

ステレオ衛星画像を用いた地形の三次元測定

Three Dimensional Measurement using Stereo Satellite Imagery

村 井 俊 治*

Shunji MURAI

世界の全陸地の3分の2は、5万分の1より大きい縮尺の地形図が作られていない。現在の地形図の作成される速度では、完成に数100年かかると言われる。5万分の1の縮尺の地形図は、資源の管理、国土計画、環境の保全等に不可欠であり早急な整備が要請されている。人工衛星の発達に伴い、高分解能のステレオ画像を取得して地形の三次元測定を行う試みが1980年代から始められた。本解説は三次元技術の動向をのべたものである。

1. ステレオ衛星画像の取得方式

人工衛星からステレオ画像を取得する方式には大きく次の2つがある。

(1) 光学的方式

カメラとフィルムを用いて、オーバーラップさせながら宇宙写真を撮影する方式である。フィルムの回収に労力がかかる。しかし航空写真測量の延長上にあり、装置およびデータ処理とも既存の技術で地形図の作成が可能である。

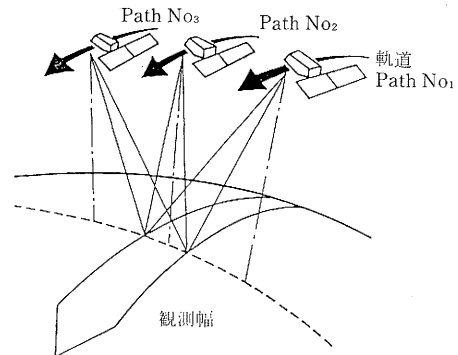
1983年12月、ヨーロッパ宇宙機構 (ESA) がスペースラブ計画 (Spacelab) と称して、ツアイスのRMKカメラ (焦点距離30cm) で80万分の1の縮尺の宇宙写真を撮影した。1984年10月、米国NASAはスペースシャトルに大画面カメラ (Large Format Camera; 焦点距離30cm) を搭載し、23cm×46cmのフィルム寸法の宇宙写真を撮影した。しかし、いずれも5万分の1地形図を作成する精度には達しなかった。

1988年6月にソ連はコスモス1951号でKFA1000という超高分解能カメラ (焦点距離100cm) で27万分の1の宇宙写真を撮影した。ステレオ写真になっているが、カメラレンズの画角が狭角のため、ステレオ性能は低い。しかし、地上分解能5mと現在利用できる衛星画像では最高の分解能を誇っている。

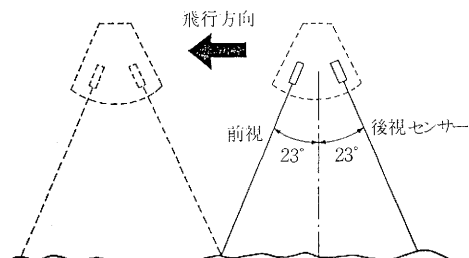
(2) 電子画像方式

リニアアレイのCCDカメラによって同一地点を異なる場所から異なる角度で視準して撮像することによりステレオデジタル画像を得る方式である。データは地上のアンテナに送信されるので無人衛星でよい。ステレオ画像取得方式には、図1に示すように、2つの方式がある。

サイドルッキング方式は、1つのセンサーを用い、隣接する軌道から角度をかえて同一地点の映像を行う方式で、現在フランスのスポット (SPOT) によるステレオ画像がこの方式により得られている。スポット画像の場合、±27°の角度まで視準方向を傾けられ、その分解能は10mで



a) サイドルッキング方式 (SPOT)



b) フォア アンド アフト方式 (MAPSAT)

図1 ステレオ画像取得方式

*東京大学生産技術研究所 第5部

表 1 光学方式と電子画像方式の比較

	利 点	欠 点
光 学 方 式	<ul style="list-style-type: none"> ・既存の技術が利用可能 ・精度管理の基準が確立している ・フィルム複製が安価である 	<ul style="list-style-type: none"> ・フィルム回収に労力がかかる ・フィルム枚数に制限がある ・オペレータによる手作業が多い
電子画像方式	<ul style="list-style-type: none"> ・無人方式でデータ受信が可能 ・デジタルのため自動処理が可能 ・データ加工が柔軟にできる 	<ul style="list-style-type: none"> ・新たなソフト開発が必要 ・データ処理が高価につく ・技術蓄積がない

ある。フォアアンドアフト方式 (Fore and Aft) 方式は、同一軌道から 2 台のセンサーにより、1 台は前方斜め、他の 1 台は後方斜めを視準し、同一軌道内でステレオ画像を撮像する方式である。この方式ではまだ撮像されていないが、1995 年に打ち上げが予定されている日本の ADEOS (Advanced Earth Observing Satellite) には 8m の地上分解能のステレオセンサーが提案されている。

電子画像方式によって得られる画像はデジタルであるが、その幾何学は光学方式によって得られる写真とは異なるため、既存の写真測量図化機でそのまま使うことはできなく、特殊なデータ処理のアルゴリズムが必要である。

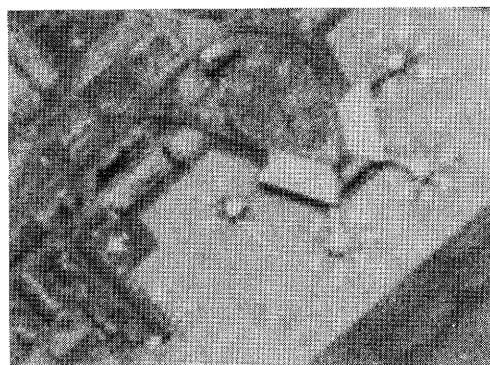
表 1 は光学方式と電子画像方式の特徴を比較したものである。図 2 は、1988 年 6 月 6 日の同じ日にソ連のコスモス KFA1000 の宇宙写真とフランスのスポット HRV 画像が取得されたもので、羽田空港を示したものである。

表 2 は、ステレオ衛星画像を取得するために打ち上げられた、あるいは計画中の衛星およびセンサーをまとめたものである。

2. 地形図作成に要求される精度

今まで作られてきた地形図は大変厳しい要求条件が課せられている。平面位置精度は地図上で 0.3mm であるから、地図の縮尺分母数に 0.3mm を乗じれば、地上での必要な精度が算出できる。高さの精度は地図の縮尺に応じて定められている等高線間隔の 1/3 が必要とされる。たとえば 5 万分の 1 の地形図の等高線間隔は 20m であるから、約 ±7m の高さの精度が必要となる。

平面位置精度は、画像の縮尺あるいは地上分解能に 1:1 で影響を受けるが、高さの精度は、ステレオ画像を取得するときの基線 (センサーの間隔) と高度の比、すなわち基線高度比 (B/H 比ともいう) の逆数を乗じた



©SOJUKARTA

a) 成田空港の拡大 KFA1000 宇宙写真
(縮尺: 約 1/10,000)

©CNES

b) 成田空港の拡大 SPOT 画像
(縮尺: 約 1/10,000)

図 2 コスモス写真とスポット画像の比較

表 2 ステレオ衛星画像取得のための衛星およびセンサー

国	衛 星	センサー	走査幅	地上分解能	打上げ年
米 国	Shuttle MAPSAT STEREOSAT	LFC	180km	15m	1984.10
		LAS	185km	10—30m	計画中
		LAS	61km	15m	計画中
フランス	SPOT	HRV	60km	10m	1986.2~
ESA	Shuttle	RMK	180km	15m	1983.12
ソ 連	KOSMOS	KFA1000	75km	5m	1988.6
日 本	ERS-1 ADEOS	OPS	75km	18×24m	計画中
		AVNIR	80km	8m	計画中
イ ン ド	IRS	MEOSS	256km	55m	計画中

分だけ誤差伝播の影響を受ける。次の式は、平面位置および高さの精度を与える式である。

$$\sigma_x = \sigma_y = H/f \cdot \sigma_{xy}$$

$$\sigma_z = H/B \cdot H/f \cdot \sigma_p$$

ここで、 H ：高度、 f ：焦点距離、 H/f ：写真縮尺の逆数、 B ：基線長、 σ_{xy} ：写真座標の平面精度、 σ_p ：ステレオ写真上の視差精度

B/H 比が1.0なら高さの精度は平面位置精度と同じであり、 B/H が0.5なら高さの精度は2倍悪くなる。

表3は地形図作成に必要な精度と地上分解能を示したものである。従来の地形図は線地図(Line drawing map)であり、輪郭線が正確に描かれていなければならない。そのため表3に示すような厳格な精度が要求される。衛星画像を正確に補正して画像の形で地図がわりに使ういわゆる画像地図(Image map)を作成する場合には、上記の基準は2倍に緩められる。

従来と同じ5万分の1の縮尺の線地図を作成するには地上分解能が3～6m必要である。フランスのスポットの地上分解能10mを単純に表3をあてはめると、得られる地形図縮尺は10万～15万分の1程度である。

平面位置精度が約±1画素と考えると、高さの精度は理論上 B/H 比が1.0場合で±1画素、 B/H 比が0.5の場合で±2画素となり、スポット画像の場合、高さの精度は良くて±10m、普通で±20mである。したがって得られる等高線間隔は高さの精度を3倍すると、30～60m程度になり、20mの等高線間隔を必要とする5万分の1の地形図の作成は困難であると考えられる。

表3 地形図作成に必要な精度と地上分解能

地形図 縮尺	要求される精度 (m)			必要とされる地上 分解能(m/pixel)
	位置	高さ	等高線間隔	
1/250,000	75	33	100	14～30
1/100,000	30	13	40	6～12
1/50,000	15	7	20	3～6
1/25,000	7.5	3	10	1.5～3

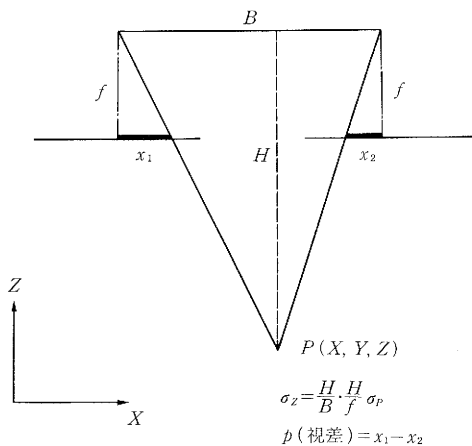


図3 基線高度比と高さの精度

3. ステレオ画像の標定問題

ステレオ画像から地形の三次元測定を行うには、地上の同一地点を異なる衛星位置から画像化したときの2本の光路の空間直線の交点を決定しなければならない。この空間直線の式を定めるためには、センサーが画像を取得したときの位置(X_0 , Y_0 , Z_0)と視準方向の姿勢(ω : ロール角, ϕ : ピッチ角, κ : ヨー角), および画像座標(u , v)の間の幾何学が確立されていなければならない。

この空間直線は、写真測量学では、投影中心(センサー)、像点および地上点が直線を構成しなければならないという共線条件式(Colinearity equation)で与えられる。

衛星軌道あるいは位置は表4に示されるように最近ではGPSを用いれば約10mと高精度で得られる。衛星の姿勢の計測精度は、0.01°程度であるが、ステラカメラの開発により2～5秒と精度が高くなった。しかし、このような精度でも、地形の三次元形状を正確に求めるのに十分ではない。

そこで、画像上で明瞭に識別できる点あるいは線で、地上の座標が地図上あるいは地上測量で与えられる、いわゆる基準点を利用して、計算で外部標定要素(X_0 , Y_0 , Z_0 , ω , ϕ , κ)を求める方法が採用される。これを

表4 衛星位置計測精度

計測システム	飛行方向(X)	直角方向(Y)	高度(Z)
衛星追跡三角網方式(STDN ¹ , 現在)	110m	130m	130m
追跡およびデータリレー方式(TDRSS ² , 1984)	430m	460m	90m
Post flight analysis	75m	75m	50m
航行衛星, 全測位システム(NAVSTAR ³ , GPS 1990)	7m	7m	10m

- 1) STDN: Spacecraft Tracking and Date Network
- 2) TDRSS: Tracking and Data Relay Satellite System
- 3) NAVSTAR: Navigation Satellite Timing and Ranging

表5 衛星姿勢計測精度

衛星	計測システム	ω : ロール角	ϕ : ピッチ角	κ : ヨー角
LANDSAT-1, 2, 3	Horizon+Gyro	0.01°	0.01°	1.0
LANDSAT-4, 5	IMU ¹ +Stellar	0.01°	0.01°	0.01°
Shuttle	IMU	0.5°	0.5°	0.5°
	Star camera	5"	5"	5"
	EO Stellar ²	2"	2"	2"

- 1) IMU: Inertial Measuring Units (慣性測量機器)
- 2) EO Stellar: Electro Optical Stellar system

標定 (orientation) とよんでいる。フィルムによる写真の場合には 6 つの未知変量でよいが、電子画像方式の場合には、上記の 6 つの要素は、時間あるいは走査番号の多項式として与えられるので未知変量の数は 18~24 と増加する。多項式は最大 3 次にすればよく、軌道 (X_0 , Y_0 , Z_0) は線形ないし 2 次式で十分である。

標定の精度は基準点の地上座標の精度、画像座標の識別精度、基準点の分布と数に依存する。特に基準点の地上座標の精度は全体の精度を大きく支配することがわかっていて、使用する衛星画像の地上分解能の 0.1 ないし 0.2 ピクセル程度の精度を保有することが望ましい。デジタル画像の場合、通常の方法では画像座標は整数値となるが、内挿を行ったり、 $n \times n$ のウィンドウのテンプレートマッチングなどにより小数点のいわゆるサブピクセル (Subpixel) の精度に高める必要がある。

標定の精度は良い条件のもとで最高約 ± 0.5 ピクセル、普通で ± 1 ピクセル、やや悪くて ± 1.5 画素程度となる。

4. 地形図の自動作成

電子画像方式の場合、画像はデジタルで与えられるが、標定終了後ステレオ画像の対応点の画像座標を求め方法に次の 2 つがある。

- (1) デジタルデータをいったんフィルムのアナログ画像に変換し、ステレオコンパレータまたは解析図化機など光学的方法により人間の目による立体観察でステレオ対応点の座標を計測する。
- (2) デジタルデータのままで、コンピュータにより、いわゆるステレオマッチングにより自動的にステレオ対応点を求める。

(1) の方法は、既存の写真測量用の装置を利用するものであり、解析図化機を利用すれば等高線の描画が可能である。ただし、スポット画像の場合、写真のように中心投影像ではないので、中心投影像と仮定した時に生じる系統的誤差をリアルタイムで補正する特殊なプログラムを付加する必要がある。この場合、1 ピクセル $25\mu\text{m}$ 以下の高解像でフィルムに正確に画像化するとともに、コントラスト強調などオペレータが計測しやすい画像にす

ることがきわめて重要である。

(2) の方法は、近年国際的に競争となっている研究課題であり、いまだに特殊なケースの完全解決が図られていない。

ステレオマッチングにはいろいろな方法があるが、今のところ画像相関法が一般に利用されている。画像相関法は図 4 に示すように、ステレオ画像の左画像の P_1 を囲む $n \times n$ の相関窓を取り、右画像上に同じ大きさの探索窓を動かし、対応する画像の相関係数が最大値を示す点をもってステレオ対応点とする方法である。この方法は相関窓の取り方が問題となる。地形起伏が急であると探索窓を相関窓と同じ大きさにすると同一領域に対応しなくなる問題がある。大きな窓を利用すると迷走などの問題は解決するが、細部の対応が悪くなる。そこで、図 5 に示すように、最初に雑音の少ない低周波域で粗いマッチングを行い、次第に高周波域にして詳細な対応点を探る多段階相関法が採用される。投影歪の影響は高周波域に生じるので狭域な帯域フィルタにより高周波成分をカットする必要がある。このようなフィルタとして、LG フィルタ (Laplacian of Gaussian Filter) が用いられる。

スポット画像の場合、相関窓は雑音成分が最も小さくなる $7 \times 7 \sim 11 \times 11$ ピクセルである。

ところで、探索を 2 次元に行うのは探索時間を要するので、2 次元の探索を 1 次元にするために図 6 に示すようにエピポラー線 (Epipolar line pair) を求め、エピポラー線対上にステレオ対応点が存在していることを利用する。しかし、エピポラー線対をそのつど求めるのは大変なので、図 7 に示すように撮影基線を X 軸とし、Z 軸方向をカメラ軸と一致させたモデル座標系の XY 平面に投影して、いわゆる偏位修正 (rectification) した画像を内挿、再配列してデジタル的に作成する。

5. スポット衛星のデジタルステレオ画像を用いた地形図作成の応用例

1986 年 3 月 7 日および 3 月 8 日の 2 日間に富士山を含

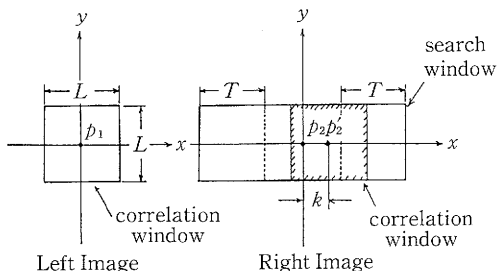


図 4 画像相関法概念

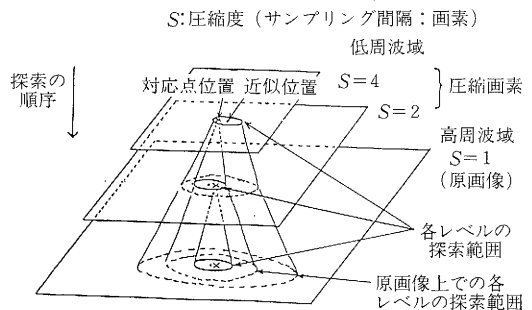


図 5 多段階相関法概念

む地域のスポットステレオ画像が取得された。3月7日画像はほぼ鉛直(4.1°東)であり、3月8日画像は斜め(23.8°西)で B/H 比は0.61であった。

図8はデジタル偏位修正を終えたスポット画像の一部を切り出したステレオ画像である。

図9は画像相関法により得られた地形標高から等高線を描き正射画像の上に重ねたものである。

図10は2.5万分の1の地図から求めた100mごとの等高線(破線)と、スポット画像から自動的に計測した等高線(実線)を比較したものである。地形図の標高と、スポット画像から求めた標高との偏差は $\pm 15 \sim 17\text{m}$ であった。等高線を比較するとほぼ一致しており、概略の地形形状を求めるのには十分利用できることがわかる。精度

から見て40m間隔の等高線描画が可能である。

ま と め

衛星画像を利用した地形計測の当面の目標は20m間隔の等高線を有する5万分の1の地形図の作成である。現在の衛星画像はもう少しのところまで来ているが、この目標には達していない。衛星画像の分解能が現在の10mから6mに向上する必要がある。地図作成の精度を向上させるには基準点の精度を上げる必要があり、今後は米海軍の衛星を利用した地球測位システム(Global Positioning System; GPS)の活用が期待できる。20世紀中に上記の目標が達成されることを望む次第である。

最後にリモートセンシング技術センターの長幸平氏お

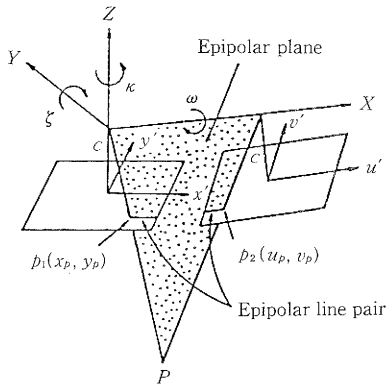


図6 エピポラー線対

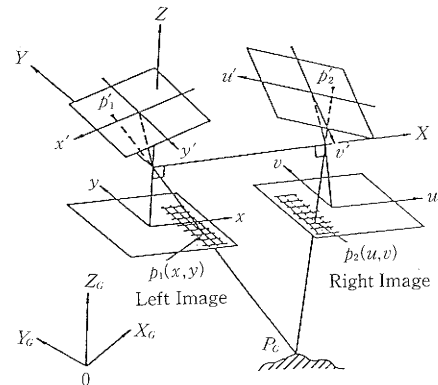


図7 デジタル偏位修正

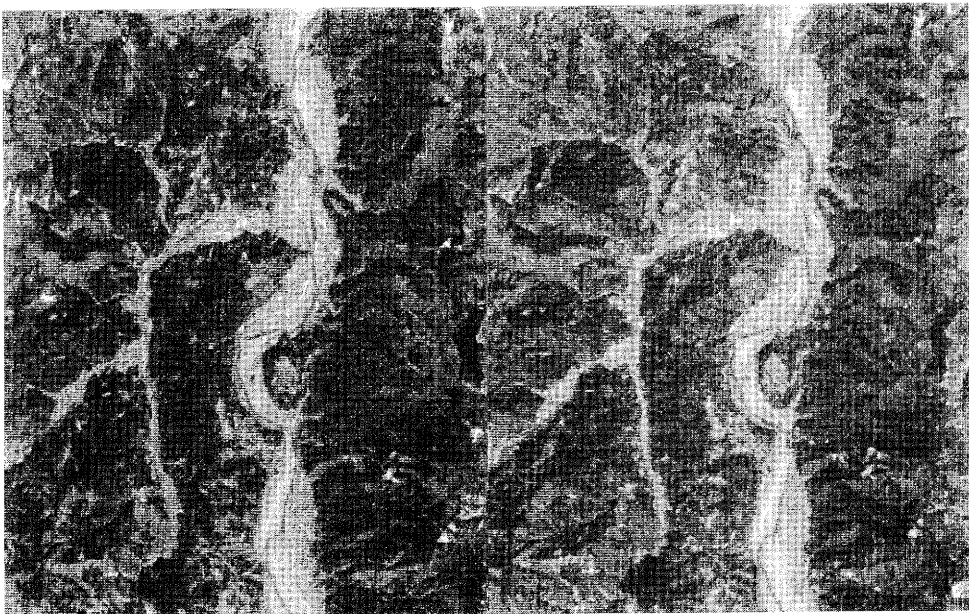


図8 デジタル偏位修正されたステレオ画像



図9 等高線を重ねた正射影像

よびアジア航測の内田修氏に多大の御協力をさせていただいたことに謝意を表したい。(1989年8月2日受理)

参考文献

- 1) Colvocoresses, A.P.: An Automated Mapping Satellite System (MAPSAT), PE & RS Vol. 48, No. 10, 1982.
- 2) 国土地理院：ステレオ宇宙写真による中縮尺地図作成への可能性に関する作業報告書，1986.
- 3) 国土地理院：デジタルステレオ衛星画像による地図作成の可能性に関する研究作業報告書，1987.

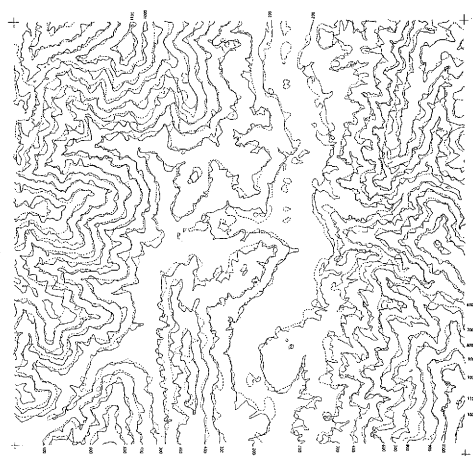


図10 等高線の比較

実線：地形図の等高線

点線：自動作成された等高線

- 4) 内田修：ステレオ衛星画像を用いた3次元計測の自動化に関する研究；岡山大学工学部学位論文，1989.
- 5) 村井俊治，柴崎亮介；リニ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.
- 6) 服部進，森忠次，内田修，藤原重雄；空中写真のステレオマッチングのための多段階相関法の改良（I），（II），写真測量とリモートセンシング，Vol. 25, No. 1, No. 2, 1980.
- 7) Hoffman, O.: Investigations of the Accuracy of the Digital Photogrammetry System DPS, A rigorous Three Dimensional Compilation Process for Pushbroom Imagery, 15th ISPRS Congress, Com. IV, 1984.
- 8) 長幸平，木村宏，竹内章司：SPOT画像とKFA1000宇宙写真の比較；写真測量とリモートセンシング，Vol. 28, No. 3, 1989.