

特徴線を使ったSPOT画像のバンドル調整

服部 進*・内田 修**・森 宣彦***

A bundle Adjustment of SPOT Imagery Using Feature Line

Susumu HATTORI, Osamu UCHIDA and Nobuhiko MORI

ABSTRACT

SPOT, a remote sensing satellite for cartography, needs many control points for orientation of images because of the weak imaging geometry due to narrow field of view. This paper discusses the validity of use of feature lines instead of ground control points in orientation of SPOT images. Ground coordinates of feature lines can be obtained by the GPS (Global Positioning System using specially designed geodetic satellites).

In the paper the bundle adjustment for the orientation is discussed, in which feature line data are incorporated in the form of spline functions as controls with 1-D unknown parameters. The method is tested on three overlapping scenes imaging the Mt. Fuji area. The result shows the formulation is valid, and the use of feature lines as controls is fully practical.

梗概

SPOTは地形図作成用のリモートセンシング衛星である。SPOT画像からの地形図作成には、画像の標定(センサの空間位置と方向を決めること)問題を解く必要がある。SPOTのセンサはラインCCDであり、かつ非常に狭い画角で撮影しているため幾何的強度が低く、標定のためには地上基準点を多く必要とする。しかし現実には多くの基準点をとるのはむづかしい。この論文では基準点のかわりに海岸線や道路などの特徴線を基準点の代用とする標定法を議論した。特徴線の3次元座標は測地衛星によるGPSを使えば容易に計測ができる。

ここでの標定法は地形図に用いる平面直角座標系を3次元曲線直交座標系に拡張して標定座標系とする。標定

要素を線型展開し、その未知係数を共線条件から最小2乗法で求めた。特徴線は曲線長を未知パラメータとして3次スプライン関数で表わし、観測式に組み込んだ。

富士山周辺の重複するシーンを標定したところ、この方法は、おおむね妥当な結果を与えることがわかった。地上基準点を使った場合と特徴線を使った場合の標定結果の精度には後者の自由度が1高いことによる以外の本質的な違いはなく、特徴線による標定は充分実用になることがわかった。

1. はじめに

SPOTは中縮尺(5万分の1~20万分の1)の地形図を作成するために1986年フランスが打ち上げた衛星で

* 情報処理工学科 (Department of Information Processing, Faculty of Engineering)

** アジア航測株式会社システム開発課 (System Development Division, Asia Air Survey Co. Ltd.)

*** 日本電気株式会社 (Nihon Electric Company)

ある¹⁾。現在のところ、縮尺10万分の1以上の地形図が存在する地域は世界の50%に満たないため、広範囲の図化が安価に作成できる可能性を持つSPOTの利用には強い関心が払われている。

SPOTの画像はデジタルで得られるため、従来の写真による図化と異なり、計算機による画像処理の応用としてディスプレイ上で地形標高を測定し、等高線の描画、地物の図化が行える。実際この目的に沿って立体視のできる画像処理機が開発されている^{3),4),5)}。

SPOT画像を図化する際の大きな問題は、どの位置からどの方向に向けて撮像を行ったか、すなわち標定要素を決定することである。

SPOTの撮像方式はフィルムではなくラインセンサであるため、特別な標定法が必要である。これまでですでにいくつかの標定法が提案され、シミュレーションおよび実画像を使った解析でそれぞれの有効性や得られる標定精度を議論している^{6),7),8)}。これらは用いた数学モデルは異なるものの、地上にいくつかの基準点(3次元座標の分かっている点)を置いて、地上座標系と衛星の画像座標系との関係を最小2乗法で決定している点は共通である。必要な基準点数は1シーン(地上60km×60km)で5-7点⁹⁾でよしとする例から18点以上必要とする例まで報告者によってばらつきが大きい。

SPOT画像が極めて狭い画角(視野角4.3°)であること、大陸周辺部では重力異常が大きく、安定した位置、姿勢の制御がむづかしいことから、理論上少ない基準点で標定可能であっても、実用的には余裕を持った基準点数が必要であろう。

これまでの報告では、基準点として既存の小縮尺地形図から道路の交点、橋の中央などを拾っているが、実際問題では画像上で認識が容易なこのような特徴点はそう多くない。空中写真の標定のように、地上にターゲット(対空標識)を置くことも考えられるが、解像度の低い衛星画像(1画素地上10m)にはターゲットが大きくなって設置が容易でない。

新しい基準点の設置方法として最近実用化されたGPS(Global Positioning System)⁹⁾がある。GPSは地上の任意点に置いたアンテナで、頭上4個の衛星からの電波を受信し、アンテナの絶対位置(緯度、経度、標準回転楕円体またはジオイドからの高さ)を計算機で求める測位システムである。その位置精度は測位方式によって異なるが、干渉測位方式ではcmオーダの精度が得られる。GPSは極めて小型軽量であり、観測者が一人で受信器材を携帯できるため基準点の設置は容易である。

そこでもし海岸線や直線道路などの周囲と区別のつく画像の線構造(特徴線と呼ぶことにする)に沿ってアンテナを次々設置すれば、アンテナ自身は確認できなくと

もアンテナの軌跡は容易に確認できるであろうから、基準点の代用として使える。

この論文はGPSを使用することを前提とし、特徴線座標を基準量として標定を行い標定要素を求める方法を議論する。さらに地形図から採った基準点および特徴線を使ってSPOT画像を標定し、それぞれどの程度の標定精度が得られるかを実験的に検討するものである。

著者らの標定法は標定要素を多項式で展開し、地上座標と画像座標の関係を最小2乗法で決定する比較的単純な方法である¹¹⁾。この方法はKonecnyらのグループが開発した衛星の標定、図化システムBINGOにも用いられている⁷⁾。標定法自体を問題とすれば、衛星の運動や軌道の方程式を制約条件に組み込んだモデルが実用上より優れているであろう。しかし、ここでは主として基準点に関する議論であるためむしろこうした制約を含まないモデルの方が特徴線の有効性を判断しやすいと考え、制約条件を考慮しなかった。

第3節では投影モデルに関するだけでなく、座標系間の変換の問題、観測式に特徴線データを組み込む問題をあわせて議論する。Konecnyらはこれらの問題に充分言及していない。

標定精度は4節で評価し、基準点および特徴線以外の地上座標既知の点(検証点)での誤差から精度を評価した。

2. SPOT衛星と画像の概要

SPOT衛星はHRV(High Resolution Visible)CCDセンサを搭載している。HRVセンサは画素数6,000のラインセンサであり、push-broom走査方式、すなわち地上を熊手で掃くように走査する(図1参照)。1ラインは6,000画素(地上60km)、視野角は4.3°である。

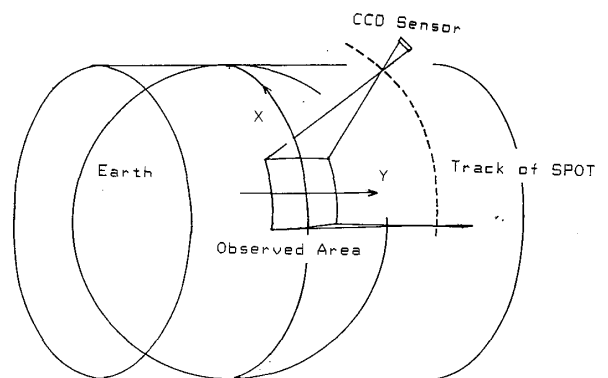


図1 SPOTの撮影方式と局所平面直角座標系
Fig.1 Imaging Geometry of SPOT and the Local Plane Rectangular Coordinate System
The origin of LPR coordinate system is set on about the scene center, at which the cylinder touches to the earth. The orientation is executed in the LPR coordinate system.

軌道方向には適当に6,000ラインを切りとって1ゾーンとしている。1画素は赤道上で地上10mに相当する。

画像は1画素6ビットで計測されている。磁気テープには輝度データ以外に衛星の位置および姿勢データが書き込んである(位置は1ゾーン1点、姿勢は72-73点)¹³⁾。これらのデータはそのままでは精度が充分ではなく標定要素としては使えない。ここではこれらを標定計算の初期値として用いた。

S P O Tは反射鏡の方向を変えて同一場所を異った軌道から観測することによって重複画像を得る。画像はラインごとには中心投影になっているので、写真測量の延長として図化が可能である。S P O T画像からは1:50,000の地形図の作成が目標とされているが、このためには20m間隔の等高線を描画する必要があり、これに要求される標定精度は15m(平面)および7m(高さ)である。

3. 特徴線データを用いたS P O T画像のバンドル調整式¹¹⁾

3.1 座標系

われわれの標定法では以下の座標系を使った。

(a) 地心座標系(U, V, W) - 図2に示すように標準回転楕円体の中心に原点を置き、赤道面にUV軸を置くデカルト座標系である。U軸は緯度0°の向きにとり、V軸は東経90°の向きに、さらにW軸は北極の向きにとる。衛星の軌道と運動は地心座標系で記述する。センサの外部標定要素(位置と方向)の概算値はこの座標系で与え

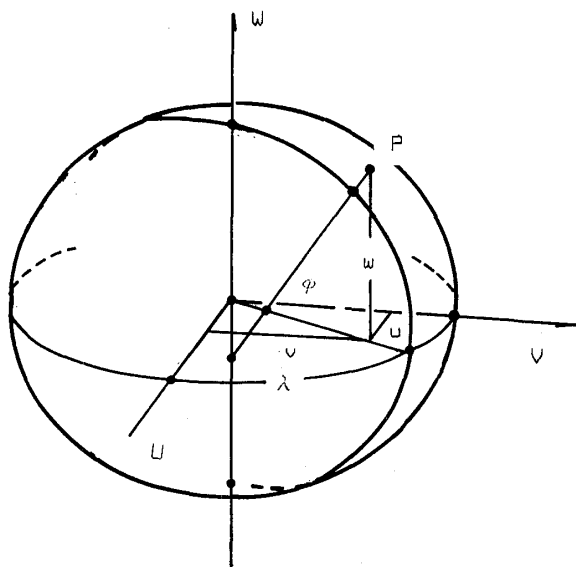


図2 地心座標系と地理座標系

Fig.2 Earth Center Coordinate System and Geographical Coordinate System

The orbit information (position and attitude) of the satellite is given referring to the EC coordinate system, while 3-D coordinates of ground points are observed in the Geographical coordinate system.

られている。

(b) 地理座標系(ϕ, λ, H) - 地上点の位置を表わすのに用いる。 ϕ は地理学的緯度(回転楕円体に降ろした垂線と、赤道を含む平面とのなす角)、 λ は経度、 H は回転楕円体からの標高である(図2)。

(c) (局所)平面直角座標系(X, Y, Z) - 本来公共測量での地形図に用いる投影法である。図1に示すように、地球回転楕円体に接する筒へ緯度、経度を投影した座標系である。対象地域のほぼ中央に原点をとり、Xを北、Yを東にとる。本来平面直角座標系は2次元座標系であるが、ここではこれを3次元の直交曲線座標系に拡張し、標高ZをXY面におろした垂線の距離にとる。標定はこの座標系で実行する。

標定計算では地心座標系で与えられるセンサの位置と方向のデータ、および地理座標系で与えられる地上点座標の値は平面直角座標系に変換した。

実際には計算の都合上地心座標も一旦地理座標に変換し、地理座標をGauß-Krügerの投影式で平面直角座標に変換した。

地理座標系の高さHは回転楕円体面からの距離でなければならないが、地形図から読みとる標高はジオイド(重力の基準等ポテンシャル面)高である。今の場合ジオイドの形が不明なので両者は一致するものと仮定して計算した。

(d) 画像座標系(x, y) - 衛星画像のライン番号(x)、画素番号(y)の座標系。中央走査ラインの中心画素を原点にし、衛星の進行方向にxをとる(図3参照)。したがって平面直角座標系のX軸と画像座標のx軸とは反対向きである。

(e) センサ座標系(x, y, z) - センサの投影中心に原点をおき、画像座標系と同方向にx, y軸をとる。zはx, y軸に直交する方向に地心と反対方向にとる。センサ座

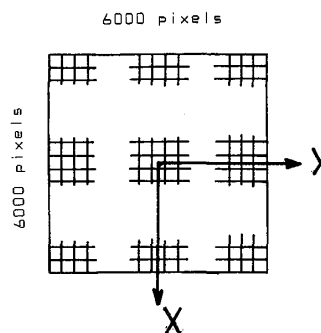


図3 画像座標系

Fig.3 Image Coordinate System of a SPOT image

The x-axis is taken in the proceeding direction of the satellite.

標系はセンサの回転行列を定めるために必要である。

3. 2 共線条件式

標定の基本式は共線条件式である。共線条件式は投影中心と画像点を通る直線が対応する地上点を通ることを示す式であり、push-broom型センサの共線式を平面直角座標系で表わすと、

$$\left. \begin{aligned} Fx = x' - f \frac{m_{11}(X-X_0) + m_{12}(Y-Y_0) + m_{13}(Z-Z_0)}{m_{31}(X-X_0) + m_{32}(Y-Y_0) + m_{33}(Z-Z_0)} = 0 \\ Fy = y' - f \frac{m_{21}(X-X_0) + m_{22}(Y-Y_0) + m_{23}(Z-Z_0)}{m_{31}(X-X_0) + m_{32}(Y-Y_0) + m_{33}(Z-Z_0)} = 0 \end{aligned} \right\} (1)$$

になる。この論文では光学系の内部標定要素（主点位置と画面距離）の値に公称値をそのまま使った、式(1)の記号は次のとおりである。

(X, Y, Z)は地上点の平面直角座標

(X₀, Y₀, Z₀)は時間あるいはライン番号Lでの投影中心の平面直角座標

fは焦点距離でf=1,082mm

(m_{ij})は平面直角座標でのセンサの回転行列で

$$(m_{ij}) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & \sin \omega \\ 0 & -\sin \omega & \cos \omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \phi & 0 & -\sin \phi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \phi & 0 & \cos \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \kappa & \sin \kappa & 0 \\ -\sin \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

で定義する。ω, φ, κはセンサ座標系x, y, z軸まわりの回転角で時間あるいはライン番号の関数である。(x', y')各ライン番号ごとの局所画像座標。主点位置はセンサの中央画像と一致するとするので

$$\begin{aligned} x' &= 0 \\ y' &= y \end{aligned}$$

になる。

式(1)は本来デカルト直交座標系について成り立つ式であって、平面直角座標系では成り立たない。しかし衛星は極軌道を取り、y軸とY'がほぼ平行で、y軸まわりの回転角φは0に近い実用の範囲で式(1)が成り立つと考える。

センサの外部標定要素をライン番号Lの関数として次式で与える。X₀₀, X₀₁, Y₀₀, Y₀₁, Z₀₀, Z₀₁, ω₀, φ₀, κ₀は未知定数である。

$$\begin{aligned} X_0(L) &= X_{00} + X_{01}L \\ Y_0(L) &= Y_{00} + Y_{01}L \\ Z_0(L) &= Z_{00} + Z_{01}L \\ \omega(L) &= \omega_0 \\ \phi(L) &= \phi_0 \\ \kappa(L) &= \kappa_0 \end{aligned} \quad (2)$$

この理由は次の通りである。

・衛星は地球の中心を焦点とする楕円軌道を航行するので撮影中心X₀, Y₀, Z₀を近似的に1次関数で与える。とくに地球の自転は画像データに西方向に対するスキュー歪を引き起こす。平面直角座標系では、地球の自転によ

る地表の表面速度と衛星の速度の比で表わされる方向にX₀は変化する。これはLの1次式である。

・衛星は常に地心方向に向くよう制御されるため、角度要素は定数とする。

なお大気屈折による位置歪はSaastamoinen¹⁴⁾によれば、地上たかだか1.2m程度であり、無視できる。

3. 3 バンドル調整の観測方程式

外部標定要素と基準点の直接または仮定の観測値が与えられているとし、式(1)の共線条件式を線型展開するとよく知られたバンドル調整の観測方程式を得る。

$$\begin{bmatrix} \underline{v} \\ \underline{v}_1 \\ \underline{v}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 & B_2 \\ -I & 0 \\ 0 & -I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{\Delta}_1 \\ \underline{\Delta}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{\varepsilon} \\ \underline{\varepsilon}_1 \\ \underline{\varepsilon}_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

ここで \underline{v} は残差ベクトル、 $\underline{\Delta}$ は未知パラメータの補正量ベクトル、 $\underline{\varepsilon}$ は線型化した観測式の残存量(discrepancy)ベクトルである。またBは $\underline{\Delta}$ に関する共線式の微係数行列、Iは単位行列である。添字1, 2はそれぞれ外部標定要素と地上点のXYZに関する諸量である。

3. 4 特徴線データに関する観測方程式

特徴線は道路の端や海岸線などの滑らかな空間曲線である。特徴線に沿ってGPSのアンテナを置くと、その位置は曲線の節点になる。そこで弧長sをパラメータとする3次スプライン関数¹⁶⁾で、曲線を次の様に表わすのが合理的である。

$$F = \begin{bmatrix} X(s) \\ Y(s) \\ Z(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_0 + A_1s + A_2s^2 + A_3s^3 \\ B_0 + B_1s + B_2s^2 + B_3s^3 \\ C_0 + C_1s + C_2s^2 + C_3s^3 \end{bmatrix} \quad (4)$$

A₀, A₁, ..., C₂, C₃は3次スプライン関数の係数であり、これらの係数は節点間の小区間ごとに变化する。我々のモデルでは曲線を自然スプラインとして係数を決定した。自然スプラインは曲線の端点で微係数 $\partial^2 F / \partial s^2 = 0$ と置く。ただし、曲線の端部分を使うことはないので、境界条件が精度に影響することはない。

また画像は立体観測できると仮定して、特徴線に沿って画像の点列の座標を計測する。式(1)の共線条件式の中の未知の地上座標X, Y, Zに式(4)を代入し、パラメータsを未知量とする線型化した観測方程式を立てると、1画像点毎に2つの式が立ち、次の観測方程式の系が得られる。

$$\underline{v}_f + H_1 \underline{\Delta}_1 + H_2 \underline{\Delta}_2 = \underline{\varepsilon}_f \quad (5)$$

ここでH₁, H₂は外部標定要素と曲線長に関する共線式の微係数行列、添字fは特徴線に関する諸量であることを示す。

式(3)、(5)をまとめて次式を得る。

$$(6)$$

$$\begin{pmatrix} v \\ v_1 \\ v_2 \\ v_f \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} B_1 & B_2 & 0 \\ -I & 0 & 0 \\ 0 & -I & 0 \\ H_1 & 0 & H_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta_1 \\ \Delta_2 \\ \Delta_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varepsilon \\ \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_f \end{pmatrix} \quad (6)$$

式(6)の重み行列 W の構造は次式になる(重みは事前分散の逆数で定義される)。

$$W = \begin{pmatrix} W & & & \\ & W_1 & & \theta \\ & & W_2 & \\ & \theta & & W_f \end{pmatrix} \quad (7)$$

ここで、 W : 画像座標の観測の重み行列(特徴線に対する観測を除く)。 W_1 : 外部標定要素の観測の重み行列。この論文では衛星の軌道に拘束を付けないので実際には W_1 は0行列。 W_2 : 地上座標の重み。地上基準点以外は0。 W_f : 特徴線の画像座標の観測の重み。

式(3)の観測方程式の系を最小2乗法で解いたとき、重み1の分散 σ_0^2 を

$$\sigma_0^2 = \frac{1}{n-p} (v^T W v + v_1^T W_1 v_1 + v_2^T W_2 v_2 + v_f^T W_f v_f) \quad (8)$$

で定義する。 n は観測式数、 p は未知パラメータ数である。 σ_0^2 は式(2)のあてはめ精度を示すと考えてよい。

4. 標定精度の実験的検討

4.1 画像資料と前処理

この実験では富士山を含む60km×60kmの地域を対象

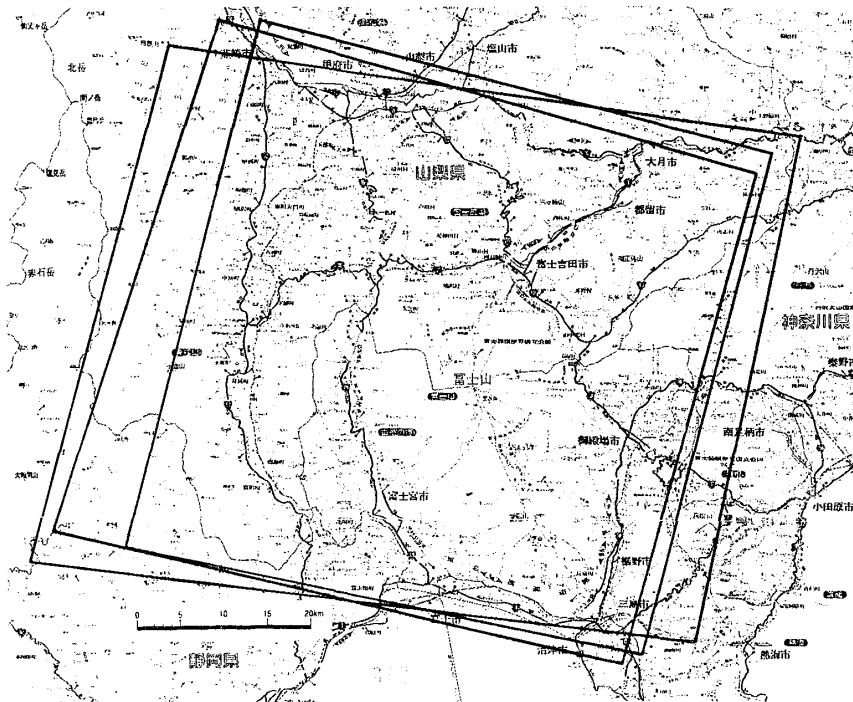


図4 実験に使った3シーン(3/17, 3/7, 3/8)の地上被覆の範囲
Fig.4 Ground Coverage of Three SPOT Scenes (3/17, 3/7, 3/8) Used in the Experiments.

とし、図4に示すように100%重複する3シーンのSPOT画像を用いた。この領域は標高0mから3,775mに渡る大きな標高差がある。3シーンのデータを表1に示す。撮影日時が異なるため、雲や降雪の状態が変り一部立体視しにくい。3枚の画像は東西方向に収束角を持つ。シーン名には撮影日を使っている。図5に本画像3117の画像を示す。3117には雲が多く、3シーン共通の基準点をとるのに制約を受けた。図6は3シーンの撮影位置の関係を示した。Y, Z軸は平面直角座標系を示す。

画像は処理レベル1A (CCDセンサの感度のばらつきのみを補正した生データ)である。画像座標を高精度で計測するには立体視が不可欠であるが、そのための適当な画像処理機が利用できなかったため、ここでは画像をフィルムに焼いて、解析図化機で観測した。フィルムに焼き付けるフォトプリンタ(阿部設計3302A、フィルムサイズは1画素 $20\mu\text{m}$ で $150\text{mm} \times 150\text{mm}$)はドラム型であったので、フィルム巻き付け時の歪が無視できない。そこで10mm(400画素)間隔のレゾー14×14個を1画

表1 3シーンのSPOT画像データ

Table 1 SPOT Image Data for Three Scenes

シーン名	3/17 左画像	3/7 鉛直画像	3/8 右画像
撮影日時	1988.3.17	1988.3.7	1988.3.8
オフナディア角(ω)	15.4°東	4.1°東	23.8°東
収束角	11.3°		27.5°
雲量	20%	3%	10%
降雪	あり	なし	なし

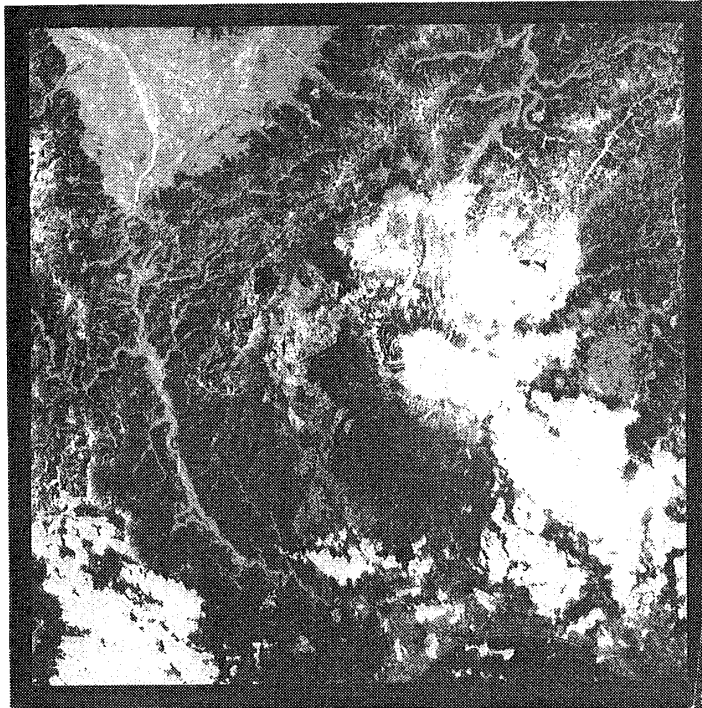


図5 シーン3/17 (左画像)

Fig.5 Scene 3/17 (Left Image)

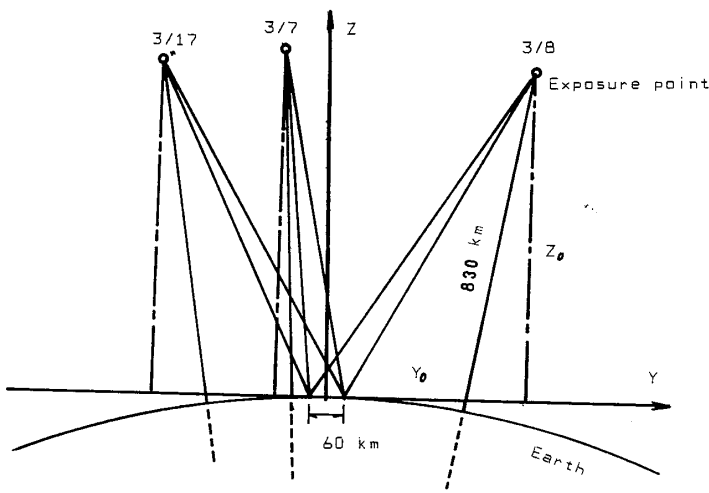


図6 3シーンの撮影位置

Fig.6 Exposing Position of Three Scenes
The Y- and Z-axes are in the LPR
coordinate system.

素の太さで画像に書き込んでその座標を計測した。そして各画像点ごとに周囲4×4個のリゾーマークをとり出し、疑似アフィン式をあてはめて画像座標の歪を除去した。

4.2 基準点、特徴線の地上座標および画像座標の測定位置の基準点を、位置的に偏った分布を示さぬ様注意して25,000分の1地形図上で選んだ。基準点はなるべく均等に分布するように選んだが富士山中腹部には欠落がある。これらは3シーン共通にとれ、かつ地形図編集の際地物表記の図式のために位置および形が変更されてい

ないことを画像上で確認した。この結果道路の交点、屈曲部、橋の中央、河川の交点、貯水池のコーナー、大きな建築物のコーナーなどを選んだ。

測定には0.1mm読みのディジタイザを用い、倍率3倍のルーペを通して2回読んだ。平面位置の最大偏差は0.23mm(地上5m)であった。

特徴線データについては基準点の効果と比較するため、基準点を中心に含むように選定した。特徴線はスプライン関数で充分線形を表現できるよう節点間隔を目測で決めた。標高値は10m間隔の等高線を1mまで読みとった。

一方画像座標の読みとりは次の様にした。3シーンの中央の画像(3/7)の測定点に点刻機(Kern PG2)で40 μ m ϕ の穴をあけ、(3/17)(3/7)、(3/7)(3/8)のそれぞれを立体視して、精密立体座標測定機(Zeiss Jena Stecometer)で1 μ mまで読んだ。

上記の観測値に対する重みは、事前分散の逆数として次の値を与えた。

- 基準点、特徴線データの重み—地形図の描画精度に等しいとし、平面方向の重みを $1/(12.5)^2$ (m^{-2})、高さ方向の重みを $1/(5.0)^2$ (m^{-2})とした。これは25,000分の1地形図の位置精度を図上0.5mm、高さ精度を等高線間隔(=10m)の1/2としたものである。
- 画像座標の重み—ホジフィルム上の画素の大きさが25 μ m×25 μ mで、点刻した穴の直径が40 μ mであることから、測定精度を40 μ m(地上16m)とし、x,y両方向とも重みを $1/(0.04)^2$ (mm^{-2})とした。

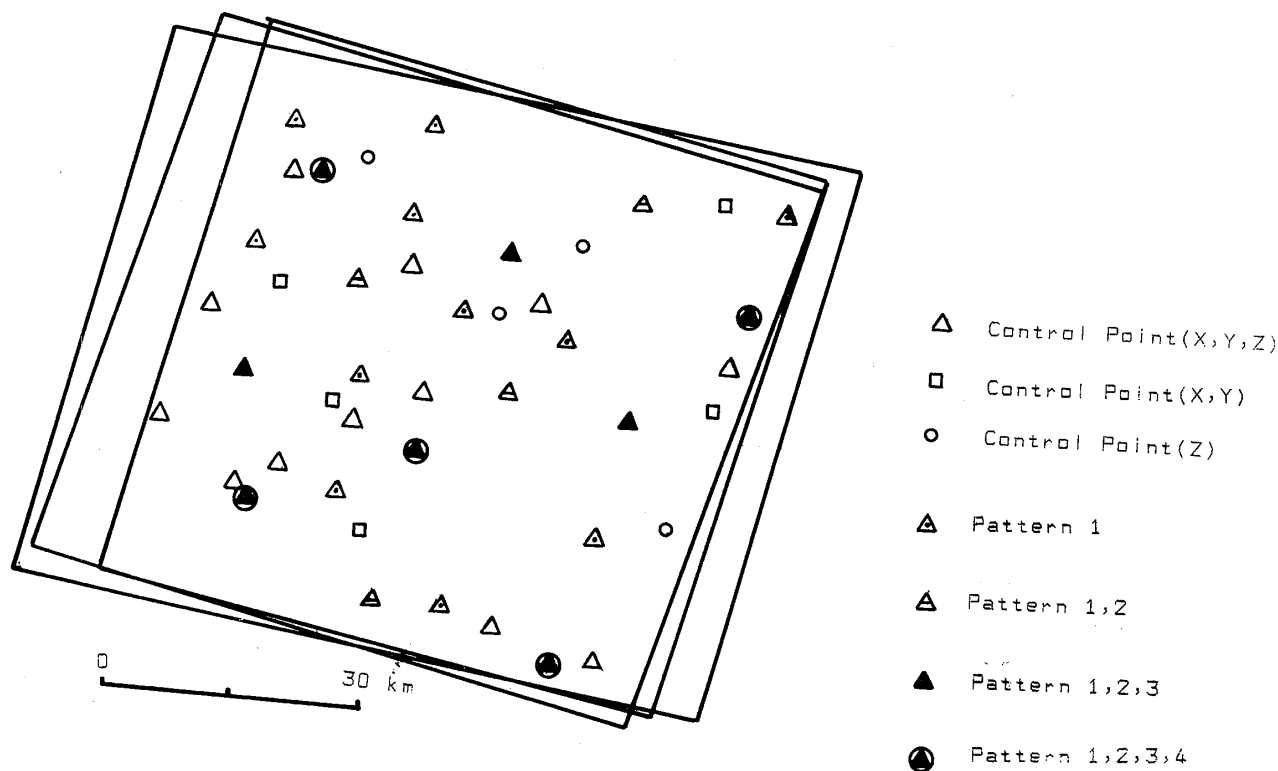


図7 地上基準点と特徴線データの配置

Fig.7 Disposition of Ground Control Points and Feature Line Data $\triangle \square \circ$ stand for ground control points XYZ, XY and Z coordinates are given respectively. There are 4 disposition patterns of 3-D control points and feature lines. The distribution patterns are shown by the symbols $\triangle \triangle \blacktriangle \bullet$. Control points in pattern 1 consist of all the points expressed by 4 symbols, for example.

5. 特徴線データの効果の検討

5.1 基準点と特徴線の配置

基準点および特徴線データの数と配置を変えて標定を行い、ここに示した標定法の妥当性を調べ、かつ特徴線データを標定に用いたときの効果を検討した。

式(2)から、決定すべき外部標定要素の数は3枚の画像で27個である。これらの未知数は地形が平坦でなければ全て独立である。未知数の値を決定するのに必要な基準点数は、X、Y、Zの値が与えられている場合5点以上 ($5 \times 2 \times 3 > 27$) であり、3次元的方向を持った特徴線では6線以上 ($6 \times 2 \times 3 - 6 > 27$) 必要である。

図7は実験で選んだ基準点と特徴線の配置である。 \triangle 、 \square 、 \circ はそれぞれ3次元(X,Y,Z)、平面(X,Y)、高さ(Z)が与えられた基準点である。特徴線は3次元座標の与えられた基準点の位置でのみ設定し、位置のずれによる影響を消去した。

5.2 いくつかの基準点、特徴線の配置パターンでの標定結果

基準点、特徴線を混ぜず、図7に示す4つの配置パターンで標定を行った。基準点は全て3次元座標が与えられている。パターン1の基準点はパターン2の基準点を含み、パターン2の基準点はパターン3の基準点を含む。

以下同様である。パターン1、2、3、4はそれぞれ23、12、8、5個の基準点または特徴線を含んでいる(パターン4は基準点のみ)表2に各パターンでの検証点(標定に使った基準点以外の基準点を全て標定精度の検証点として用いた)での残差の平均2乗値(RMS誤差)を示した。図7、表2から次のことがわかる。

・パターン1で得られた検証点のRMS誤差は充分な(10点以上)基準点または特徴点がある場合各方向とも10m~14mであった。これは25,000分の1地形図上0.5mm(画像上1画素強)であり、ほぼ期待される標定精度であるといえる。すなわち式(1)、(2)の定式化はおおむね

表2 基準点および特徴線の数と配置による標定精度
Table 2 Orientation Precision for some distribution patterns of Ground Control Points and Feature Lines
 σ_0 means the root of a variance with weight unity in adjustment.

実験 No.	基準点 特徴線の別	基準点、特徴線の分布パターン	検証点のRMS誤差(m)			σ_0 (μm)
			X	Y	Z	
1	基準点	1 (23)	14.3	9.8	13.8	10.3
2	基準点	2 (12)	13.2	12.0	14.4	9.7
3	基準点	3 (8)	12.3	17.5	16.5	6.6
4	基準点	4 (5)	19.1	17.1	14.5	5.7
5	特徴線	1 (23)	14.0	11.2	13.3	10.4
6	特徴線	2 (12)	16.6	13.4	14.4	9.4
7	特徴線	3 (8)	14.7	25.1	16.1	7.1

基準点、特徴線の分布パターンの項はパターン番号(点数)を示す。

妥当である。ただしこの精度では描ける地形図の縮尺はたかだか1:100,000である。

・表2中の重み1の標準偏差 σ_0 は基準点数が減るに従って減少する。これは基準点数が減ることによる不安定性を超えて、式(1)のあてはめ精度が良くなることを示す。しかしパターン1、2、3では検証点でのX(画像のライン方向)、Z方向のRMS誤差は基準点数の減少にも拘らずあまり変わらない(Y方向のみは変化する)。

このことから、式(2)で投影中心をLの1次式とし、回転角度を未知定数と置いたのはやや単純すぎて高次の変動が吸収できていないことがわかる。そのため基準点数が少ないとあてはめ精度が良くなり、 σ_0^2 は小さくなるが検証点での残差は大きい。

・特徴線を使ったときの標定精度は、基準点のみのときの標定精度と本質的に差がなく、充分基準点の代用になり得る。基準点を使ったときの σ_0^2 は、特徴線を使ったときよりやや小さい。これは後者の自由度が1つ高いことによる。

・基準点数、特徴線数が少なくなるとY方向の誤差が大きい。これは内部標定要素の y_0 (主点の画素方向の位置ずれ)に誤差があることを疑わせる。

結 論

この論文は人工衛星SPOTの画像を標定するのに、多数必要とする基準点のかわりに、道路、海岸線などの線構造(特徴線)を使って標定する手法を論じた。特徴線の3次元座標(特徴線データ)は測地衛星を使ったGPS(Global Positioning System)から得られる。標定には、局所平面直角座標系を3次元曲線直交座標系に拡大した座標系を用い、共線条件式に基づくバンドル調整を行った。特徴線データはスプライン関数で表現し、曲線長を未知パラメータとして調整式に組み込んだ。富士山周辺の重複する3シーンの画像を標定したところ次の結果を得た。

・この論文での標定法および定式化はおおむね妥当である。ただし、標定要素のうち撮影点を時間(実際には画像のライン番号)の1次式、回転角度を未知定数にとったため高次の変動を吸収しきれなかった。

・基準点と特徴線による標定での精度については、後者の自由度が1増えることによる低下以外の違いは認められなかった。したがってGPSを用いた標定法は十分に実用的である。

・基準点、特徴線とも10点(本)以上必要である。

参考文献

1) Chevrel M., M.Courtois and G.Weill ; The SPOT Satellite Remote Sensing Mission, Photo-

grammetric Engineering and Remote Sensing, vol.47, No.8, pp.1163-1171 (1981).

- 2) Asche, H ; Thematic Mapping for Developing Countries Using Metric Camera Imagery, ISPRS Proceeding of Symposium - Mapping from Modern Imagery, Scotland, pp.278-287 (1986).
- 3) 大谷仁志 ; ステレオ画像解析システム, 映像情報インダストリアル, Vol.21, No.25, pp.49-54 (1989).
- 4) Hattori, S, S.Murai, H.Ohtani and R.Shibasaki, A Semi-Automatic Terrain Measurement System for Earthwork Control, PE & RS, vol.55, No.5, pp.573-579 (1989).
- 5) Lohmann, P, G.Picht, J.Weidenhammer, K.Jacobsen and L.Skog ; The design and Development of a digital Photogrammetric Steres Workstation, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, vol.44, pp.215-224 (1989).
- 6) Trinder, J.C and B.E.Donnely, SPOT Software for Wild AVIOLYT BC2 Analytical Plotter, ISPRS Kyoto, Commission IV, pp.412-421 (1988).
- 7) Konecny, G., E.Kruck and P.Lohmann, Ein Universeller Ansatz für die Geometrische Auswertung von CCD-Zeilen abtaster aufnahmen, Bildmessung und Luftbildwesen, vol.54, No.4, pp.139-146 (1986).
- 8) Kratky, V. ; Rigorous Photogrammetric Processing of SPOT images at CCM Canada, ISPRS Journal of P & RS, vol.44, pp.53-71 (1989).
- 9) 日本測地学会編 ; GPS-人工衛星による精密測位システム-1, p272 (1989).
- 10) Konecny, G, P.Lohmann, H.Engel and E.Kruck ; Evaluation of SPOT Imagery on Analytical Photogrammetric Instrument, PE & RS, vol.53, No.9, pp.1223-1230 (1987).
- 11) 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, 岡山大学博士論文, (1990年).
- 12) Bomford, G ; Geodesy, fourth edition, Clarendon Press, pp.191-194 (1987).
- 13) SPOT HRVデータ CCTフォーマット説明書, 宇宙開発事業団地球観測センター(1989).
- 14) Saastamoinen, J. ; Refraction, PE & RS, vol.38, pp.798-810 (1972).
- 15) American Society of Photogrammetry ; Manual of Photogrammetry, pp.88-101 (1980).

- 16) 市田浩三, 吉本富士市; スプライン関数とその応用, 教育出版, pp.43-59.
- 17) 服部 進; いくつかの走査型微小濃度計の位置精度について, 情報処理学会論文誌, vol.28, No.12, pp.1318-1327 (1987).