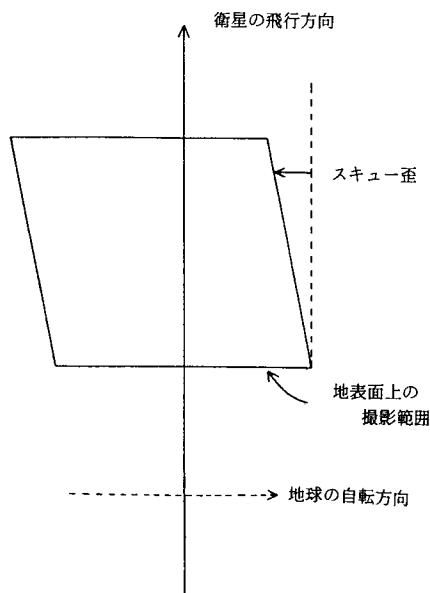
 α_{skew} : スキューによる見かけ上の角速度

図 2.6 地球の自転によるスキュー歪

となる。

したがって、スキューを考慮しても衛星位置の経度が時間の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って表わされるため、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、この場合考慮する必要はない。

2) 地球の曲率

走査長が10km程度でも地球の曲率を考慮しないことによって生ずる鉛直方向のずれは5~10mになり、リニア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必ずしも無視できない。しかしながら、地球の曲率を無視することによって生ずる画像の歪は画像全面で非常にゆるやかに変化する性質のものであることから、その歪の有無によって後述するステレオ対応点の自動探索精度等が影響されることはない判断できる。したがって計算の単純化のために本研究では曲率は無視してシミュレーションを行う。

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58×46km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250mメッシュ)を約60mメッシュに内挿後、さらにセンサの地上解像力10m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、60m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)に重ね合せて用いた。LANDSAT画像を用いた理由は、それが容易に入手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($\lambda=0.5\sim0.8\mu\text{m}$)に属するため、それに近い波長域($\lambda=0.6\sim0.7\mu\text{m}$)をもつ5バンド(MSS5)をえらんだ。

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に比べて輝度の変化はさ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って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は光束の屈折の概念図である。

θ_1 はセンサ取付角、 θ_2 は光束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。

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 (5万分の1)	立山, 高山, 上高地, 大町, 信濃池田, 松本	同左
原データ	国土数値情報 (約250 m メッシュ)	LANDSAT MSS 画像 (5バンド, 高山, 1975. 9. 11)
データ内挿間隔	約60 m 間隔に内挿後 スケールを $1/6$ に縮小	約60 m 間隔に内挿後 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 参照)	(写真2.1 参照)

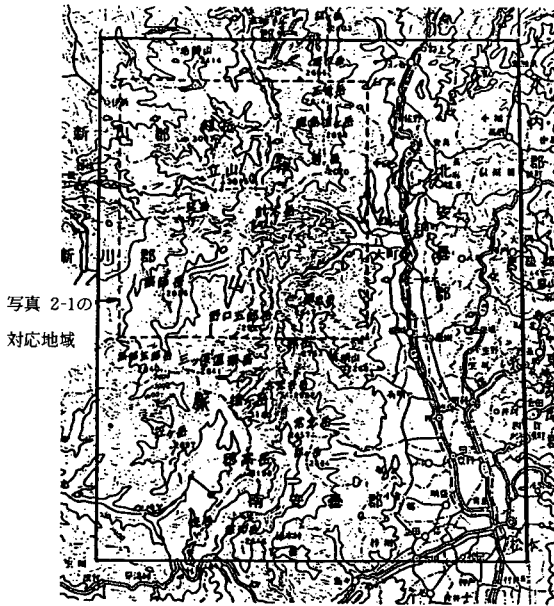


図 2.7 スタディエリア地形図(全域)

(50万分の1, 中部・近畿, 58km×47km)

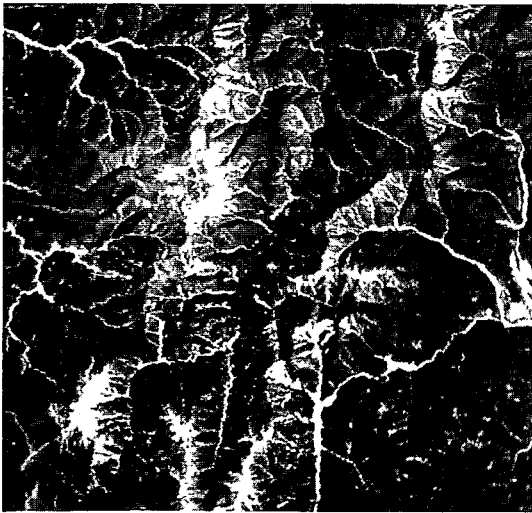


写真 2.1 スタディエリア MSS 5画像(一部)

$H=600\text{km}$, $\theta_1=45^\circ$, 標準大気組成 (50°N) を仮定して $\Delta\theta$ を Saastamoinen の方法⁽⁹⁾ 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 m にあたり、予想されるリニアアレイセンサの地上解像力 10 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。

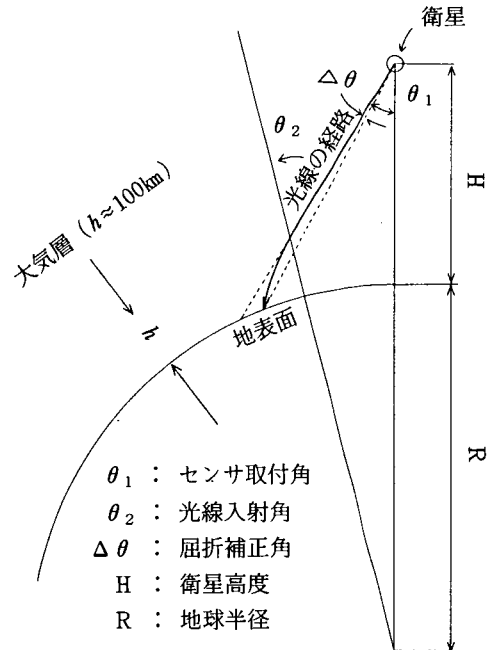


図 2.8 大気による光線の屈折

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チリや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、画質低下がさ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できる。

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⁽⁸⁾ 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。

- 1) 第 L 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、第 L 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。

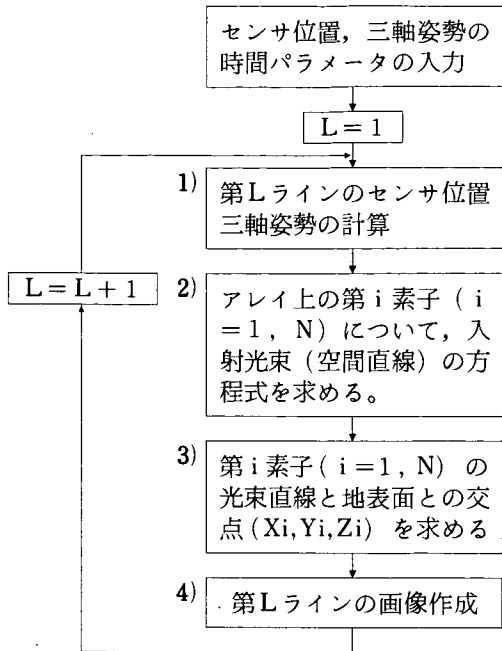


図 2.9 ステレオ画像作成のフロー

写真 2. 2,
2. 3 に対応
する地域

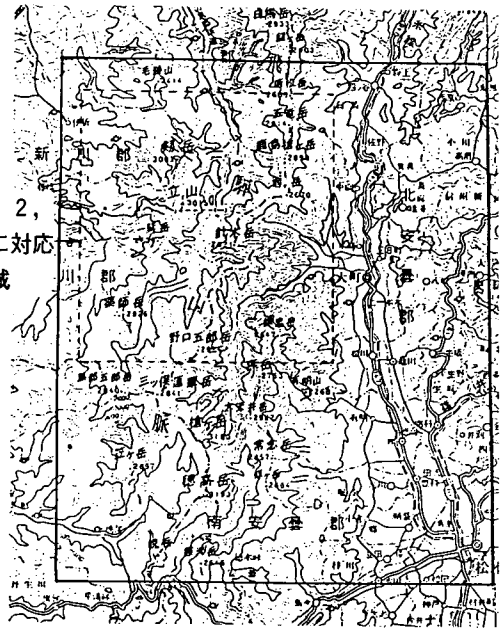


図 2. 10 テストスタディ地区地形図 (全域)

(50万分の 1 : 中部. 近畿, 南北 58km, 東西 47km)
(図 2. 7 再掲)

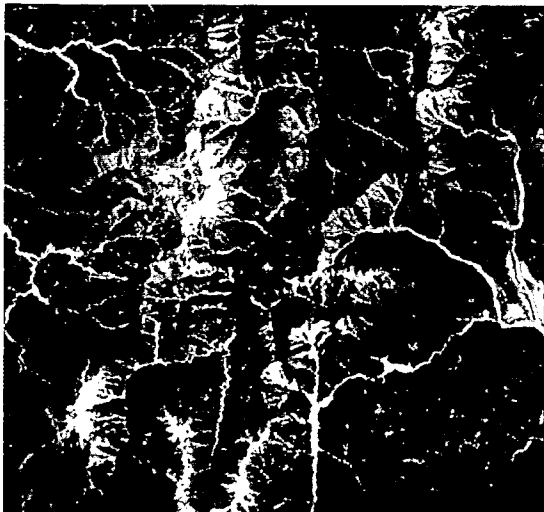


写真 2.2 テストスタディ地区ランドサット画像 MSS 5
(一部)

3) アレイ上の第 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にこない場合,
標高は共一次式で内挿して与える。



(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)

4) 第 L ライン画像の作成

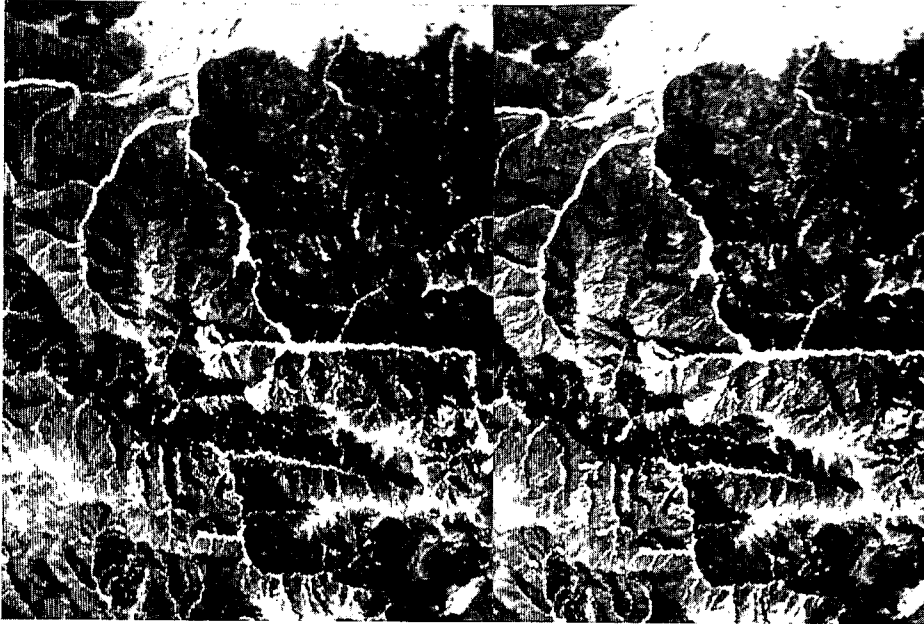
各交点 (X_i , Y_i , Z_i) ($i = 1 \sim N$) に対応する地表
輝度 $R(X_i, Y_i)$ を最近隣内挿により求め, その値を
そのまま第 i 素子が検知した地表輝度の値とする。(大
気による減衰や撮影方向の変化による輝度の変化等は
考慮しないため。)

2.2.2 テストスタディ

高度 (H) = 600km, 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によるステレオ画像である。



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. 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わけられる。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って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 リニアアレイセンサの幾何学

3.2.1 座標系

リニアアレイセ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。

アレイセ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。

一方地図等利用されている座標系は測地座標系である。そのため地図などにより測定される基準点の座標を直角平面座標へ、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。

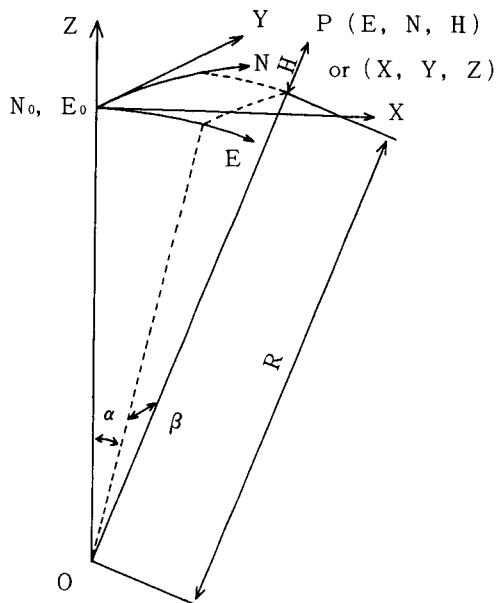


図3.1
測地座標系 (E, N, H) と
直角平面座標系 (X, Y, Z)

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

ここで $\alpha = \frac{E-E_0}{R}$
 $\beta = \frac{N-N_0}{R}$

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

ここで $\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{X}{R+Z} \right)$
 $\beta = \tan^{-1} \left(\frac{Y \cos \alpha}{R+Z} \right)$

2) 衛星座標系 (Xst, Yst, Zst)

衛星座標系は原点を衛星上におき、座標軸を衛星に固定させた座標系*である。衛星の三軸姿勢 (ω , φ , κ) 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 (Xst, Yst, Zst) と地上座標系 (X, Y, Z) の関係は次式で与えられる。

* 一般に衛星の進行方向に Xst 軸を、天頂方向に Zst 軸を直角方向に Yst 軸をとる。

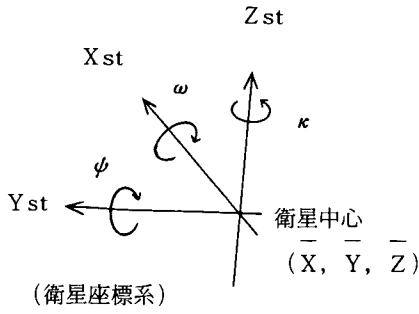


図 3・2 衛星座標系 (Xst, Yst, Zst) と地上座標系

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

$$\begin{pmatrix} Xst \\ Yst \\ Zst \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} X - \bar{X} \\ Y - \bar{Y} \\ Z - \bar{Z} \end{pmatrix} \quad (3-4)$$

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

ω : 衛星のロール角

φ : " ピッチ角

κ : " ヨー角

$$\{a_{ij}\} = R\omega \cdot \kappa \cdot \varphi = R\omega \cdot R\kappa \cdot R\varphi$$

$R\omega$, $R\varphi$, $R\kappa$ 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。

$R\omega$, $R\varphi$, $R\kappa$, $R\omega \cdot \kappa \cdot \varphi$ は式 (3-5), (3-6), (3-7), (3-8) で表わされる。

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

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

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

$$R\omega \cdot \kappa \cdot \varphi = R\omega \cdot R\kappa \cdot R\varphi = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix}$$

$$\left. \begin{aligned} a_{11} &= \cos \kappa \cdot \cos \varphi \\ a_{21} &= \sin \kappa \cdot \cos \varphi \cdot \cos \omega + \sin \omega \cdot \sin \varphi \\ a_{31} &= \sin \omega \cdot \sin \kappa \cdot \cos \varphi - \sin \varphi \cdot \cos \omega \\ a_{12} &= -\sin \kappa \\ a_{22} &= \cos \omega \cdot \cos \kappa \\ a_{32} &= \cos \kappa \cdot \sin \omega \\ a_{13} &= \cos \kappa \cdot \sin \varphi \\ a_{23} &= \cos \omega \cdot \sin \kappa \cdot \sin \varphi - \sin \omega \cdot \cos \varphi \\ a_{33} &= \sin \omega \cdot \sin \kappa \cdot \sin \varphi + \cos \omega \cdot \cos \varphi \end{aligned} \right\} \quad (3-8)$$

3) センサ座標系 (x, y, z)

センサ座標は, 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 $\bar{\omega}$, $\bar{\varphi}$, $\bar{\kappa}$ で表わすと, センサ座標は衛星座標系に対して, Yst 軸まわりに $\bar{\varphi}$, Zst 軸まわりに $\bar{\kappa}$, Xst 軸まわりに $\bar{\omega}$ 回転している。

センサ座標系 (x, y, z) と衛星座標系 (Xst, Yst, Zst) との関係は次式で与えられる。

$$\begin{pmatrix} Xst \\ Yst \\ Zst \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{a}_{11} & \bar{a}_{12} & \bar{a}_{13} \\ \bar{a}_{21} & \bar{a}_{22} & \bar{a}_{23} \\ \bar{a}_{31} & \bar{a}_{32} & \bar{a}_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} Xst \\ Yst \\ Zst \end{pmatrix} \quad (3-9)$$

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{a}_{11} & \bar{a}_{12} & \bar{a}_{13} \\ \bar{a}_{21} & \bar{a}_{22} & \bar{a}_{23} \\ \bar{a}_{31} & \bar{a}_{32} & \bar{a}_{33} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} Xst - \bar{Xst} \\ Yst - \bar{Yst} \\ Zst - \bar{Zst} \end{pmatrix}$$

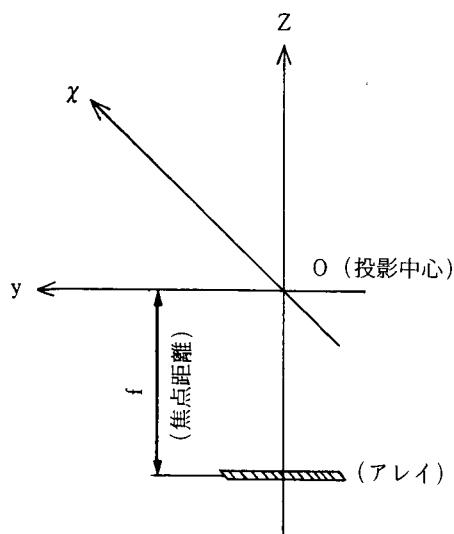


図3・3 センサ座標系

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

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

$$\{\bar{a}_{ij}\} = R\bar{\omega}, \bar{\kappa}, \bar{\varphi} = R\bar{\omega} \cdot R\bar{\kappa} \cdot R\bar{\varphi}$$

$[R\bar{\omega}, R\bar{\varphi}, R\bar{\kappa}]$ の定義は式(3-8)による。
ここで $\bar{X}_{st}, \bar{Y}_{st}, \bar{Z}_{st}$ は高々数メートル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。

故に

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

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

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

$$\{b_{ij}\} = R\omega \cdot R\kappa \cdot R\varphi \cdot R\bar{\omega} \cdot R\bar{\kappa} \cdot R\bar{\varphi} = \{a_{ij}\} \cdot \{\bar{a}_{ij}\} \text{ とおくと}$$

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

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

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 $\omega', \varphi', \kappa'$ とすると、 $\{b_{ij}\} = R\omega' \cdot \kappa' \cdot \varphi' = R\omega' \cdot R\kappa' \cdot R\varphi'$ と表現できる。

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 がリニアアレイセンサ画像の第 L ライン、第 i アレイ素子に映っている時、センサ投影中心 O と第 i アレイ素子、 G 点の三点は同一光束(直線)上にある。異なる三点が同一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) 第 i 素子のセンサ座標

アレイ上の素子の総数を N 、素子間隔を l 、センサの焦点距離を f とする。ここでは N を奇数とし、アレイ中心の第 $\frac{N-1}{2}$ 素子が Z 軸(光軸)と交わるとしている。すなわち、アレイ中心と主点^(注)が一致していると想定している。

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第 i 素子の座標 (x_i, y_i, z_i) は次式で与えられる。

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

ここで, $NN = \frac{N-1}{2}$

Δx_i : 第 i 素子の x 方向の内部歪補正量

Δy_i : " y 方向の " "

f : (補正済の) 焦点距離

l : 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。 $\bar{X}_{(L)}, \bar{Y}_{(L)}, \bar{Z}_{(L)}, \omega_{(L)}, \varphi_{(L)}, \kappa_{(L)}$ は第 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。

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

$$\{b_{ij}\} = R^{-1} \omega_{(L)} \cdot \kappa_{(L)} \cdot \varphi_{(L)}$$

$$\{b_{ij}\} = R_{\omega}^{(L)} \cdot R_{\kappa}^{(L)} \cdot R_{\varphi}^{(L)}$$

$$(\equiv R_{\omega}^{(L)} \cdot \kappa_{(L)} \cdot \varphi_{(L)})$$

3) 共線条件

センサ座標系において, 投影中心 $O(0, 0, 0)$, 第 i 素子 (x_i, y_i, z_i) , 点 $G(x_G, y_G, z_G)$ が同一線上にあるという条件(共線条件)は次式で表わされる。

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

式 (3-17), (3-18) を式 (3-19) へ代入すると,

(注) 主点とはアレイを含む投影平面と光軸との交点である。

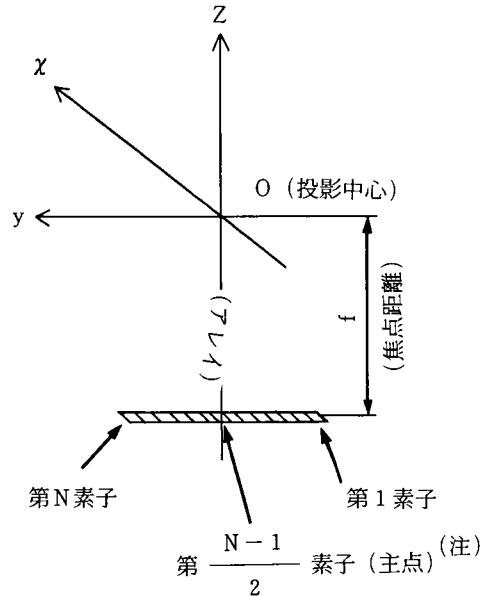


図 3・4 アレイの素子番号とセンサ座標系

共線条件は以下になる。

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

$$\frac{b_{12}(X_G - \bar{X}_{(L)}) + b_{22}(Y_G - \bar{Y}_{(L)}) + b_{32}(Z_G - \bar{Z}_{(L)})}{b_{13}(Z_G - \bar{Z}_{(L)}) + b_{23}(Y_G - \bar{Y}_{(L)}) + b_{33}(Z_G - \bar{Z}_{(L)})} + \frac{(i - NN)l + \Delta y_i}{f} = 0 \quad (3-21)$$

但し

$$\begin{aligned} b_{11} &= \cos \kappa_{(L)} \cdot \cos \varphi_{(L)} \\ b_{21} &= \sin \kappa_{(L)} \cdot \cos \varphi_{(L)} \cdot \cos \omega_{(L)} + \sin \omega_{(L)} \cdot \sin \varphi_{(L)} \\ b_{31} &= \sin \omega_{(L)} \cdot \sin \kappa_{(L)} \cdot \cos \varphi_{(L)} - \sin \varphi_{(L)} \cdot \cos \omega_{(L)} \\ b_{12} &= -\sin \kappa_{(L)} \\ b_{22} &= \cos \omega_{(L)} \cdot \cos \kappa_{(L)} \\ b_{32} &= \cos \kappa_{(L)} \cdot \sin \omega_{(L)} \\ b_{13} &= \cos \kappa_{(L)} \cdot \sin \varphi_{(L)} \\ b_{23} &= \cos \omega_{(L)} \cdot \sin \kappa_{(L)} \cdot \sin \varphi_{(L)} - \sin \omega_{(L)} \cdot \cos \varphi_{(L)} \\ b_{33} &= \sin \omega_{(L)} \cdot \sin \kappa_{(L)} \cdot \sin \varphi_{(L)} + \cos \omega_{(L)} \cdot \cos \varphi_{(L)} \end{aligned}$$

$$(3-22)$$

3.3 内部歪等の補正方法

3.3.1 内部歪等の種類

外部標定に先立って補正すべき内部歪等は以下のとおりである。

- (1) 焦点距離のずれ; Δf
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(アレイ中心)と主点とはわずかな位置ずれが存在する。
- (3) レンズ歪
主に放射方向にわい曲収差が存在する。
- (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) 取付角のずれ
リニアアレイセンサの衛星への取付角にずれが存在する。
- (7) 大気による屈折
光束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。

焦点距離を基準点座標から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600~800km)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) アレイ素子の座標変換

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で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

放射方向のレンズのわい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、

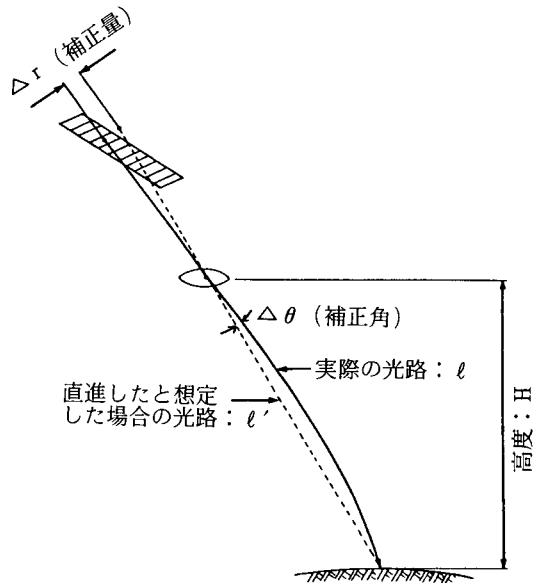


図3・5 大気による屈折の補正

表3・1 内部歪等の補正方法のまとめ

補正方法	補正される内部歪等
焦点距離の検定	焦点距離のずれ
アレイ素子の座標変換	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
レンズ歪の検定	レンズ歪
取付角の検定	取付角のずれ
大気による屈折の補正	大気による屈折

収差を補正できる。

(4) 取付角の検定

室内で前視および後視センサの取付角を測定しておく^{*}。

(5) 大気による屈折の補正

光束は大気の密度差によって図3.5に示すように屈折する。この光束 l を直進したと想定することによって生ずる位置ずれ $\Delta\gamma$ を求めて補正する。

屈折補正角 $\Delta\theta$ は一般に大気の組成・高度により変化する。 $\Delta\theta$ の求め方には、Saastamoinen^[2]による方法がある。

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(ω, φ, κ)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)。

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

$$\begin{cases} \omega = \omega_0 + \omega_1 \cdot L + \omega_2 \cdot L^2 + \omega_3 \cdot L^3 \\ \varphi = \varphi_0 + \varphi_1 \cdot L + \varphi_2 \cdot L^2 + \varphi_3 \cdot L^3 \\ \kappa = \kappa_0 + \kappa_1 \cdot L + \kappa_2 \cdot L^2 + \kappa_3 \cdot L^3 \end{cases} \quad (3-24)$$

L : ライン番号

(X, Y, Z): センサ投影中心位置(衛星位置)

(ω, φ, κ): 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(ω, φ, κ)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。

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

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

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

$$\omega = \omega(L; \omega_i) \quad i = 1, n_\omega$$

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

$$\kappa = \kappa(L; \kappa_i) \quad i = 1, n_\kappa$$

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

リニアアレイセンサの外部標定とは地上基準点等を用いてこれらのパラメータ($X_i, Y_i, Z_i, \omega_i, \varphi_i, \kappa_i$)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))が画線上に点 G' (センサ座標¹⁾($x_g, y_g, -f$)として映っている場合、投影中心 O , 点 G' と点 G が、同一直線(光束)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)。

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

$$(3-28)$$

注) 内部歪は補正済であるとする。

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

$\{b_{ij}\} = R^{-1} \cdot \dots \cdot \varphi$: (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、1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を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。

*) 3.4.2節で述べるように取付角は外部標定時に解析的に求めることもできる。

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れば、2つないし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、ステレオ画像1、2上の光束 l_1 、 l_2 について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)。

$$= -\frac{x_g^i}{f} \quad (3-29)$$

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

$i = 1, 2$: ステレオペアの画像番号

$$\left(\begin{array}{l} i=1 \text{ は } l_1 \text{ に対する共線条件式} \\ i=2 \text{ は } l_2 \text{ に } \quad \quad \quad \end{array} \right)$$

(x^i, y^i, z^i) : 画像 i におけるセンサ位置

$\{b^i_{kl}\}$: 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 XG , YG , ZG の全てが未知数であっても、新たに付け加わる方程式数は 4 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。これら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。

投影中心 $\theta_1 (X_1, Y_1, Z_1, \Omega_1, \Psi_1, \kappa_1)$ 投影中心 $\theta_2 (X_2, Y_2, Z_2, \Omega_2, \Psi_2, \kappa_2)$

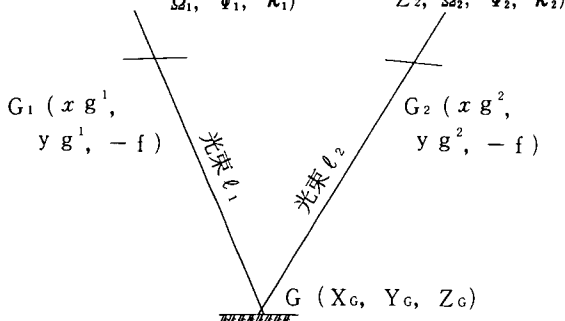


図3・6 点Gにおける光束 l_1 , l_2 の交差

(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ていない基準点座標)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，偏微分係数，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)

$$\begin{aligned}
& F + \sum_{i=1}^{n_x} \frac{\partial F}{\partial X_i} \Delta X_i + \sum_{i=1}^{n_y} \frac{\partial F}{\partial Y_i} \Delta Y_i + \sum_{i=1}^{n_z} \frac{\partial F}{\partial Z_i} \Delta Z_i \\
& + \sum_{i=1}^{n_w} \frac{\partial F}{\partial \omega_i} \Delta \omega_i + \sum_{i=1}^{n_\phi} \frac{\partial F}{\partial \phi_i} \Delta \phi_i + \sum_{i=1}^{n_\kappa} \frac{\partial F}{\partial \kappa_i} \Delta \kappa_i = 0
\end{aligned}
\quad (3-31)$$

ここで

$$F \equiv F(X_i, Y_j, Z_k, \omega_i, \phi_m, \kappa_n) \\ \equiv \frac{b_{11}(X_G - X) + b_{21}(Y_G - Y) + b_{31}(Z_G - Z)}{b_{13}(X_G - X) + b_{23}(Y_G - Y) + b_{33}(Z_G - Z)} + \frac{x_g}{f} \\ + \frac{x_g}{f} \quad (3-32)$$

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

$$\begin{aligned} & G + \sum_{i=1}^{n_x} \frac{\partial G}{\partial X_i} \Delta X_i + \sum_{i=1}^{n_y} \frac{\partial G}{\partial Y_i} \Delta Y_i + \sum_{i=1}^{n_z} \frac{\partial G}{\partial Z_i} \Delta Z_i \\ & + \sum_{i=1}^{n_\omega} \frac{\partial G}{\partial \omega_i} \Delta \omega_i + \sum_{i=1}^{n_\phi} \frac{\partial G}{\partial \phi_i} \Delta \phi_i + \sum_{i=1}^{n_\kappa} \frac{\partial G}{\partial \kappa_i} \Delta \kappa_i = \\ & = 0 \end{aligned} \quad (3-33)$$

ここで

$$G \equiv G(X_i, Y_j, Z_k, \omega_i, \phi_m, \kappa_n) \\ \equiv \frac{b_{12}(X_G - X) + b_{22}(Y_G - Y) + b_{32}(Z_G - Z)}{b_{13}(X_G - X) + b_{23}(Y_G - Y) + b_{33}(Z_G - Z)} + \frac{y_g}{f} \\ + \frac{y_g}{f} \quad (3-34)$$

ここで $i=1, n_x$

$$\begin{aligned} j &= 1, \quad n_y \\ k &= 1, \quad n_z \\ l &= 1, \quad n_w \\ m &= 1, \quad n_\phi \\ n &= 1, \quad n_\varepsilon \end{aligned} \quad \left(\begin{array}{l} n_x, n_r \text{等は, 各未知} \\ \text{パラメータの個数} \end{array} \right)$$

(各未知パラメータに対する偏微係数)

$$\begin{cases} \frac{\partial F}{\partial X} = -\frac{1}{f} \cdot \frac{b_{31} \cdot f + b_{33} \cdot x_D}{b_{13}(X_C - X) + b_{23}(Y_C - Y) + b_{33}(Z_C - Z)} \\ \frac{\partial F}{\partial X_i} = \frac{\partial F}{\partial X} \cdot \frac{dX}{dX_i} \end{cases} \quad (3-35)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial F}{\partial Y} = -\frac{1}{f} \cdot \frac{b_{21} \cdot f + b_{23} \cdot x_g}{b_{13}(X_c - X) + b_{23}(Y_c - Y) + b_{33}(Z_c - Z)} \\ \frac{\partial F}{\partial Y_i} = \frac{\partial F}{\partial Y} \cdot \frac{dY}{dY_i} \end{cases} \quad (3-36)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial F}{\partial Z} = -\frac{1}{f} \cdot \frac{b_{31} \cdot f + b_{33} \cdot x_g}{b_{13}(X_c - X) + b_{23}(Y_c - Y) + b_{33}(Z_c - Z)} \\ \frac{\partial F}{\partial Z_i} = \frac{\partial F}{\partial Z} \cdot \frac{dZ}{dZ_i} \end{cases} \quad (3-37)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial F}{\partial \omega} = \frac{\partial F}{\partial Z} (Y_c - Y) - \frac{\partial F}{\partial Y} (Z_c - Z) \\ \frac{\partial F}{\partial \omega_i} = \frac{\partial F}{\partial \omega} \cdot \frac{d\omega}{d\omega_i} \end{cases} \quad (3-38)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial F}{\partial \phi} = -1 - \left(\frac{x_g}{f} \right)^2 \\ \frac{\partial F}{\partial \phi_i} = \frac{\partial F}{\partial \phi} \cdot \frac{d\phi}{d\phi_i} \end{cases} \quad (3-39)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial F}{\partial \kappa} = -\frac{\cos \phi}{f} \cdot y_g - \frac{x_g \cdot y_g}{f^2} \cdot \sin \phi \\ \frac{\partial F}{\partial \kappa_i} = \frac{\partial F}{\partial \kappa} \cdot \frac{d\kappa}{d\kappa_i} \end{cases} \quad (3-40)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial F}{\partial X_c} = -\frac{\partial F}{\partial X} \\ \frac{\partial F}{\partial Y_c} = -\frac{\partial F}{\partial Y} \\ \frac{\partial F}{\partial Z_c} = -\frac{\partial F}{\partial Z} \end{cases} \quad (3-41)$$

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

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

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

$$\begin{cases} \frac{\partial G}{\partial \omega} = \frac{\partial G}{\partial Z} (Y_c - Y) - \frac{\partial G}{\partial Y} (Z_c - Z) \\ \frac{\partial G}{\partial \omega_i} = \frac{\partial G}{\partial \omega} \cdot \frac{d\omega}{d\omega_i} \end{cases} \quad (3-45)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial G}{\partial \phi} = -\frac{x_g \cdot y_g}{f^2} \\ \frac{\partial G}{\partial \phi_i} = \frac{\partial G}{\partial \phi} \cdot \frac{d\phi}{d\phi_i} \end{cases} \quad (3-46)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial G}{\partial \kappa} = -\frac{\cos \kappa (\kappa_c - X) + \cos \omega \sin \kappa (Y_c - Y) + \sin \omega \sin \kappa (Z_c - Z)}{b_{13}(X_c - X) + b_{23}(Y_c - Y) + b_{33}(Z_c - Z)} \\ \quad - \sin \left(\frac{y_g}{f} \right)^2 \\ \frac{\partial G}{\partial \kappa_i} = \frac{\partial G}{\partial \kappa} \cdot \frac{d\kappa}{d\kappa_i} \end{cases} \quad (3-47)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial G}{\partial X_c} = -\frac{\partial G}{\partial X} \\ \frac{\partial G}{\partial Y_c} = -\frac{\partial G}{\partial Y} \\ \frac{\partial G}{\partial Z_c} = -\frac{\partial G}{\partial Z} \end{cases} \quad (3-48)$$

(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って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 ω_i , $i=1, n_\omega$ 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° とする) 付近で小さく変化しているので, 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 ϕ_i , $i=1, n_\phi$ 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 κ_i , $i=1, n_\kappa$ 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SPOT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, 4.1節で述べるように基準点の地上座標や画像座標のわずかな計測誤差が標定要素の決定精度を大きく低下させてしまうことが考えられる。

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年代後半より稼動するGPS (Global Positioning System) を用いることにより約10m(1 σ 値)の精度で計測可能であり⁽³⁾、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arcsec(1 σ 値)の精度で計測できる^{(4),(5)}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できる。

すなわち、画像の第L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 ($X_L, Y_L, Z_L, \omega_L, \varphi_L, \kappa_L$) 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。

$$\left. \begin{aligned} X_L &= X(L; X_i) \quad i=1, n_x \\ Y_L &= Y(L; Y_i) \quad i=1, n_y \\ Z_L &= Z(L; Z_i) \quad i=1, n_z \end{aligned} \right\} \quad (3-49)$$

$$\left. \begin{aligned} \omega_L &= \omega(L; \omega_i) + \omega_0 \quad i=1, n_\omega \\ \varphi_L &= \varphi(L; \varphi_i) + \varphi_0 \quad i=1, n_\varphi \\ \kappa_L &= \kappa(L; \kappa_i) + \kappa_0 \quad i=1, n_\kappa \end{aligned} \right\}$$

X_i, Y_i 等：パラメータ

n_x, n_y 等：パラメータの個数

$\omega_0, \varphi_0, \kappa_0$ ：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) ($\omega_0, \varphi_0, \kappa_0$) 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 ($X_i, Y_j, Z_k, \omega_l, \varphi_m, \kappa_n$) を求めることができる。

回転角 ($\omega_0, \varphi_0, \kappa_0$) が計測されていない場合には、 $\omega_0, \varphi_0, \kappa_0$ 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 $X_L, Y_L, Z_L, \omega_L, \varphi_L, \kappa_L$ の計測誤差の分散 $\sigma_{X_L}^2, \sigma_{Y_L}^2, \sigma_{Z_L}^2, \sigma_{\omega_L}^2, \sigma_{\varphi_L}^2, \sigma_{\kappa_L}^2$ の逆数、および共線条件式の誤差分散 σ_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. 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

外部標定とは第3章で述べたとおり、地上基準点や位置・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 |
|---|

第2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 t の三次式で表わせない変化をしているにもかかわらず、3次式をあてはめて標定したために生ずる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、標準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 (α) 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

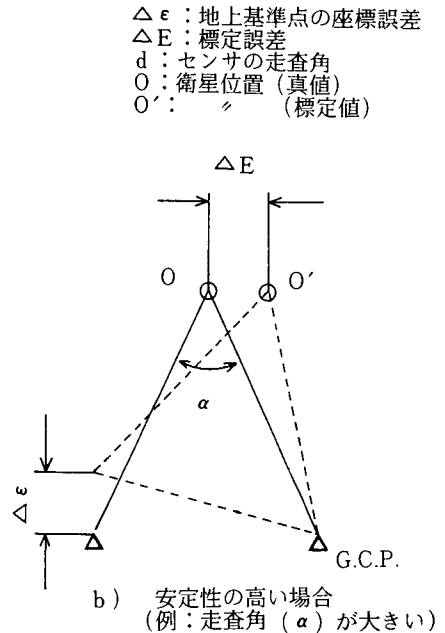
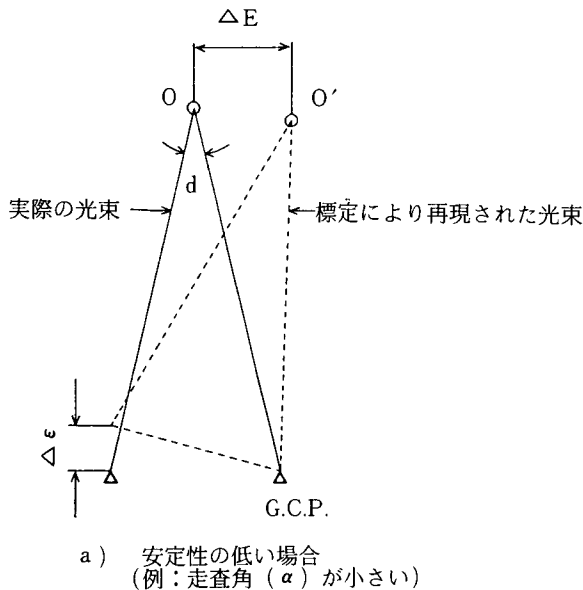


図 4・1 標定モデルの幾何学的安定性と外部標定の精度

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。

衛星搭載のリニアアレイセンサの場合、走査角が4～5°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。

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特に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4.1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って、十分な精度で再現できることが第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にした。したがって、ここでは画像作成時に

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・姿勢データ利用の有無, 及びデータ精度

与えた衛星位置・姿勢の時間変化を表す 3 次式の関数のパラメータが外部標定によってどれほど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、計測精度を落しても一般に計測も含めた標定費用がさほど節約されないことから、計測精度を落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こととし、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ニアアレイ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さ(表4.1の4))についてはこれがセンサの走査角、収れん角等によってお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のある条件、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次式で表わされるとする。これは第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。軌道諸元は表4.3 c) に示すとおりである。

(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(表4.6参照)。

(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

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もとめ、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の範囲で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。

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 (5万分の1)	立山, 高山, 上高地, 大町, 信濃池田, 松本	同 左
原データ	国土数値情報 (約250mメッシュ)	LANDSAT MSS画像 (5バンド, 高山, 1975.9.11)
データ内挿間隔	約60m間隔に内挿後 スケールを $\frac{1}{2}$ に縮小	約60m間隔に内挿後 スケールを $\frac{1}{2}$ 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	1 0 m
ステレオ角 (注)	45° 60°
(B/H比)	(0,83) (1,15)

(注) 1組のステレオセンサの光軸のなす角 (θ)

前視, 後視両センサが鉛直方向となす角が等しい本研究の場合
には $(B/H比) = 2 \cdot \tan (\theta/2)$ となる。

c) 軌道諸元

	前視センサ	後視センサ
X_0 (m)	$-0.3415000 \text{ E}+06$	$0.3470000 \text{ E}+06$
Y_0 (m)	$0.2300000 \text{ E}+05$	$0.2300000 \text{ E}+05$
Z_0 (m)	$0.6000000 \text{ E}+06$	$0.6000000 \text{ E}+06$
X_1 (m/L)	$0.5999956 \text{ E}+02$	$0.5999956 \text{ E}+02$
Y_1 (m/L)	$0.1570789 \text{ E}+00$	$-0.1570789 \text{ E}+00$
Z_1 (m/L)	$0.1570794 \text{ E}+00$	$-0.1570794 \text{ E}+00$
ω_3 (rad/°)	$-0.1048611 \text{ E}-11$	$-0.1048611 \text{ E}-11$
ω_1 (rad/°)	$0.1327932 \text{ E}-08$	$0.1327932 \text{ E}-08$
ω_1 (rad/L)	$-0.3474495 \text{ E}-06$	$-0.3474495 \text{ E}-06$
ω_0 (rad)	$-0.6000000 \text{ E}-04$	$-0.6000000 \text{ E}-04$
φ_3 (rad/°)	$0.2516668 \text{ E}-11$	$0.2516668 \text{ E}-11$
φ_2 (rad/°)	$-0.4828841 \text{ E}-08$	$-0.4828841 \text{ E}-08$
φ_1 (rad/L)	$0.1737246 \text{ E}-05$	$0.1737246 \text{ E}-05$
φ_0 (rad)	$-0.9999999 \text{ E}-05$	$-0.9999999 \text{ E}-05$
κ_3 (rad/°)	$0.1677778 \text{ E}-11$	$0.1677778 \text{ E}-11$
κ_2 (rad/°)	$-0.2414422 \text{ E}-08$	$-0.2414422 \text{ E}-08$
κ_0 (rad/L)	$0.3474495 \text{ E}-06$	$0.3474495 \text{ E}-06$
κ_0 (rad)	$0.6999999 \text{ E}-04$	$0.6999999 \text{ E}-04$

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 (ω, φ, κ) 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。

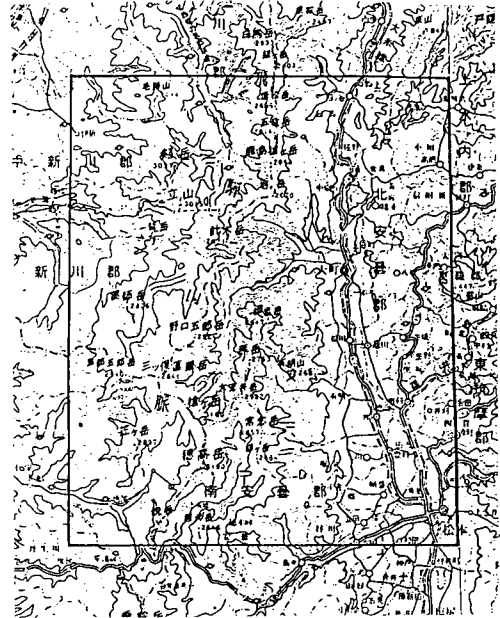


図4. 2 テストエリアの地形図 (図2・10再掲)
(50万分の1, 中部・近畿)

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。

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, 精度が向上するのがわかる。

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がわかる。

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な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

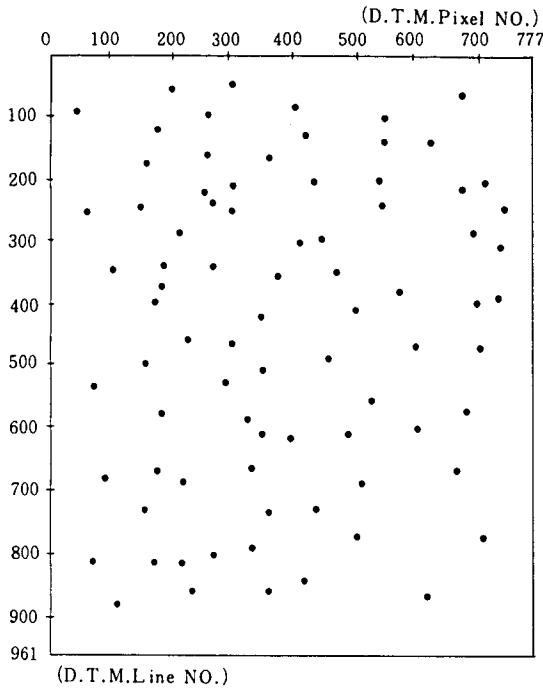


図4.3 a) 地上基準点の分布 (候補点の分布)
(図中・点)

(合計79点)

(N:地上基準点数)

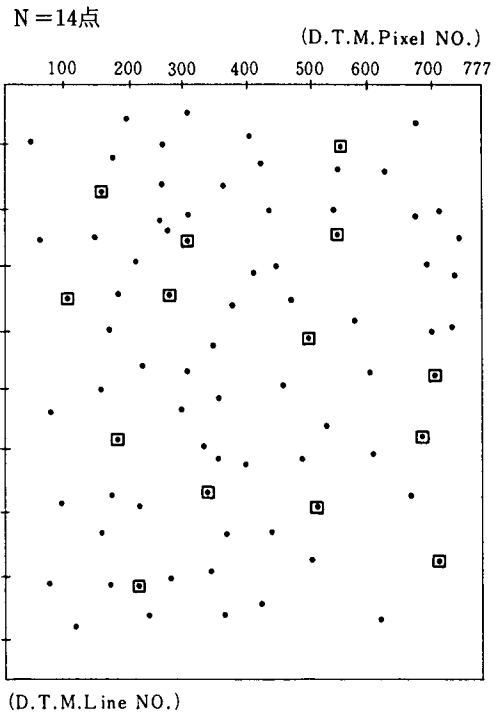
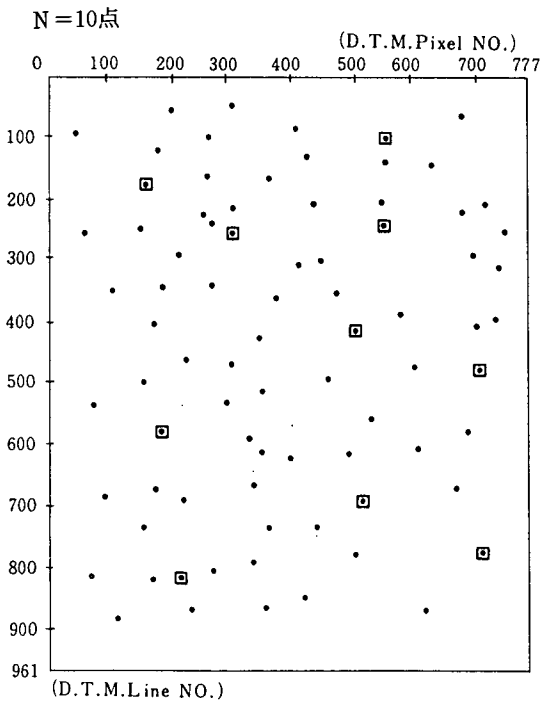


図4.3 b) 標定に用いた地上基準点の分布 (図中の□点)

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ニアアレイセンサの場合、高度に比べて走査幅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。

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。

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。

画像全体に一樣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、ライン方向に一樣分布)を、画像

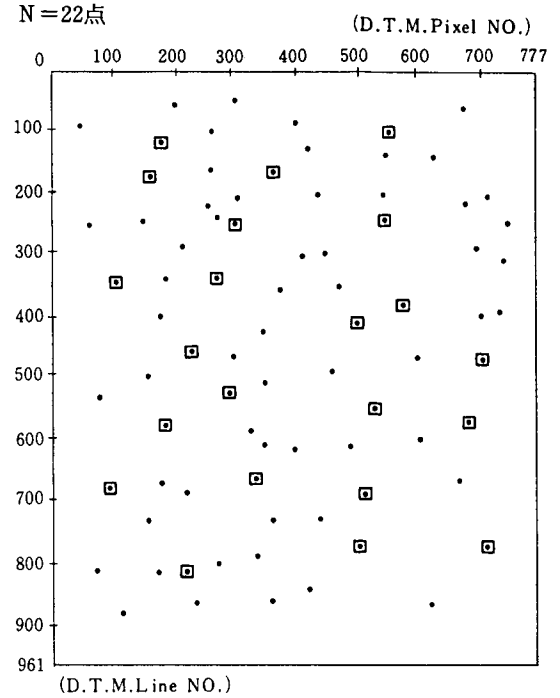
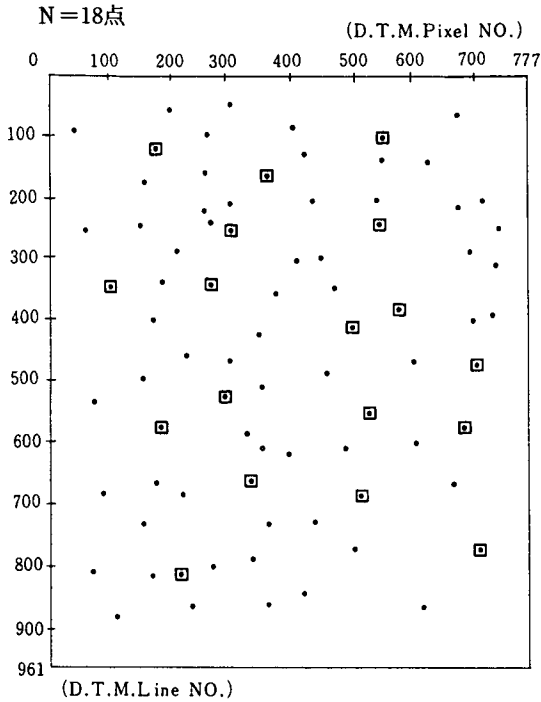


表4.4 三次元測定の精度 (平均二乗誤差, 単位m)

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

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分布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が, 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が, ライン方向に偏在している場合は, 基準点のないラインを持つ画像部分での再現精度は非常に低くなると言える。

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°

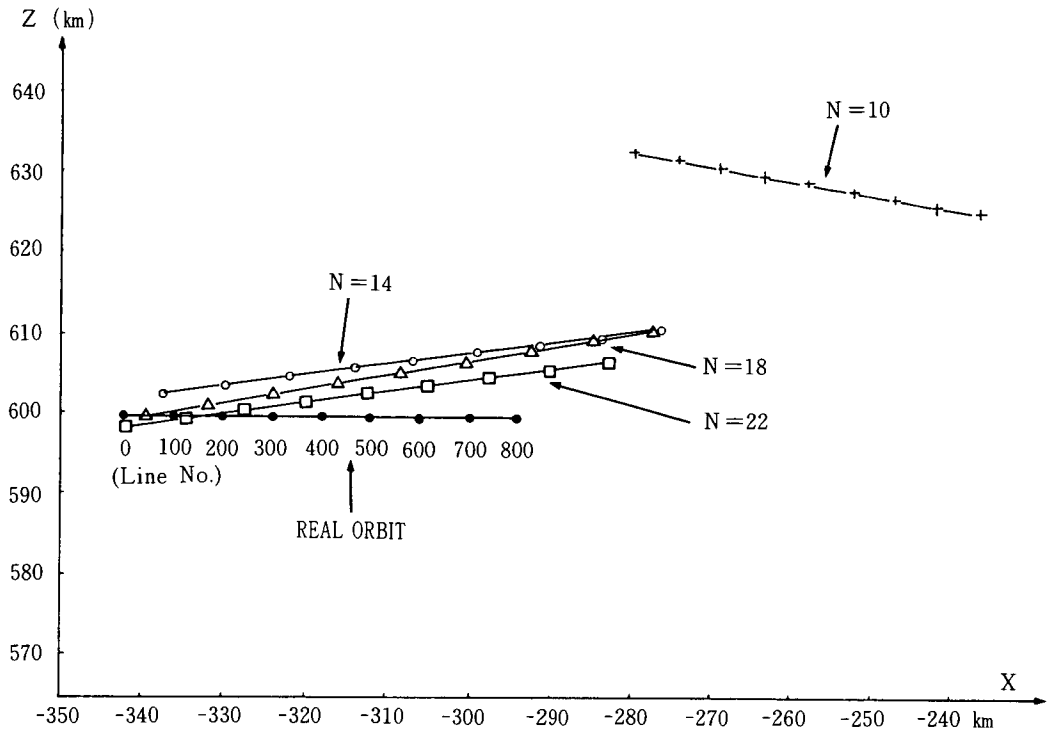


図4.4 標定により求められた衛星軌道と実際の軌道の比較
(その1, X・Z平面)

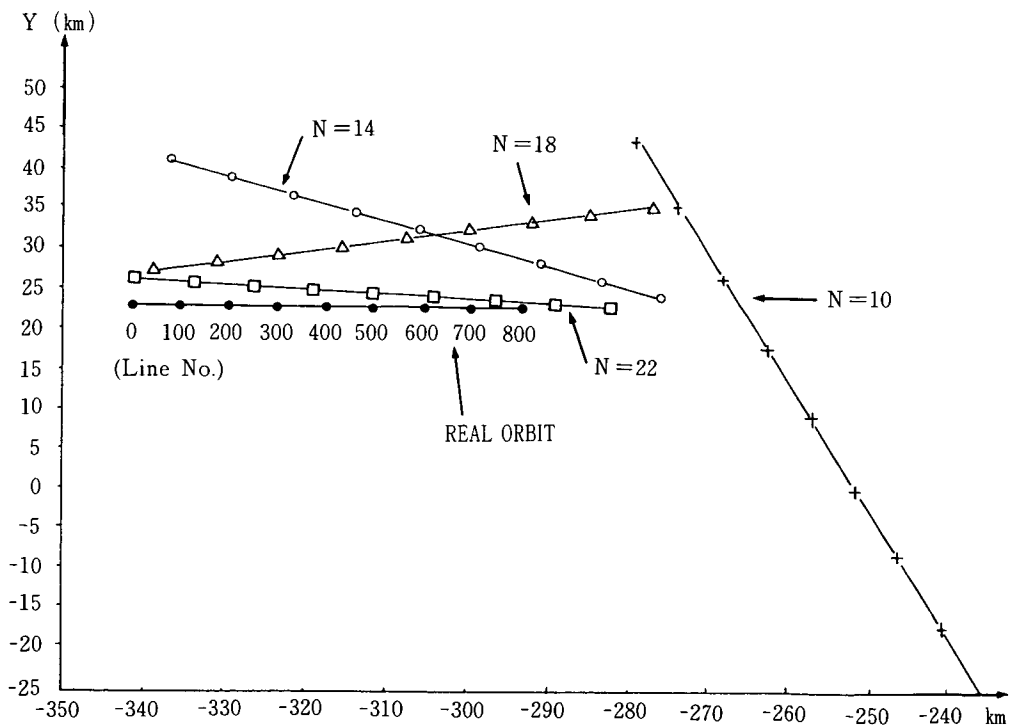


図4.4 (その2, X・Y平面)

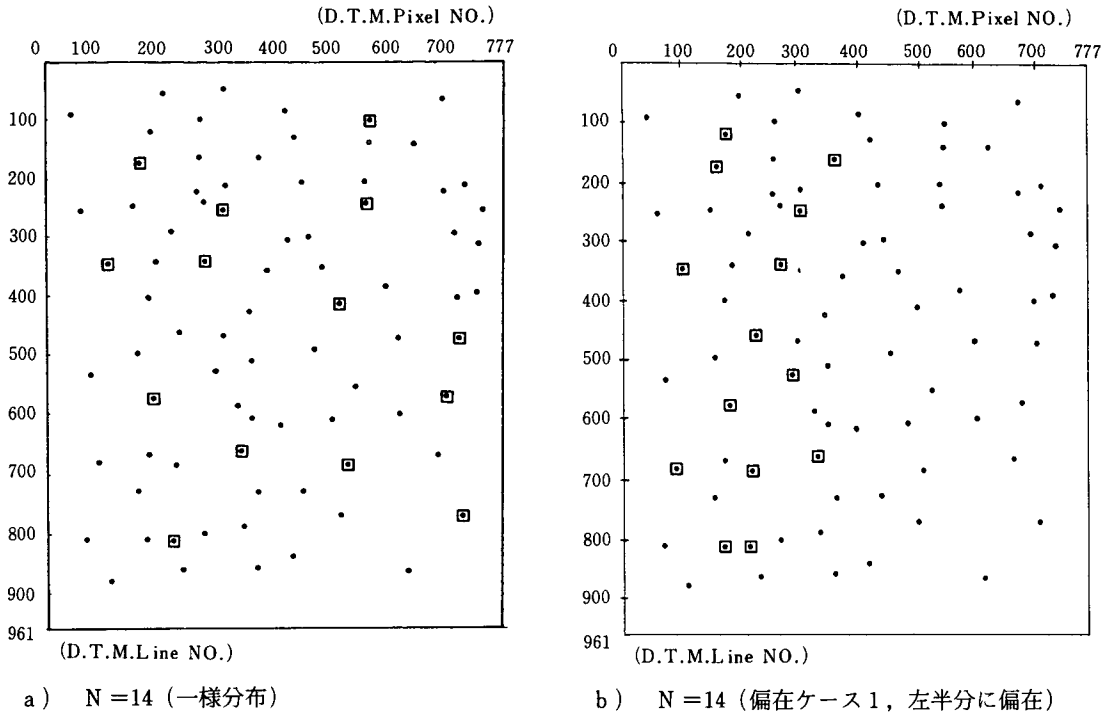
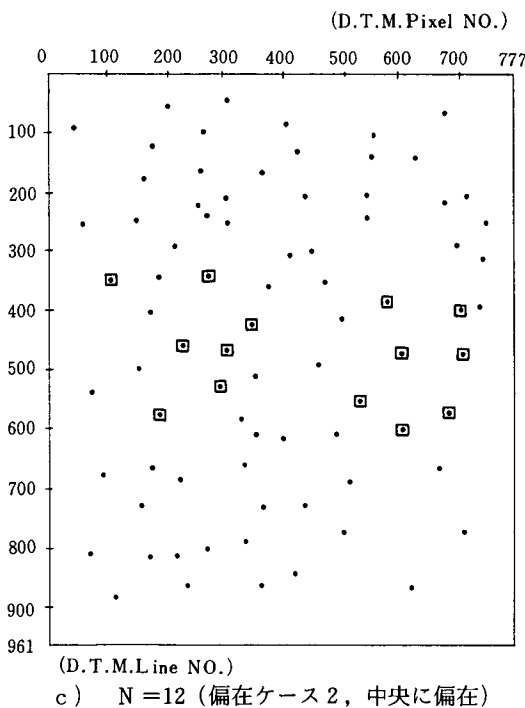


図4.5 基準点の画像内分布ケース



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、一般基準点を数多く設定することは困難であると予想できる。そこで、衛星の位置・姿勢データを併用することによって標定モデルを安定させ、必要な地上基準点数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⁽¹⁾(ケース1)とG.P.S.(Global Positioning System)の利用を仮定したもの⁽¹⁾(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⁽¹⁾(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、MAPSAT⁽²⁾におけるもの(ケース3)をいくらか修正して用いている。

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（1 σ 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残差の分散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4.6の計測精度（1 σ 値）および基準点回りの残差の分散の逆数を標定における重みとする。

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。

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、衛星データを制約条件として与えることにより、図4.7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い。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。

4.4 まとめ

- 1) 本研究で開発された外部標定手法を用いると、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受けやすく、分布が一樣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。

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	$\Delta \omega$	$\Delta \varphi$	$\Delta \kappa$	
ケース 1	80 m	80 m	80 m	0.01°	0.01°	0.01°	ランドサット 4, 5 号程度
ケース 2	10 m	10 m	10 m	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	10 m	10 m	10 m	0.0025°	0.0025°	0.0025°	衛星姿勢測定技術の進歩 (MAPSAT 程度)

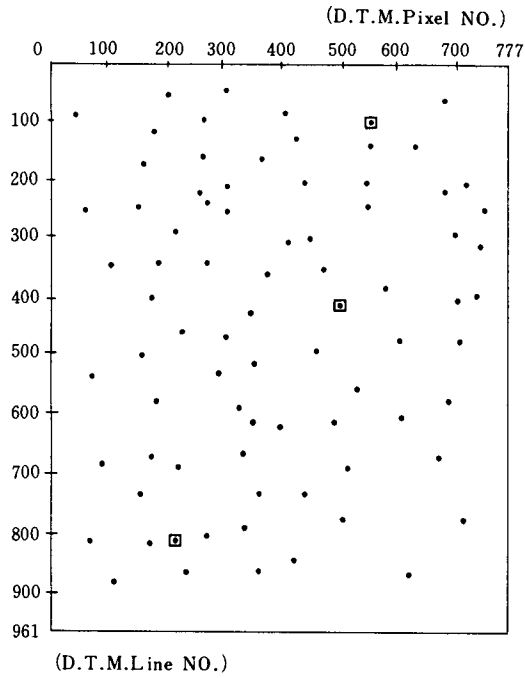
注) 画像上の基準点回りの中等誤差は
0.3ピクセルと経験的に想定する。

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)

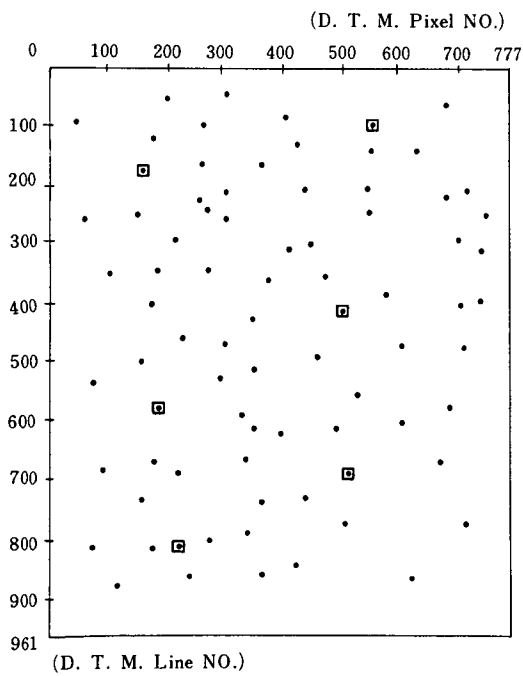
基準点類	ケース 1		ケース 2		ケース 3	
	平面位置	標 高	平面位置	標 高	平面位置	標 高
N=0	60.9	165.	42.7	154.	20.0	39.8
N=3	16.4	96.6	19.0	81.4	6.15	21.4
N=6	4.92	6.27	4.55	5.87	3.72	5.08
N=10	3.52	5.31	3.26	5.05	3.13	4.10

(単位: m)

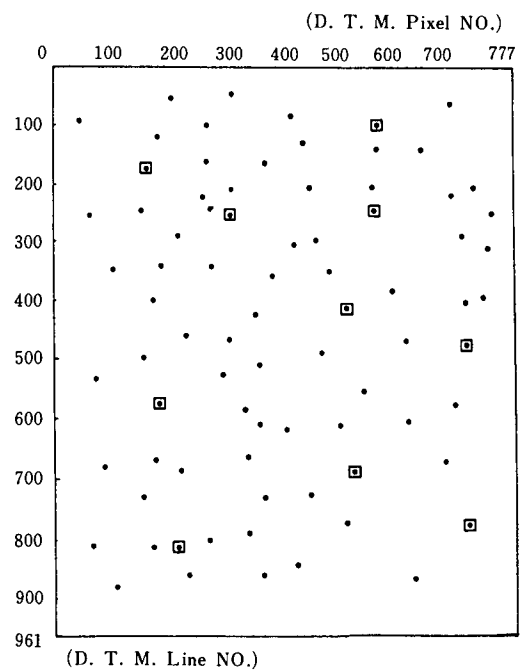
注) ステレオ角=60°



a) $N = 3$



b) $N = 6$



c) $N = 10$

図 4.6 地上基準点分布 (基準点数 : N)

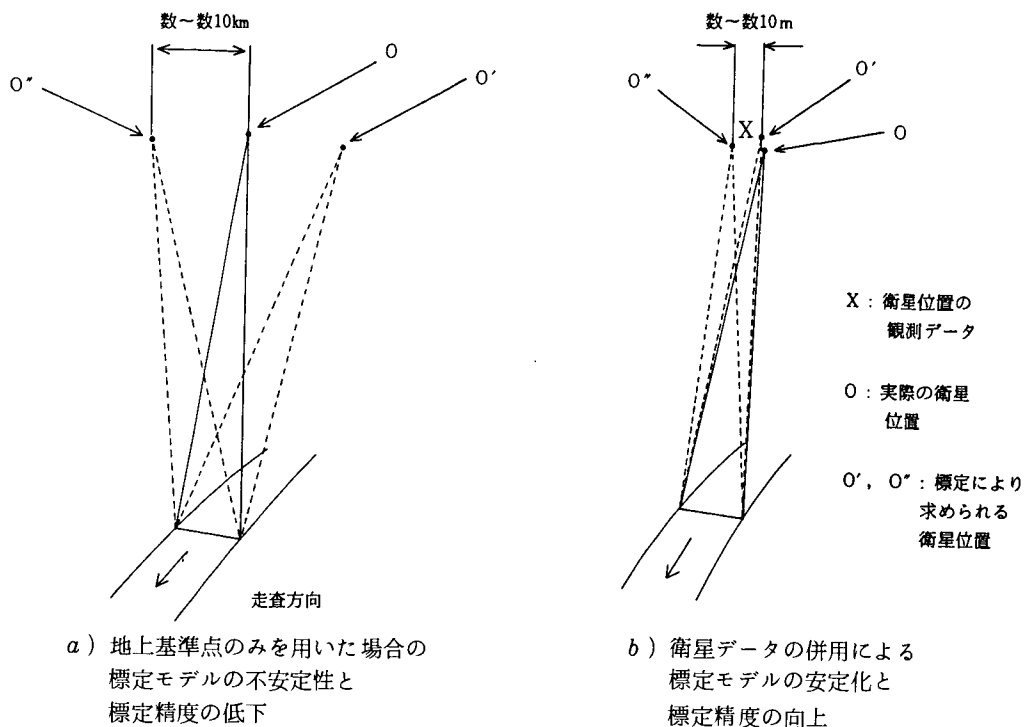


図4. 7 衛星データの併用による標定モデルの安定化と標定精度の向上

5. 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）については第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 λ/ρ 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なっている。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じく主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による三次元計測を行う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さほど厳密に考える必要がなく、樹冠標高から樹木の高さの予想値を差し引く程度の簡単な処理でよいと考えられることから探索の自動化が比較的容易であると判断できる。

画像相関を用いたステレオ対応点の探索アルゴリズム

ムは一般的に図5.1のようにまとめられる。

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

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処理 (photometric preprocessing) と画像の幾何学的な処理 (locational preprocessing) に分けられる。^(*)

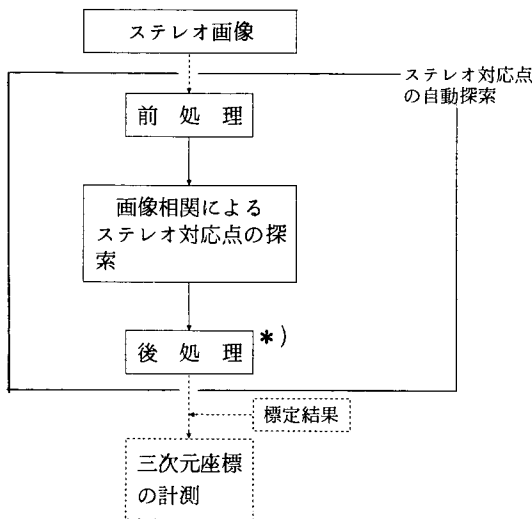


図 5.1 ステレオ対応点の自動探索アルゴリズムのフロー

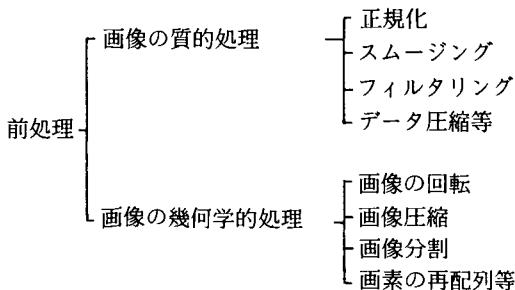


図 5.2 画像の前処理の分類

*) 後処理は三次元座標の計測後に行われるものも含む

1) 画像の質的処理

本研究では、シミュレーション画像に対して質的処理は行っていない。これは本研究で作成したリニア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さほど多くないこと、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、リニアアレイセンサ画像についても図5.2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

リニア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、リニアアレイセンサのステレオ画像では共役直線にそってステレオ対応点の探索を行うことによって探索範囲を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アレイセンサ画像を図5.3に示すように水平面に投影し、近似的な共役直線(擬似共役直線(quasi-epipolar line))にそ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次元と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。

a) 前後方式(STEREOSAT, MAPSAT型)(図5.4参照)

- i) 計測対象の地表面にできるだけ近く水平投影平面($Z=一定$)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) リニアアレイ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 $X-Y$ 座標系に変換することにより画像の再配列を行う。

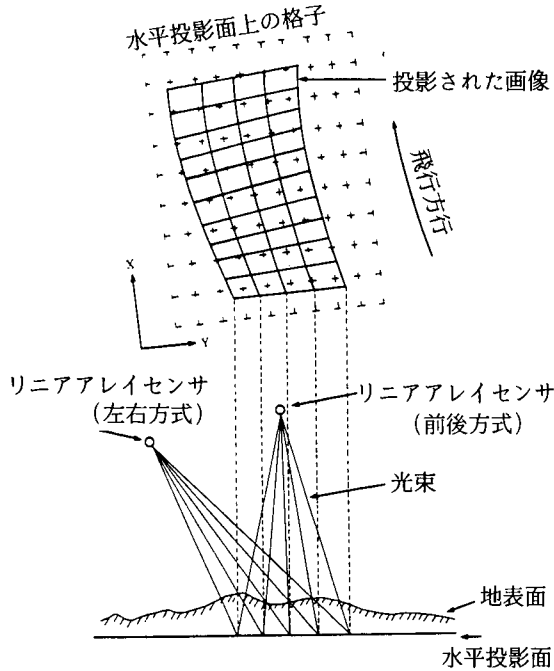


図 5.3 水平面への投影による
リニアアレイセンサ画像の再配列

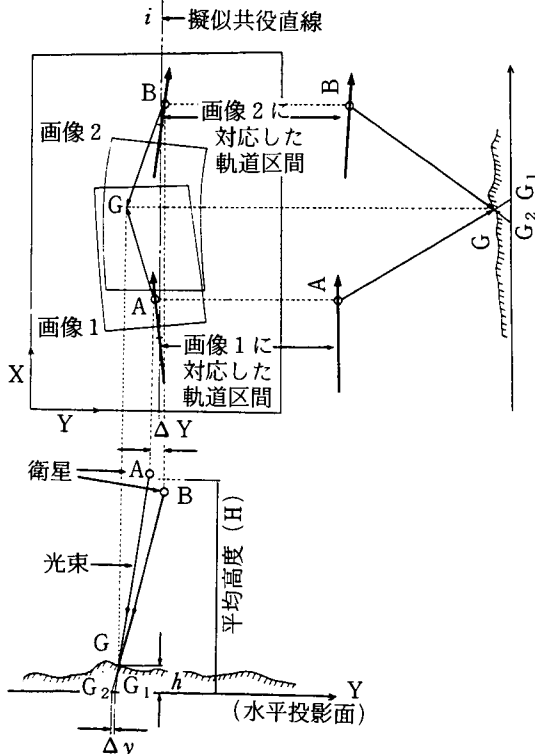


図 5.4 リニアアレイセンサ画像の
水平面投影による再配列
(前後方式の場合)

擬似共役直線のY視差は図5.4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(Δy)であり以下の式で表わされる。

$$\Delta y \approx \frac{h}{H-h} \cdot \Delta Y$$

$$\approx \frac{h}{H} \Delta Y \quad (5-1)$$

($\because H \gg h$) ΔY : 点Gを走査した時衛星位置
(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600km及び B/A 比を1.0とすると、画像1, 2の各軌道区間の間の距離は約600kmとなる。約600kmの軌道長であれば衛星位置は時間の1次式を用いて650m程度の精度で表わされること(注)から ΔY はその2倍程度の値をとると考えられる。 h は地形の凹凸の大きさで決まるので約1000mと仮定すると、(式 5.1)より Δy は $(1/600) \times \Delta Y$ 、すなわち2m程度の大きさとなり、地上での画素の大きさ(10m×10m)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 Δy (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570km)で衛星位置(経度)を時間の1次式により近似した場合、6ケースの平均二乗誤差は 9.3×10^{-5} radでありこれは、約650mに相当する。

b) 左右方式 (SPOT型) (図5.5参照)

- 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

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

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) 擬似共役直線の方向を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。その上でリニア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5.5の中の点 G_1 , G_2 のX座標の差(Δx)で表わされる。 Δx は近似的に以下の式で与えられる。

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

$$\approx \frac{h}{H} \cdot \Delta X \quad (5-2)$$

ΔX : 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

$h \approx 1000$ m, $H \approx 800$ kmと想定すると Δx が高々数mのオーダーになるためには, ΔX は2000m程度以内になる必要がある。ここで ΔX はその発生要因に従って大きく2つ(ΔX_1 , ΔX_2)に分けられる(図5.5b)参照)。

ΔX_1 は例えば左画像の1本の走査線と交わる, すなわちステレオ対応点を持つ右画像のライン方向の長さ(右軌道上の衛星位置の巾)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巾を乗す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はほぼ等しいと考えられる。ヨー角は, ランドサット4号を例とすると約490秒間に $0.0 \sim 0.3 \times 10^{-3}$ radの間を変動している。隣接軌道への回帰には7000秒程度かかることから, SPOTにおいても隣接軌道間のヨー角の差はその数十倍にあたる高々 10^{-2} radのオーダーと推察される。これにより ΔX_1 は1000m程度と求められる。

次に ΔX_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, ピッチ角の変動巾に高度を乗することにより近似的に求められる。SPOT衛星の姿勢安定性(姿勢変化の速度)は $1.0 \cdot 10^{-5}$ rad/sec(MAX)と言われており, ピッチ角の時間変動の巾が $\Delta X_2 = 1000$ mに対応する値 1.25×10^{-3} radになるのに少なくとも125秒($\sim 1.25 \cdot 10^{-3}$ rad $\div 1.0 \cdot 10^{-5}$ rad/sec)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。

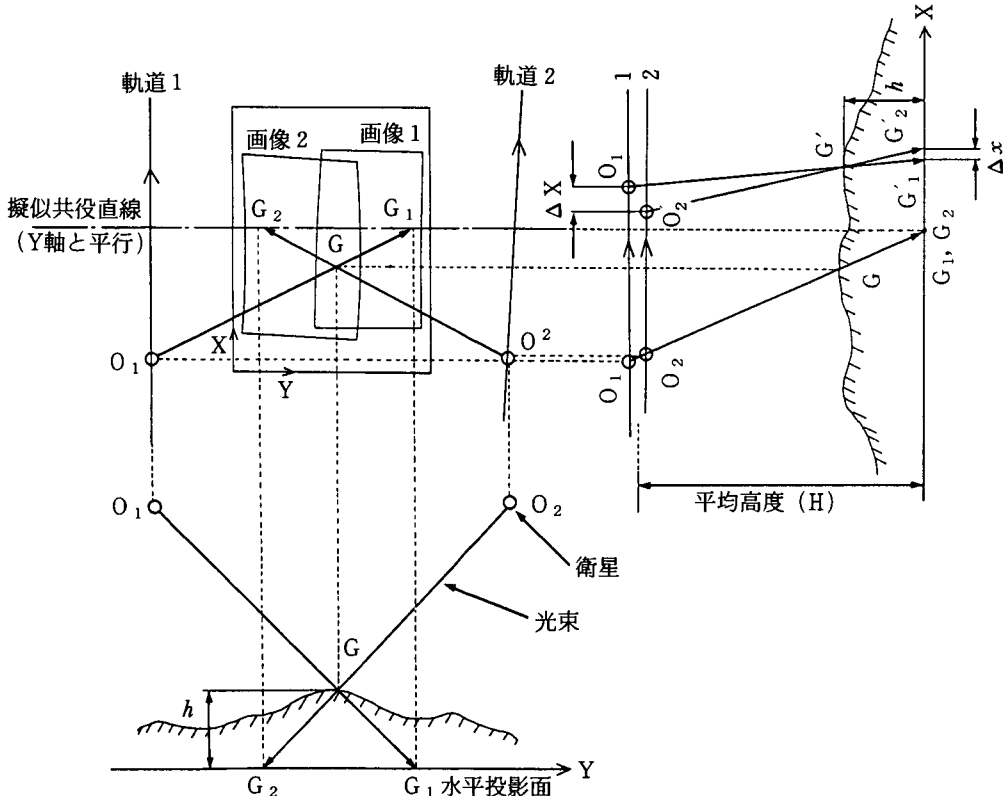
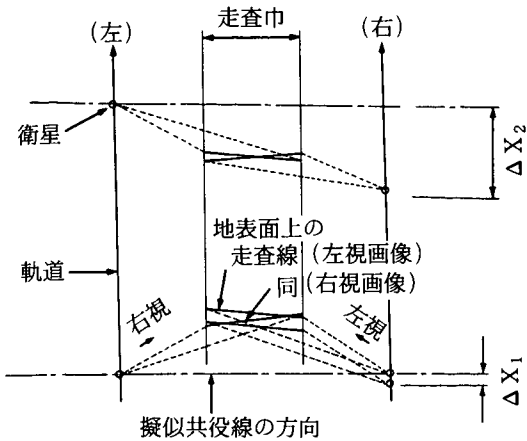


図 5.5 a) リニアアレイセンサ画像の水平面への投影による再配列
(左右方式の場合)



ΔX_1 : 隣接軌道間のヨー角の差によるもの
(地面上の左右走査線のなす角によるもの)
 ΔX_2 : 隣接軌道間のピッチ角の変化の差によるもの

図 5.5 b) 左右方式における ΔX の変化

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、オン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ある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さがす部分(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けられる。

本研究では前者について画像相関(面積相関)手法を利用したステレオ対応点探索の精度及び基本的な精度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

相関のとり方、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

- 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
ンジを越えた領域
- テクスチャなどの規則的な輝度のパター
ン

に分けられる。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歩を見せてはいるものの、^{06, 09, 09} 今だ研究の途上にあり、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ぺい(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。^{(17),(23),(24)}

衛星からのリニア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なされる傾向にあり、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、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
- である。

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アレイセンサのシミュレーション画像を用いて表5.1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 リニアアレイセンサによる衛星画像は地上解像力が高々10m×10m程度であるため、1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。

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や相互相関による例^{(21),(8),(9),(10)}が比

表 5.1 ステレオ対応点の自動相関手法について
本研究で検討する要因

画像相関 手法に関する もの	○画像相関度(類似度)のとり方 ○相関窓の大きさ等 ○探索範囲の大きさ
画像そのもの に関するもの	○地形の起伏による画像の幾何的歪(視差) ○地表面の状況等 ^(注)

注) テストエリアはテクスチャに富んだ山地部とテクスチャに乏しい平野部(田畑, 市街地等)よりなっており、その範囲内で検討する。

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手法^{(9),(25)}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})

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

$$S_{ab} = \sum_{i,j} (a_{ij} - \bar{a})(b_{ij} - \bar{b})$$

$$S_{aa} = \sum_{i,j} (a_{ij} - \bar{a})^2$$

$$S_{bb} = \sum_{i,j} (b_{ij} - \bar{b})^2$$

$$\bar{a} = \frac{1}{MN} \sum_{i,j} a_{ij}$$

$$\bar{b} = \frac{1}{MN} \sum_{i,j} b_{ij}$$

$\{a_{ij}\}$: 画像A

$$\begin{pmatrix} 1 \leq i \leq N \\ 1 \leq j \leq M \end{pmatrix}$$

$\{b_{ij}\}$: 画像B

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、そこで計算を打ち切る。そ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)

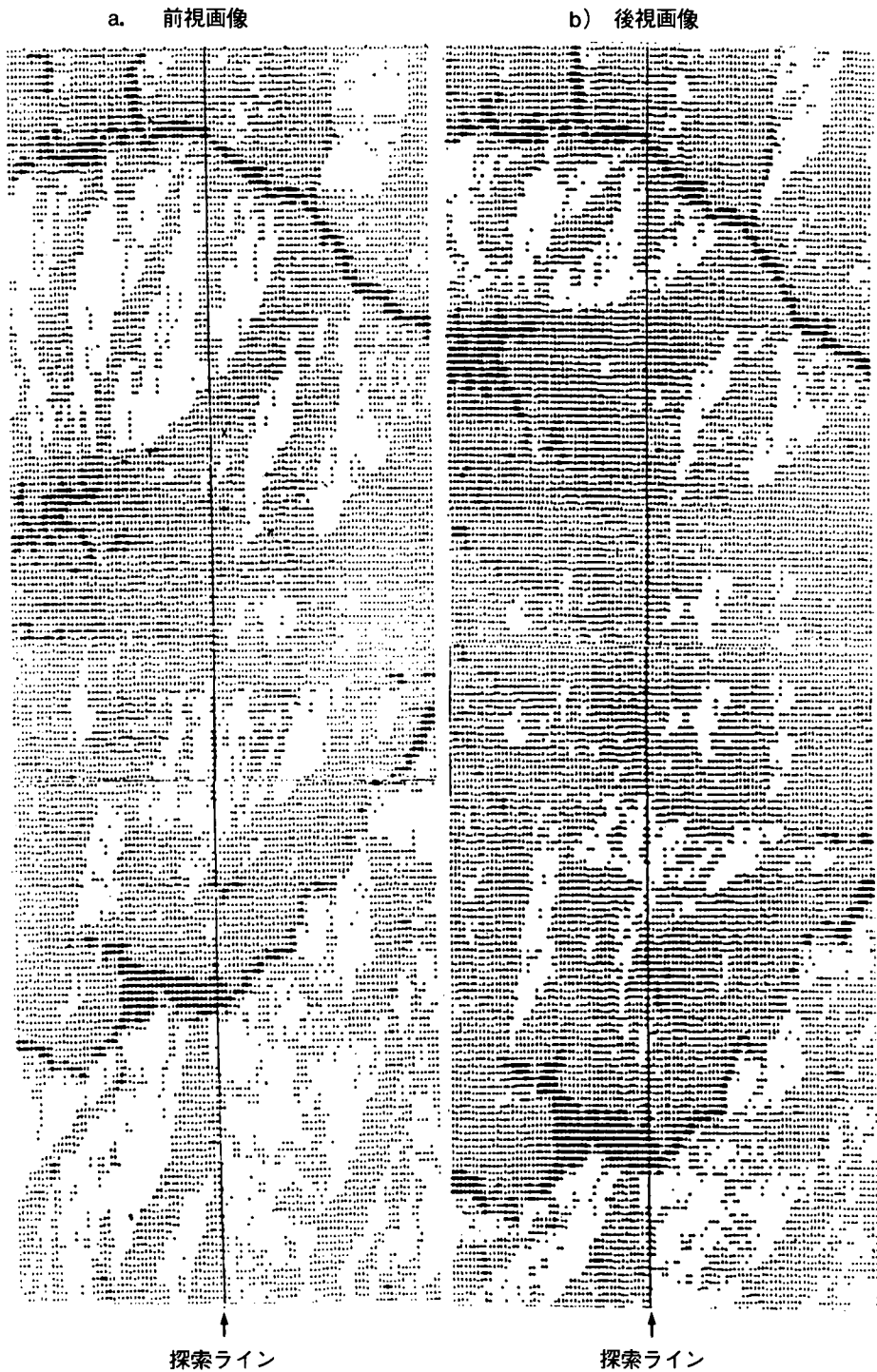
$$S = \sum_{i,j} |a_{ij} - b_{ij}| \quad (5-4)$$

$$\{a_{ij}\} : \text{画像A} \quad \begin{pmatrix} 1 \leq i \leq N \\ 1 \leq j \leq M \end{pmatrix}$$

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。(ただし探索範囲は、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

図5. 6 比較テストのテストエリア画像（ステレオ角=60°）



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) 計算時間を相関窓の大きさ、探索範囲の広さを変えて比較した。

図5.6にテストエリア画像を示す。

(比較結果)

- (1) 相関精度(対応点の自動認識精度)の比較結果

(表5.2参照)

- (2) 計算時間の比較結果(図5.7, 5.8参照)

これらをまとめると、以下のとおりである。

- i) 相関係数による方法を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ほぼ3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5.9a)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5.9b)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。パントンや服部らは、すでに終了した周辺の探索結果や低周波成分画像における探索結果等から地形起伏の概略値を与えて相関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。

表 5.2 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 × 5	1.88	3.85
9 × 9	1.59	1.64
11 × 11	1.60	2.56
33 × 33	4.25	4.26

(サンプル数 = 100)

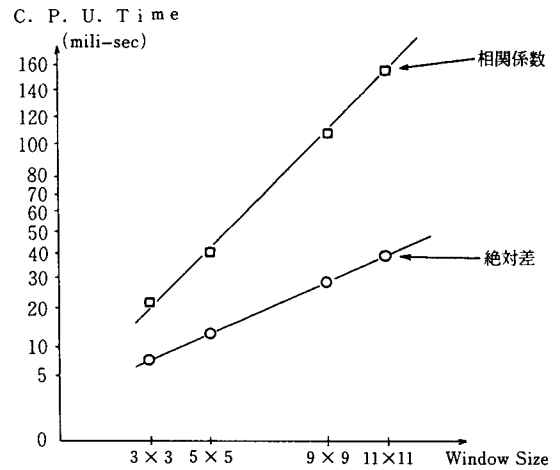


図 5.7 計算時間と^{注)}相関窓のサイズ

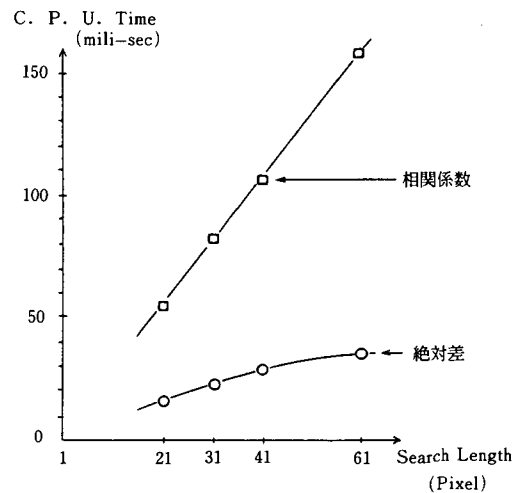
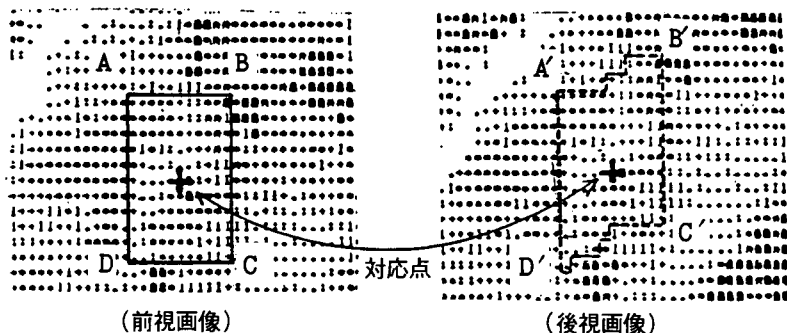


図 5.8 計算時間と^{注)}探索長

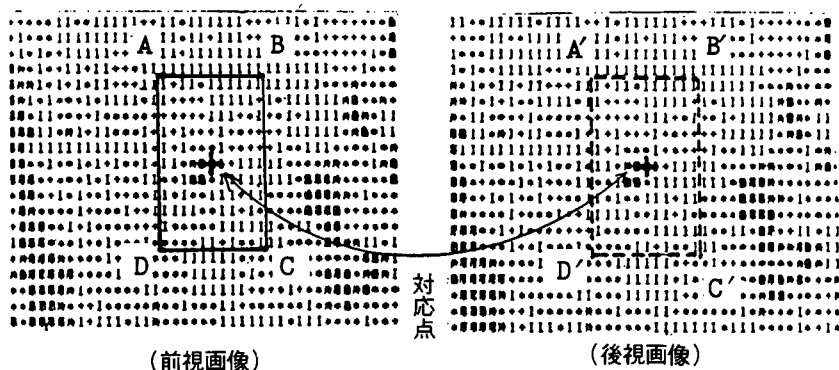
図5.9 視差による相関窓の歪と地形起伏の大きさ

(相関窓サイズ=11×11)
(ステレオ角= 60°)

a) 起伏の激しい地域



b) 平坦な地域



(2) 相関窓の大きさ

図5.10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(Δh)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より歪(ΔL)は大きくなる傾向がある。

$$\Delta L = 2 \cdot \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \cdot \Delta h \quad (5-5)$$

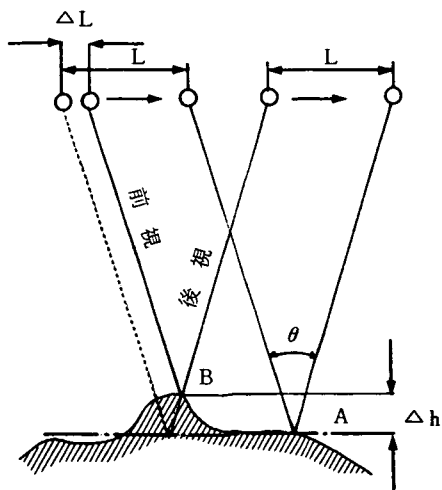
θ = ステレオ角

Δh = 地点A,B間の標高差

ΔL = 視差による窓画像間の歪の大きさ

ちなみに、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5.11である。

しかしながら、相関窓が大きいほど、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



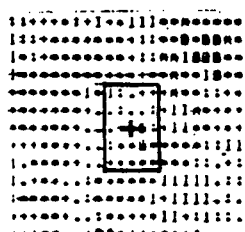
(例) 前後方式

図5.10 リニアアレイセンサによる
ステレオ画像のx視差(ΔL)

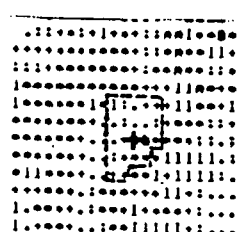
図5. 11 視差による相関窓の歪と相関窓の大きさ（同一地点，ステレオ角 $=60^\circ$ ）

—— 起伏の激しい地域 ——

a) 窓の大きさ 5×5

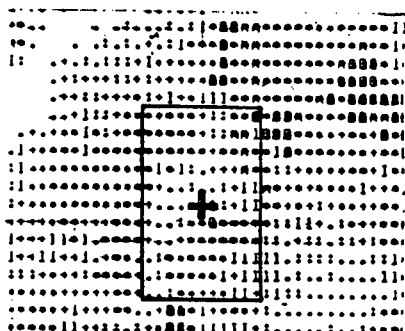


(前 視)



(後 視)

b) 窓の大きさ 11×11

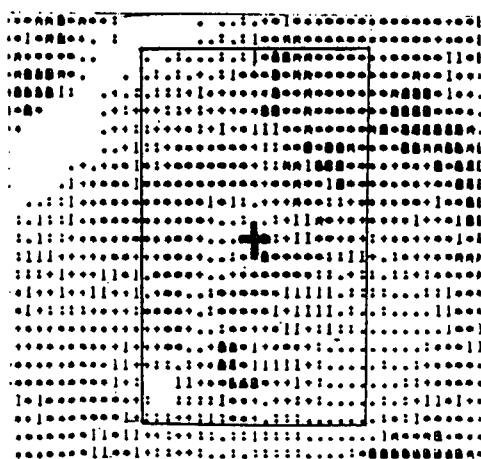


(前 視)

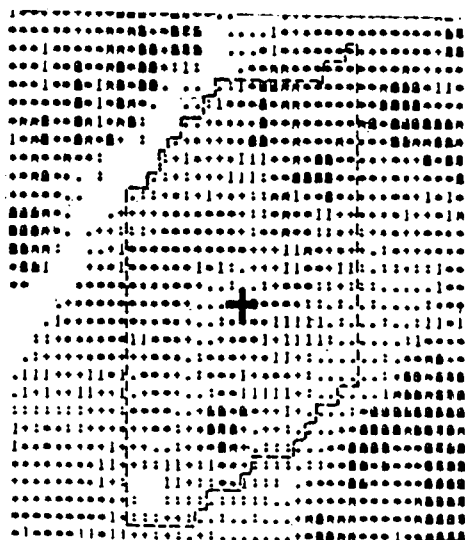


(後 視)

c) 窓の大きさ 21×21



(前 視)



(後 視)

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、LPに出力した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5.12～15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。

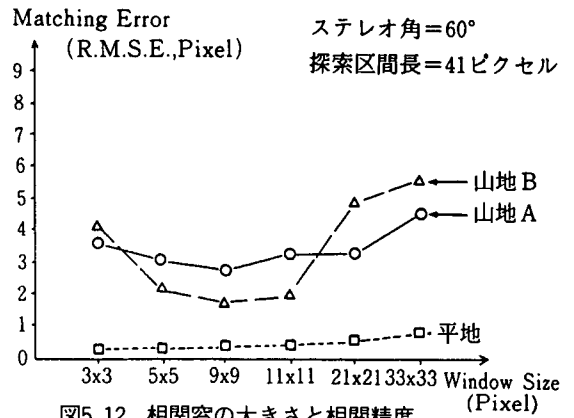


図5.13 テストエリア画像 (山地A, ステレオ角=60°)

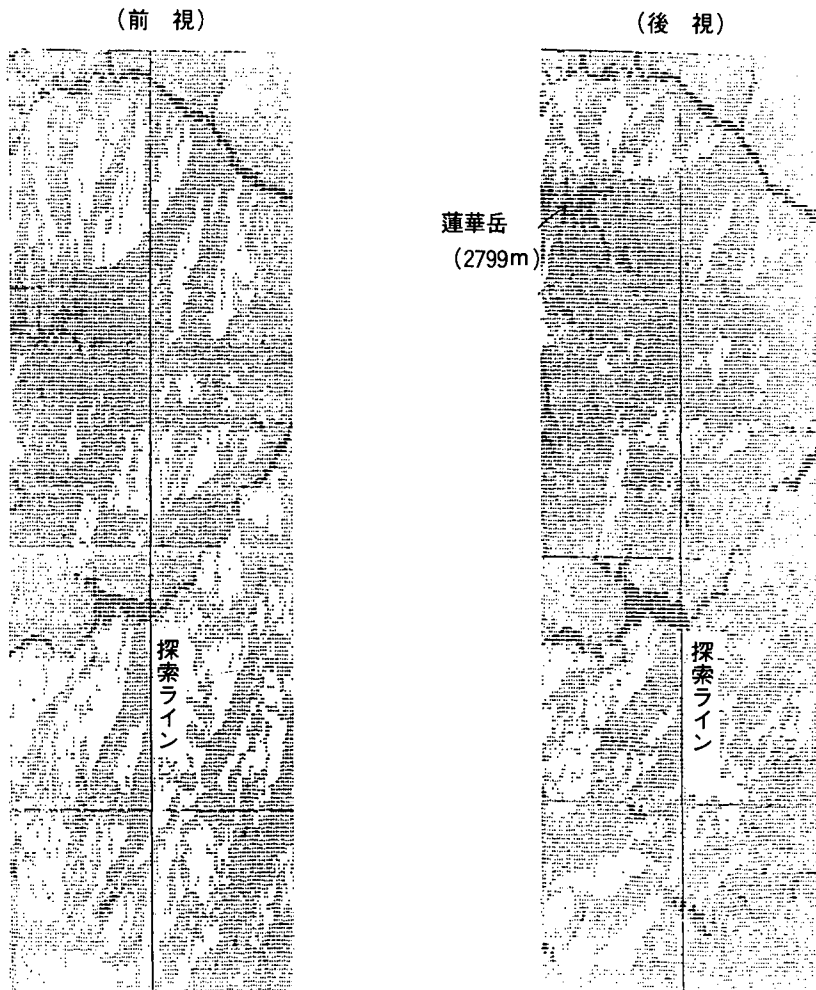


図5. 14 テストエリア画像 (山地B, ステレオ角=60°)

(前 視)

(後 視)

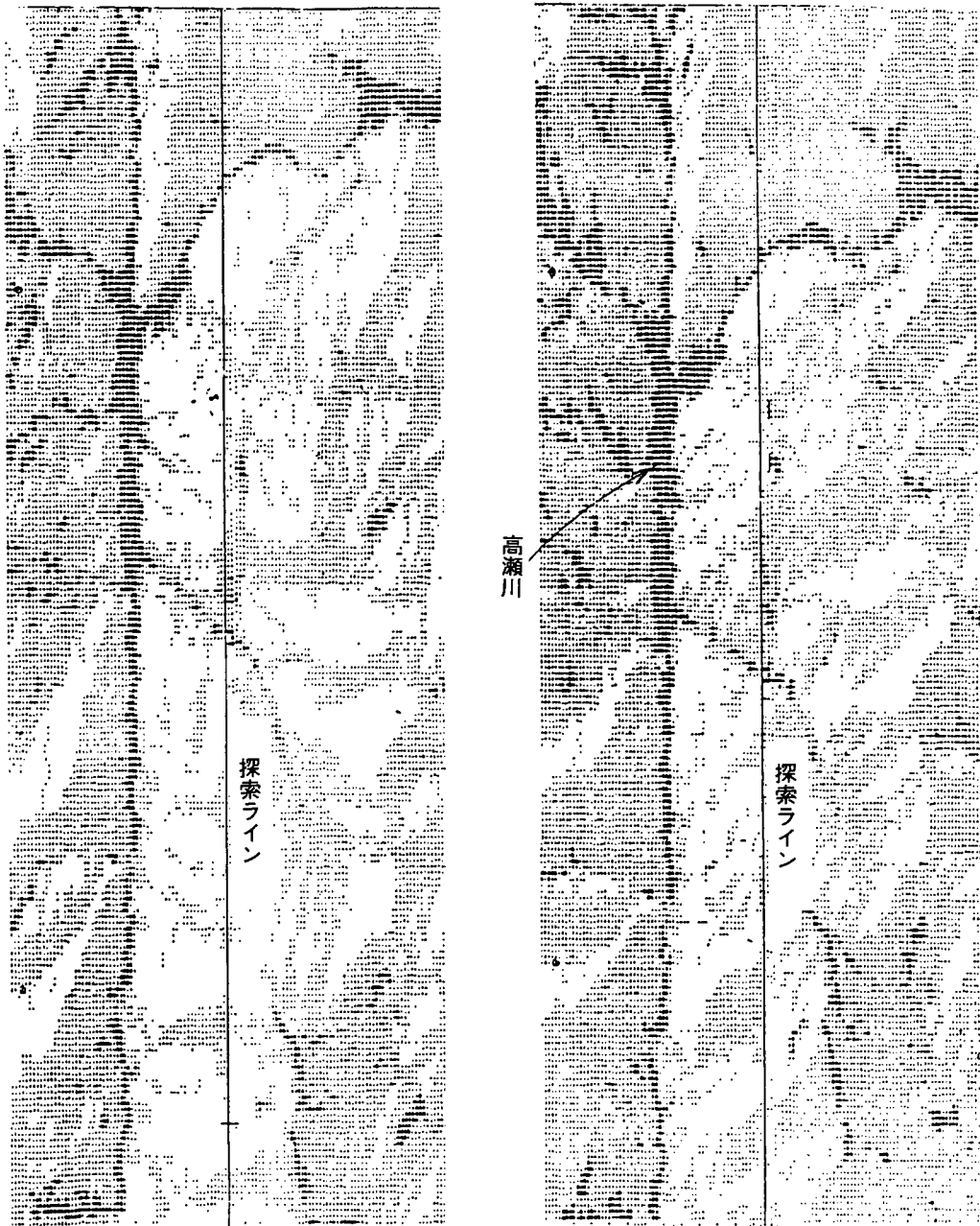
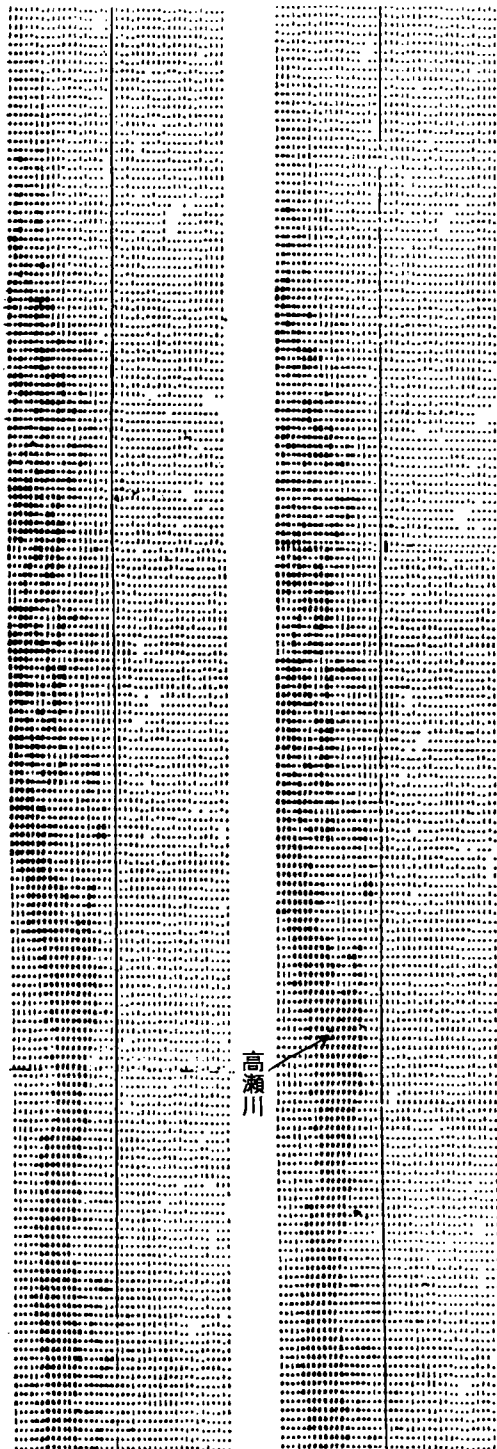


図5.15 テストエリア画像(平地, ステレオ角=60°)

(検討結果)

(前 視)

(後 視)



i) 視差による画像の大きな歪が存在する地域(起伏に富んだ山地)では相関窓の大きさが 11×11 をこえると相関誤差は増加し、 5×5 以下でも同様に誤差は増える(ステレオ角=60°, 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 11×11 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 5×5 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5.16参照)。前者は、視差に

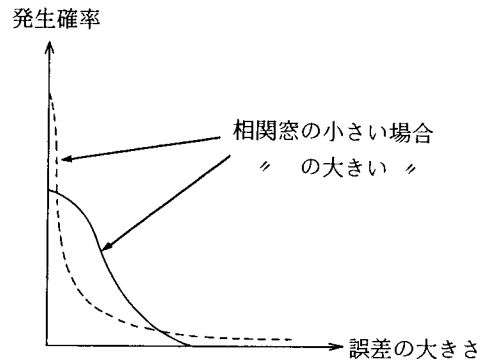


図5.16 相関窓の大きさによる相関誤差分布の違い(概念図)

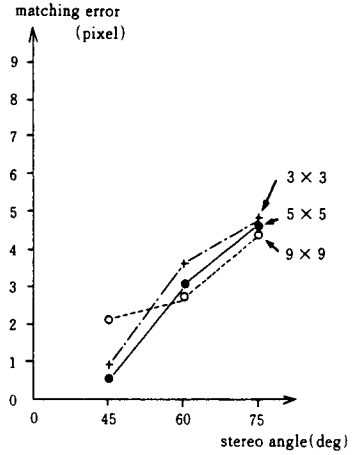
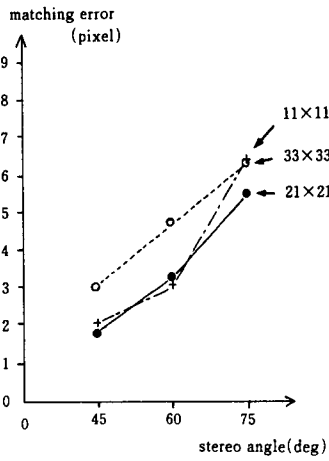
よる歪が大きいものの窓が大きいために、安定化効果が働き、極端に大きな誤差が生じにくくなっているためであり、後者は視差による歪が小さいため一般には相関誤差は小さいが、窓が小さいため画像相関を求めるためのサンプル数が少なく、歪の発生状況によっては画像相関が大きく変動し大きな誤差が発生することがあるためと考えられる。この結果は服部らが画像濃度値を定常確率場からの標本であると考えて導いた相関窓の大きさと相関精度との関連にはば一致した傾向を示している。

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。

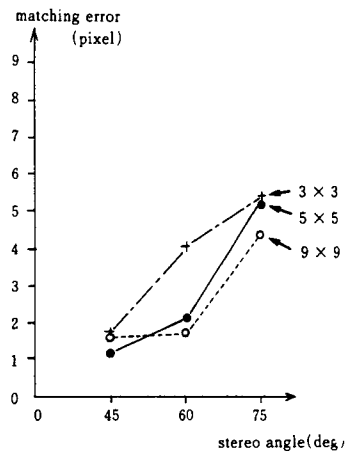
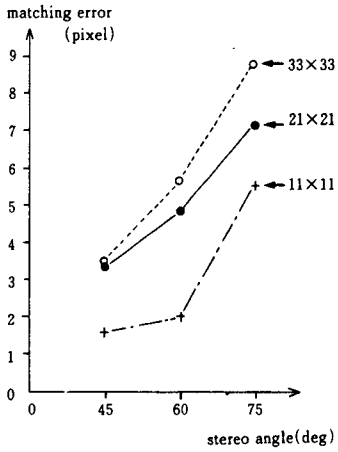
3) ステレオ角(B/H 比)の大きさ

ステレオ角(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から、相関精度が低下することが考えられる。図5.17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、ステレオ角を30°, 45°, 60°($B/H=0.54, 0.83, 1.15$)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ピクセルである。

a) 山地 A



b) 山地 B



c) 平地

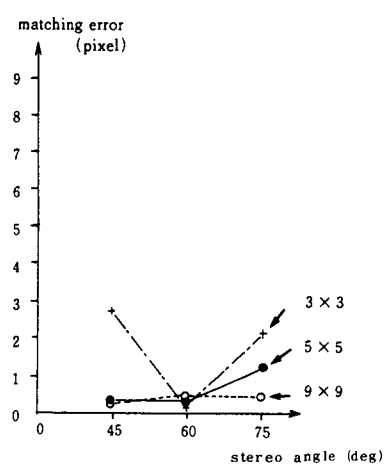
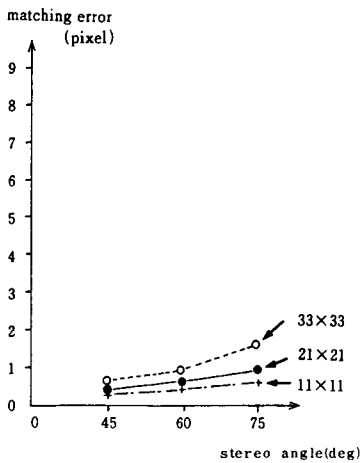
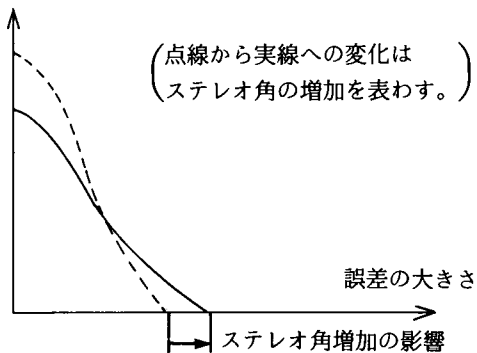


図5.17 ステレオ角と画像相関精度 (平均二乗誤差)

(検討結果)

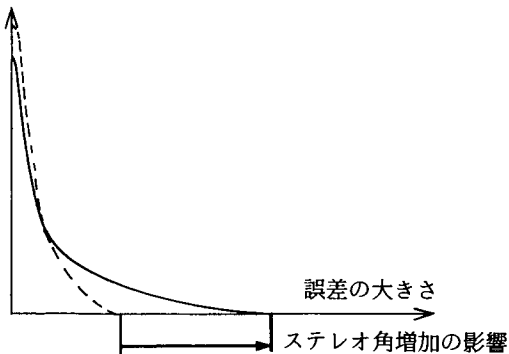
- i) 起伏に富む地域(山地A,山地B)ではステレオ角が大きいかほど画像相関の精度は低下する。精度低下の程度は相関窓の大きさにより大きな差はない。しかし、大きな相関窓については図5.18に示すように、誤差の分布型がなだらかに横へ広がるのに対し、小さな相関窓については離散的な大きな誤差の頻度が増加する傾向がある。これは小さな相関窓の場合、相関の値が視差等の歪の状況によって変動しやすく相関精度が不安定であるためと考えられる。

発生確率



a) 相関窓が大きい場合

発生確率



b) 相関窓が小さい場合

図5.18 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

探索範囲を広げるほど相関エラーが発生し易くなる

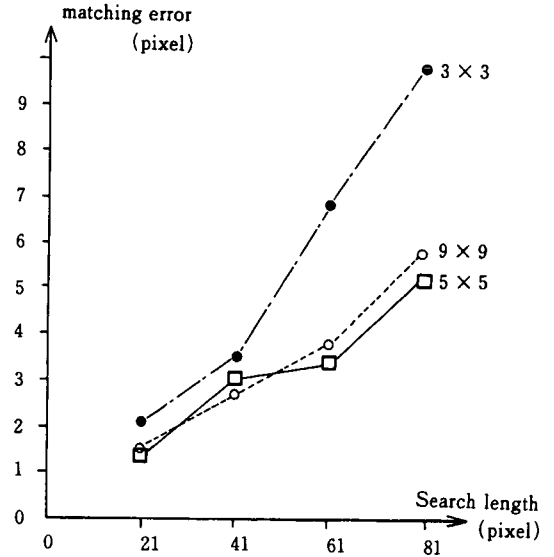
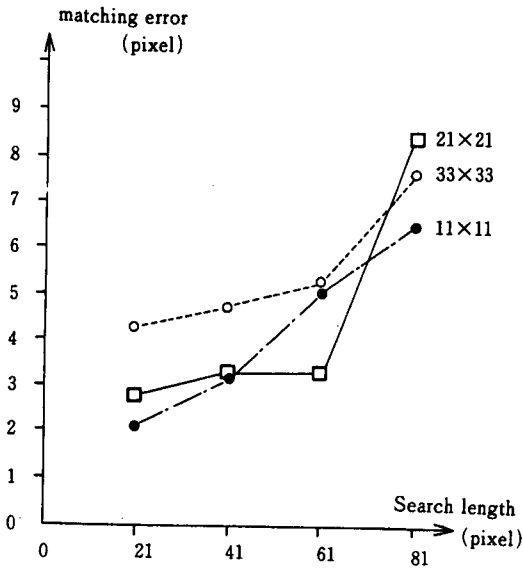
と予想される。また探索に要する時間も比例的に大きくなると考えられる。

図5.19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5.20は探索長と計算時間との関連を示している。

(検討結果)

- i) 山地のように視差による画像の歪が大きな地域では探索長が増加するにつれ、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 の回数が増加するためと考えられる。
- 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3×3のパッチについては、誤差がほぼ4.5倍になっている。これは3×3のパッチでは、中に含まれる画素の数が少なく、画像相関の偽のピークが生じやすい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。山地では両者はほぼ比例関係にあるが、平地では計算時間が探索長に対して逓減傾向にある。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しきい値による計算打ちき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さほどふえないためと考える。

a) 山地 A



b) 平地

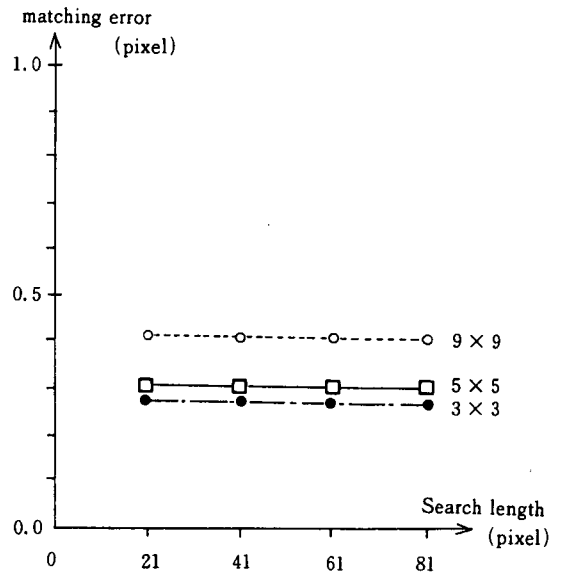
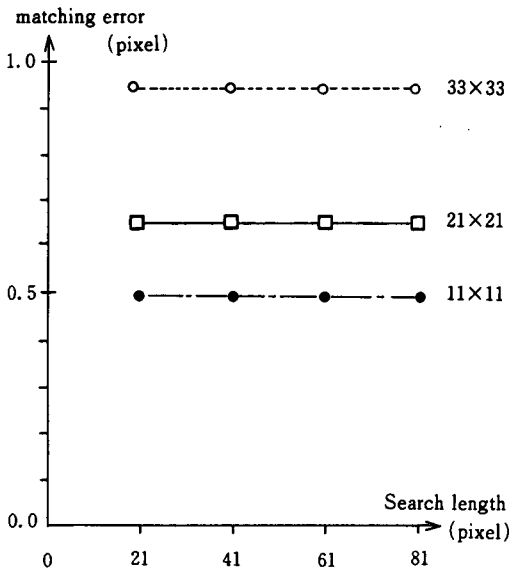
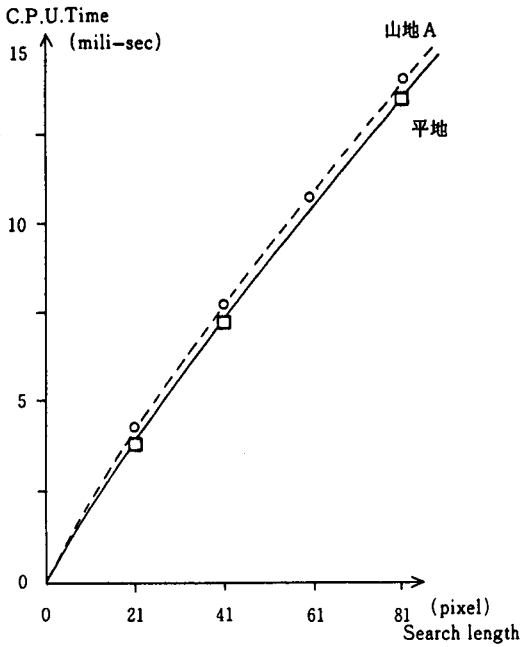
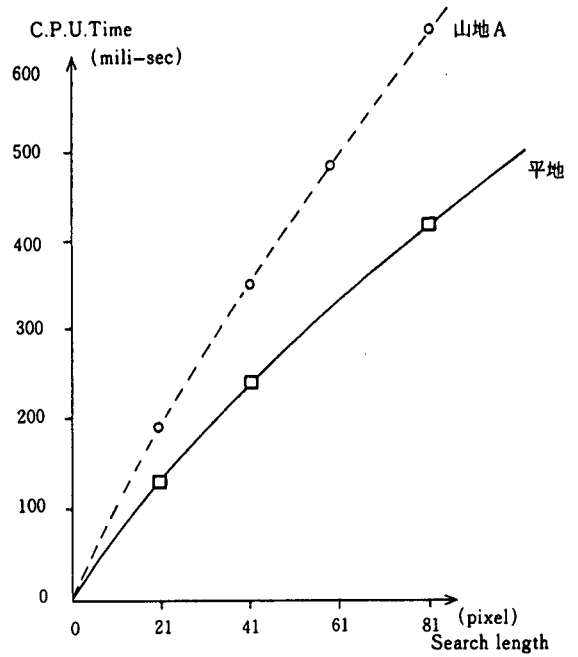


図5.19 探索長と相関精度(平均二乗誤差)

a) 相関窓: 3×3



c) 相関窓 33×33



b) 相関窓: 11×11

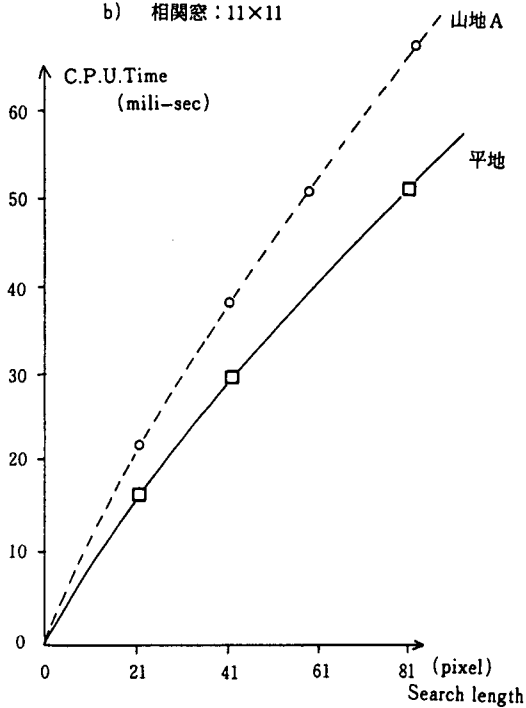


図5.20 探索長と計算時間

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）

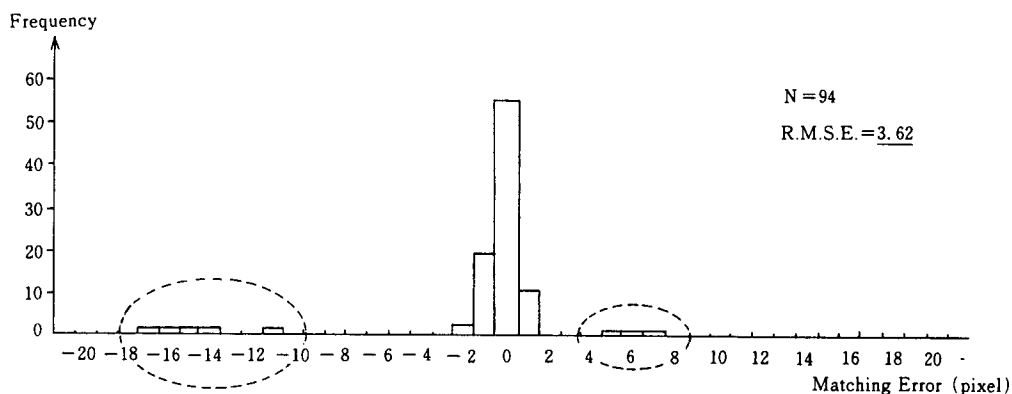
1) ステレオ相関アルゴリズム

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、

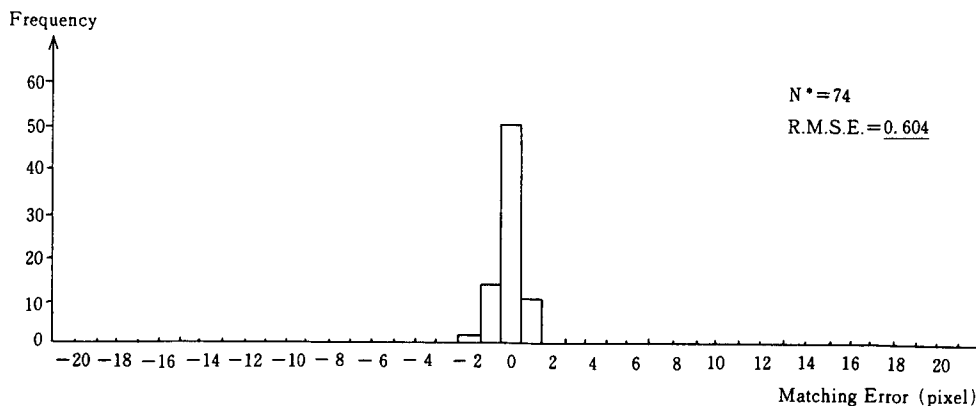
時々、極めて大きな誤差が生ずること、また大きな相関窓では、誤差分布はなめらかであり誤差の小さいケースが少ないかわりに、大きな誤差も生じにくいことがわかった。

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5.21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3×3の相関窓のみを用いた場合約3.6ピクセル(R.M.S.E)であった相関精度が、11×11

a) 3×3のみを用いた場合



b) 3×3と11×11を併用した場合（しきい値=2）



* しきい値を越えたケース = 20

図 5.21 大小の相関窓の併用による相関精度の向上例

の相関窓のフィルターを通すことにより、3ピクセル以上のエラーが全て除かれ、相関精度も約0.6ピクセル(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。

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¹⁰⁾ (図5.22参照)
- 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次の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大きい。一方、(ii)の方法はアルゴリズムも複雑であり、探索にあたって決めて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。¹²⁾

本研究では以下のような単純な探索手順を採用した。前後方式のリニアアレイセンサステレオ画像を例として以下に説明する。(図5.23参照)

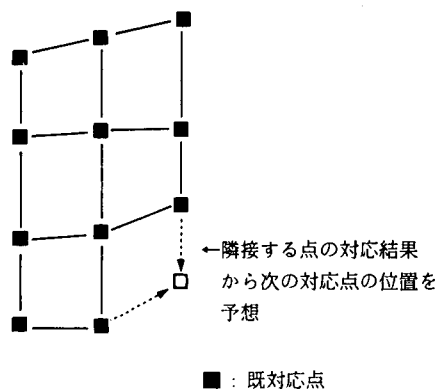


図 5. 22 隣接点より外挿的に
対応の予測位置を
与える方法

(隣接する2点より予想するケース)

- i) 前処理済のステレオ画像の片方(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点に対応する点の正確な、もしくは概略の位置を残りのステレオ画像(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、対応点の位置を正確に求めておく。
- 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5.23(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5.23(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5.23(iii)参照)。このように、ステレオ対応点の数と密度を順次、増加させてゆく。

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ことができ、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、そ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^{12), 18)}も

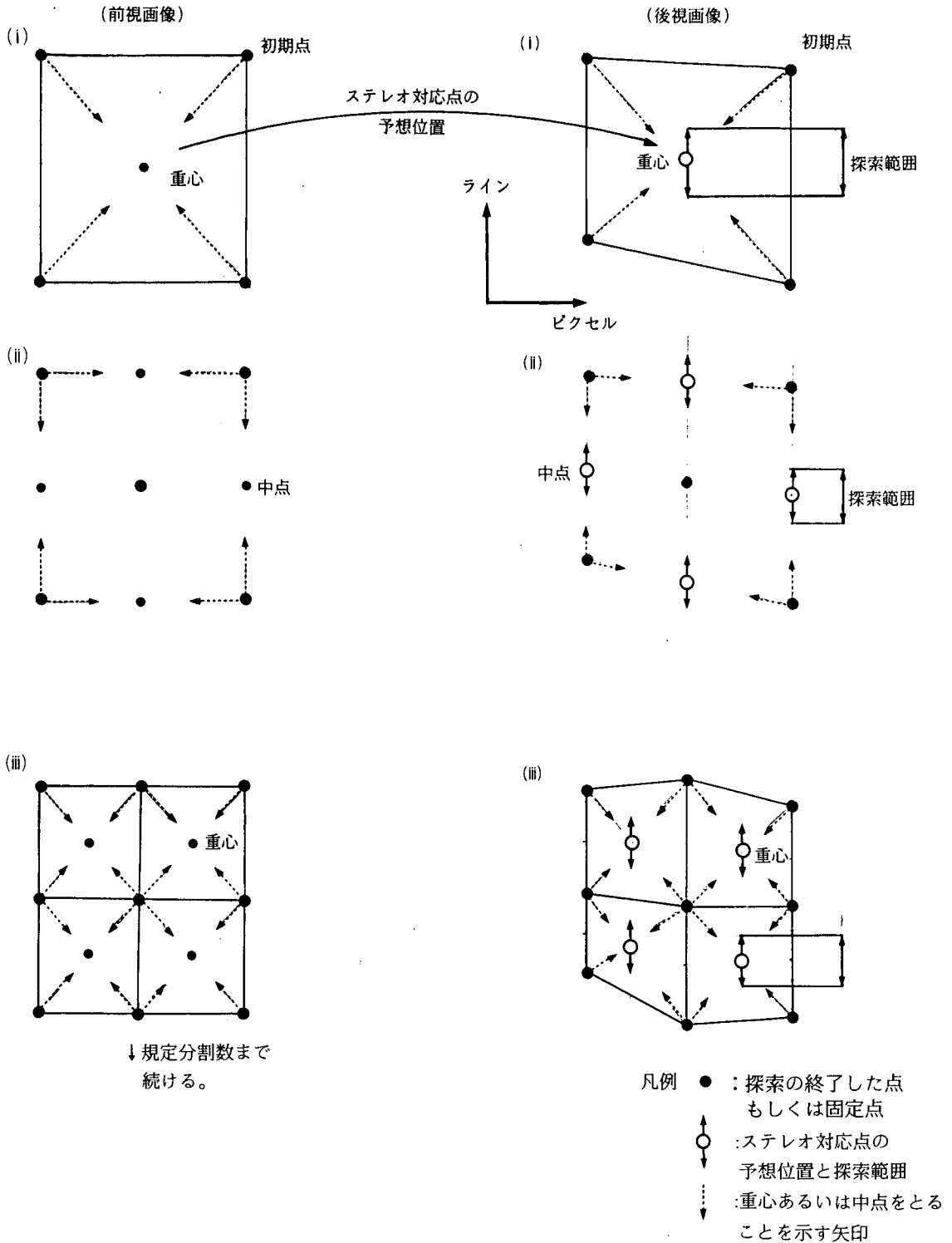


図 5.23 ステレオ対応点の探索手順（前後方式画像における例）

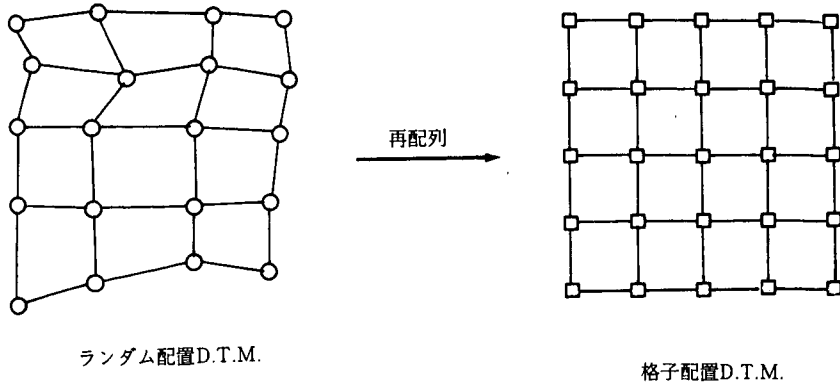


図 5.24 ランダム点から格子点の並びかえ

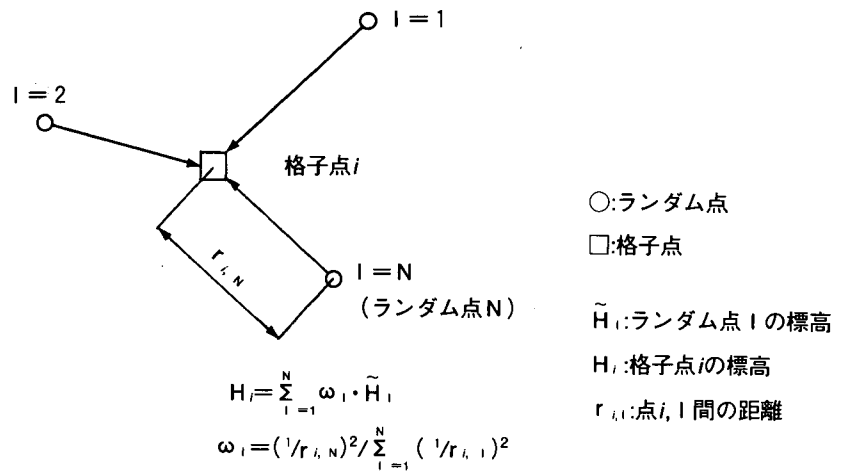


図 5.25 ランダム点標高から格子点標高への内挿アルゴリズム²⁹⁾

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は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は避け得ても大きな誤差を十分除去できなかっ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5.24参照)。

本研究では図5.25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 $(=\sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2})^{1/2}$ 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²⁹⁾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ている。

6. 数値地形モデルの自動作成精度に関する検証

6.1 精度の検証において検討すべき要因の抽出

リニ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要因をまとめると以下になる。

- 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、本研究においては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。)

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

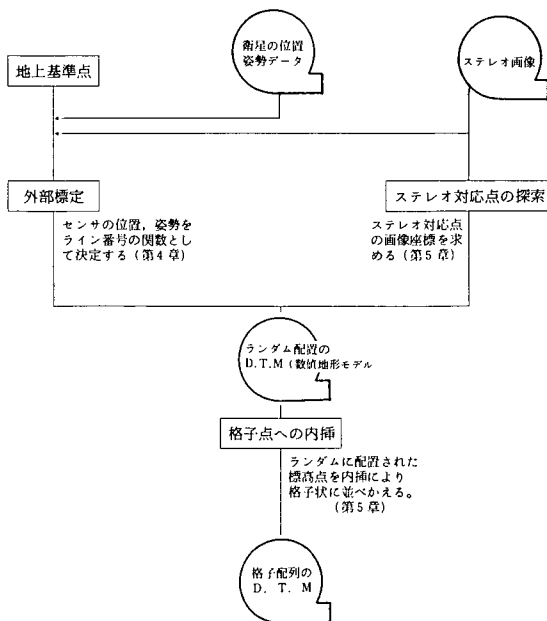


図 6・1 数値地形モデルの自動作成フロー

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 Δr 、 ΔZ)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るが、作業に極めて繁雑となる。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($\Delta \bar{Z}$)を用いて精度検証を行うことにしている。したがって格子点間の標高差($\Delta \bar{Z}$)は、水平位置の誤差(Δr)によって生ずる標高誤差(Δr に地形の傾斜を乗じて得られる)が ΔZ に合成されたものと考えられる。

なお、精度検証のケースは以下のように設定した。

- 1) リニア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を利用した場合のランドサット4, 5号程度(表4-14のケース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つのみの相関窓の利用

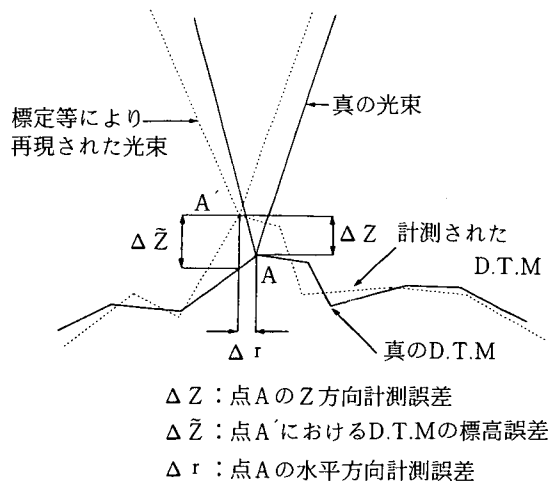


図 6・2 数値地形モデルの精度検証の方法

6.3 検証結果

標定方法及びB/H比による標高精度の変化を示したものが表6・1である。

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

標 定 方 法	B/H比	
	0.5	0.5
地上基準点 =10点	7.5m	7.4m
地上基準点 =25点	7.3m	7.2m

標 定 方 法	B/H比	
	0.5	1.0
地上基準点 =10点	8.5m	8.3m
地上基準点 =25点	8.3m	8.5m

- 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ンドサット4, 5号程度を想定している。
- 2) ステレオ対応点の探索は2種類の相関窓の併用により行っている。
(9×9及び3×3)

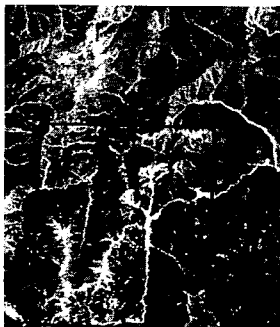


a) 前視画像



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



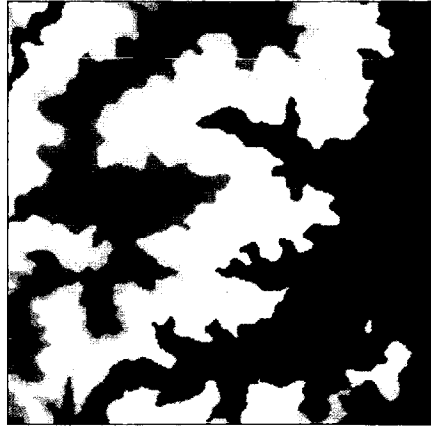
b) 右視画像

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）

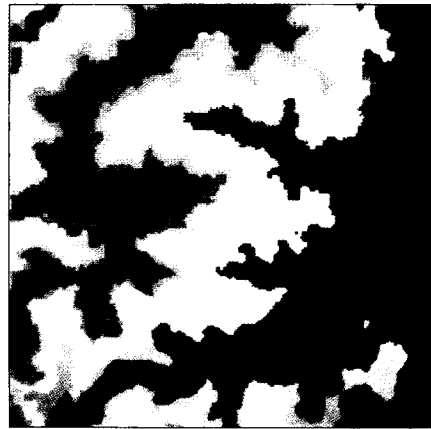
写真6.3 自動作成されたD.T.M.と真のD.T.M.の比較（前後方式）

—— B/H比による比較 ——

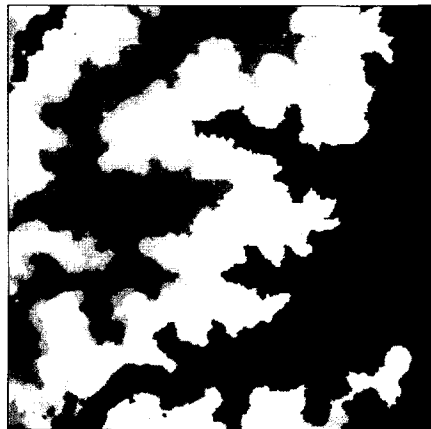
a) 真のD.T.M.



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）

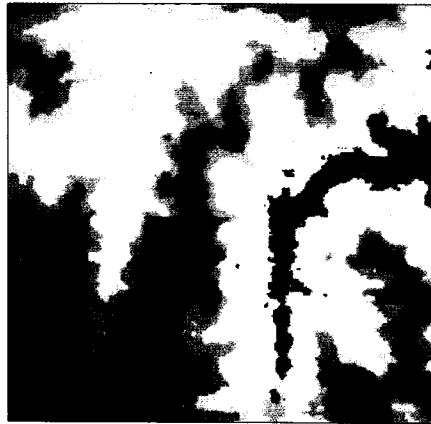
—— B/H比による比較 ——

a) 真のD.T.M.



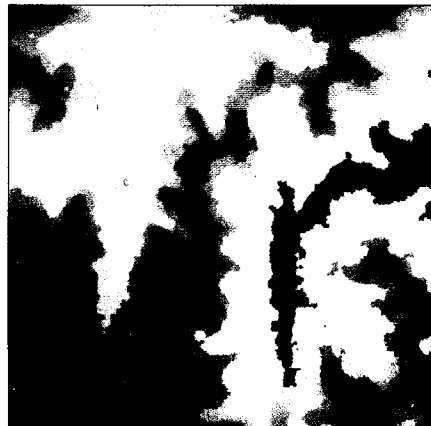
b) 自動作成D.T.M.

$\left\{ \begin{array}{l} B/H=0.5 \\ \text{左右方式} \end{array} \right.$



c) 自動作成D.T.M.

$\left\{ \begin{array}{l} B/H=1.0 \\ \text{左右方式} \end{array} \right.$



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

b) 左右方式(SPOT型)

探 索 方 法 (相関窓の大きさ)	B/H 比	
	0.5	1.0
3×3 } 併用 9×9	8.3 m (65 m)	8.5 m (116 m)
3×3	9.8 m (191 m)	21.2 m (282 m)
9×9 (ピクセル)	12.5 m (71 m)	12.6 m (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。

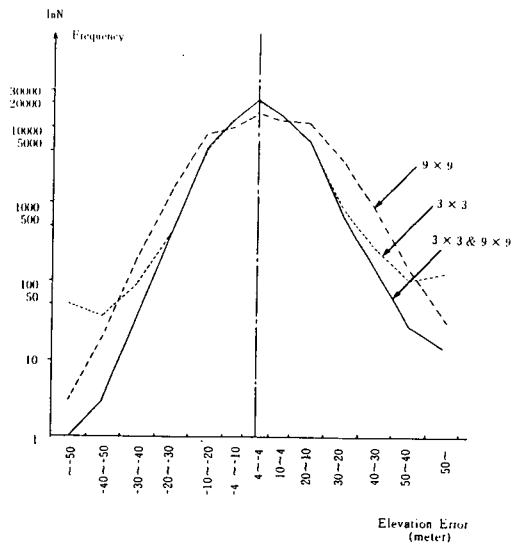
表 6・3 ステレオ探索時間(一点あたり)の比較

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

ステレオ対応点の探索手法及びB/H比による
標高精度の変化をまとめたものが表6・2である。

i) B/H=0.5



ii) B/H=1.0

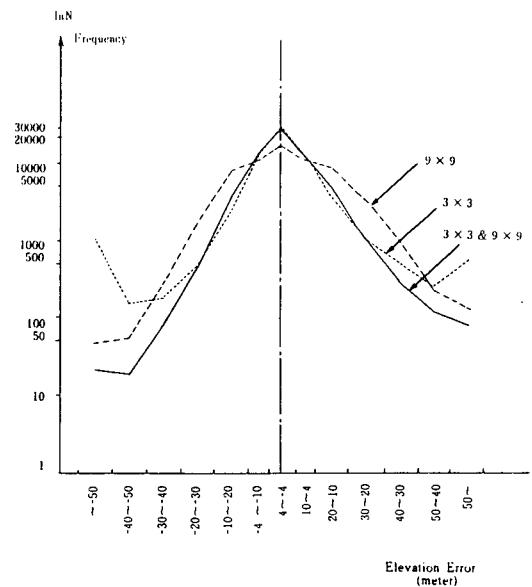


図 6-3 誤差の頻度分布の比較^{注)}

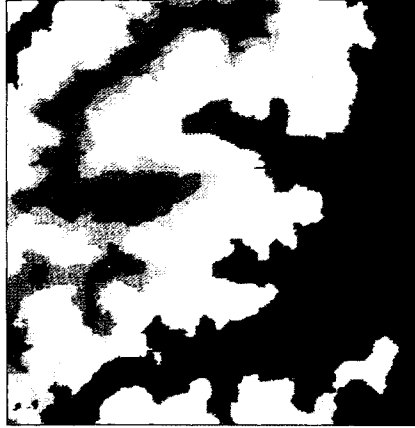
注) 左右方式

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 ——

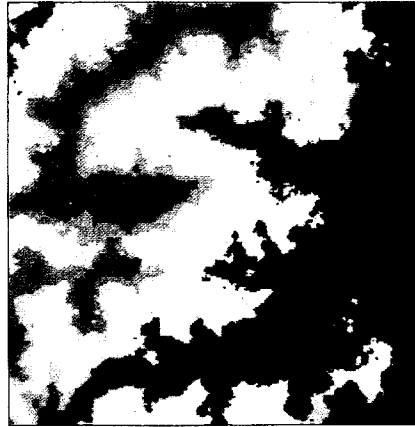
- a) 単一相関窓による
D.T.M.

(窓サイズ=9×9)



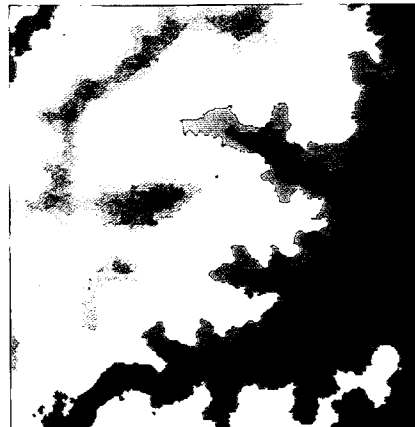
- b) 単一相関窓による
D.T.M.

(窓サイズ=3×3)



- c) 二種類の相関窓
の併用によるD.T.M.

(窓サイズ=3×3
及び
9×9)



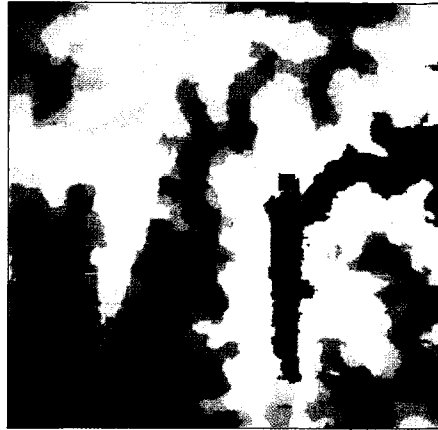
等高線間隔=25m

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=9×9)



b) 単一相関窓による
D.T.M.

(窓サイズ=3×3)



c) 二種類の相関窓の
併用によるD.T.M.

(窓サイズ=3×3
及び
9×9)



等高線間隔=25m

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(表6.1参照)

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って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(表6.2, 図6.3参照)

ステレオ対応点の探索において2種類の相関窓の併用は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^{迷走}することを防止することができる。

注) 一箇所で生じた探索誤差が周辺の点の探索にも悪影響を与え、全体として雪崩的に誤差が広がる状況

3) B/H 比による標高精度の変化について(表6.1参照)

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ないという条件の下で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(表6.2参照)、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を示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低くなることが予想される。

4) その他(表6.1参照)

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7.2m~8.3mである。したがってその3倍程度、すなわち約25m間隔の等高線の描画が可能であると判断される。

7 結論及び今後の課題

本研究は、衛星リモートセンシング技術の進歩によって宇宙から地形図を作成できる可能性が生じたこと、及び開発途上国を中心として地形図、各種主題図といった国土情報の収集・更新に対するニーズが高まってきていること、の2点を背景として始められたものである。そして、代表的な画像センサとしてCCDによるリニアアレイセンサを選び、そのステレオ画像から地形の三次元測定を行うために必要な手法を開発することを主たる研究の目的として設定した。研究の結果、地形の三次元測定に必要な一連の手法が得られ、また、シミュレーション画像を用いて三次元測定精度の検証が行われた。

本研究の結論をまとめると以下のとおりである。

1) リニア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) リニアアレイセンサ画像の外部標定手法

リニア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った。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ー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なった。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得ることが

示された。

リニア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

リニアアレイセンサ画像を擬似共投直線 (Quasi-Epipolar line) にそっ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) ランドサットMSS画像等から作成した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。この結果、地形の3次元測定精度等に関して以下のような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10m×10mのリニアアレイセンサによる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と考えられる。8m程度の標高誤差があれば約25m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7.3~8.3m, 1.0の場合に約7.2~8.4m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)を表わしていることから、水平方向の誤差を一定のもとでB/H比を2倍にす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比を大きくしたことによる有利さが相殺された結果である。

(3) このようにリニアアレイセンサ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っても変化すると

考えられるが、それら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。

なお、今後の課題としては以下のものがあげられる。

1) リニアアレイセンサの外部標定手法の適用範囲の拡大

本研究で得られた外部標定手法は衛星の位置、姿勢の時間変化が安定的であることに着目したものであるため、位置、姿勢の安定性に乏しい航空機をリニアアレイセンサのプラットフォームとした場合に本手法をそのまま適用しようとする、画像を短く区切ってそれぞれに標定をほどこす必要があるなどの問題が生ずる。そのため、外部標定手法を航空機の場合にも適用できるよう、センサの数や搭載方式等の検討も含めて、外部標定手法の適用範囲の拡大を図る必要がある。

2) ステレオ対応点の自動探索手法の精度及び信頼性の向上

本研究で得られたステレオ対応点の自動探索アルゴリズムは比較的良好な探索精度を与えているが、センサ雑音等のないシミュレーション画像上での結果であることを考えると、実際のCCDステレオ画像を用いて検証を行う必要がある。また、精度や信頼性の面でも向上の余地があると考えられ、今後の課題である。

参考文献

第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. X VII.
- (3) Chevreil, M., Courtois, M., Weill, G.: The SPOT Satellite Remote Sensing Mission, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, vol. 47, No.8, 1981, pp. 1163—1171
- (4) Riverean, 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, 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.1437-1441
- (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, Camberra, 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. $N/2$ 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. $N/2$, pp.172-179
- (14) Ackerman, F. : Use and Benefits of X, Y, ΔZ , Auxiliary Data for Aerial Triangulation—Results of the Test Mission "Bodensee", 1982, Discussion Paper for J.S.P.R.S.
- (15) Francois, I.R., Corein, 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.13-1178
- (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 : 累積傾度曲線を用いた 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
- (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, pp.10-16
- (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 Engineering & Remote Sensing, 1975. pp. 993-1002
- (26) Helava, U.V., Chapelle, W.E., : Epipolar-Scan 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を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 : STEREO-SAT, 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.1585-1591
- (4) Chevreil, 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 SSS 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, pp. 161-191, 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—共立出版
- (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の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, pp.798-810, 1972
- (3) Welch, R., Marko, W. : Cartographic Potential of a Spacecraft Line Array Camera System : STEREO-SAT, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing vol.47, No.8, 1981, pp.1173-1185
- (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 (ChapXV II)
- (6) 日本写真測量学会編 : 解析写真測量, 昭和58年

第4章 参考文献

- (1) Welch, R., Marko, W. : Cartographic Potential of a Spacecraft Line Array Sensor Camera System : STEREO-SAT, 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) 画像の処理と解析: 日本リモートセンシング研究会編, 共立出版
- (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, Con. 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の考察, 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: 画像相関を使った空中写真からの等高線自動図化の一方——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, pp.533-534
- (24) Horn, B.K.P. : Non Correlation Methods for Stereo Matching, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol.49, No.4, 1983, pp.535-536

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

土 木 研 究 所 報 告
第171号 1987年2月
柴 崎 亮 介

近年のセンサ技術の進歩により衛星に搭載したCCDリニアアレイセンサを用いて地上解像力が10～20mのステレオ画像が得られるようになってきている。これらを用いて5万分の1～10万分の1の地形図に対応した精度で地形の三次元計測が可能と言われている。しかしながら、リニアアレイセンサによるステレオ画像を用いた三次元計測手法は検討されていなかった。

本研究は(1)地上基準点と衛星の位置、三軸姿勢の計測値を併用して撮影時のセンサの位置、姿勢の時間変化を時間の多項式として解析的に求める方法と、(2)ステレオ画像でステレオ対応点を面積相関により自動探索する方法を開発し、リニアアレイセンサによるステレオ画像を用いた地形の三次元測定を可能にした。そして、シミュレーション画像を用いて三次元測定の精度を検証し、地上解像力が10mのステレオ画像から7～8mの標高精度(平均二乗誤差)が得られることを示した。これは約25m間隔の等高線が描画できることを意味している。

キーワード：CCDセンサ、リニアアレイセンサ、ステレオ画像、三次元測定、衛星リモートセンシング、外部標定、面積相関、ステレオマッチング、数値地形モデル、コンピューターシミュレーション

Report of the Public Works Research Institute, Ministry of Construction

A Study on Automatic Generation of Digital Terrain Model

Vol. 171 February 1987

Using Stereo Linear Array Sensor Data

Dr. Ryosuke Shibasaki

In recent years, CCD linear array sensor enables us to obtain stereo image with 10m ground resolution from space. It is said that using these stereo images, three dimensional terrain measurement whose accuracy corresponds to 1:50,000–1:100,000 scale map is possible. However, it has not been investigated how to make three dimensional measurement using stereo linear array sensor data.

This study proposes following methods of three dimensional measurement using stereo linear array sensor data.

(i) Method of estimating the change of sensor position and attitude analytically using both ground control points and satellite position and attitude data measured with on-board sensors (exterior orientation method for linear array sensor).

(ii) Method of measuring image coordinates of stereo conjugate points automatically by applying image correlation technique (stereo matching for linear array sensor data).

The author obtain digital terrain model whose height error is about 7–8m (root mean square error) by applying the methods proposed here to simulated stereo image data with 10m ground resolution. 7–8m error of height enables to draw contour line with 25m interval.

Key Words : CCD sensor, linear array sensor, stereo image, three dimensional measurement, satellite remote sensing, exterior orientation, area correlation, stereo matching, digital terrain model, computer simulation

土木研究所報告第171号

昭和62年2月発行

発行 建設省土木研究所

〒305 茨城県筑波郡豊里町大字旭1番地
電話 0298 (64) 2211

印刷所 株式会社 愛 甲 社

東京都新宿区西落合 1-26-6
電話 03 (952) 4466

本研究報告より転載又は複製する場合は、前もって建設省土木研究所情報資料課に連絡のうえ、許可を得てください。

Report
of
The Public Works Research Institute
Ministry of Construction
Vol. 171 February 1987

CONTENTS

A Study on Automatic Generation of Digital Terrain Model
Using Stereo Linear Array Sensor Data Dr. Ryosuke Shibasaki
