

三次元地形計測を目的としたデジタル
立体画像処理システムの
開発とその応用

森 宣 彦

①

● 三次元地形計測を目的としたデジタル
立体画像処理システムの
開発とその応用

森 宣 彦

目 次

1. 概論	1
1. 1 研究の背景	1
1. 2 研究の目的	7
1. 3 従来の研究とその課題	8
1. 4 本研究の特色	14
2. デジタル立体画像処理システムの開発	16
2. 1 概説	16
2. 2 三次元グラフィックディスプレイの現状	16
2. 3 立体画像表示モジュールの開発	18
2. 4 立体画像表示モジュールを有する立体画像処理システムの開発	23
2. 4. 1 立体画像処理システムのハードウェア構成	23
2. 4. 2 立体画像処理システムのソフトウェア構成	26
2. 4. 3 他システムとの対比	28
2. 5 三次元マウスを用いた三次元位置計測法の開発	32
2. 6 マニュアルによる等高線描画ソフトウェアの開発	35
2. 7 まとめ	38
3. デジタル立体画像処理システムを用いた地形情報自動抽出	39
3. 1 概説	39
3. 2 衛星画像の標定	39
3. 2. 1 衛星画像の外部標定要素抽出法	39
3. 2. 2 南九州SPOT画像の外部標定要素抽出	43
3. 3 ステレオマッチングによる地形情報自動抽出	47
3. 3. 1 地形情報自動抽出法の開発	47
3. 3. 2 立体画像表示モジュールを用いた初期値入力	50
3. 3. 3 ステレオマッチングによるステレオ対応点の自動決定	52
3. 3. 4 立体画像表示モジュールを用いたマッチング結果の検査修正	57
3. 3. 5 DEM抽出と等高線描画	57
3. 4 JERS-1立体画像を用いた地形情報抽出に関する検討	61
3. 4. 1 JERS-1立体画像から地形情報を抽出する場合の問題点	61
3. 4. 2 JERS-1立体画像に含まれる幾何学的歪	64
3. 5 まとめ	85

4. 立体画像のB/H比と抽出可能なリニアメント	86
4.1 概説	86
4.2 LFC宇宙写真からの各種B/H比立体画像の作成	87
4.2.1 LFC宇宙写真の正射写真画像化	87
4.2.2 各種B/H比衛星立体画像の作成	93
4.3 急傾斜地におけるリニアメント抽出実験	101
4.4 SPOT画像からの各種B/H比立体画像の作成	111
4.5 緩傾斜地におけるリニアメント抽出実験	118
4.6 まとめ	124
5. デジタル立体画像処理システムの応用	125
5.1 概説	125
5.2 立体画像処理機能の開発	126
5.2.1 従来のリモートセンシング画像処理システム	126
5.2.2 立体画像処理汎用ソフトウェアの開発	129
5.3 DEMを用いた任意B/H比立体画像の作成	138
5.4 画像と各種情報の重ね合わせ立体表示	141
5.5 立体画像の資源探査への応用	146
5.6 立体画像のルート選定への応用	148
5.7 まとめ	151
6. 結論	152
参考文献	155

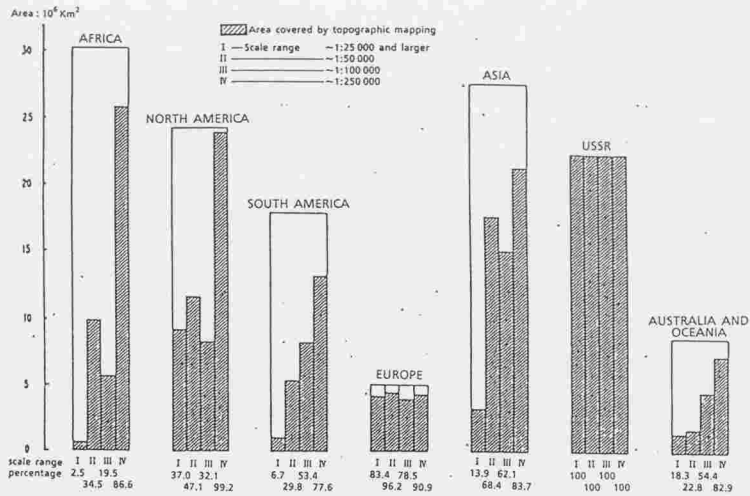
1. 概論

1.1 研究の背景

LANDSAT-1号が1972年に打ち上げられて以来、地球観測衛星から取得される画像の実利用について各方面で活発な研究が行われてきたが、その利用は殆ど平面画像としてであって、三次元の情報を利用するものは少なかった。しかし図1.1に示すように、世界における2.5万分の1および5万分の1の等高線地形図の完成率はそれぞれ平均して33%および57%であり、等高線地形図作成の要請は緊急を要している。

LANDSATの隣接するコースの重複部がわずかに立体視できるのに着目して、高さの計測が試みられたこともあるが⁽¹⁾、基線-高度比(B/H比)が0.1ないし0.26と小さいため、地形図を作成する精度は得られなかった。その後、1983年にESAがスペースシャトルに航測カメラMC(Metric Camera)を搭載し⁽²⁾、さらに1984年に米国が大画面カメラLFC(Large Format Camera)を搭載して⁽³⁾、にわかに宇宙からの地形図作成が注目を浴びるようになった。しかし、カメラを用いたオプティックス方式の場合、空中写真で開発された写真測量の技術がそのまま使える利点があるものの、大量のフィルムを衛星と地上の間で運搬しなければならず、フィルム交換およびフィルム回収の点から広域の地形図作成には不向きであった。

1986年にフランスが打ち上げた衛星、SPOTに搭載されたステレオ機能のCCDカメラは、10mの地上分解能でB/H比最大1.0まで高められるもので、5万分の1の等高線地形図の作成に期待がもたれた。CCDカメラを使用したエレクトロニクス方式の場合、画像情報が電波で送られてくるので大量のデジタル画像取得が可能であるが、これまでにない幾つかの新しい技術を開発しなければならなかった⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾。これまでに打ち上げられた衛星の内、ステレオ機能を有したセンサを搭載した衛星を表1.1に示す。また、エレクトロニクス方式で代表的なSPOTとJERS-1について、立体画像取得法を図1.2と図1.3に示す。



出典：国連、World Cartography Volume XX、1990

図1.1 世界における地形図の作成状況

表1.1 ステレオ機能を有したセンサを搭載した衛星

衛星	センサ	空間分解能	打ち上げ国	打ち上げ年	画像方式
Shuttle	RMK ¹⁾	15m	ESA ²⁾	1983	フィルム カメラ
Shuttle	LFC ³⁾	15m	USA	1984	フィルム カメラ
SPOT	HRV ⁴⁾	10m~20m	France	1986~	デジタル CCD
JERS	OPS ⁵⁾	18m	Japan	1992	デジタル CCD

1) Metric Camera

2) European Space Agency

3) Large Format Camera

4) High Resolution Visible

5) Optical Sensor

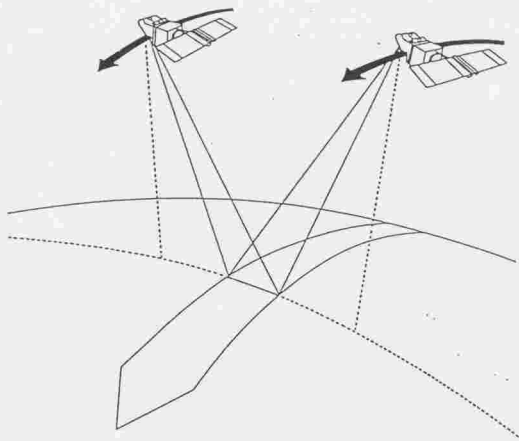


図1.2 SPOT衛星による立体画像の取得法 (横視方式)

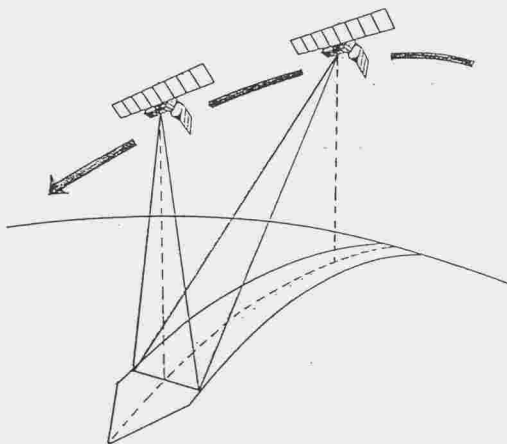


図1.3 JERS-1衛星による立体画像の取得法 (前後視方式)

SPOT画像から地形図を作成するシステムとして、現在実用化されたものがいくつかあるが、主流は従来と同じ解析図化機を用いたものであり、その実用例もいくつか報告されている(7)(8)(9)。しかし解析図化機の入力フィルムまたは印画紙に限られるので、以下の不都合がある。

- 1) デジタル画像をアナログ写真に変換するために高価な装置が必要であり、またこの時新たな歪が発生する。
- 2) 成果品は一般にデジタルな形で出力を要請されるため、デジタル→アナログ→デジタルと余分の工程を費やさなければならない。

従ってデジタル画像からの地形図作成は、デジタル画像をそのまま扱うことができるデジタル方式で行うのが理想的であるが、今の所十分な性能を持った装置は、まだ実用化されていない。また、画像相関などソフトウェアのみに依存するシステムも開発されているが(10)、エラー対策や人間の経験やパターン認識能力の活用にはマン・マシンの機能が不可欠である。

一方我が国では、1992年2月にステレオセンサを搭載した地球資源衛星JERS-1が打ち上げられたが、その初期設計の段階において、B/H比0.3の立体画像が資源探査にどれほど有効なのかを調べる必要があった。本論文の「立体画像のB/H比と抽出可能なリニアメント」の部分は、このような要求から行われたものである。そして、JERS-1等の衛星画像を資源探査で有効に利用するために、以下の機能を持ったシステムを開発することが重要であるということが判明した。

- 1) 任意B/H比の立体画像を作成し、立体表示する機能。
- 2) 任意B/H比立体画像の作成に必要な数値標高モデル(Digital Elevation Model : DEM)を立体画像から手軽に抽出できる機能。

2)については地形図が存在する場合、地形図の等高線から求めることも可能である。アナログの等高線地形図をデジタル画像に変換し、計

算機処理でDEMを抽出するわけだが⁽¹¹⁾⁽¹²⁾⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾、この方法には多くの費用と時間がかかるという問題がある。しかし本論文では、地形図が作成されていない途上国のDEMを作成するという立場から、地形図からのDEM作成には触れないこととする。

立体画像を立体表示するためには三次元ディスプレイが必要であるが、その代表的な方式を図1.4に示す⁽¹⁷⁾。現在これらの方式を用いて画像を立体表示するものが多数実用化されているが、その立体像に対し計算機から直接アクセスできるものはまだ少なく、かつその機能が限られている。立体画像を立体視しながら解析する作業は資源探査等で非常に重要であり、現在このような作業は、通常反射実体鏡等を用いた手作業で行われている。しかしこのような作業を行う機能が立体画像処理システム上で実現されれば、解析作業が飛躍的に発展することが期待できる。カナダのLaval大学では、パーソナルコンピュータのモニターに立体鏡を取り付けて立体視を実現する装置を開発したが、モニターの半分の領域しか利用できないといった欠点が残っている。

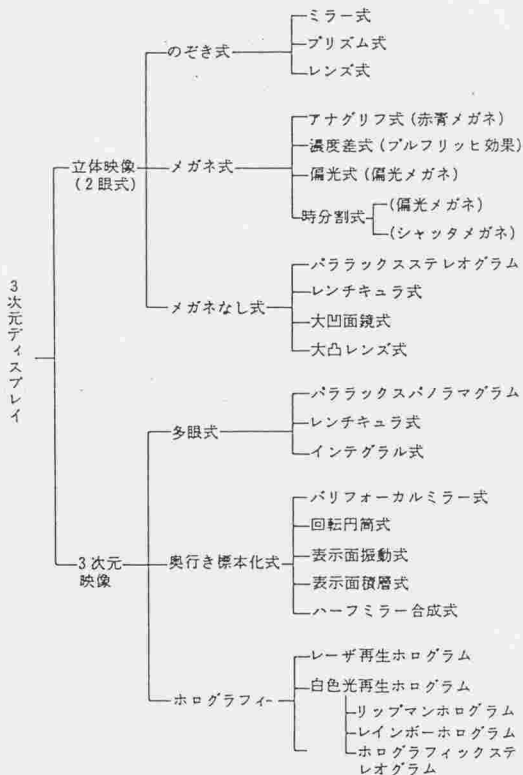


図1.4 各種の3次元ディスプレイ

1.2 研究の目的

本研究の目的は「三次元地形計測機能を持つデジタル立体画像処理システムの開発を行い、その立体画像処理への応用を確認すること」である。さらに詳しくは以下の通りである。

- 1) デジタル立体画像から等高線やDEMを高精度で抽出するデジタルシステムを開発する。
- 2) 上記システムを安価に実現し、かつ取り扱いが容易なものとする。
- 3) 立体画像のB/H比と抽出可能な地形情報に関する検討を行う。
- 4) 三次元ディスプレイに立体画像を表示し、かつ計算機から立体画像に対するアクセスが可能な立体画像処理方式を開発する。
- 5) デジタル立体画像を資源探査等へ有効に利用する技術を開発する。

1.3 従来の研究とその課題

前節で述べた研究の目的を達成するために、下記の技術的課題を解決する必要がある。

- 1) デジタル立体画像を用いた三次元計測システムに関する課題
- 2) 立体画像の利用に関する課題

本節では、これらの課題に関して行われた従来の研究の内、主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。

1.3.1 デジタル立体画像を用いた三次元計測システムに関する課題

現在地形図作成等の三次元計測は、飛行機から撮影した空中写真を用い、解析図化機で行うのが一般的である。しかし、コンピュータを中心としたデジタル機器が急速な発展を遂げ、1986年に人工衛星SPOTが打ち上げられて宇宙から大量のデジタル立体画像が取得されるようになると、デジタル機器による三次元計測の研究開発が大変盛んになった。デジタル機器で三次元計測を行う場合、三次元ディスプレイが大変重要な役割りを果たすので、ここではまず三次元ディスプレイの発展について述べ、次にデジタル三次元計測システムの現状とその課題について述べる。

a. 三次元ディスプレイの発展

大越孝敬氏の「三次元画像工学」⁽¹⁸⁾によると、立体視の試みは、1600年ごろイタリアのGiovanni Battista della Portaによって立体作画で行われたものが最初であると言われている。その後1838年にイギリスのCharles Wheatstone卿が、Wheatstone Stereoscopeと呼ばれる図1.5に示すような立体鏡を王立協会で発表した。これは異なる2方向から撮影した写真(または立体画)を立体視するための装置

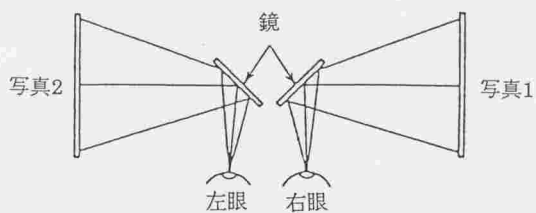


図1.5 Wheatstoneの立体鏡

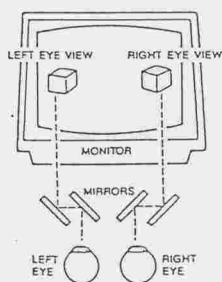


図1.6 スプリットスクリーンと立体鏡による立体視

で、Niepceがはじめて写真像の定着に成功してから16年後であった。その後この装置に改良が加えられ、19世紀末にはのぞきめがね式のparlor stereoscopeとして大衆遊戯場で大普及した。その後、1939年にはニューヨーク万国博で公開された偏光めがね式の立体映画が話題を呼び、500万人以上の人々が観賞した。このように三次元ディスプレイの歴史は古く、いくつかの研究の山があったが、近年において三次元ディスプレイの研究がまたしても大変盛んになってきている。

現在三次元ディスプレイの研究で最も話題を呼んでいるのは、立体テレビやVirtual Realityの分野であるが⁽¹⁹⁾、研究が最も進んでいるのはCADやCAMで使われる三次元グラフィックディスプレイの分野である。この分野ではアナグリフ式や⁽²⁰⁾⁽²¹⁾、立体鏡を用いたのぞき式⁽²²⁾の研究も行われているが、最も盛んで近年長足の進歩を遂げたのは、液晶シャッターメガネや偏光メガネを用いた時分割式である⁽²³⁾⁽²⁴⁾。各種デバイスの進歩により、時分割式で実用的な画質の立体像が得られるようになり、既に製品化されたものもいくつかある。時分割式には、モニターが一台でよいとか、カラー画像が表示できるとか、複数の人が同時に立体像を観察できるといった長所がある。ただモニターにおける表示周波数が60Hzの場合、明るい所でフリッカ(ちらつき)が生じ、目が疲れやすいという欠点があったが、これも表示周波数を120Hzにして解消する技術が開発された。⁽¹⁷⁾⁽²⁵⁾しかしこの場合、モニターが特殊な高価なものとなるので、実用的には今も60Hzのものがよく使われている。

b. デジタル三次元計測システムの現状とその課題

近代写真測量は1850年代にフランスで起源したが、1901年にドイツのブルフリヒが実体写真測定機ステレオコンバータを作った頃から急速に発達し、アナログ図化機を経て現在では解析図化機が全盛

である⁽²⁶⁾。解析図化機は内部でコンピュータを使用しているものの、入力アナログのフィルムまたは印画紙に限られるので、SPOTからデジタル立体画像が大量にもたらされたのと前後して、入力もデジタルで行うデジタル三次元計測システムの研究が大変活発になった。それらの研究の中で最近行われた代表的なもの3つについて次に簡単に説明する。

1) カナダのDVP⁽²⁷⁾

カナダのLaval大学で開発されたもので、図1.6に示すように1台のモニタのスクリーンを2つに分けてスプリットスクリーンとし、そこに立体画像を表示して立体鏡でのぞく方式をとっている。構成は簡単であるがスクリーンの大きさが半分になるとか、同時に一人しか観測できないといった欠点を持っている。立体画像の一方に地図を重ねて表示し、地図の修正を行う機能を持っており、既に製品化されている。

2) ドイツのDigital photogrammetric stereo workstation⁽²⁸⁾

ドイツのHannover大学等で開発されたもので、図1.7に示すように、2台のモニタに立体画像を表示し、立体鏡でのぞく方式をとっている。2台のモニタの配置に高精度が要求され、かつ同時に一人しか観測できないといった欠点がある。立体画像からDEMを抽出し、等高線を描画する機能がある。

3) トプコンのステレオ画像ワークステーション⁽²⁹⁾

日本のトプコンが開発したもので、図1.8に示すように互いに直交する偏光フィルタを装着した2台のモニタが一定の角度を向いて置かれ、その中央にハーフミラーを置いて2台のディスプレイに表示される立体画像を偏光メガネで立体視する。この場合も2台のモニタとハーフミラーの配置に高精度が要求され、また2台のディスプレイを中央から見るという理由で、画像を正確に観測できるのは一

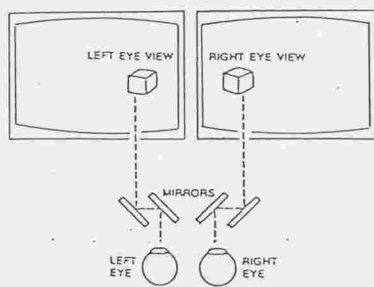


図1.7 2台のモニタと立体鏡による立体視

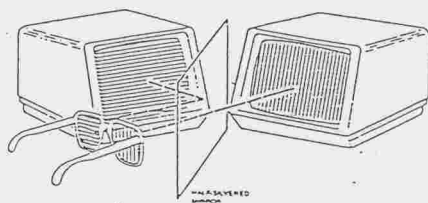


図1.8 2台のモニタと偏光メガネによる立体視

人だけという制約がある。立体画像からDEMや等高線を抽出する機能がある。

このようにデジタル立体画像からDEMを抽出したり、地図を修正したりするシステムが既にいくつか開発され、中には製品化されたものもあるが、まだ、システムが大きくて高価であるとか、スクリーンを分割して使用しているため表示画像が小さいとか、同時に一人でしか観察できないといった問題点が残っており、さらに使い易く安価なシステムの出現が待たれている。

1.3.2 立体画像の利用に関する課題

1972年にLANDSAT-1号が打ち上げられ、衛星から観測したリモートセンシング画像データが大量に地上にもたらされるようになると、これらの画像から有用な情報を抽出する研究と、そのための画像処理システムの開発が急速に発展した⁽³⁰⁾⁽³¹⁾⁽³²⁾⁽³³⁾。リモートセンシング画像データを利用する研究は非常に広い分野にわたって行われたが、その中の2つについて以下に簡単に述べる。

1) リニアメント抽出⁽³⁴⁾⁽³⁵⁾⁽³⁶⁾⁽³⁷⁾

地下資源探査や原子力発電所立地選定等で非常に重要な役割りを果たす断層を探すために、リモートセンシング画像からリニアメントを抽出する研究が行われた。

2) ルート選定⁽³⁸⁾

電力伝送のための高圧線や道路等のルートを、リモートセンシング画像を用いて選定する研究が行われた。

これらの解析作業は平面画像を扱う画像処理システム上で行われたが、SPOT, JERS-1等で立体画像が得られるようになれば、明らかに立体画像を用いた方が良く、立体画像が扱えるデジタル画像処理システムの実現が待たれている。

1.4 本研究の特色

本研究の特色は以下の2つである。

- 1) 時分割式三次元ディスプレイを用いたデジタル三次元計測システムの開発。

従来デジタル三次元計測システムでは、三次元ディスプレイとしてモニタを2台使う方法や、1台のモニタを半分に分割する方法によるのぞき式等が用いられていたが、ここでは最近著しい発達を遂げた液晶シャッターメガネを用いた時分割式を試みた。この方式の採用により次の効果が期待できる。

- (i) システム構成がシンプルになり、配置で高精度を要求される所がなくなる。
- (ii) 三次元グラフィックスで開発された三次元グラフィックドライバを利用し、グラフィック画面を立体画像に対するマンマシンインターフェースとして活用することが容易にできる。
- (iii) 安価で性能の高いデジタル三次元計測システムを実現することができる。
- (iv) 立体像を同時に複数の人で観測することができる。

- 2) デジタル立体画像をリアルタイムで処理解析する機能の実現。

平面画像を対象とした画像処理システムは多数製品化されているが、立体画像を対象としたものはまだ殆どなく、その機能も限られている。立体画像を用いた解析は現在実体鏡を用いた手作業で行うのが一般的であるが、ここでは上記デジタル三次元計測システムの上に立体画像処理機能を開発することを試みた。この機能の実現により、次の効果が期待できる。

- (i) デジタル三次元計測システムで作成されたDEMを用いて、任意B/H比の立体画像が作れる。
- (ii) 拡大・縮小・強調等の処理がリアルタイムでできるので、試行錯誤を行いながら望みの画像に仕上げることができる。
- (iii) 解析結果を立体画像上に書き込み、複数の人で検討することができる。
- (iv) コンピュータを用いて解析作業の自動化を行うことが容易にできる。

2. デジタル立体画像処理システムの開発 (39)

2.1 概説

等高線地形図の作成に利用できるデジタル立体画像として、現在SPOT衛星から得られる立体画像があるが、このSPOT立体画像からの等高線抽出には一般に解析図化機が用いられている。しかし解析図化機の入力はフィルムまたはプリントにした写真に限られるので、デジタル画像を一度フィルムに焼かねばならず、高価な装置と手間暇がかかり、さらに新たな歪が加わるという問題が起こる。そこで、デジタル立体画像をそのまま用いることができるデジタル図化機の研究開発が近年盛んになってきているが、現在発表されているシステムには、まだ価格が高いか、精度が悪いといった問題がある。本研究では安価なデジタル立体画像処理システムの上に、高精度なデジタル図化機能を開発することを試みたが、三次元ディスプレイとしては、最近急速な発展を遂げた液晶シャッタメガネによる時分割式を用いた。

2.2 三次元グラフィックディスプレイの現状

近年CAD等の分野で三次元グラフィックディスプレイを用いた、立体図形処理の研究が盛んであるが、これは、液晶シャッタメガネや偏光メガネを用いて、実用に耐える画質の立体図形が安価な機器で得られるようになったためと思われる。液晶シャッタの構成の一例を図2.1に示す。(19) 液晶シャッタはTN形液晶素子を2枚の偏光板ではさんで構成されるが、図のように偏光板の偏光角を90度ずらしておく、液晶素子に電圧を加えないと、入射光はちょうど90度だけ偏光軸がねじれて出力されるので“シャッタ開”の状態となり、液晶素子に数百Hzの交流電圧を加えると、90度のねじれが生ぜず、“シャッタ閉”の状態となる。このような構成から、光の透過率は最大でも40%近くになってしまうが、左右の画像を

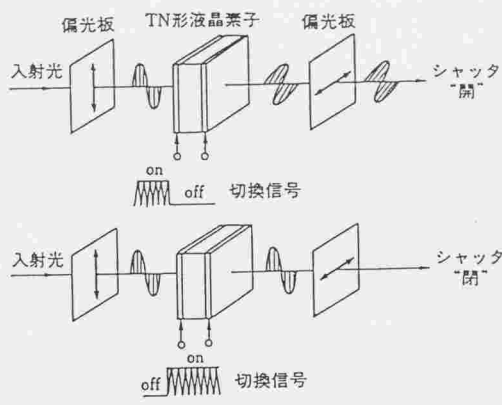


図 2.1 液晶シャッターの構成の一例

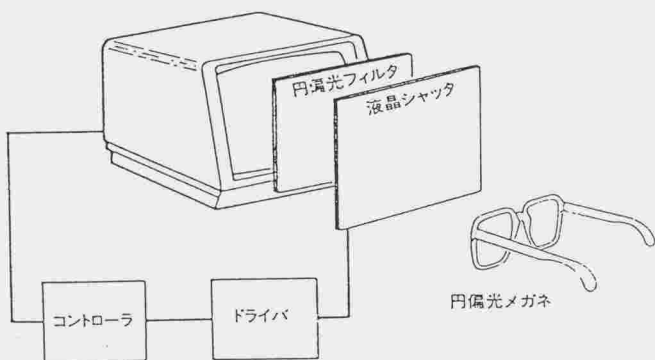


図 2.2 円偏光メガネを用いた三次元グラフィックディスプレイ

それぞれ30Hzで表示する場合は、フリッカを減少させるため、通常光透過率を3~4%におさえている。しかし左右画像の表示周波数をそれぞれ60Hzにすると、フリッカが生じないので、光透過率を35%程度まで高めることができる。(17) 60Hzの場合はディスプレイの後方に明るい窓があっても平気であるが、30Hzの場合は後方を暗くし、暗い画面を見やすくする工夫が必要である。

液晶シャッターメガネを用いた方式の場合は、ディスプレイにおける表示と液晶シャッターメガネの開閉を同期させるため、メガネにコードを接続するか、同期信号を赤外線で送信する装置を装備する必要があるが、偏光メガネを用いた方式の場合はこのようなことが不要であり、自由に動き回れるという利点がある。図2.2はその一例で、(40) ソニーテクトロニクス社の円偏光メガネを用いた三次元グラフィックディスプレイである。しかしこの方式には、19インチ以上の大型画面の場合、液晶製作が困難であるという問題がある。(41)

2.3 立体画像表示モジュールの開発

立体画像に対するマンマシンインターフェースとして、本研究では新しいタイプの立体画像表示モジュールを開発した。このモジュールは、通常の三次元グラフィックディスプレイのグラフィック画面に立体画像を重ねて表示する構造になっている。図2.3にその原理図を示す。図において、ステレオペアを構成する2枚の画像(左画像と右画像)は2枚のフレームメモリにそれぞれ記憶される。また、これら2枚の画像と重ねて表示される2枚の図形(左図形と右図形)はパーソナルコンピュータ内蔵のビデオメモリ(VRAM)の2面に記憶される。ディスプレイは左画像と左図形を重ねたもの、および右画像と右図形を重ねたものを交互に表示する。液晶シャッターメガネはディスプレイと同期して左右の液晶シャッターを交互に開くので、このメガネを掛けてディスプレイを観測すると、左目には左

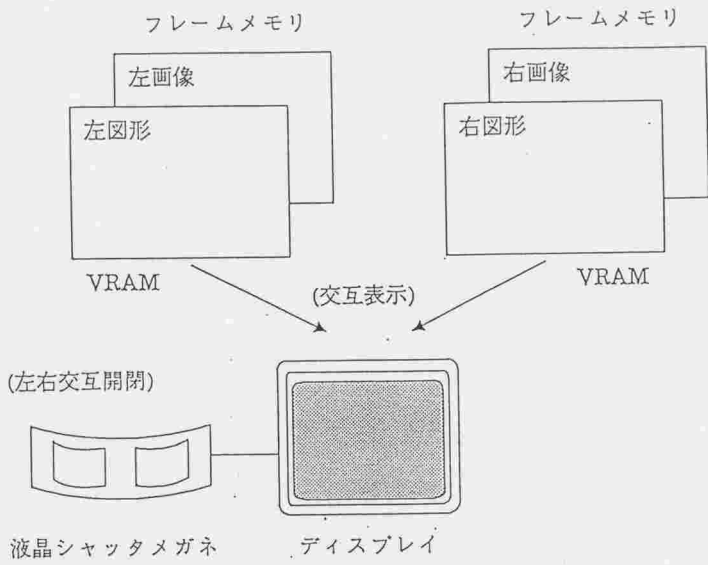


図 2.3 立体画像表示モジュールの原理図

画像のみが、右目には右画像のみが見え、立体画像の立体視が可能となる。

このようにこの立体画像表示モジュールを用いると、VRAM内の立体図形と、フレームメモリ内の立体画像を同時に立体視することができ、VRAM内の立体図形を用いて、立体画像に関する情報の入出力を行うことができる。

図 2.3 で示した原理に基づき、実際にハードウェアを構成したのが図 2.4 である。図 2.4 において、一对の立体画像を記憶するフレームメモリは、パーソナルコンピュータ(PC)の拡張スロットに実装される2枚の拡張ボードであり、PCのI/Oポートを介して制御される。このフレームメモリには、外部から入力される図形と、内部に記憶した画像を重ね合せて出力する機能がある。一对の立体図形はPC内蔵のVRAM(Video Random Access Memory)の2面に記憶されるが、その選択はGDC(Graphic Display Controller)の制御により、バンク切り換えで行われる。

液晶シャッターメガネの制御は、拡張スロットに実装される液晶シャッターメガネコントロールボードにより行われる。これら全体の機器の制御は、PCのプログラムメモリに記憶されたデバイスドライバが行うが、その手順を以下に示す。

- (i) GDCからディスプレイに送られる垂直同期信号で、デバイスドライバに60Hzの周期で割り込みがかけられ、デバイスドライバが起動される。
- (ii) デバイスドライバからGDCに「VRAM選択」信号が送られる。GDCではこの信号に従って右又は左の図形をバンク切り換えで選択し、その図形信号を2枚のフレームメモリに送る。
- (iii) デバイスドライバから2枚のフレームメモリに「フレームメモリ選択」信号が送られる。フレームメモリではこの信号に従って右又

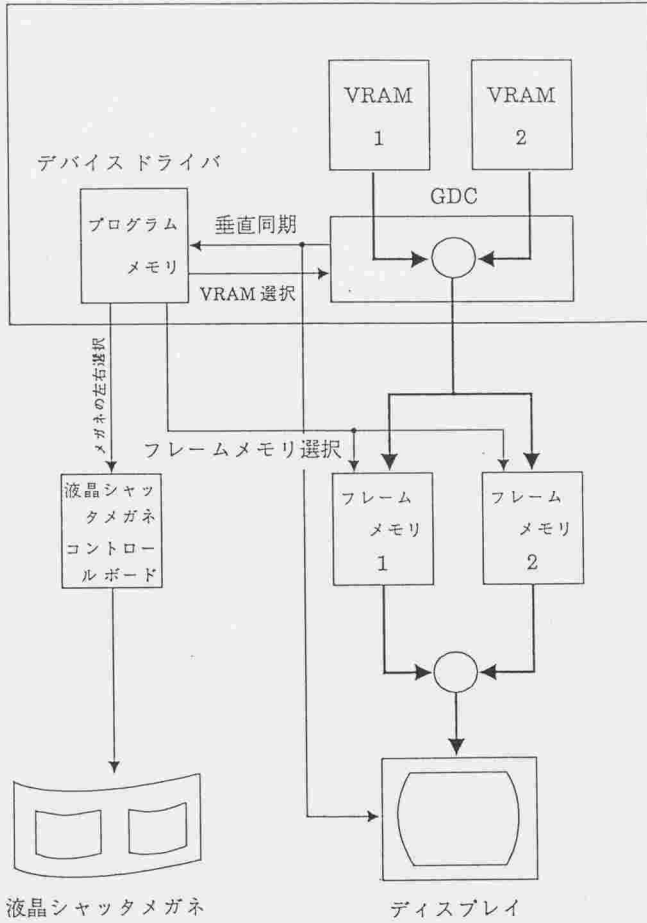


図 2.4 立体画像表示モジュールのハードウェア構成

は左の画像を選択し、上記図形信号と重ね合せた画像信号をディスプレイに送る。

- (iv) デバイスドライバから液晶シャッタメガネコントロールボードに「メガネの左右選択」信号が送られる。液晶シャッタメガネコントロールボードではこの信号に従って、右目又は左目用の液晶シャッタを開けるための一連の信号を発生する。

以上でここで開発した立体画像表示モジュールについて詳しく説明したが、立体図形として三次元マウス(マウスの動きとボタン操作で、メスマーク等のマークを立体的に移動させることができるマウス)で移動するメスマークを用いると、立体視した画像上の任意の点の三次元座標を計算機に入力することができ、またこれらの点から作成したワイヤフレームモデル等の立体図形を、立体画像と重ね合せて出力することができる。この方式では1台のディスプレイに2枚の画像を時分割で交互に表示するので、2台のディスプレイに同時に表示し、それぞれ逆の偏光をかけてハーフミラーで合成する場合のように、経年変化等で周辺で2枚の画像に縦視差が生じるとか、装置が大きく高価になるといったことがなく、安価でコンパクトな機器で構成することができる。また市販の大画面ディスプレイに写し出すことも容易にできる。

2.4 立体画像表示モジュールを有する立体画像処理システムの開発

2.4.1 立体画像処理システムのハードウェア構成

前節で述べた立体画像表示モジュールを用いて、三次元地形計測を目的としたデジタル立体画像処理システムを開発したが、その外観を写真 2.1 に、ハードウェア構成を図 2.5 に示す。また図中の各構成機器について以下に詳しく説明する。ディスプレイについては、フリッカをなくすためには 120Hz のものが良いが、120Hz にするとディスプレイが特殊で数百万円程高価なものとなり、安価なシステムとするという目的に合わないこと、室内でディスプレイの後方を暗くして使用すると、60Hz でもフリッカがあまり気にならないこと等の理由で、ここでは 60Hz のものを用いた。

1) パーソナルコンピュータ

32ビットパーソナルコンピュータ・PC-9801DA2を用いた。また拡張装置として、数値データプロセッサと6メガバイトの増設RAMボードを取り付けた。全体のコントロール及び各種演算処理を行う。

2) ディスプレイ

15インチカラーディスプレイ・PC-KD881を用いた。立体像の表示には別途大型ディスプレイを設置した方が効果的であるが、本研究では21インチカラーディスプレイ・PC-TV901を並用した。画面表示周波数が60Hzであるので、市販の大型ディスプレイをそのまま用いることが可能である。

3) フロッピーディスクドライブ

パーソナルコンピュータに標準装備されている2台の5インチフロッピーディスクドライブを用いた。プログラムやデータの出入力用として用いる。



写真2.1 立体画像処理システムの外観

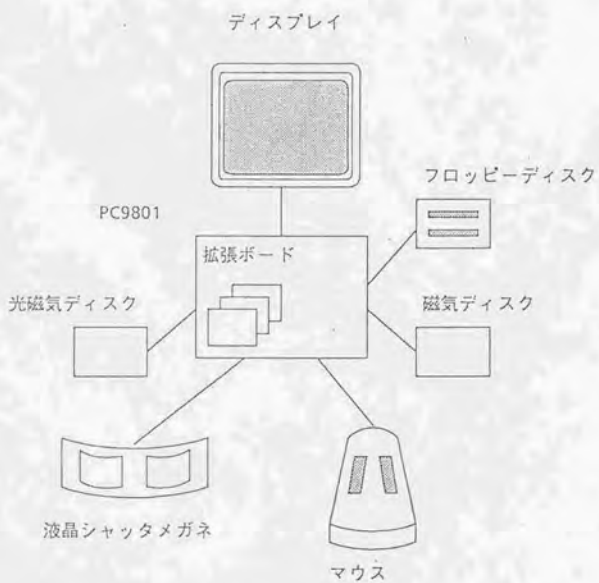


図2.5 立体画像処理システムのハードウェア構成

4) 磁気ディスクドライブ

132メガバイト磁気ディスクドライブ・DD130を用いた。パーソナルコンピュータ内蔵の固定ディスクとして、プログラムや画像の一時記憶に用いる。

5) 光磁気ディスクドライブ

書き換え可能な594メガバイト光磁気ディスクドライブ・RMO-S550を用いた。媒体の交換が可能なので、衛星画像データ等の大容量データの記憶に用いる。

6) マウス

立体像の上で位置を指定したり、図形を描いたりする時に用いる。

7) 液晶シャッターメガネ

ディスプレイに交互表示される立体画像を立体視するために必要なメガネであり、メガネに取りつけられた左右の液晶シャッターが表示と同期して交互に開く。4個まで接続可能であり、4人まで同時に立体像を観察できる。

8) 拡張ボード

1枚の液晶シャッターメガネコントローラと2枚の画像用フレームメモリを用いた。液晶シャッターメガネコントローラは特別に開発したものである。画像用フレームメモリとしてはサビエンス社のスーパーフレーム2を用いた。1枚の容量は768Kバイトであり、400×640画素のフルカラー画像1枚を記憶することができる。2枚のフレームメモリに立体視に必要な2枚の画像をそれぞれ記憶する。

2.4.2 立体画像処理システムのソフトウェア構成

立体画像処理システムのソフトウェアは、PC9800シリーズで最も良く用いられているOS(Operating System)であるMS-DOSの上で開発した。MS-DOSのバージョンは3.3である。バージョン3.3からグラフィックスドライバ(Graph.sys)やライブラリ(Graph.lib)が提供されたため、PC(Personal Computer)上でグラフィックス機能を利用することが大変容易になった。PCにおいて、ディスプレイ上での文字、図形表示を制御するのはGDCと呼ばれるLSIであるが、GDCには下記機能がある。(42)

1) 同期信号発生機能

常に同期信号を発生し、モニタ・テレビに供給すると共に、表示/描画のタイミング制御をする。

2) 文字表示制御機能

常に表示アドレス演算をし、算出したアドレスを映像メモリに供給して、表示データを読み出す。

3) 大容量メモリ制御機能

コマンド/パラメータを基にして描画アドレス計算を行う。

4) 高速グラフィック描画機能

算出したアドレスを映像メモリに供給し、データの修正変更を行う。

GDCのこのような機能を利用し、一般ユーザーが容易にグラフィックス機能を使えるようにしたのがグラフィックドライバーやライブラリーである。(43)

三次元地形計測を行うためには、立体像の上で三次元的に移動するメスマーク(浮標)が必要であるが、本システムではPCのグラフィックス機能を利用してこのようなメスマークを実現した。つまり、下記機能を持つ三次元マウスデバイスドライバを開発した。

- 1) VRAM内の左図形と右図形として、それぞれ1つのカーソルマークを記憶する。これらは同一番号のラインに記憶されるので、立体視すると高さを持った1つのマークとして観察できる。
- 2) マウス上のボタンを押下せずにマウスを平面内で移動すると、VRAM内の2つのカーソルマークがマウスと同じ動作をする。立体視した時は、高さを一定に保ったマークの移動となる。
- 3) マウス上のボタンを押下しながらマウスを上下に動かすと、VRAM内の2つのカーソルマークが、カラム番号の差が拡大または縮小するように動く。立体視した時はマークの高さの変化となる。

このような機能を持つ三次元マウスデバイスドライバを使用することにより、マウスで三次元的に移動するメスマークを、本システム上で実現することが可能となった。

本システムにおける基本ソフトウェアとしては、他に液晶シャッターメガネデバイスドライバがあるが、その動作は既に2.3節で説明した。そして、これらの基本ソフトウェアを用いて各種の応用プログラムをこのシステムの上で開発したが、それらについては次節以降で順次説明する。

2.4.3 他システムとの対比

デジタル立体画像を用いて三次元計測を行うシステムの研究開発が近年盛んになってきているが、その中の代表的なものとしては下記のものがある。

- 1) カナダで開発されたDVP
- 2) ドイツで開発されたDigital photogrammetric stereo workstation
- 3) 日本のトプコンで開発されたステレオ画像ワークステーション

これらについては概論で簡単に説明したが、本研究で開発したシステムとの対比を交え、以下にさらに詳しく説明する。

カナダのLaval大学で開発されたDVPは、その後スイスのLeica社でDigital Photogrammetric Station DVPとして製品化され、約700万円で市販されている。その外観を図2.6に示す。ホストコンピュータはIBMのパーソナルコンピュータであり、ディスプレイを2つに分割して立体画像を表示し、立体鏡で立体視する構成になっている。立体画像の一方に地図を重ね合わせて表示し、地図の修正を行う機能や、X,Y,Z値を計測する機能等がある。ディスプレイが固定で、半分の大きさの画像しか表示できず、かつ同時に一人しか観察できないという制約がある。本研究で開発したシステムとこのシステムを比較すると、本研究で開発したシステムには、市販の大画面ディスプレイを自由に選択して使え、かつ複数の人が同時に観察できるという長所があるが、画面が暗くなるという短所もある。

ドイツ Hannover大学のKonecny教授らが全体システムの概略を作り、Hannoverの写真測量研究所やメーカーが協同で開発したDigital photogrammetric stereo workstationの構成を図2.7に示す。ホストコンピュータにはSun-3を使用しており、バスを介して各種の機器が接



図 2.6 Digital photogrammetric station DVPの外観

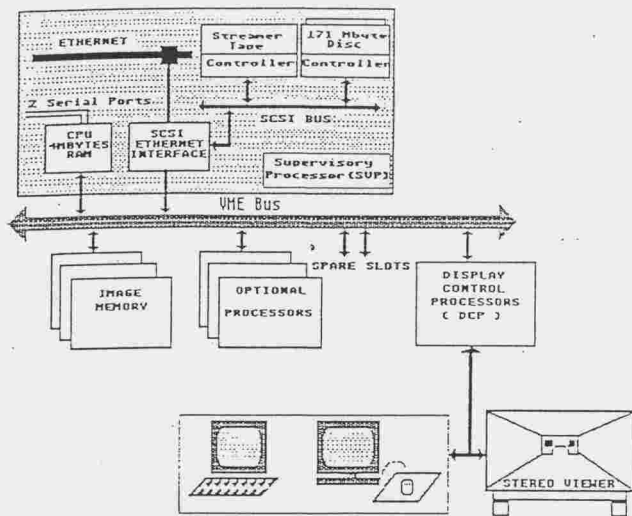


図 2.7 ドイツの Digital photogrammetric stereo workstation

続されている。立体画像を観測するStereo viewerは、2台のモニタに立体画像を表示し、立体鏡でのぞく方式を取っている。立体画像からDEMを抽出し、等高線を描く機能を持っている。このシステムにも立体観測をするディスプレイが固定で、同時に一人しか観察できないという制約があり、またシステム全体が大型で高価なものとなっている。

日本のトプコン社が開発したステレオ画像ワークステーションの外観を図2.8に示す。ホストコンピュータはパーソナルコンピュータであり、図2.9に示す三次元ディスプレイを持っている。このディスプレイは、2台のモニタに表示された立体画像に、互いに直交する偏光フィルタで偏光をかけ、ハーフミラーで合成して、偏光メガネで観察する構成になっている。上記システムと同様に、立体画像からDEMを抽出し、等高線を描く機能を持っている。この三次元ディスプレイには、2台のモニタとハーフミラーの配置に高精度が要求され、しかも経年変化で2台のモニタに表示される画像の位置がずれると2枚の画像に縦視差が生じるという問題点がある。また、2台のモニタを正面から観測しなければならないため、複数の人が同時に立体画像を観察することはできない。

このように従来のシステムに比べ、本研究で開発したシステムには、複数の人が同時に立体画像を観察できるとか、モニタが一台で済むためシステム構成がシンプルで安価であるとか、市販の大画面ディスプレイに大きく立体画像を表示することができるといった数々の特長がある。

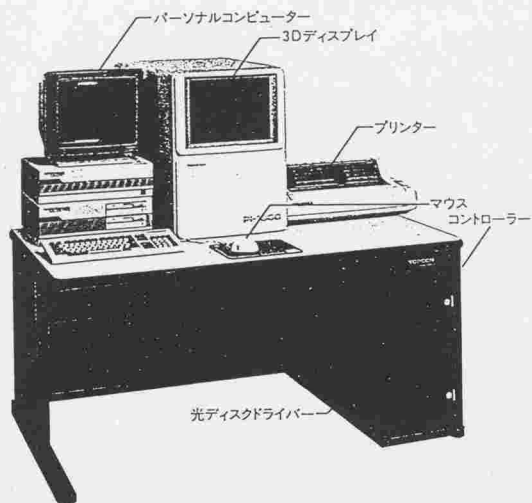


図 2.8 ステレオ画像ワークステーションの外観

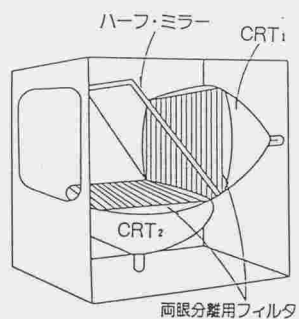


図 2.9 ステレオ画像ワークステーションで用いられている三次元ディスプレイの構造

2.5 三次元マウスを用いた三次元位置計測法の開発⁽⁴⁴⁾

本研究で開発した立体画像処理システムの上に、三次元マウスを用いて立体画像上の任意の点の三次元位置を計測するソフトウェアを開発した。このソフトウェアを用いた三次元位置計測の一例を写真2.2に示す。この写真は、屋久島の立体画像と、三次元空間における位置を指示するメスマークを表示するための一対の十字のマーク(カーソルマーク)を左右別々に重ね合わせ、2枚の重ね合わせ画像を交互に表示したものである。この表示を液晶シャッターメガネを通して観測すると、立体画像とカーソルマークが同時に立体視できる。ここで、立体画像は2枚のフレームメモリに記憶され、一対のカーソルマークは立体図形として、2面のVRAMに記憶されている。そしてVRAM内のカーソルマークの位置は、マウスで自由に移動することができる。一対のカーソルマークの位置は、立体視するために同一ライン上になければならないが、ボタンを押しながらマウスを上下に動かすとその間隔が変わり、ボタンを押さずにマウスを平面内で動かすと、一対のカーソルマークはその間隔を保ちながらマウスの動きに追従する。横方向の間隔は立体視すると高さに相当するので、これだけの機能があれば、カーソルマークの立体像、つまりここではメスマークを三次元空間内で自由に動かすことができる。

立体画像が立体視されるためには、表示した一対の画像に縦視差がないことが必要であるが、この時2枚の画像におけるステレオ対応点は同一ライン上にある。したがって前述のマウスの機能があれば、一対のカーソルマークをステレオ対応点の上に重ね合わせることができる。この動作はとりもなおさず、立体視した画像上でメスマークを計測点に三次元的に合わせることであり、この時計測点の一対の画像における位置は、一対のカーソルマークの位置より簡単に求めることができる。このようにして、立体画像上の任意の点の三次元位置計測が可能であるが、計測点の三次元座標は、これらの位置と別途求められる外部標定要素を用いて計算で求められる。図2.10はその計算法を示したものであり、計測点Pの位

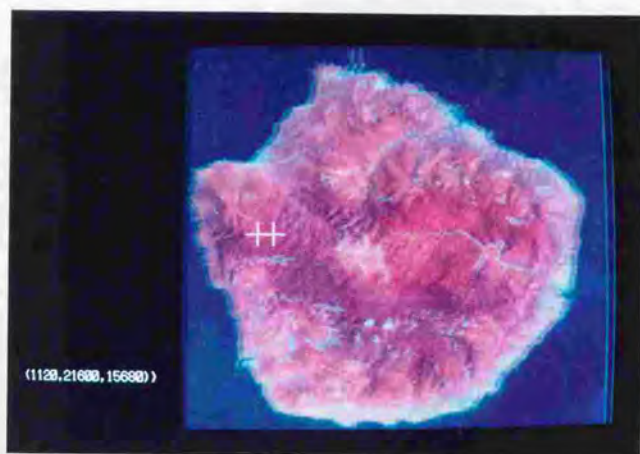


写真 2.2 三次元位置計測の一例

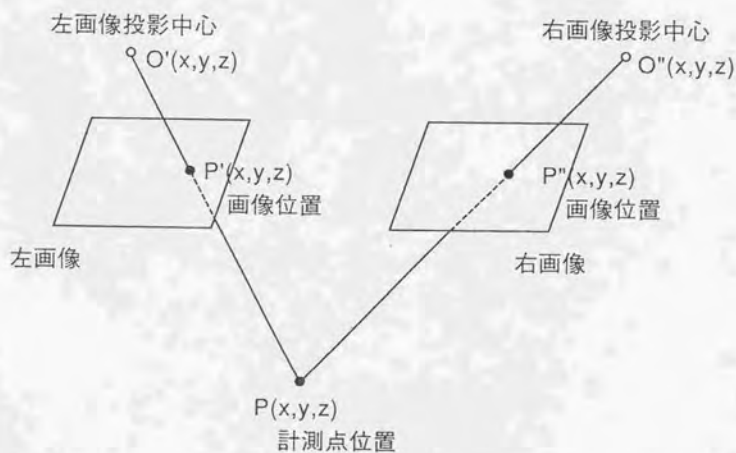


図2.10 立体画像を用いた三次元位置計測法

置は、直線 $O'P'$ と直線 $O''P''$ の交点として求められる。写真2.2の左下の3つの数字は、メスマークで指示された位置の三次元座標 (x,y,z) であり、それぞれ高さ(m),左上角からの横方向の距離(m),縦方向の距離(m)を示している。

このようにこのシステムを用いると、外部標定要素が判っている立体画像上の任意の点の三次元座標を瞬時に求めることができ、二点間の距離等が簡単に計算できる。固定した2台のビデオカメラの場合は、外部標定要素をあらかじめ正確に計測できるので、これらのカメラで撮影した移動物体の位置、大きさ、間隔等はメスマークで指示するだけで、瞬時に計算することができ、今後多方面での利用が期待できる。

2.6 マニュアルによる等高線描画ソフトウェアの開発⁽⁴⁵⁾

前節でメスマークを用いた三次元位置計測法について述べたが、このソフトウェアに若干の機能を追加すると、マニュアルで等高線が描ける等高線描画ソフトウェアを作ることができる。以下にこのようにして開発したソフトウェアの使用法を示す。

- 1) マウス上の右ボタンを押下しながらマウスを前後に動かすとメスマークの高さが変わるので、最初にこのようにしてメスマークの高さをこれから描く等高線の高さに設定する。メスマークの高さは画面左下に表示される。
- 2) 立体画像を立体視しながら、メスマークを山の斜面に接する位置まで移動する。
- 3) “キーボードのSをたたくとメスマークの軌跡を画面に描く”という追加機能を用いて、等高線描画を開始する。
- 4) メスマークを山の斜面に接させながら移動し、等高線を描いてゆく。
- 5) 山の斜面を1回りし、出発点に戻ってくると、等高線が1本引けたことになるので、“キーボードのDをたたくとメスマークの軌跡描画を中止する”という追加機能を用いて、等高線描画を終了する。

写真2.3はこのようにして等高線を1本描いた所であり、写真における2本の線は液晶シャッターメガネを掛けて観測すると、山腹に接した1本の等高線として観測される。このような方法で等高線を描画するためには、解析図化機の場合と同様多少の訓練が必要であるが、解析図化機と比較すると大変安い価格で同等の機能を持つものが得られるということが判った。なお、このシステムで1度に扱える画像の大きさは400×640画素であるので、これより大きな画像を扱う場合は、何回かに分けて行う必要がある。

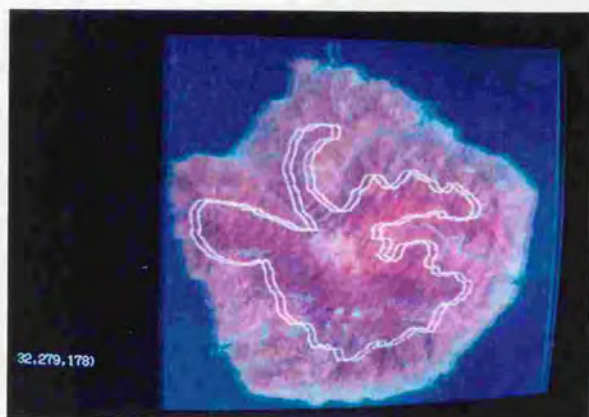


写真 2.3 マニュアルによる等高線描画

2.7 まとめ

SPOT等の人工衛星から得られるデジタル立体画像を用いて、安価に等高線地形図が作成できるように、デジタル立体画像処理システムを開発した。本システムのホスト・コンピュータとしては、全体の価格を低く抑さえるためにパーソナルコンピュータを用いた。三次元ディスプレイとしては、最新技術である、液晶シャッターメガネを用いた時分割方式を用いた。この方式の採用により、システムを非常にコンパクトにまとめることができた。また従来システムと比べて、複数の人が同時に立体像を観察できるとか、市販の大画面ディスプレイがそのまま使えるといった長所も加えることができた。この三次元ディスプレイに立体画像を重ね合わせて表示できる機能を追加し、立体画像表示モジュールを開発したが、このモジュールは立体画像に対する情報の入出力を極めて容易にし、立体画像に対する強力なマンマシンインターフェースとして作用することが判った。

本立体画像処理システム上で三次元位置計測ソフトウェアと、マニュアルによる等高線描画ソフトウェアを開発したが、このシステムを用いると、容易に三次元位置計測やマニュアルによる等高線描画ができることが実証された。

3. デジタル立体画像処理システムを用いた地形情報自動抽出

3.1 概説

立体画像に関するマンマシンインターフェースとして非常に有効な立体画像表示モジュールを有する立体画像処理システムについて前章で説明したが、本章ではこのシステムを用いてデジタル立体画像から地形情報を自動的に抽出する方法について述べる。

立体画像からの等高線抽出は、現在解析図化機等を用いて目視で行われているが、正確な等高線が描けるようになるまでに半年から1年の訓練を必要とし、また一枚の等高線図を描くのにかなりの長い時間を要している。そこで立体画像からの等高線抽出を自動的に行おうとする試みが各所で行われているが、⁽⁶⁾⁽⁴⁶⁾ まだ十分な性能を得るには至っていない。その最大の原因は、ステレオマッチングでステレオ対応点を決定する時、現在の技術では対応点決定の誤りを完全に防ぐことができないというところにある。本研究では、このステレオ対応点自動決定の誤りを立体画像表示モジュールを用いて検出、修正し最終的に得られる結果を高精度にすることを試みた。

3.2 衛星画像の標定

3.2.1 衛星画像の外部標定要素抽出法

カメラで撮影された写真の場合、外部標定要素は定数であるが、リニアアレイセンサ等で衛星の進行と共に1ラインずつ取得された衛星画像の場合、外部標定要素は時間(ライン)の関数となる。このような衛星画像の外部標定要素抽出法として、村井、柴崎、両氏により開発された方法があるので、⁽⁵⁾ 以下にその内容を簡単に説明する。

衛星画像は、衛星の進行と共にリニアアレイセンサ等で1ラインずつ取得されるので、衛星画像における外部標定要素(センサーの位置と姿勢)は時間(又はライン番号L)の関数となる。センサーの位置(\bar{X} , \bar{Y} , \bar{Z})と三軸の傾き(ϕ , κ , ω)を次式で近似する。

$$\begin{aligned}\bar{X}(L) &= X_0 + X_1 \cdot L \\ \bar{Y}(L) &= Y_0 + Y_1 \cdot L \\ \bar{Z}(L) &= Z_0 + Z_1 \cdot L \\ \\ \phi(L) &= \phi_0 + \phi_1 \cdot L + \phi_2 \cdot L^2 + \phi_3 \cdot L^3 \\ \kappa(L) &= \kappa_0 + \kappa_1 \cdot L + \kappa_2 \cdot L^2 + \kappa_3 \cdot L^3 \\ \omega(L) &= \omega_0 + \omega_1 \cdot L + \omega_2 \cdot L^2 + \omega_3 \cdot L^3\end{aligned}\tag{3.1}$$

また地上座標系(X, Y, Z)とセンサー座標系(x', y', z')を図3.1の如く定義すると、両座標系の間には次式が成立する。

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = R \phi \kappa \omega \begin{pmatrix} X - \bar{X} \\ Y - \bar{Y} \\ Z - \bar{Z} \end{pmatrix}$$

$R \phi \kappa \omega =$

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \phi & 0 & -\sin \phi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \phi & 0 & \cos \phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \kappa & \sin \kappa & 0 \\ -\sin \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & \sin \omega \\ 0 & -\sin \omega & \cos \omega \end{pmatrix}$$

ここで (\bar{X} , \bar{Y} , \bar{Z}) : 投影中心 (センサーの位置)

(ϕ , κ , ω) : 三軸の傾き (センサーの姿勢)

a_{ij} : 回転行列の要素

これらの式より、図3.1において、投影中心 \bar{O} 、画像点 P' 、地上の対象物 P が一直線上にあるという共線条件式は次式となる。

$$x = -f \frac{x'}{z'} = -f \frac{a_{11}(X - \bar{X}) + a_{12}(Y - \bar{Y}) + a_{13}(Z - \bar{Z})}{a_{31}(X - \bar{X}) + a_{32}(Y - \bar{Y}) + a_{33}(Z - \bar{Z})}$$

$$y = -f \frac{y'}{z'} = -f \frac{a_{21}(X - \bar{X}) + a_{22}(Y - \bar{Y}) + a_{23}(Z - \bar{Z})}{a_{31}(X - \bar{X}) + a_{32}(Y - \bar{Y}) + a_{33}(Z - \bar{Z})}$$

これらの式に地上基準点における計測値等を代入し、(3.1)式における18個の未知係数を最小二乗法で求めると、その衛星画像の外部標定要素が時間(ライン)の関数として求まる。

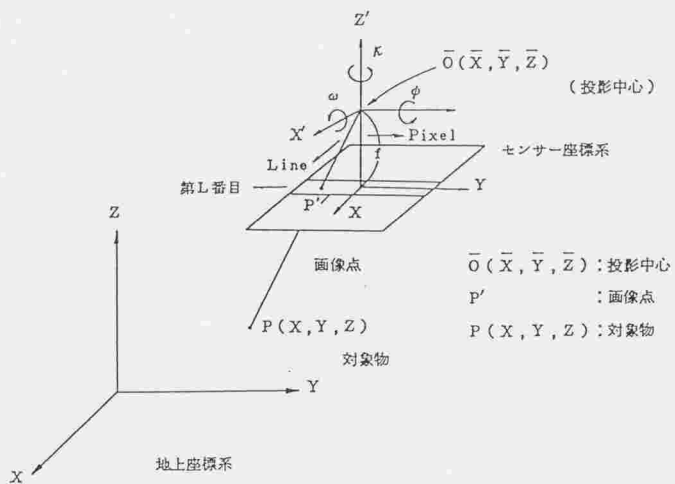


図3.1 地上座標系とセンサ座標系の関係

3.2.2 南九州SPOT画像の外部標定要素抽出

前述の方法を用いて、南九州地域のSPOT画像の外部標定要素抽出実験を行った。実験画像として使用したSPOT画像は写真3.1に示したものであり、その詳細を以下に示す。

観測場所 : 南九州(K/J=315/286)
観測年月日 : 1987年11月25日
オフナディア角 : 2.3度西
空間分解能 : 10m(パンクロマティック画像)
処理レベル : 1A
雲量 : 0000

このSPOT画像の全域を覆うために2万5千分の1の地形図が45図葉必要であった。GCP(Ground Control Point)は各図葉より3点程度、合計117点選定したが、最終的に使用したのは88点であった。図3.2はこれらのGCPの分布図であるが、丸印で示したものは最終的に使用したGCP、三角印で示したものは最終的に使用しなかったGCPである。

図中の大きな四角形の内、幅の狭い方がSPOT画像の領域にほぼ一致する。これらのGCPを用いてこのSPOT画像の外部標定要素を抽出した結果を表3.1に示す。またこの時の画像上における残差を以下に示す。

- ・ ライン方向残差 : 0.82画素(RSME値)
- ・ ピクセル方向残差 : 0.86画素(RSME値)



写真3.1 実験画像として使用した南九州のSPOT画像

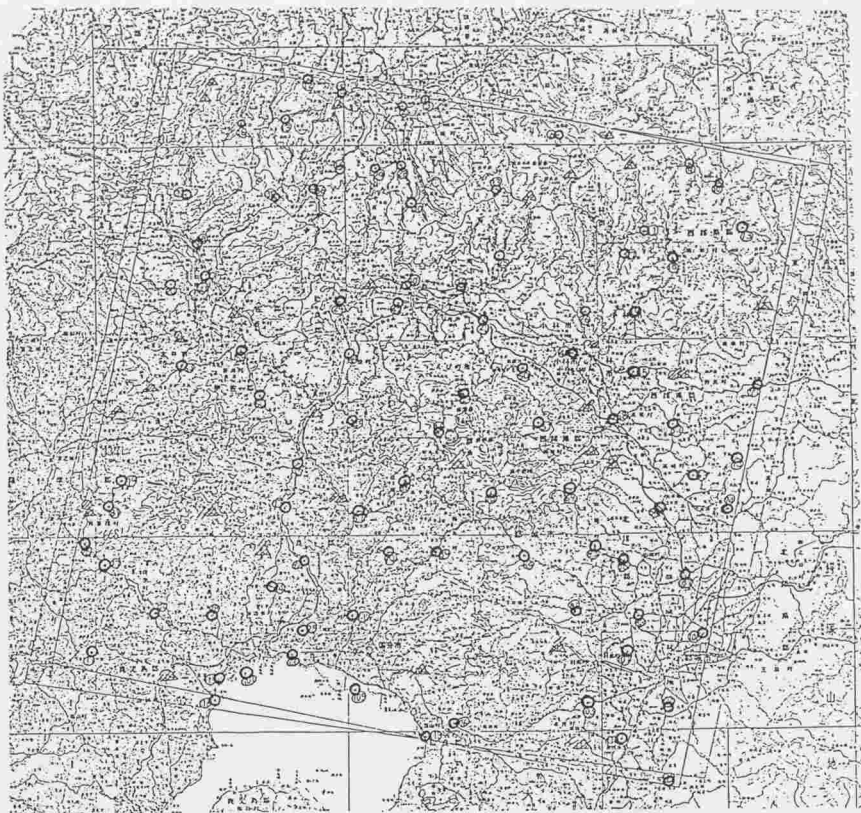


図3.2 SPOT画像の外部標定要素抽出に使用したGCPの分布図

表3.1 SPOT画像の外部標定要素抽出結果

次数 パラメータ	定数項	1次項	2次項	3次項
x (m)	$x_0 = -357 \times 10^4$	$x_1 = 9.74$		
y (m)	$y_0 = 218 \times 10^3$	$y_1 = -2.89$		
z (m)	$z_0 = 827 \times 10^3$	$z_1 = 0.509 \times 10^{-2}$		
(ラジアン) ϕ	$\phi_0 = -0.898 \times 10^{-2}$	$\phi_1 = -0.548 \times 10^{-7}$	$\phi_2 = -0.145 \times 10^{-11}$	$\phi_3 = -0.109 \times 10^{-15}$
(ラジアン) κ	$\kappa_0 = -0.159$	$\kappa_1 = -0.298 \times 10^{-6}$	$\kappa_2 = 0.555 \times 10^{-10}$	$\kappa_3 = -0.437 \times 10^{-14}$
(ラジアン) ω	$\omega_0 = -0.917 \times 10^{-2}$	$\omega_1 = 0.893 \times 10^{-6}$	$\omega_2 = -0.209 \times 10^{-11}$	$\omega_3 = 0.159 \times 10^{-15}$

ただし

- ・ センサーの位置 (x, y, z) はライン番号を L として

$$x = x_0 + x_1 L$$

$$y = y_0 + y_1 L$$

$$z = z_0 + z_1 L$$

- ・ センサーの Y, Z, X 軸回りの回転角度 (ϕ, κ, ω) は

$$\phi = \phi_0 + \phi_1 L + \phi_2 L^2 + \phi_3 L^3$$

$$\kappa = \kappa_0 + \kappa_1 L + \kappa_2 L^2 + \kappa_3 L^3$$

$$\omega = \omega_0 + \omega_1 L + \omega_2 L^2 + \omega_3 L^3$$

- ・ XY 座標は UTM 座標系第 52 ゾーン ($E 126^\circ \sim 132^\circ$) の値。

また X, Y 軸の正の方向はそれぞれ南方向, 東方向である。

3.3 ステレオマッチングによる地形情報自動抽出⁽⁴⁷⁾⁽⁴⁸⁾

3.3.1 地形情報自動抽出法の開発

本研究で開発したデジタル立体画像処理システムを用いて、地形情報を自動的に抽出する方法を開発したが、その流れ図を図3.3に示す。また、図中の各項目を以下に簡単に説明する。

- (1) 基準点の画像座標を求めるために、ステレオペアを立体視する。
- (2) 立体像の上でメスマークで基準点を指示することにより、2枚の画像における基準点座標を同時に求める。1枚ずつ別々に基準点座標を求めるより、このように立体視した方が座標値が正確に求まる。
- (3) 基準点の画像座標と別途求めた地上位置を用いて両画像の標定を行う。衛星画像の場合、外部標定要素は時間の関数となる。
- (4) ステレオマッチングを行うために、ステレオペアを再度立体視する。
- (5) ステレオマッチングを行う領域の四隅や、内部の要点をメスマークで指示する。次のステレオマッチングでは、このような点を拘束条件として用いるので、このような点が多ければ多い程ステレオマッチングの精度が高くなる。
- (6) ステレオマッチングによりステレオ対応点を自動的に決定する。
- (7) ステレオマッチングで決定されたステレオ対応点の位置と立体画像を同時に立体表示し、誤りの検出と修正を行う。ステレオマッチングの結果が正しければ、ステレオ対応点の位置は立体画像の表面に接して見える。

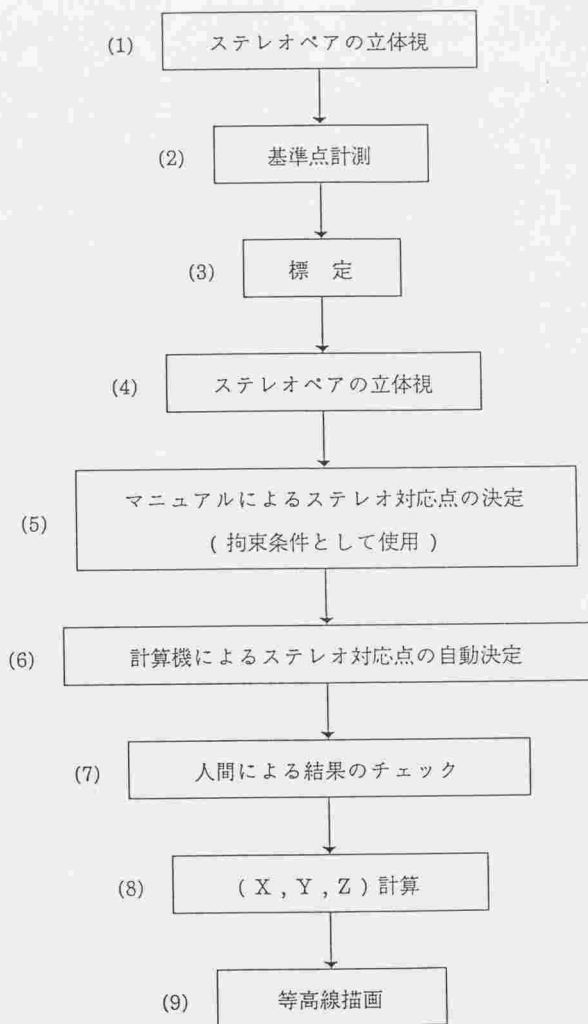


図3.3 立体画像処理システムを用いた等高線自動抽出法

- (8) ステレオ対応点の位置と外部標定要素より、各点の三次元座標を計算する。
- (9) 上記三次元座標を用いて等高線を描画する。

ここに示した地形情報自動抽出法の特長を以下に記す。

- 1) 計算機処理による等高線抽出の自動化

計算機でステレオマッチング処理を行い、等高線やDEMを自動抽出したので、誰でも容易に立体画像から等高線やDEMを抽出することができるようになった。

- 2) 計算機処理の結果を人間が検査・修正することによる出力の高精度化

現在ステレオマッチング処理を計算機で高精度に行うことが難しいので、計算機による処理結果を人間が検査・修正できるようにした。

- 3) 衛星データを直接取り扱うことによる工数削減と歪混入の防止

解析図化機では、入力がフィルムまたはプリントにした写真に限られるため、デジタル形式の衛星画像を一度写真に焼かねばならず、余分な工数がかかり、また新たな歪が加わるという問題が発生するが、ここに示した方法では衛星から得られるデジタル画像データをそのまま用いるので、このようなことはない。

- 4) パソコンシステム利用に伴う低価格化

解析図化機は数千万円と高価であるが、ここで使用する立体画像処理システムは数百万円程度で構成でき、コンパクトで取扱いが容易である。

本地形情報自動抽出法の標定の部分については既に説明したので、その他の部分について以下に説明する。

3.3.2 立体画像表示モジュールを用いた初期値入力

立体画像表示モジュールを用いると、目視によるステレオ対応点入力が容易にできるため、ステレオマッチングの処理時間を短縮し、処理精度を高めるために、少数の点についてこのような目視入力を行う。

写真3.2は目視入力を行うべき少数の点(5×5点)の位置を立体画像と共に示したものであり、写真3.3は一方の画像上のカーソルマークをマニュアルで動かし、立体像の表面にくっつくように調節して、ステレオ対応点を決定しているところである。

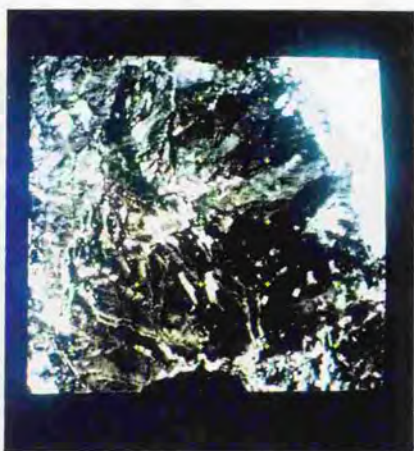


写真3.2 マニュアルによるステレオ対応点入力を行う点の位置(5×5点)

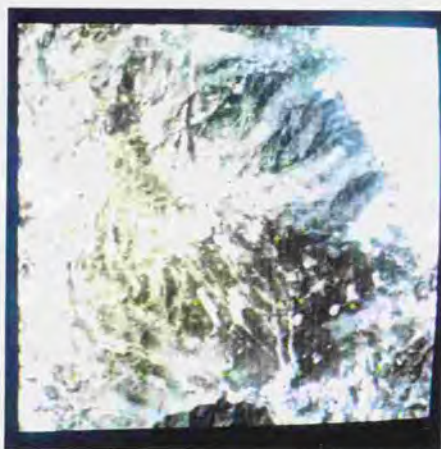


写真3.3 マニュアルによるステレオ対応点入力

3.3.3 ステレオマッチングによるステレオ対応点の自動決定

ステレオペアを構成する2枚の画像上で、対応する2点の位置を計算機で順次求めてゆく処理をステレオマッチングと呼ぶ。ステレオマッチングについてはこれまで多くの研究がなされ、発表論文も多いが、いずれの方式においてもまだステレオ対応点を完全に自動決定できる迄には至っていない。しかし、本システムでは立体画像表示モジュールを用いてステレオ対応点自動決定の誤り(ミスマッチ)を発見、修正することができるので、ステレオマッチングではミスマッチの数をできるだけ少なくしておくだけでよい。ここでは、既存の研究と対比させながら、本システムで用いたステレオマッチング法について説明する。

1) ステレオ対応点の検出方法

(i) 注目する画像の特徴

ステレオ対応点を決定するために注目する画像の特徴でステレオマッチング法を分類すると、両画像の上に相関窓を設定し、窓画像の類似度を計算して最も類似度の高いところが同一対象物に対応した画像であると判断する面積相関法と、エッジ等の特徴を用いて両画像のステレオ対応点を決定する方法(Feature based matching)がある。前者を用いるとテクスチャやコントラストに富んだ屋外の画像に対して実用的な性能が得られるが、標高値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がある。後者は標高値の急激な変化や視差による隠ぺいに良く追従できると期待されており、特にロボットビジョン等の分野で活発な研究が続けられているが、 $(49 \times 50) \times (52 \times 63)$ 処理が複雑であり、性能も今のところまだ十分ではない。衛星画像のように分解能の低い画像では地形起伏の急激な変化がならされ、視差による隠ぺいも少

ないので、前者の面積相関法の方が適していると考えられる。また、この方法はパーソナルコンピュータシステムでも容易に実現できるので、ここでは面積相関法を用いた。

(ii) 相関窓の形状・大きさ

相関窓の形状は一般に両画像で同形にとられるが、⁽⁵⁾⁽⁴⁶⁾ 地表面が傾いている場合、図3.4に示すように地表面上の同じ領域が両画像で違った大きさに撮影されるため、ステレオ対応点の決定が難しくなることがある。そこで、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、一方の相関窓の形状を変更する方法が提案されているが、⁽⁵¹⁾ 本システムでもこのような方法を用いた。図3.4は、本システムにおける相関窓の形状決定法を説明したものである。まず、画像A上の相関窓内の各点が地表面のどこに対応しているかを地表面の傾きと画像Aの外部標定要素を用いて決定し、次にその点が画像B上のどこに写っているかを画像Bの外部標定要素を用いて決定している。

相関窓の大きさに関しては、相関窓が大きいと大きな相関誤差は生じないが平均相関誤差が増大し、相関窓が小さいと平均相関誤差は小さいが時々大きな相関誤差が生じるという傾向がある。そこで大小2種類の相関窓を用いてステレオ対応点の位置を決定する方法が提案されているが、⁽⁵⁾ ここでもその方法を用いた。大小2種類の相関窓の大きさは、ソフトウェアで自由に設定できるようにした。

(iii) 類似度の求め方

面積相関法における類似度の求め方としては、代表的なものとして相関係数を用いるものと各画素値の絶対差の総和を用いるものがある。相関係数を用いるものは、精度が良いが計算時間がかかり、各画素値の絶対差の総和を用いるものは、精度が若干落ちるが計算

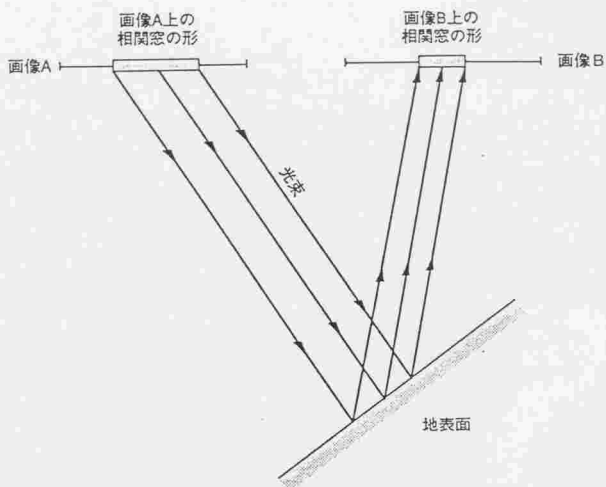


図3.4 地表面の傾斜を考慮した相関窓の変形

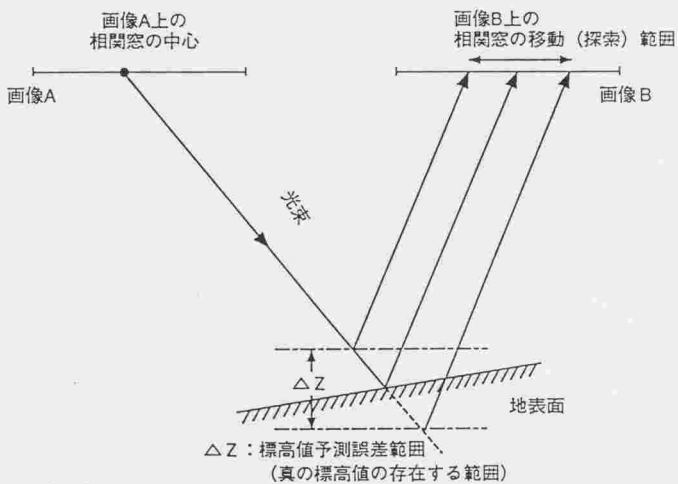


図3.5 地表面の傾斜と標高値予測誤差範囲(ΔZ)を考慮した相関窓の移動範囲(探索範囲)の決定法

時間が数倍早いという特徴がある。(5×46)ここでは、場合によって両者が自由に選択できるようにしたが、両者の計算式を以下に示す。

<画像 A, 画像 B の相関係数: r_{AB} >

$$r_{AB} = \frac{S_{ab}}{\text{def } \sqrt{S_{aa} \cdot S_{bb}}}$$

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

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

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

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

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

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

{ b_{ij} }: 画像 B ($1 \leq i \leq M, 1 \leq j \leq N$)

<画像 A, 画像 B の絶対差の総和: S>

$$S = \sum_{\text{def } i=1}^M \sum_{j=1}^N \{ a_{ij} - b_{ij} \}$$

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

{ b_{ij} }: 画像 B ($1 \leq i \leq M, 1 \leq j \leq N$)

2) ステレオ対応点の探索範囲の決定手法

ステレオ対応点の探索範囲が広がると、ステレオマッチングのミスを起こす確率が高くなり、計算時間が長くなるので、探索範囲をいかに精度良く狭く与えるかは重要な問題である。レンズカメラによる立体写真においては、一般に共役直線に沿った画素の再配列が行われ、⁽⁴⁶⁾探索範囲を共役直線上に限定することが行われるが、リニアアレイセンサによる立体画像には共役直線が存在しないので、この手法を用いることはできない。代わって、このような画像に適用できる手法として、現在Coarse-to-Fine法が良く用いられている。一例としては、まず低周波成分だけからなる画像上でステレオ対応点を決定し、その後順次高周波成分を加えてその位置を細かく決定してゆくものがある。⁽⁶⁾⁽⁵¹⁾

ここで用いた方法もこのCoarse-to-Fine法に属するが、まず四隅を含む粗い間隔の点(ここでは 5×5 点)のステレオ対応点を立体画像表示モジュールを用いてマニュアルで与え、次に隣接する4点の重心位置を両画像で求め、それらの位置を新しいステレオ対応点の予想位置とし、その近傍で面積相関法を用いて正しい位置を探索、決定している。この自動決定処理を繰り返してゆくと、 9×9 点、 17×17 点というように次第に細かい間隔のステレオ対応点が決定されてゆく。予想位置の近傍における探索範囲は、図3.5に示したように地表面の傾斜とその地点における標高値予測誤差範囲を考慮して決定した。この方法はアルゴリズムが比較的簡単なため、パーソナルコンピュータシステムでも無理なく実現することができる。

3.3.4 立体画像表示モジュールを用いたマッチング結果の検査修正

ステレオマッチングで自動決定されたステレオ対応点を立体画像と重ね合わせて立体画像表示モジュールに表示し、自動決定の誤りを見つけ修正した。誤りか否かは、立体視した時ステレオ対応点が立体像の表面に接しているか否かで判断した。写真3.4は、ステレオ対応点自動決定結果を立体画像と共に立体画像表示モジュールに表示したものである。

3.3.5 DEM抽出と等高線描画

ステレオ対応点の位置と外部標定要素を用いて、まずこれらの点の標高値を求めた。しかし、これらの点は正格子上にないので、次にこれらの点から内挿して正格子上の点の標高値(DEM)を求めた。⁽⁵⁴⁾ 等高線はこのDEMを用いて描くことができるが、そのアルゴリズムを図3.6に示す。この方法は各点の高さを等高線間隔で割り、その商の値が右隣または真下の点と異なっていれば等高線上の点、他の場合は等高線上の点でないとするものであり、等高線間隔として任意の値を選ぶことができる。

写真3.5~3.8はこのようにして描いた等高線であるが、写真3.5はステレオマッチング結果を修正した場合の100m間隔等高線、写真3.6は修正しない場合の100m間隔等高線、写真3.7は修正した場合の50m間隔等高線、写真3.8は修正しない場合の50m間隔等高線である。ステレオマッチング結果を修正しない場合の等高線では異常高度点の影響と考えられる渦があちこちに見られるが、修正した場合はこのような渦がなくなっており、修正作業の効果が歴然と表れている。異常高度点の修正をソフトウェアで行う方法も発表されているが、⁽⁵⁵⁾ ステレオマッチング処理では近隣点を考慮してステレオ対応点を決定しているのでこのような異常点が集団で発生することが多く、このような場合はソフトウェアで修正することが難しい。

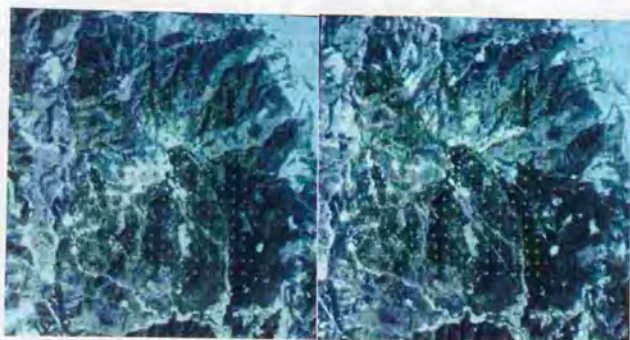


写真3.4 ステレオ対応点の自動決定結果

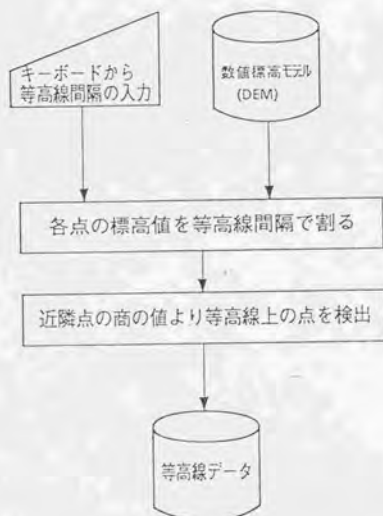


図3.6 DEMからの等高線描画法

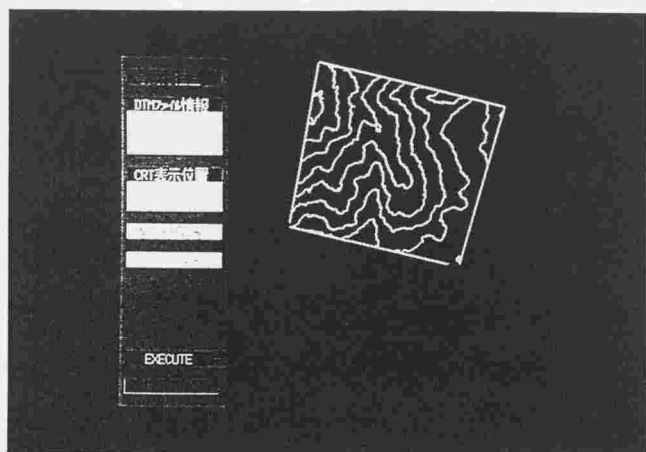


写真3.5 ステレオマッチング結果を修正した場合の100m間隔等高線

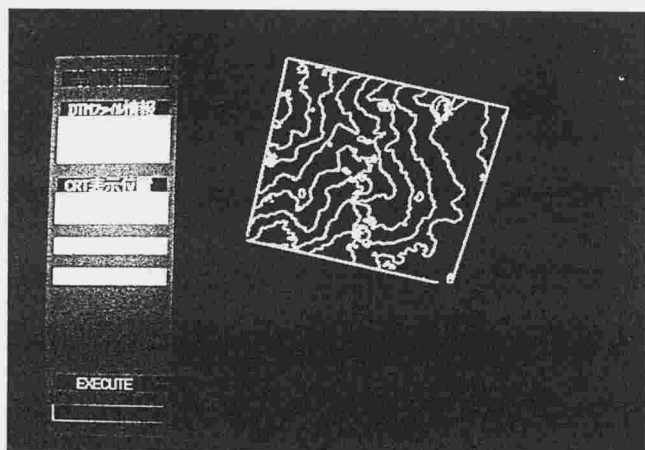


写真3.6 ステレオマッチング結果を修正しない場合の100m間隔等高線

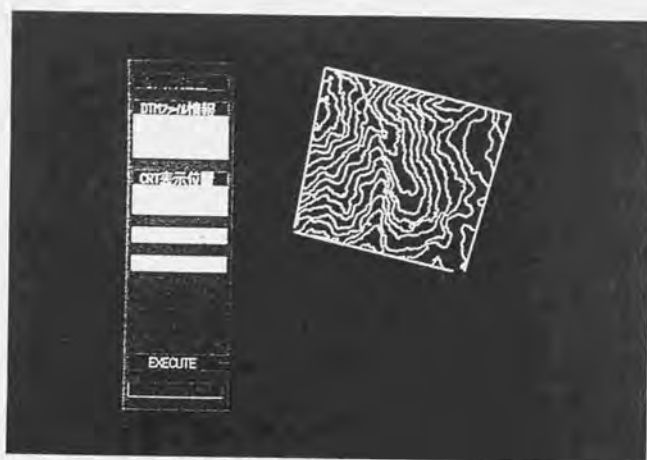


写真3.7 ステレオマッチング結果を修正した場合の50m間隔等高線

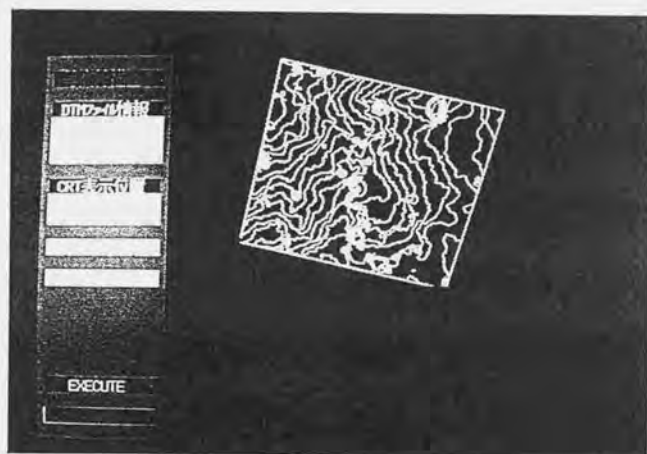


写真3.8 ステレオマッチング結果を修正しない場合の50m間隔等高線

3.4 JERS-1立体画像を用いた地形情報抽出に関する検討⁽⁵⁶⁾

3.4.1 JERS-1立体画像から地形情報を抽出する場合の問題点

現在SPOT立体画像からの地形情報抽出が実務として行われているが、1992年3月に打ち上げられたJERS-1からも立体画像が取得される。しかし、JERS-1の立体画像は、資源探査のための地形立体観測を目的として設計されているため、DEMや等高線等の地形情報抽出にはあまり適していない。JERS-1立体画像から地形情報を抽出する場合の主な問題点を2つ以下に示す。

(i) JERS-1立体画像で計測できる高さの精度が悪い。

立体画像の高さの精度 σ_H は次式で与えられる。

$$\sigma_H = \text{平面精度} \times \frac{H}{B}$$

ここで

平面精度 : だいたい1画素の大きさ(18.3m)

H/B : B/H比の逆数(1/0.3)

従って

$$\sigma_H = 18.3 \times \frac{1}{0.3} = 61 \text{ (m)}$$

等高線の間隔は $3\sigma_H$ 以上であるので、183m以上となりJERS-1立体画像からは非常に粗い等高線しか描けないことになる。もっと密な等高線を描くために高さ計測精度を上げるためには、サブピクセルまで読む等の特別の努力が必要である。

(ii) 直下視画像と前方視画像で画素の大きさが違う。

図3.7に示すように直下視画像の画素の大きさは $18.3\text{m} \times 24.2\text{m}$ であるが、前方視画像の画素の大きさは $19.1\text{m} \times 24.2\text{m}$ である。リニアメント抽出時のように、画像の立体視効果のみを必要とする場合はリサンプリングを行い、画素の大きさを同じにしてもあまり問題とはならないが、高さ計測を行う場合にリサンプリングを行うとその精度に多大の影響を与える。

この程度の大きさの違いならば人間の目で立体視できなくはないが、かなり見づらくなり、かつ画像の移動等において特別の考慮をすることが必要となる。

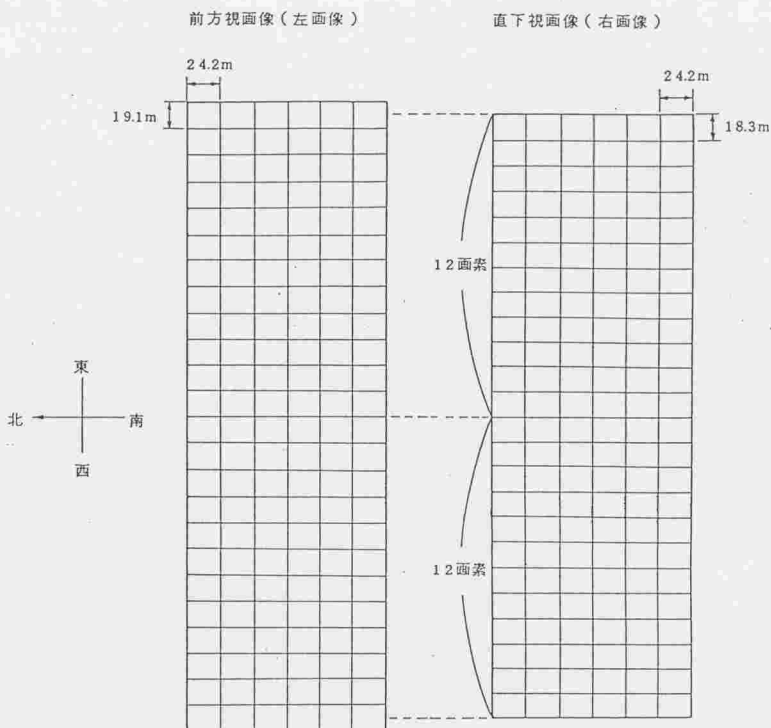


図3.7 JERS-1の直下視と前方視画像における画素サイズの違い

3.4.2 JERS-1立体画像に含まれる幾何学的歪

JERS-1立体画像は前後視方式で取得されるため、横視方式で取得されるSPOT立体画像とは異なる幾何学的歪を持っている。そこでここではまず、前後視方式で取得される立体画像に含まれる幾何学的歪の種類について検討し、次にJERS-1の場合についてその大きさを実際に計算し、地形情報抽出時に考慮しなければいけない歪かどうかを検討した。以下にその詳細を述べる。

1) 地球の曲率による直下視画像CT方向(走査方向)歪

図3.8に示すように、アレイセンサーで観測される1ライン上の画素のCT方向の長さは、中央から両端へ行く程長くなる。しかしその差は、両端で中央より0.06%長くなる程度で殆ど無視し得る。

以下にその差の計算方法を示す。

図3.9において、衛星高度 h (568Km)、地球半径 R (6378Km)、走査幅 d (37.5Km)が既知なので、図中の θ , α , ψ , l_1 , l_2 は次式で求まる。

$$\cos \theta = \frac{2R^2 - d^2}{2R^2} \quad \therefore \theta = 0.3369^\circ$$

$$\alpha = 180^\circ - \frac{1}{2}(180^\circ - \theta) = 90.1685^\circ$$

$$l_2 = \sqrt{d^2 + h^2 - 2dh \cos \alpha} = 569.35 \text{ Km}$$

$$\sin \varphi = 37.5 \times \frac{\sin 90.1685^\circ}{569.35} \quad \therefore \varphi = 3.776^\circ$$

$$l_1 = \frac{h}{\cos \varphi} = 569.24 \text{ Km}$$

図3.10において a を中央の画素のCT方向の長さ、 b を両端の画素のCT方向の長さとするれば、その比は次式で求まる。

$$\frac{b}{a} = \frac{b}{c} \cdot \frac{c}{a} = \frac{\sin(90^\circ + \psi)}{\sin(90^\circ - \psi - \theta)} \cdot \frac{\lambda_2}{\lambda_1} = 1.00060$$

つまり両端における画素のCT方向の長さは中央の場合より約0.06%長くなることが示された。

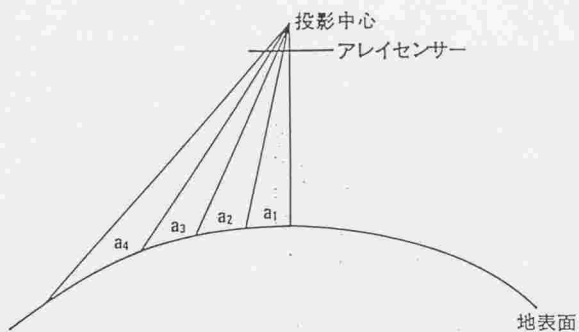


図3.8 地球の曲率による直下視画像CT方向歪

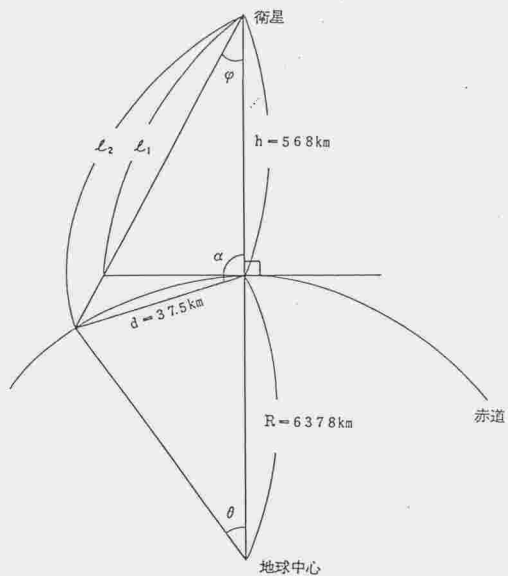


図3.9 CT方向歪の求め方(その1)

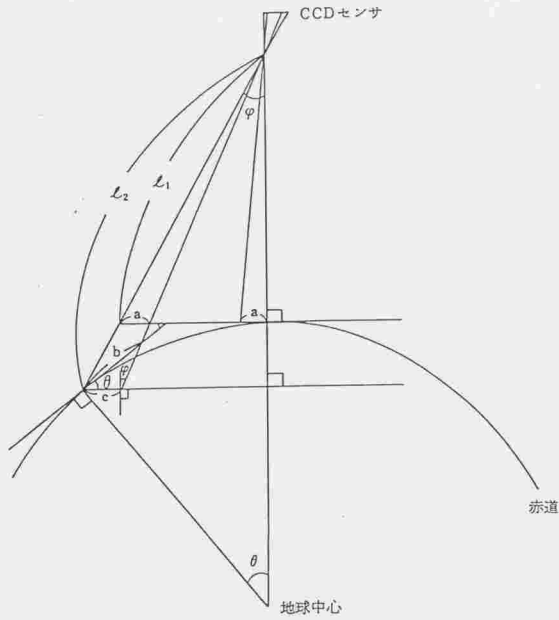


図3.10 CT方向歪の求め方(その2)

2) 地球の曲率による前方視画像AT方向(衛星進行方向)歪

図3.11に示すように、前方視用アレイセンサーで観測される地上の領域は一直線上になく、衛星進行方向(AT方向)に少し曲がっている。その大きさは計算したところ中央と両端でAT方向の位置の差が約27.8mであった。これは、前方視画像を直下視画像と重ねた時、中央と両端で約1ラインずれることを意味する。以下にこの値の計算方法を示す。

図3.12において、衛星高度 h (568Km)、立体視角 γ (15.33°)、地球半径 R (6378Km)が既知なので、図中の m 、 R' 、 h' は次式で求まる。

$$m = (R + h) \sin \gamma = 1836.4 \text{ Km}$$

$$R' = \sqrt{R^2 - m^2} = 6107.9 \text{ Km}$$

$$h' = (R + h) \cos \gamma - R' = 591 \text{ Km}$$

図3.13は図3.12における投影中心とセンサーを含む平面で地球を切った図であるが、図中の α と d は走査角 ψ (3.776°)が既知なので次式で求まる。

$$\sin \alpha = (R + h') \times \frac{\sin \psi}{R} \quad \therefore \alpha = 175.86^\circ$$

$$d = R' - n = R' - R' \cos(180^\circ - \alpha - \psi) = 0.10499 \text{ Km}$$

求める1ラインの中央と両端におけるAT方向のずれは次式で求められる。

$$\text{AT方向のずれ} = d \sin \gamma = 0.027757 \text{ Km}$$

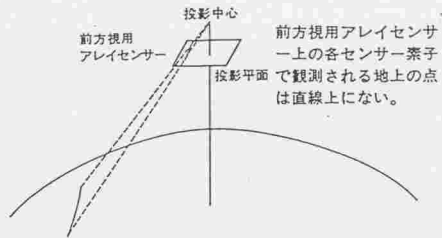
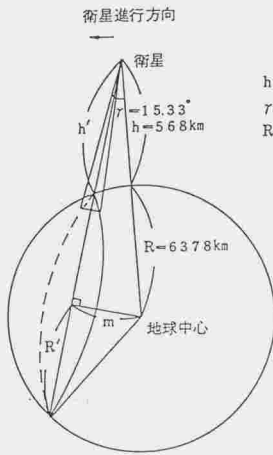
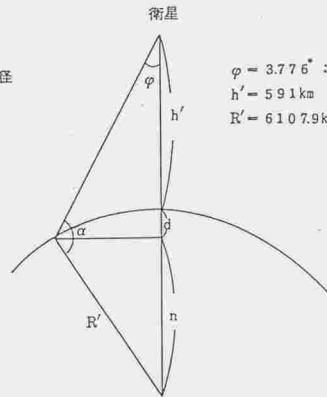


図3.11 地球の曲率による
前方視画像AT方向歪



h : 衛星高度
 γ : 立体視角
 R : 赤道における地球半径



$\varphi = 3.776^\circ$: 走査角
 $h' = 591 \text{ km}$
 $R' = 6107.9 \text{ km}$

図3.12 前方視画像AT方向歪
の求め方(その1)

図3.13 前方視画像AT方向歪の求め方(その2)

3) 地球の自転による歪

地球表面の自転速度が緯度により異なり、赤道に近い程ライン毎の撮影位置が西に大きくずれる。図3.14は北半球における同一バスで観測される地上領域の形である。赤道付近では4200ライン(約1シーン)取得する間に西に約20.2Kmずれるが、この計算方法を図3.15を用いて説明する。

地球半径 $R(6378\text{Km})$, 軌道傾斜角 $\alpha(97.662^\circ)$, 衛星の対地速度 $V(6.946\text{Km/sec})$, サンプルング周期 $T(3.46\text{ms})$, 地球が1回自転するのに要する時間(23時間56分4秒)が既知なので、図中の V_E, V_x は次式で求まる。

$$\text{地球の自転速度 } V_E = \frac{2\pi R}{(23 \times 60 + 56) \times 60 + 4} = 0.4651 \text{ Km/sec}$$

$$\text{衛星の対地速度のx成分 } V_x = V \cos \alpha = -0.9261 \text{ Km/sec}$$

従って赤道付近で4200ライン撮影する間に衛星が進むx方向の距離(Δx)は

$$\Delta x = (-V_E + V_x) \times 4200 \times T = -20.217 \text{ Km}$$

この距離をカラム数(n)に換算すると、

$$n = - \frac{20217}{18.3} = -1105$$

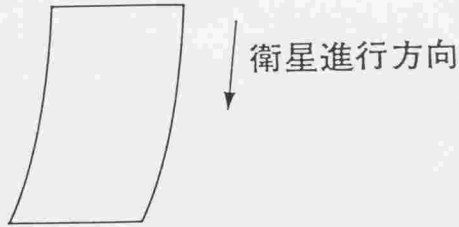


図3.14 地球の自転による歪

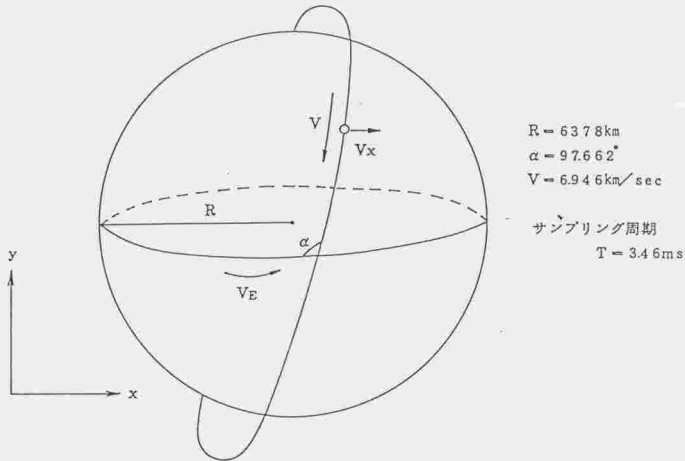


図3.15 地球の自転による歪の求め方

4) 衛星のローリングによる歪

ローリングは衛星の進行方向の軸(X軸)回りの回転であるが、この回転があると、地表面が平面であると仮定しても1ライン上の各画素が観測する地上領域の大きさは画素毎に異なってくる。図3.16に示したように右回りの回転があると、各画素が観測する地上領域のCT方向の長さは図示したように $a_1 > a_2 > a_3 > a_4 > a_5$ となる。この違いは回転角をJERS-1の基本設計値である 0.13° とすると、両端と中央で約0.03%の大きさの違いとなる。以下にこの計算方法を示す。

図3.17はセンサーを傾ける代わりに地表面を傾けたものであり、図中の b と a は直下を観測する画素とそこから2047個左側の画素が観測する地上の領域である。衛星高度 $h(568\text{Km})$ 、ローリング角 $\theta(0.13^\circ)$ 、地上分解能の設計値(18.3m)を既知とすると、図中の $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \beta_1, \beta_2, \gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ は次式で求まる。

$$\tan \alpha_1 = \frac{d_1}{h} = \frac{18.3}{56800} \quad \therefore \alpha_1 = 0.0018460^\circ$$

$$\tan \alpha_2 = \frac{d_2}{h} = \frac{18.3 \times 2047}{56800} \quad \therefore \alpha_2 = 3.77324^\circ$$

$$\tan \alpha_3 = \frac{d_3}{h} = \frac{18.3 \times 2048}{56800} \quad \therefore \alpha_3 = 3.77508^\circ$$

$$\beta_1 = 90^\circ + \alpha_1 = 90.0018460^\circ$$

$$\beta_2 = 90^\circ + \alpha_2 = 93.77324^\circ$$

$$\beta_3 = 90^\circ + \alpha_3 = 93.77508^\circ$$

$$\gamma_1 = 180^\circ - (\beta_1 + \theta) = 89.8681540^\circ$$

$$\gamma_2 = 180^\circ - (\beta_2 + \theta) = 86.09676^\circ$$

$$\gamma_3 = 180^\circ - (\beta_3 + \theta) = 86.09492^\circ$$

また図中の l_2 と l_1 の比は次式で求まる。

$$\sin \alpha_2 = \frac{d_2}{l_1}$$

$$\frac{d_2}{l_2} = \frac{\sin r_2}{\sin \theta}$$

$$\therefore \frac{l_2}{l_1} = \frac{d_2 \sin \theta}{\sin r_2} \cdot \frac{\sin \alpha_2}{d_2} = 0.0001497$$

従ってaとbの比は次式で求まる。

$$\frac{a}{b} = \frac{a}{c} \cdot \frac{c}{d_1} \cdot \frac{d_1}{b} = \frac{\sin \beta_2}{\sin r_3} \cdot \frac{l_1 + l_2}{l_1} \cdot \frac{\sin r_1}{\sin \beta_1} = 1.000299$$

つまり両端と中央で1画素のCT方向の長さは約0.03%違うことが示された。

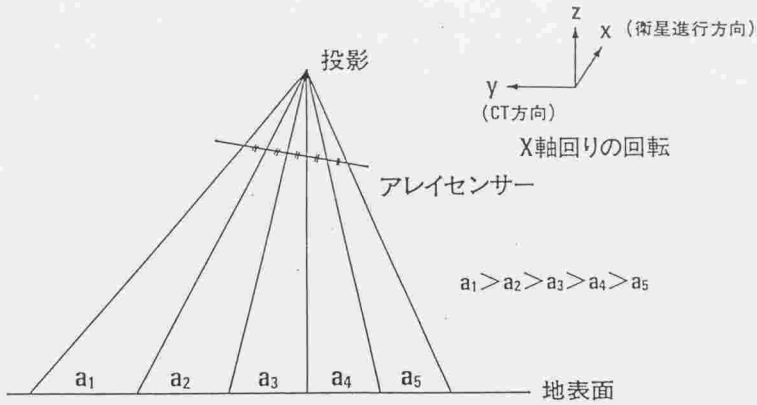


図3.16 衛星のローリングによる歪

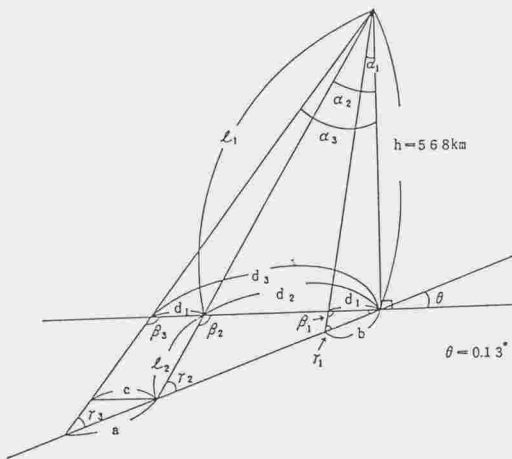


図3.17 衛星のローリングによる歪の求め方

5) 衛星のピッチングによる歪

ピッチングは衛星の進行方向と直角な水平軸(Y軸)回りの回転であるが、この回転があるとセンサーから地表面までの距離が変わるので、一画素の地上対応領域の大きさが変わる。図3.18において ψ はピッチング角であるが、JERS-1の基本設計値では 0.12° である。この時図示の l と h の長さの比は

$$\frac{l}{h} = \frac{1}{\cos \psi} = 1.000002$$

従って1画素の地上対応領域のCT方向長さは最大 0.0002% 長くなるがこの値は十分小さく無視し得る。

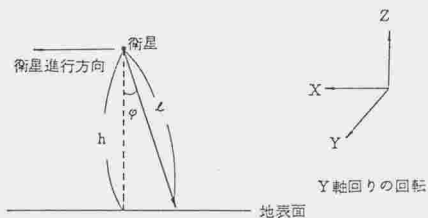


図3.18 衛星のピッチングによる歪

6) 衛星のヨーイングによる歪

ヨーイングは天頂方向の軸(Z軸)回りの回転であるが、この回転があると1ラインで観測される地上の領域がCT方向から回転する。図3.19において κ はヨーイング角であるが、JERS-1の基本設計値は 0.09° である。この時両端におけるずれは走査幅(75Km)が既知なので、次式で求められる。

$$\text{両端におけるずれ} = \frac{\text{走査幅}}{2} \cdot \tan \kappa = 58.9 \text{ m}$$

つまり両端で逆方向に58.9mずれる。両端の間では117.8mとなる。1画素のAT方向の長さが24.2mであるので、これは約4.9画素長に相当する。

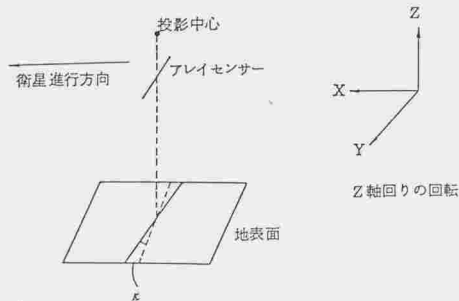


図3.19 衛星のヨーイングによる歪

7) 衛星の軌道変動による歪

JERS-1の降交点地方時は全寿命期間(2年間)を通じて2~4分の誤差内に納まるように、打上げ時に軌道傾斜角に適当なバイアスが与えられる。衛星の高度は空気抵抗により徐々に落ちてくるが、同時に衛星の軌道が西に移動してゆく。軌道の経度変動を走査幅の10%(7.5Km)以内に抑えるためには、5日毎の高度修正が必要であり、この時高度は基準高度の上下に約600m変動する。衛星の高度はこれ以外摂動の影響も受ける。摂動による高度変動は1975年にフランスが打ち上げた測地衛星スターレットの場合900m近くあったとの計算結果があるが、その大部分は赤道で低下し極近くで上昇する定常的なものである。従って同一地点における高度変動にはあまり影響しない。そこでここでは高度変動を600mとしてその画像に与える影響を検討する。

図3.20において衛星高度 h (568Km)が既知なので、高度変動 l を0.6Kmとすれば図示した走査幅 d' と d の比は

$$\frac{d'}{d} = \frac{h+l}{h} = 1.00106$$

つまりJERS-1の高度変動により走査幅又は各画素のCT方向の長さは約0.106%変動する。

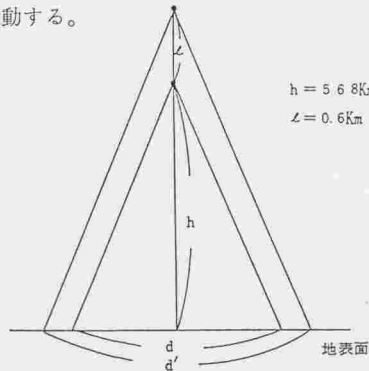


図3.20 衛星の高度変動による歪

8) 光学系の歪曲による歪

光学系はレンズや反射鏡を用いて構成されるが、そこで得られる実像は光学系の性質により周辺部で伸びたり縮んだりする。図3.21はJERS-1のVNIRセンサーで得られる実像を示したものであるが、撮像面における平行線は実像では周辺部が縮み樽のような形(樽型)となる。

JERS-1のSWIRセンサーでは逆に実像は周辺部で伸び、糸巻きのような形(糸巻き型)となる。次にこの伸縮の大きさを実測した結果を示す。

図3.22及び図3.23はVNIRセンサー及びSWIRセンサーにおける歪曲を説明するための図で点線はセンサー位置、実線はそこに写るべき像が実際に写る位置である。 Δx_i と Δy_i は端点におけるこれらの位置の差のx成分とy成分である。以下にこれらの実測値を示す。

$$\Delta x_1 = -8\mu\text{m} \text{ (約1.1画素長)}$$

$$\Delta y_1 = -5\mu\text{m} \text{ (約0.7画素長, } -12\mu\text{mのバイアスは除去)}$$

(VNIRセンサーにおけるセンサー素子の大きさは $7\mu\text{m} \times 7\mu\text{m}$)

$$\Delta x_2 = 43\mu\text{m} \text{ (約4.3画素長)}$$

$$\Delta y_2 = 3\mu\text{m} \text{ (約0.3画素長)}$$

(SWIRセンサーにおけるセンサー素子の大きさは $10\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$)

なお上記の負符号は縮むことを、正符号は伸びることを示す。

9) CCDセンサーや放射計本体の取付誤差による歪

CCDセンサーを衛星本体に固定する際には何段階かの取付作業があり、それらの取付個所における取付誤差の総計がCCDセンサーの取付誤差となる。この取付誤差は、取付終了後正確に計測することができるので、衛星の姿勢制御時あるいは得られた画像の処理時にその補正を完全に行うことができる。なお、衛星の姿勢制御後も

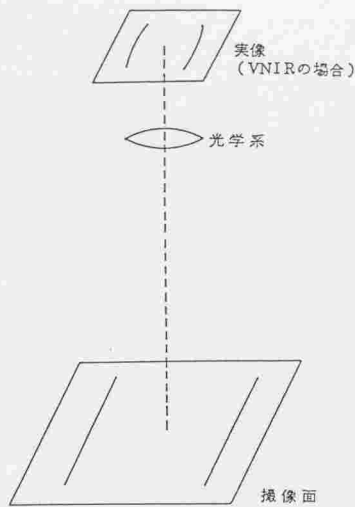


図3.21 光学系の歪曲による歪

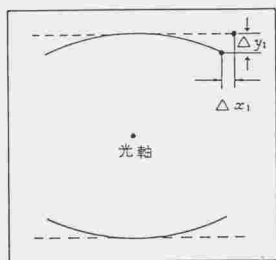


図3.22 VNIRセンサーにおける歪曲

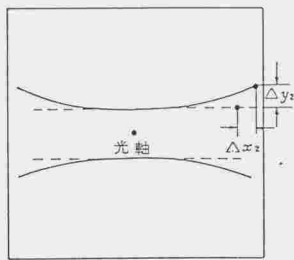


図3.23 SWIRセンサーにおける歪曲

残っている取付誤差は得られる画像上に衛星の姿勢変動で説明した歪と同種の歪を発生する。

10) 光の大気屈折による歪

大気の密度は地表面に近くなる程濃くなるが、この密度差により地表から反射した光束はセンサーに入射する迄に屈折する。この屈折の大きさはSaastamoinenの方法で求めると、⁽⁵⁷⁾ JERS-1の前方視画像で約0.74mであった。この値は一画素の大きさ18.3m×24.2mと比べると十分小さく無視できる。

以下にこの値の求め方を説明する。

図3.24は光の大気屈折を示した図であるが、衛星上で立体視角 $\theta(15.33^\circ)$ だけ前方を見た時に見える画像は、実は $(\theta - \Delta\theta)$ 前方の画像である。ここで $\Delta\theta$ はSaastamoinenの方法によると次式で求められる。

$$\Delta\theta(\mu\text{rad}) = 2.316 \times \tan \theta \left(\frac{P_1 - P_2}{h} - 34.11 \frac{P_2}{T_2} \right)$$

ただし $P_1 =$ 地上気圧 = 1015mb
 $P_2 =$ 衛星高度の気圧 = 0mb
 $h =$ 衛星高度 = 568Km

これらより $\Delta\theta = 1.13 \mu\text{rad}$

また高度 h が20Kmを越えると地球の曲率による歪の補正を行わねばならないが、この値は計算によると $0.10 \mu\text{rad}$ となる。従って $\Delta\theta$ は

$$\Delta\theta = 1.13 \mu\text{rad} + 0.10 \mu\text{rad} = 1.23 \mu\text{rad} = 0.000070^\circ$$

この時地上における距離 λ は

$$\lambda \doteq h \tan \theta - h \tan (\theta - \Delta\theta) = 0.74\text{m}$$

つまり大気による屈折の大きさが0.74mであることが計算された。

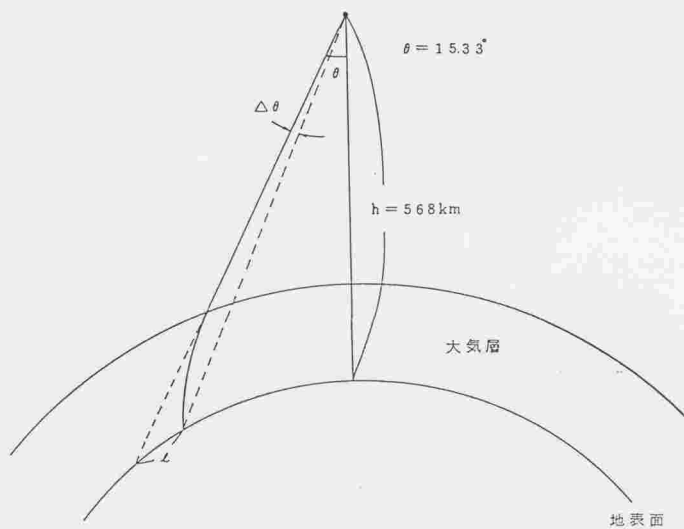


図3.24 光の大気屈折

11) 直下視画像と前方視画像における画素の大きさの違い

前方視センサーの瞬時視野は直下視センサーより広がるので、CT方向の地上分解能は両者で異なり、直下視画像が18.3mであるのに対し前方視画像は19.1mとなる。AT方向の地上分解能は衛星の対地速度で決まるので共に24.2mである。次に前方視センサーの瞬時視野の求め方を示す。図3.25において、衛星高度をH、前方視距離を ℓ 、衛星の直下点から前方視センサーの観測領域に下した垂線の長さをBとすれば、直下視センサーの瞬時視野が18.3m、 B/H 比が0.3であるので、前方視センサーの瞬時視野をxとするとxは次式で求まる。

$$x = 18.3 \times \frac{\ell}{H} = 18.3 \times \frac{\sqrt{B^2 + H^2}}{H} = 18.3 \times \sqrt{\left(\frac{B}{H}\right)^2 + 1} = 19.1 \text{ m}$$

つまり前方視センサーの瞬時視野が19.1mであることが判った。

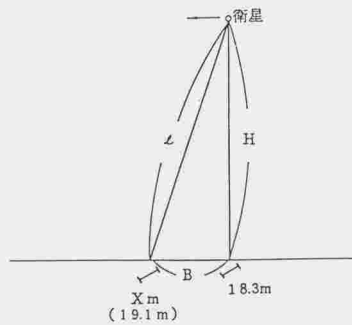


図3.25 直下視・前方視センサーにおける瞬時視野の違い

12) JERS-1立体画像の幾何学的歪のまとめ

JERS-1立体画像に含まれる幾何学的歪の大きさを表3.2にまとめた。

この表より次のことが判る。

特に大きな歪は次の2つである。

- ・ 地球の自転による観測位置のずれ
- ・ 前方視画像と直下視画像における瞬時視野の差

場合によって考慮すべき歪は次の4つである。

- ・ 地球の曲率による前方視画像AT方向の位置ずれ
- ・ 衛星のヨーイングによるAT方向の位置ずれ
- ・ 衛星の高度変動によるCT方向画素長の変動
- ・ 光学系の歪曲による観測位置のずれ

立体画像から高度を計算する時の視差は、画素長を単位とすると一般にそんなに大きくないので、上記の特に大きな歪以外は標高値計測時無視してよい。

表3.2 JERS-1光学センサー画像に含まれる幾何学的歪の大きさ

歪の要因	歪の方向	歪の大きさ	歪の内容
地球の曲率	CT方向 (走査方向)	画素長が0.06%違う。	両端で中央より長くなる
	AT方向 (衛星進行方向)	観測位置が27.8mずれる	前方視画像の両端で中央より27.8m前方を観測する
地球の自転	CT方向	4200ライン取得する間に20.2Kmずれる	赤道付近で4200ライン取得する間に、1ラインで観測する位置が西に20.2Kmずれる
衛星のローリング	CT方向	画素長が0.03%違う	0.13°のローリングがあると、両端と中央で0.03%画素長が違う
衛星のピッチング	CT方向	画素長が0.0002%違う	0.12°のピッチングがあると、直下視の場合より画素長が0.0002%長くなる。
衛星のヨーイング	AT方向	観測位置が58.9mずれる	0.09°ヨーイングがあると、AT方向の観測位置が両端で逆方向に58.9mずれる
衛星の高度変動	CT方向	画素長が0.106%変動する	衛星高度が600m変動すると、画素長が0.106%変動する。
光学系の歪曲 (VNIR)	CT方向	観測位置が1.1画素長ずれる	両端で1.1画素長光軸側を観測する
	AT方向	観測位置が0.7画素長ずれる	両端で0.7画素長光軸側を観測する
光学系の歪曲 (SWIR)	CT方向	観測位置が4.8画素長ずれる	両端で4.3画素長光軸と反対側を観測する
	AT方向	観測位置が0.3画素長ずれる	両端で0.3画素長光軸と反対側を観測する
センサーの取付誤差	—	—	取付誤差の設計値未定
光の大気屈折	AT方向	観測位置が0.74mずれる	前方視画像の観測位置が0.74m手前になる
前方、直下視画像における瞬時視野の差	CT方向	18.3mと19.1m	各センサーの瞬時視野のCT方向の長さは直下視画像で18.3m、前方視画像で19.1mである

3.5 まとめ

デジタル立体画像処理システムを用いて、衛星立体画像から三次元地形情報を抽出するソフトウェアを開発した。入力画像としては、衛星から得られるデジタル画像をそのまま用いることができるので、デジタル画像をフィルムに焼くフォトプリンタを用いる必要がなく、非常に便利でありかつ精度を上げることができる。地形情報抽出は、面積相関法によるステレオマッチング処理で自動的に行った。このステレオマッチング処理の前に少数のステレオ対応点を立体画像表示モジュールを用いて目視で入力したが、これらの点はステレオマッチングの処理時間を短縮し、精度を高める上で有効であった。また、ステレオマッチングで自動決定されたステレオ対応点を立体画像と共に立体画像表示モジュールに立体表示し、自動決定の誤りを検出し修正を行ったが、この機能は最終結果の精度を高める上で非常に効果的であった。ここで開発したソフトウェアを用いることにより、安価で取扱いの容易なデジタルシステムにより、衛星立体画像から高精度な地形情報を容易に抽出できることが実証された。