

アフィン投影に基づく 衛星ラインスキャナ画像の標定法

服部 進¹・山川 毅²・小野 徹³・長谷川 博幸⁴

¹ 正会員 工博 福山大学教授 工学部情報処理工学科 (〒 729-0292 福山市 学園町 1 丁目)
E-mail: hattori@fuip.fukuyama-u.ac.jp

² 工修 京都大学学生 工学研究科環境地球工学 (〒 606-8501 京都市左京区吉田本町)
E-mail: yamakawa@info.gee.kyoto-u.ac.jp

³ 正会員 工修 京都大学助手 工学研究科環境地球工学 (〒 606-8501 京都市左京区吉田本町)
E-mail: ono@jf.gee.kyoto-u.ac.jp

⁴ ジオネット株式会社 代表取締役 (〒 222-0033 横浜市港北区新横浜 1-13-12-802)
E-mail: hasegawa@geonetz.com

中, 大縮尺地図作成用の衛星画像標定法として, アフィン投影に基づく標定法を提案した. 衛星が安定したケプラー軌道を航行すること, および衛星画像の画角が極端に狭いことに注目し, 従来の中心投影式に代わりアフィン投影式を採用した. その結果, 中心投影式で問題となるオーバーパラメタリゼーションが回避され, 少ないパラメータで安定した標定結果を得られることを示した. この論文はアフィン投影に基づく標定法に関する理論的基礎を明確にし, SPOT および MOMS-2P 画像を使った標定実験によって, その実用性を確認したものである. それぞれ 1 シーン (60kmx60km および 50kmx150km) の画像を扱い, 4 点および 9 点の基準点で平面/高さ方向共に 1 画素以内の外的精度 (検証点での RMS 誤差) を達成した.

Key Words: *affine projection, sensor orientation, satellite mapping, SPOT, MOMS-2P*

1. はじめに

地図作成用の地球観測衛星として 2002 年 2 月現在, アメリカから IKONOS-2 (2000 年, 地上解像度 1m), QuickBird-2 (2001 年, 60cm), インドから IRS-1D (1997 年, 5m), フランスから SPOT (1986 年から, 10m) が打ち上げられている. 2003 年には日本から ALOS (地上解像度 2.5m) の打ち上げも予定されていて, ようやく本格的に衛星から地図を作る時代に入ったといえる.

これらの衛星は長焦点の光学系を採用して高解像度の画像を取得している. 撮像システムとして, 通常のカメラに対応するエリアセンサはコスト面, 技術面などの制約から現段階では実用化されておらず, 全て 1 次元の CCD ラインセンサを搭載している. 1 次元センサを衛星の進行に合わせて連続的に地表を走査することで面的な撮影を行う (プッシュブルーム撮影方式). しかし図化は従来の空中写真測量と同じステレオ方式であり, そのため高精度で安定した標定法が必要となる.

これまでに提案されている標定法の多くは, 伝統的な中心投影式に基づいている. しかし, プッシュブルーム撮影方式では各線画像がそれぞれ異なる標定要素を

持つので, エリアセンサに比べて幾何学的安定性が劣る. また, 極端に狭い画角のために標定要素間に強い相関が生じる. このため標定精度が悪化し, 充分安定した標定精度を得るに至っていない. 近年打ち上げられた衛星の中には, GPS, INS, Star Tracker を搭載して外部標定要素を直接測定するものもある. しかし現在のところ, 高精度軌道情報を利用した標定実験報告はほとんど見られず, またこれらの内部情報だけで実用的な精度が得られるかはやや疑問であり, 地上基準点は今後も必要である可能性が高い.

上記の問題を解決するとともに, 1m 解像度衛星画像を図化する標定法を確立するため, 岡本³⁾(11), 20), 26)–31) は一連の論文を発表し, 中心投影に代わるいくつかの標定法を提案した. 結論としてアフィン投影に基づく標定法が中心投影に基づく標定法よりも高精度の計測が得られることを示し, さらに実験によってこれを示した. しかし岡本は 1999 年 2 月全体の理論を統一的に整理する前に急逝した. 著者らはこの論文で, 岡本が提案したアフィン投影に基づく標定法を体系的に示すとともに, アフィン投影の理論的根拠について詳しく検証する.

論文をできるだけ自己完結的にするため, まず第 2

章において実験に使った SPOT, MOMS-2P の軌道とセンサ及び地上座標系について概説し、これまでに発表された標定法を整理する。第3, 4章で、アフィン投影に基づく標定法の数学モデルならびにその理論的根拠を示す。アフィン投影が成り立つにはいくつかの仮定があり、それらが妥当であるかを検証する。最後に、第5章で SPOT, MOMS-2P 画像を用いた標定実験を報告する。

アフィン投影に基づく標定法は画角が狭いほど適合性が高い。今回の実験で用いた衛星画像よりもさらに狭画角の IKONOS 衛星画像はすでに入手可能であったが、軌道情報、センサ情報が公開されておらず、また幾何補正未処理画像の入手が困難であったために適用を断念した。IKONOS などの高解像度衛星画像へのアフィン投影法の適用性については、シミュレーションにより、1m 解像度画像に対して1画素以内の外的精度が得られることを確認している¹⁶⁾。

2. 標定法の整理

(1) 衛星の軌道とセンサ

SPOT などの地球観測衛星の多くは、太陽同期準極軌道をとる。軌道面と地心から太陽への方向のなす角をほぼ一定に保ちつつ、地球自転により撮影範囲を変える。このことから赤道面に対する軌道の傾斜角がおおよそ 98 度に決定される¹⁾。衛星の飛行高度は、センサと想定する地上解像度に応じて異なるが、おおよそ 600-900 km の範囲に設定される。SPOT 衛星の場合、軌道傾斜角は約 98.7 度、飛行高度は約 800 km である²⁾。一方 MOMS-2P は、宇宙ステーション MIR に搭載された撮影系である。MIR は大多数の地球観測衛星に比べて軌道傾斜角が大きく異なり、若干高度が低い地球周回軌道をとる。MIR の軌道傾斜角は 5 1 度、飛行高度約 400km である²⁴⁾。しかしながら両者共に、離心率が小さいほぼ円に近い楕円軌道を航行する。SPOT, MIR 軌道の離心率はそれぞれ 0.00059, 0.00063 である。

地球観測衛星に搭載されるセンサは、CCD 素子を 1 次元配列したラインセンサと長焦点の光学系から構成される。SPOT, MOMS-2P のセンサの諸元を表-1に示す^{2), 24)}。但し表中の MOMS-2P の諸元は、MIR ステーション PRIRODA Module に搭載された 5 台のセンサのうち、ステレオ計測に用いられた 2 台の Stereo Module の値であり、これを実験に使った。1 画素のサイズ $10 \mu\text{m}$ は 1 画素の見込み角 $42.16 \mu\text{rad}$ × 焦点距離 237 mm として求めた推定値である。

プッシュブルームセンサのステレオ撮影方式としては、隣接する軌道から重複撮影を行う C/T (Cross-Track) 方

表-1 SPOT/MOMS-2P センサ諸元

	SPOT	MOMS-2P
画素サイズ (μm)	13	10
地上解像度 (m)	10	18
素子数 (pixel)	6,000	2,976
焦点距離 (mm)	1,082	237.2
画角 (度)	4	7
センサの傾斜角 (度)	$\omega \leq 27$	$\phi = 23.4$

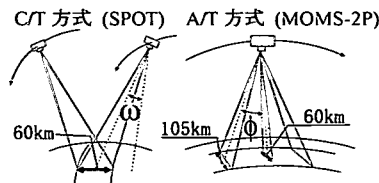


図-1 ステレオ撮影方式

式と同一軌道において重複撮影を行う A/T (Along-Track) 方式 (F/A (Fore-Aft) 方式とも呼ばれる) があり、SPOT, MOMS-2P はそれぞれ C/T, A/T 方式を採用する (図-1 参照)。ラインスキャナ画像の幾何学的特性から、A/T 方式の画像は C/T 方式の画像に比べて、高さ方向の計測精度が劣る可能性が指摘されている⁸⁾。しかし A/T 方式画像はステレオ撮影時刻のずれがほとんどないため、地表の時間変動がなく観測が容易であるという利点がある。

(2) 地上座標系

地上座標系としては、地球重心を原点としたデカルト座標系である地球中心座標系を採用するのが一般的である。地球中心座標系は、X 軸を赤道と基準子午線の交点方向に、Z 軸を北極方向に取った 3 次元直交座標系 (右手系) である。但し標定時には、地球中心座標系を直交変換と平行移動によって対象地域に移動した局所的なデカルト座標系を用いる。この場合の X, Y 軸は、原点においてそれぞれ経線と緯線に接するように設定する。

一方地上測量の観点からは、対象空間座標系として地図投影座標 (x, y) と標高 h を用いるのが便利である。地図投影座標とは、準楕円体に対する測地緯度、測地経度を地図投影法によって 2 次元平面に投影して得られる座標である^{13), 25)}。我が国で用いられる地図投影座標は、ガウスクリューガ投影法に基づいた UTM 座標系 (小・中縮尺図用) と平面直角座標系 (大縮尺図用) がある。一方標高は、重力の等ポテンシャル面の基準面であるジオイド面からの高さを表す。ジオイド面は準楕円体面と完全には一致せず、平行とも限らないので標高は準楕円体面からの高さ (楕円体高) とは異なる。物理的な標高と幾何学的な楕円体高との変換を一般的に考察することは困難であるが、本論文ではジオイドの挙動が穏やかな場合を想定して、両者が

線形変換できると仮定している。

(3) 従来の標定法

プッシュブルーム方式で撮影された画像は1次元中心投影に基づく。これまでに発表されたSPOT, MOMS-2P衛星画像標定に関する論文の多くは、本質的に1次元中心投影モデルを基本にしている。

衛星画像を用いた地図作成の試みが本格化したのは、1986年に第1号機が打ち上げられたSPOT衛星以降であり、代表的な標定法の多くはこの時期に提案された。それらの標定法を大別すると、衛星軌道とセンサの傾きを厳密に、あるいは簡略化してデカルト座標系でモデル化する方法^{19), 22), 32), 33)}と、地図投影座標系を擬似的な3次元デカルト座標系とみなして、従来の空中写真測量で用いられる中心投影式を拡張させる方法²³⁾に分けられる。いずれの方法も、画像データの標定という観点だけで開発されているのではなく、従来の空中写真測量用解析図化機の制御を念頭に置いて、解析図化機をできるだけそのまま衛星画像の図化に利用したいという思想がある。中心投影式から観測方程式を作り、センサの幾何学的な撮影状態を表現する外部標定要素とセンサの内部幾何学を記述する内部標定要素、そして被写体の3次元座標を未知量としてこれらのパラメータを同時決定する(バンドル調整計算)。以下にそれぞれの手法を代表してKratky, Kruckのモデルを紹介する。

Kratky²²⁾は、SPOT画像のための標定法を提案した。局所デカルト座標系でのセンサ位置/姿勢(外部標定要素)をライン番号の2次式(すなわち時間の2次式)でモデル化してその係数を未知量とした。一方内部標定要素として、画面距離と主点位置を未知量とした。更には、ケプラー軌道(外部標定要素)に関する拘束条件式を観測方程式に組み込んだ。5-20点の基準点を用いたステレオ計測において平面/高さ方向それぞれ5-6m, 4-8mの外的精度を報告している。

Kruck and Lohmann²³⁾は、空中三角測量プログラムBINGOをSPOT衛星画像にそのまま適用できるように伝統的な中心投影式を基本にする標定法を開発した。1シーン60kmx60kmを対象にして、標定をUTMなどの地図投影座標系で行った。衛星が対象空間を等速直進運動するとみなし、オーバーパラメタリゼーションを避けるために角度の外部標定要素を定数で固定し、角度要素の変動で生じる小さな歪および地球の自転によるスキュー歪を8つの付加パラメータでモデル化した。基線高度比1.05のSPOTステレオ画像を用いた標定実験で、1:25000の地形図から基準点および検証点をそれぞれ18点/68点計測した。全86点による標定の結果、

平面方向12m、高さ方向6.5mの外的精度を得た。

上記の標定法に対して、岡本³¹⁾は狭い画角での投影モデルを安定化させるため、いくつかのモデルを考察し、最終的に2次元アフィン投影モデルが最も安定したモデルであることを主張した。Kruck, 岡本の方法は外部標定要素を時間(画像のライン番号)の関数として表現するかわりに定数で表す。この方法は3.1節に示すように空間に立体モデル(注:光線の交会によって再現される空間をモデルと呼ぶ)を作るので、基準点の分布が変動しても比較的安定した標定を行える。

1990年代にはSPOT衛星に引き続いて登場したMOMS-2Pの標定実験が報告されているが、それらの標定法は前述の中心投影式によるSPOT標定法をそのままあるいは拡張した方法である。SPOT標定法とMOMS標定法との違いは、前者の方法がSPOTの軌道情報が正確ではないために、外部標定要素初期値の算出以外には軌道情報に依存していないのに対して、後者の方法ではMOMS-2Pに搭載されたGPS, INS(Inertial Navigation System: ジャイロと加速度センサによって位置と姿勢を外部からの情報なしに計測する装置)による高精度の軌道情報を利用している点である。これらの情報は重みつきの観測値として処理される。

Fritsch¹⁸⁾はKratky型のモデルを用いて、MOMS-2P画像の標定を行った。基準点10点前後を用いて平面11-14m、高さ14mの外的精度を報告している。

Kornus²¹⁾は、外部標定要素を時間の3次多項式として表す1次元中心投影モデルを用いてMOMS-2P画像の標定を行った。単ストリップ標定実験において、基準点10点を用いて平面、高さ方向それぞれ15mおよび18m前後の外的精度を報告している。

以上のように中心投影モデルによるSPOT, MOMS-2P画像標定では、軌道情報と基準点10点前後を用いて、平面、高さ方向ともに0.5-2画素程度の外的精度が得られている。

3. アフィン投影の数学モデル

(1) アフィンモデルの導出

ラインセンサ画像ではライン毎に中心投影が成り立つ。したがってその共線条件式は、センサの画像座標を衛星進行方向/センサ走査方向に対してそれぞれ u 軸(ライン番号方向)/ v 軸(画素方向)と取ると式(1)のように表される。

$$\begin{aligned} u &= -c \frac{a_{11}(X - X_0) + a_{12}(Y - Y_0) + a_{13}(Z - Z_0)}{a_{31}(X - X_0) + a_{32}(Y - Y_0) + a_{33}(Z - Z_0)} \\ v &= -c \frac{a_{21}(X - X_0) + a_{22}(Y - Y_0) + a_{23}(Z - Z_0)}{a_{31}(X - X_0) + a_{32}(Y - Y_0) + a_{33}(Z - Z_0)} \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 c はセンサの焦点距離、 (X_0, Y_0, Z_0) は投影中心、そして $R=R(\omega)R(\phi)R(\kappa)=(a_{ij})$ はセンサの回転行列であり、これらは時間の関数である。また u は常に0である。

式(1)は物理的な回転要素を用いているため、衛星画像のような狭い画角では標定要素間に強い相関が生じる。たとえば、 u 軸周りの回転角 ω は Y_0 の動きと、 v 軸周りの回転角 ϕ は X_0 の動きとそれぞれ重なる。したがって、正確な軌道情報が与えられない場合には調整計算が不安定になりやすい。岡本³¹⁾は、この画角の狭さに起因するオーバーパラメタリゼーションを避けるために、画像の投影関係が平行投影に近いことに着目して、アフィン幾何学に基づく標定モデルを提案した。具体的には、式(1)をアフィン式で置き換えた。

$$\begin{aligned} u &= A_1X + A_2Y + A_3Z + A_4 \\ v_a &= A_5X + A_6Y + A_7Z + A_8 \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 u, v_a はそれぞれ衛星進行方向、センサ走査方向のアフィン投影された画像座標(第4.3節)であり、 u は0ではない。また、式(2)の係数 A は定数である。このモデルの第1式と第2式はそれぞれ、対象空間内の衛星の等速直進と画角が十分狭いことをそれぞれ仮定している。

(2) 重複画像による3次元解析理論

式(2)に基づく投影モデルは1次元画像の集合体であるラインセンサ画像を2次元画像として取り扱うことで、従来の2次元中心投影と同じく、2枚の画像から空間に立体モデルを作る。2次元中心投影に対する一般の射影変換式

$$\begin{aligned} u &= \frac{E_1X + E_2Y + E_3Z + E_4}{E_9X + E_{10}Y + E_{11}Z + 1} \\ v &= \frac{E_5X + E_6Y + E_7Z + E_8}{E_9X + E_{10}Y + E_{11}Z + 1} \end{aligned} \quad (3)$$

では、交会条件から作る観測方程式のランク(決定できるパラメータの数)は7である。これは次のようにして分かる。射影空間を表現するために用いられる同次座標系により立体モデルの座標系を $[X_m Y_m Z_m T_m]^T$ 、対象空間座標系を $[X Y Z T]^T$ とすると、両者は次式(4)で関係付けられる。

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 & F_2 & F_3 & F_4 \\ F_5 & F_6 & F_7 & F_8 \\ F_9 & F_{10} & F_{11} & F_{12} \\ F_{13} & F_{14} & F_{15} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \\ T_m \end{bmatrix} \quad (4)$$

式(4)は15個の未知パラメータを持つ。これらを確定するためには、たとえば5点以上の基準点があればよい。式(3)は2枚の重複画像で合計22個のパラメータ

がある。このとき $22-15=7$ 組以上の共面条件(交会条件)で立体モデルができる。すなわち8組目からの光線対はすべて空間で交会する。このときにできる立体モデルは対象空間に相似ではない。内部標定要素が既知であればよく知られているように5組以上の共面条件で相似の立体モデルができる(相互標定の自由度)¹²⁾。

これに対して式(2)から作る観測方程式のランクは4であり、立体モデルを作るのに最低限必要な地上基準点の数も4である。これらは次のように示される。式(2)を満たす重複画像の光線対から作る共面条件でできる立体モデルの座標系と対象空間座標系は次式(5)で関係付けられる。

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_1 & G_2 & G_3 & G_4 \\ G_5 & G_6 & G_7 & G_8 \\ G_9 & G_{10} & G_{11} & G_{12} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \\ T_m \end{bmatrix} \quad (5)$$

上式(5)の12個の係数を決定するためには4点の基準点が必要であり、式(2)の関係を満たす2枚の画像からの光線の交会条件のランクは $16-12=4$ であることが分かる。2枚のアフィン投影画像から形成される立体モデルは、厳密には対象空間に相似ではない。

4. アフィン投影の理論的根拠

2次元アフィンモデル(式(2))は、(i). 衛星が対象空間を等速直進運動すること、ならびに(ii). 画角が十分に小さくアフィン投影に近似できることの2つの仮定を導出の前提にしている。ここでは、これらの仮定の妥当性を議論する。

(i)の仮定に関しては、Kruck, 岡本ともガウスクリュエガ地図投影座標と楕円体高(もしくは標高)を擬似的にデカルト座標系とみなす座標系(以後地図投影座標系と呼ぶ)を用い、この仮定が成り立つとした。衛星の楕円軌道が円に近いことや地上の起伏が衛星飛行高度に比べて小さいことなどから、この仮定は妥当であると予想されるが、両者ともこれについて詳しく議論していない。したがって、第4.1節でこの衛星の等速直進性仮定の妥当性について検証する。

また、画像と被写体の投影関係は厳密にはデカルト座標系で成立する。したがって、地図投影座標系を基準座標系として選択した場合には、投影関係に歪が生じる。第4.2節で、地図投影座標系における画像と被写体の投影関係に関して考察を行う。

一方(ii)の仮定は、SPOT, MOMS-2P画像のようにアフィン投影画像とみなすには画角が大きすぎる場合(SPOT, MOMS-2Pの画角度はそれぞれ4.7度)には、

画像の投影に基づく誤差(中心投影画像をアフィン投影画像と見なすことによる誤差)が許容範囲を超える。この投影誤差は、中心投影からアフィン投影への投影変換処理により除去される。この方法を第4.3節に示す。

(1) 衛星の等速直進性の検証

地図投影座標系における衛星の等速直進仮定の妥当性を調べるため、地図投影座標空間での SPOT, MIR 衛星の動きをケプラー軌道要素を用いて検証した。

ケプラー軌道は、軌道を空間に固定する要素(軌道傾斜角 i 、昇交点赤経 Ω 、近地点引数 ω)と、軌道上の衛星の運動を決定する要素(離心率 e 、平均運動 n 、平均近点離角 M)で記述される¹⁾(図-2 参照)。衛星軌道に対する慣性系として固定地心座標系(Earth Centered Inertial Coordinate System, $X_g Y_g Z_g$ 系とする)を用いる。ECI 系は、地球重心を原点とし、 X 軸、 Z 軸をそれぞれ春分点方向、天の極方向にとる右手系の3次元直交座標系である。これ以外に解析の便宜上、衛星軌道面上に XY 座標を置く $X_{op} Y_{op} Z_{op}$ 系を取る。 $X_{op} Y_{op} Z_{op}$ 系は、 X, Y 軸をそれぞれ軌道楕円の長軸、短軸方向に取り、楕円の焦点の一つに原点をとる。

この時、 $X_{op} Y_{op} Z_{op}$ 系と ECI 系との関係およびケプラー要素で記述される $X_{op} Y_{op} Z_{op}$ 系での衛星位置は、式(6)-(10)で表される。

$$\begin{pmatrix} X_g \\ Y_g \\ Z_g \end{pmatrix} = R_\Omega R_i R_\omega \begin{pmatrix} X_{op} \\ Y_{op} \\ Z_{op} \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{pmatrix} X_{op} \\ Y_{op} \\ Z_{op} \end{pmatrix} = a \begin{pmatrix} \cos E(t) - e \\ \sqrt{1-e^2} \sin E(t) \\ 0 \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$M(t) = E(t) - e \sin E(t) \quad (8)$$

$$M(t) = M_0 + nt \quad (9)$$

$$a = \sqrt[3]{G/n^2} \quad (10)$$

ここで R は回転行列で、原点に向かって右周りの方向を正とし、移動軸周りのオイラー角 Ω, i, ω (それぞれ Z, X, Z 軸周りの回転角)で定義する。 M_0 は元期における平均近点離角、 a, G はそれぞれ軌道長半径、地球引力定数である。なお、式(6)-(10)を用いてケプラー要素から ECI 系での衛星位置を求める際に、式(8)において $M(t)$ から $E(t)$ を求めなければならない。この場合、式(8)は超越方程式となるので、ニュートン法による繰り返し演算が必要となる。自転と共に回転する地球に固定された地球中心座標系での衛星位置は、ECI 系での衛星位置からユリウス暦を介して求められる。

本研究では衛星軌道を表す慣性系として、ある任意の時刻(ここではシーンセンター撮影時刻)における

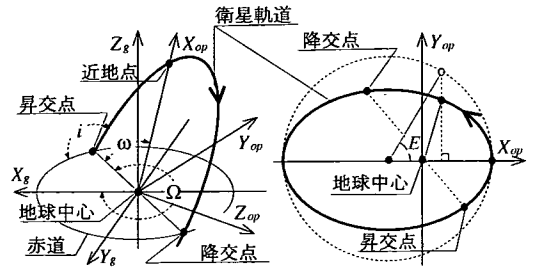


図-2 ケプラーの軌道要素

表-2 SPOT 軌道シミュレーション諸元

SPOT 衛星軌道要素	
平均運動 ⁽ⁱ⁾ n (回転/日)	14.20063057
離心率 e	0.0000587
近地点引数 ω (度)	116.8392
軌道傾斜角 i (度)	98.7480
地図投影座標諸元	
回転楕円体/地図投影座標	GRS80/平面直角第5系
シーンセンター直下点	(0.0, 0.0)
平面直角座標 (x, y) (km)	(0.0, 0.0)
平面直角座標原点	N36.0度/E134度 20分

(i). 軌道公転周期の逆数で定義される。

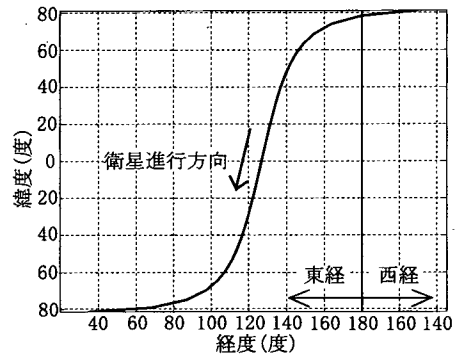


図-3 SPOT の軌道

地球中心座標系を ECI 系の代用に使った。したがって、ケプラーの軌道要素の内、昇交点赤経が地球中心座標系の経度(同じく Ω で表す)に変わる。また ECI 系から地球中心座標系への変換は、地球の自転の影響を考慮して求められる。なお、衛星軌道の摂動を与える成分として、重力ポテンシャルの J_2 項による摂動を考慮した。他の影響、例えば Z_g 軸の歳差運動などは、検証する衛星の飛行時間が短いためにここでは考慮しない。

表-2、図-3 に検証に用いた SPOT 衛星軌道要素などのシミュレーション諸元¹⁷⁾とそこから再現される SPOT 衛星の軌道(約 50 分間の飛行軌跡)をそれぞれ示す。

図-3 に示される軌道の一部である北緯 36 度付近での SPOT 衛星軌道(1 シーン, 60km, 約 10 秒間)に対して、その衛星位置 (X_0, Y_0, Z_0) をライン番号、すなわち時間の 1 次式で仮定して最小 2 乗法により当ては

表-3 等速直線軌道当てはめ誤差 (SPOT)

座標系	非負残差最大値 (m)		
	X_0	Y_0	Z_0
デカルト座標系	17.50	20.55	14.84
地図投影座標系	0.17	3.70	0.10

めた。なお、表-2 に示すように地図投影座標系の地図投影座標原点は、軌道のシーンセンター直下点に取っている。表-3 に当てはめの非負残差の最大値を示す。表-3 のデカルト座標系は地球中心座標系を取っている。

SPOT 軌道の 1 シーン 10 秒間での軌道はデカルト座標系では明らかに非線形であるが、地図投影座標系においては十分に線形かつ等速であることが分かる。なお、上記の検証ではシーンセンター直下点に地図投影座標の原点を取ったが、実際の撮影状況は必ずしもシーンセンター直下点に地図投影座標原点がくるとは限らない。例えば、第 5 章の実験の SPOT 衛星左画像を撮影した SPOT 衛星は、神戸地区を撮影するべく静岡の上空を飛行しており、神戸地区が属する平面直角座標系第 5 系原点からは大きくずれている。参考のため、シーンセンター直下点が地図投影原点から大きくずれている (300km 程度) 軌道の直進性を同様に調査した。その結果、 X_0, Y_0, Z_0 の非線形成分がそれぞれ 0.55, 5.78, 0.10m と求められ、そのような場合でも衛星はほぼ直進運動することが分かった。ここで Y_0 (東西方向) の非線形成分が他に比べて大きいのは、図-3 の SPOT 軌道から明らかのように、地球自転による影響が主に東西方向に影響を及ぼすことに起因している。

日本付近の中緯度地域ではほぼ同様の結果が得られたのに対して、低緯度付近 (北緯 10 度付近) での等速直進性を調べたところ、 X_0, Y_0, Z_0 の非線形成分がそれぞれ 0.01, 1.17, 0.28m (シーンセンター直下点に地図投影座標の原点を取った場合)、0.90, 3.21, 0.28m (シーンセンター直下点が地図投影座標の原点から大きくずれる場合) とほぼ同様の結果が得られた。一方、北緯 60 度以上の高緯度地域では、 X_0, Y_0, Z_0 の非線形成分がそれぞれ 1.31, 5.45, 0.08m (シーンセンター直下点に地図投影座標の原点を取った場合)、1.96, 7.54, 0.10m (シーンセンター直下点が地図投影座標の原点から大きくずれる場合) となり、平面方向の線形性はやや崩れてくるものの、その影響はやはり一画素 10m 以内であった。

一方、MOMS-2P を搭載した MIR ステーションの軌道 (図-4 参照) についても、同様にシミュレーションで調べた。表-4、表-5 にシミュレーション諸元ならびに中緯度付近での軌道 (1 シーン、約 150km、約 20 秒間の軌道) の線形当てはめ結果をそれぞれ示す。ここで、地図投影座標系の地図投影座標原点は、直下視のシーンセンター直下点に取った。

表-4 MIR 軌道シミュレーション諸元

MIR 衛星軌道要素	
平均運動 n	15.60683012
離心率 e	0.0006281
近地点引数 w (度)	174.6654
軌道傾斜角 i (度)	51.6506

地図投影座標諸元は表 2 と同様

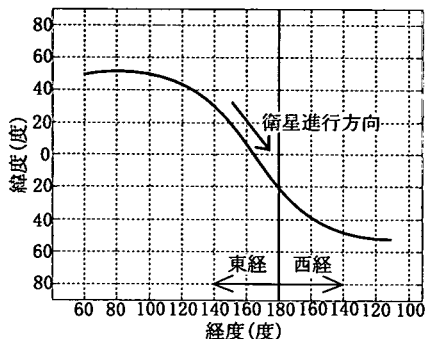


図-4 MIR の軌道

表-5 等速直線軌道当てはめ誤差 (MIR)

座標系	非負残差最大値 (m)		
	X_0	Y_0	Z_0
デカルト座標系	77.62	100.98	84.60
地図投影座標系	8.25	12.49	0.11

表-4 の結果から、地球中心のデカルト座標系での MIR ステーションの軌道は、SPOT 軌道に比べてより非線形の度合いが大きいことが分かる。これは、MIR の軌道が SPOT とは軌道傾斜角が異なり、また 1 シーン撮影の飛行距離も長いためである。一方、地図投影座標系での軌道についても、同様の理由により SPOT 衛星に比べて非線形性は大きいものの、MOMS-2P の解像度 18m を考慮すれば非線形成分の影響は 1 画素以内であり、等速直進のモデル化は実質上問題は無い。

IKONOS など高解像度衛星の軌道も基本的に SPOT の軌道に類似した極周回軌道であり、1 シーン撮影する間の飛行距離も SPOT に比べてはるかに小さくなる (SPOT の約 60km に対して IKONOS は約 10km) ので、地図投影座標系での軌道の等速直進性は成り立つとみなせる。

(2) 座標系の問題

デカルト座標系の代わりに地図投影座標系を使うと、ガウスクリューガ投影による地図投影歪と地球曲率の影響などから、画像と被写体の投影関係には次の非線形歪が現れる。

図-5 に模式的に示すように、地球楕円体に接するデカルト座標系 XYZ と地図投影座標系 (緯度、経度、楕円体高 xyh) との関係を考える。図-5 は適当な地図投

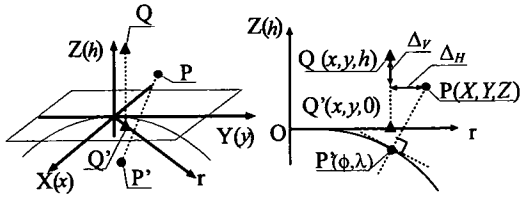


図-5 地球曲率に起因する誤差

影座標系 xy の原点で、原点を共有し、準拋楕円体に接する平面をデカルト座標系にとっている。原点で x, y 軸は、それぞれ X, Y 軸に接するよう取る。デカルト座標系の点 $P(X, Y, Z)$ から楕円体面に下ろした垂線の足を P' とし、 P' の地図投影座標を $Q'(x, y)$ とする。地図投影座標で Q' の上方に楕円体高 h の点 $Q(x, y, h)$ を取る。すなわちデカルト座標系での点 P が地図投影座標系での点 Q で表される。

2つの座標系での平面および高さ方向の差(図中の Δ_H, Δ_V) が投影関係に歪を与えると考えられる。簡単のために、地球を半径 R の球、地図投影による増大率を 1 と定めると式 (11), (12) が近似的に成立する。ただし、 r は弧 OP の長さ(原点からの距離)、 θ は弧 OP に対する中心角とする。

$$\Delta_H = r - R\theta \approx \left(1 - \frac{R}{R+Z}\right) r \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \Delta_V &= \frac{R(1 - \cos\theta) + Z}{\cos\theta} - Z \\ &\approx \frac{(R+Z)r^2}{2(R+Z)^2 - r^2} \quad (12) \end{aligned}$$

式 (11), (12) は、画像と被写体の投影関係に歪を与える要素のうち、地球曲率に起因する平面/高さ方向の歪の影響を近似的に評価する式である。したがって、投影関係に影響を与える可能性のあるもう一つの要素、すなわちガウスクリューガ投影法での非線形の地図投影歪の影響は含まれていない。これは、ガウスクリューガ投影法による地図投影座標 X, Y がいずれも経度(基準子午線との経度差)の冪級数の形で表されており、デカルト座標系との変換式は複雑で一般的に考察することは困難であるからである。そこで実際に、地球曲率の影響だけではなく厳密な地図投影式を用いて地図投影歪の影響も含めた座標系の違いに起因する誤差(Δ_H, Δ_V)を調査した。すなわち、図-5の XY 平面上に正方グリッドを切り、各格子点 $(X, Y, 0)$ を地図投影座標 (x, y, h) に変換して平面および高さ方向に生じる誤差を調べた。地球楕円体としてはGRS80楕円体、地図投影座標としては平面直角座標系(地図投影原点は任意に選択)を選択し、比較範囲をSPOTの1シーン(60km*60km)と

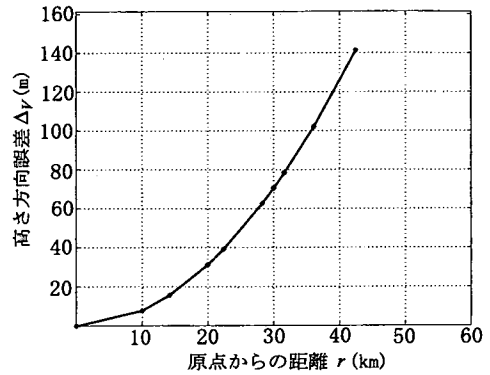


図-6 地球曲率に起因する高さ方向の誤差

した。多くのシミュレーション結果をまとめると以下のようである^{14), 15)}。

平面方向の誤差 Δ_H は、原点からの距離 r に対してほぼ線形の誤差を生じていることが分かった。この誤差は地図投影における縮尺係数による線形歪(10kmにつき1mの誤差)とほぼ一致しており、地球曲率による平面方向の誤差の影響(式(11))が小さいことが確かめられた。 Δ_H を距離 r の一次式として最小2乗法により当てはめて、その非線形要素を求めた。1シーン60km四方での非線形要素は最大でも20cm程度であり、SPOTの地上解像度10mを考慮すると実質上問題とはならない。同様に、高解像度画像の1シーンを10km程度として非線形成分を求めたところ、約1cmであって、画像の解像度を1mとしても無視できることが分かった。なお、ガウスクリューガ投影法投影は狭い経度帯での投影を想定している。すなわち、基準子午線からの距離が増大するにつれて、投影による非線形歪が大きくなる。地図作成用地球観測衛星の多くが、極周回軌道により地上をほぼ南北方向(子午線とほぼ平行)に撮影している。この場合、SPOTの1シーンよりも長いストリップ画像に対しても、平面方向の非線形誤差は実質無視できる。一方、MOMS2-Pのように浅い軌道傾斜角をとる衛星で撮影した画像は、東西方向にも広がりをもつので、ストリップの長さおよび地上解像度によっては問題が生じる可能性がある。しかしその非線形要素の大きさは、ストリップ長150kmのMOMS-2P画像で約30cm程度であり、同衛星の解像度18mでは問題とならない。

一方高さ方向の誤差 Δ_V は、地球の曲率に基づく誤差であり、原点からの距離 r に対して近似的に2次式で表される誤差が生じる。SPOTの1シーンでは最大100m以上にもなり、当然無視することは出来ない。この誤差を、原点からの距離 r の2次式で最小2乗法当てはめた結果の例を図-6に示した。なお、式(12)から明らかのように、高さ方向の誤差 Δ_V は Z の関数で

あるが、地球半径 R に比べるとはるかに小さいので、画像内に現れる歪みとして画像座標の2次式の付加パラメータで除去することができる。更にラインスキャナー画像の場合には、スキャナー走査方向に Δv の影響は現れるので、画像走査座標 v に対して v^2 の付加パラメータ項を付ければ良い。またこれは、アフィン画像への投影変換にも組み込むことが出来る(第4.3.c項)。

以上まとめると、地図投影座標系では衛星は等速直進運動するとみなせるが、地球曲率に起因する高さ方向の非線形誤差は無視できず、アフィン画像への投影変換に除去処理を組み込むか、もしくは付加パラメータにより除去する必要がある。

(3) 中心投影からアフィン投影への画像の投影変換

アフィン投影は無限小の画角を仮定しているが、中解像度衛星 SPOT, MOMS-2P の画角はそれぞれ 4, 7 度であり、アフィン投影と中心投影の誤差が大きい。この点で両者は中心投影とアフィン投影の中間的な投影であるといえる。岡本⁷⁾は以下の方法で、中心投影の画像をアフィン投影の画像に変換することでこの誤差を取り除いた。以下の議論では中心投影画像の走査方向に v 、これを変換したアフィン投影画像の座標系を v_a とする。また光学系の画面距離を c 、ライン方向にとった v 軸周りの回転角(ローリング角)を ω とする(図-7 参照)。

画像の座標補正には地形標高の値が必要になるが、これを求めるのが本来の目的であるから明らかに矛盾している。しかしステレオ画像を計測するときには、第4.3.b項のように繰り返しの計算で地形標高に基づく誤差を補正することができる。センサの内部標定要素に誤差はないとして、まず地形が平坦である場合の単画像を取り扱い、ついでステレオ計測の場合を論じる。

なお、高解像度衛星画像では画角が十分小さく(IKONOSで1度弱)、アフィン投影と中心投影との変換誤差は小さいので、実質上無視できる。

a) 地形が平坦な時のアフィン投影への変換

衛星飛行高度の粗い近似値は通常既知である。図-7のように、地表面と中心投影画像がローリング角 ω だけ傾いて交わっているとして、その交点を主点位置とする。便宜上画像の縮尺は1に取る。中心投影画像の画像点 $p(v)$ は次のようにアフィン投影の点 $p_a(v_a)$ に変換される。投影中心 O_A と画像点 $p(v)$ を結ぶ直線が地表面と交わる点 P_g を求め、これを中心投影画像に正射投影する。すなわち

$$v_a = \frac{v}{1 - (v \cdot \tan \omega) / c} \quad (13)$$

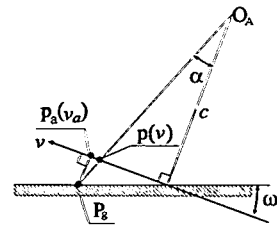


図-7 アフィン画像への投影変換

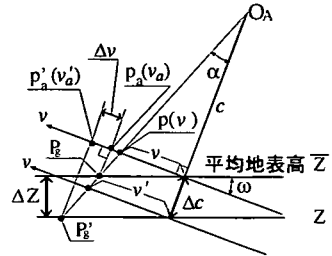


図-8 アフィン画像投影変換誤差の除去

と求められる。

b) 地形の起伏が大きい時のアフィン投影への変換

地形起伏が大きいときは、繰り返し解法で各点ごとに画面距離 c を補正し、中心投影からアフィン投影への変換誤差を消去する。図-8に示すように、画像点 $p(v)$ の高さが仮定した平均地表面から比高 ΔZ だけ低かったとする。この未知の比高のために、投影変換した点 $p_a(v_a)$ は正しい変換点 $p'_a(v'_a)$ に対して式(14)で表される変換誤差 $\Delta v = v'_a - v_a$ を持つ。

$$\Delta v = \Delta Z (\tan(\omega + \alpha) - \tan \omega) \cos \omega \quad (14)$$

ここで α は画角の半分である。すなわち変換誤差は比高に比例する。この誤差は次のように消去できる。

- (イ). 地表面を平坦として、式(13)からアフィン投影のステレオ画像を作成する。
- (ロ). 得られたアフィン投影画像を用いて、ステレオ計測で各地上点の3次元座標を計測する。この段階での高さ Z は誤差を含んでいる。
- (ハ). (ロ)で求められる各計測点の高さ Z の平均地表高 \bar{Z} を求め、各計測点での平均地表高からの誤差 $\Delta Z = \bar{Z} - Z$ を求める。この誤差 ΔZ により補正される画面距離 $c' = c + \Delta Z / \cos \omega$ と $v' = v c' / c$ を式(13)に代入することで、地表の起伏を考慮したアフィン投影画像座標 $p'_a(v'_a)$ を求める(図-8参照)。

更新したアフィン投影画像の座標からバンドル調整で新しい地表高を得る。以下収束するまで(イ)-(ハ)を繰り返す。

なお、この手続きは最初にステレオ画像点を一度計測しておけば、繰り返しのバンドル調整計算は自動であることに注意する。

c) 地球曲率を考慮したアフィン投影への変換

4.(2)で述べた通り、基準座標系として地図投影座標系を選択した場合には、地球曲率に起因して画像と被写体の投影関係には歪が生じる。この地球曲率に起因する誤差は無視できない程大きく、画像に対する非線形歪としての影響を持つ。しかしながら、アフィン投影の画像への投影変換処理に組み込んで除去することが出来る。

図-9に示すように、地図投影座標系では焦点距離を短くした投影関係が近似的に成立しているとみなせる。すなわち、4.(3)a),b)で示したアフィン画像への投影変換において、焦点距離を全体的に変化させて投影変換を行えば、地球曲率を考慮したアフィン投影の画像座標が得られる。

上記の操作を代数的に考察する。式(13)において異なる焦点距離 c_1, c_2 に対するアフィン投影画像座標をそれぞれ v_{a1}, v_{a2} とする。焦点距離 c に比べて画像座標 v が十分小さいことと近似的に $v \propto v_a$ であることに注意して、変換後画像座標の差分 $\Delta v_a = |v_{a1} - v_{a2}|$ を計算すると、

$$\begin{aligned} \Delta v_a &= \left| \frac{v}{1 - (\tan \omega)(v/c_1)} - \frac{v}{1 - (\tan \omega)(v/c_2)} \right| \\ &= \frac{|(c_2 - c_1) \tan \omega|}{(c_1 - v \tan \omega)(c_2 - v \tan \omega)} v^2 \\ &\simeq \frac{|(c_2 - c_1) \tan \omega|}{c_1 c_2} v_a^2 \end{aligned} \quad (15)$$

となる。これはすなわち、 c の値を変化させてアフィン画像へ投影変換することで、走査方向画像座標 v_a^2 、すなわち v^2 項の付加パラメータと同等の役割を果たすことを示している。地球曲率に起因する高さ方向の誤差が走査方向の画像座標 v に対して v^2 の付加パラメータで補償されることとあわせて考えれば(第4.2節)、焦点距離補正によるアフィン投影画像変換が地球曲率に対する妥当な補正方法であることが分かる。

さて次に、実際にどの程度焦点距離を変化させる必要があるのかについて考察する。図-10に、地球曲率に起因する高さ方向 Δh の誤差がアフィン画像に及ぼす影響を図示した。簡単のため、地球を半径 R の球と仮定して、鉛直傾斜角 ω によって撮影された状況を想

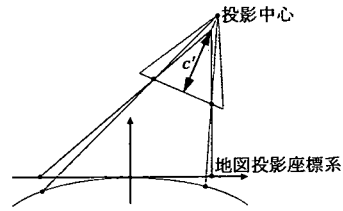


図-9 焦点距離操作による地球曲率補正

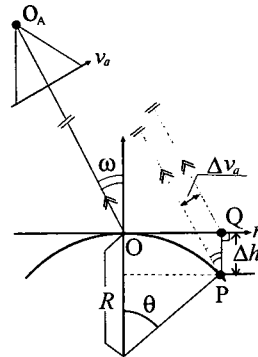


図-10 地球曲率がアフィン画像に与える影響

定する。座標原点から距離 r (θ 微小により、 $R\theta = r$ とする) だけ離れたデカルト座標系の点を P とし、それに対応する地図投影座標系の点を Q とする。点 P における地球曲率による高さ方向の誤差 Δh は、近似的に2点 P, Q の高さ方向のずれとして、

$$\begin{aligned} \Delta h &= R(1 - \cos \theta) \\ &\simeq \frac{r^2}{2R} \\ &(\because \theta \text{ 微小より } \cos \theta \simeq 1 - \frac{\theta^2}{2}) \end{aligned} \quad (16)$$

と表される(式(12)において $Z=0$ とし、更に簡略化した形)。よって点 P, Q に対応するアフィン画像点座標の補正量 Δv_a は、原点からの距離 r が走査方向画像アフィン画像座標 v_a に対して $r = v_a / \cos \omega$ で対応することに着目して、式(17)で表される。

$$\begin{aligned} \Delta v_a &= \frac{\Delta h \sin \omega}{2R \cos^2 \omega} v_a^2 \\ &\simeq \frac{\sin \omega}{2R \cos^2 \omega} v_a^2 \end{aligned} \quad (17)$$

式(17)は、地球曲率に起因する高さ方向の誤差 Δh が画像に及ぼす影響を表している。この画像座標の補正量が、式(15)における補正量と等しくなるように焦点距離 c を変化させれば良い。実験に用いた SPOT 衛星

画像の場合、公称焦点距離 $c = 1082\text{mm}$ 、鉛直傾斜角 ω が $21/17$ 度 (右/左画像) である。補正後の焦点距離を c' (但し $c > c'$)、 $\omega > 0$ 、地球の半径を $R = 6300\text{km}$ として式 (15), (17) から成立する次式

$$\frac{(c - c') \tan \omega}{c c'} = \frac{\sin \omega}{2R \cos^2 \omega} \quad (18)$$

に上記の値を代入すると、 c' が凡そ 1010mm と求まる。第5章の SPOT 画像の標定解析においては、この補正された焦点距離 c' をアフィン画像への投影変換に用いることで、地球曲率に対する補正処理を行った。なお基礎方程式に付加パラメータの項 $A_9 v_a^2$ を導入すれば、上記と等価になって地球曲率の補正はできるが、そのときの A_9 の初期値には式 (17) を用いばよい。

5. 実験

(1) SPOT 画像標定結果

実験に用いた SPOT 画像 (左画像) とその諸元をそれぞれ図-11、表-6 に示す。撮影地域に、2つのテストフィールド (Kobe-AT および Kobe-Osaka) を設定した。Kobe-AT テストフィールドは東西 50km 南北 20km と狭く、神戸地区の沿岸部と六甲山脈の一部を含む標高差 800m の急峻な地形からなる。一方 Kobe-Osaka テストフィールドは、Kobe-AT テストフィールドに、六甲山脈北部の比較的なだらかな山間部が加わった東西 50km 南北 60km の広域なフィールドである。両テストフィールドの諸元を表-7 に示す。

図-12 に標定点の分布を示す。地上座標の計測には、空中三角測量ならびに GPS 測量を実施した。このために基準座標系としては、平面直角座標系第5系と標高を採用した。なお、地上座標の計測精度は、空中三角測量により計測された Kobe-AT テストフィールドの 117 点と Kobe-Osaka テストフィールドの南側 17 点が水平方向 31.5cm 、高さ方向 62.0cm であるのに対して、スタティック GPS 測量によって取得された Kobe-Osaka テストフィールドの北側 7 点に関しては、平均三角網と基線ベクトルの残差推定値がほぼ 10cm 以内である。衛星画像座標を計測するため、PC を使ったデジタルステレオコンパレータ (精密座標測定機) を試作した。立体めがねで画面を観測し、 $1/2$ 画素まで目測で計測した。計測に際しては、大縮尺の航空写真を利用して画像点と地上点との同定をより確かなものにした。右画像が神戸大震災直後の画像であるのに対して、左画像は震災後約2年後に撮影された画像であるため、復興作業により地表物の変化が一部市街地で見られた。ま

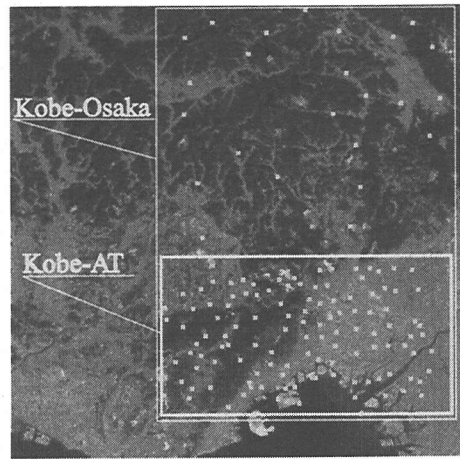


図-11 SPOT 左画像

表-6 SPOT ステレオ画像諸元

	右画像	左画像
撮影日	1996年11月	1995年2月
シーンセンター	N34.70/E135.45	N32.70/E135.19
鉛直傾斜角 (度)	23.0	17.9
基線高度比		約 0.75

表-7 SPOT テストフィールド諸元

	Kobe-AT	Kobe-Osaka
範囲 (km×km)	50×20	50×60
基準系	平面直角座標系	同左
標定点数	117	141
最大標高差 (m)	800	同左

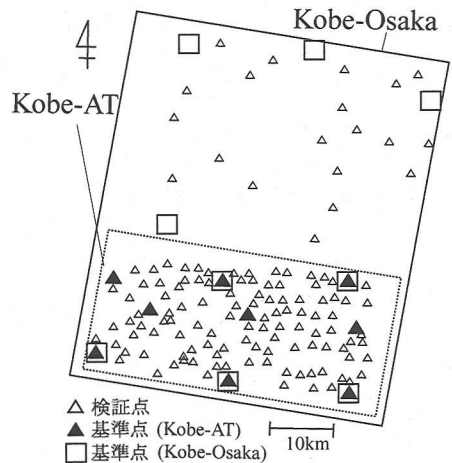


図-12 SPOT 神戸テストフィールド標定点配置図

た、SPOT の地上解像度 10m では、候補点の選定に困難が生じる場合があった。特に郊外の山岳部での計測

表-8 Kobe-AT 解析結果

GCP	σ_0 (μm)	内的精度 (m)		外的精度 (m)	
		平面	高さ	平面	高さ
9	4.0	2.7	7.6	4.9	5.9
6	3.9	2.8	7.8	5.3	6.5
4	3.9	3.0	8.6	5.8	6.3

表-9 Kobe-Osaka 解析結果

GCP	σ_0 (μm)	内的精度 (m)		外的精度 (m)	
		平面	高さ	平面	高さ
9	4.0	3.1	7.7	5.8	6.9
6	4.0	3.4	8.3	5.7	7.2
4	3.9	3.7	9.1	6.2	8.3

表-10 MOMS テストフィールド諸元

MOMS	
範囲 (km×km)	50×150
基準系	UTM 座標系
標定点数	58
最大標高差 (m)	約 180

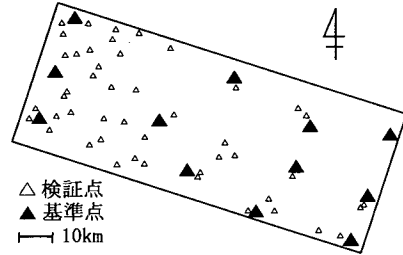


図-13 MOMS テストフィールド標定点配置図

表-11 MOMS テストフィールド解析結果

GCP	σ_0 (μm)	内的精度 (m)		外的精度 (m)	
		平面	高さ	平面	高さ
12	3.6	12.3	16.4	10.5	10.5
9	3.8	13.9	17.5	11.5	11.3

は、市街地での計測に比べて地上構造物が少なく、候補点選定に苦慮した。したがって計測はこれらの点を考慮して慎重に行い、明瞭に識別可能な道路および地上構造物の角などの特徴点を計測した。

表-8、表-9 に Kobe-AT および Kobe-Osaka での解析結果を示す。なお、解析に当たって、与えられた SPOT 軌道データから撮影傾斜角 (右/左画像それぞれ 23.0/17.9 度)、ならびに飛行高度の概算値 800km を得て、粗い初期軌道情報として用いた。

表-8、表-9 中の σ_0 は単位重みの画像座標計測精度の推定量である。予想値と大きく異なって大きい場合は、大誤差の存在かモデルの不適合を疑わねばならない。表中の値 4.0 μm は約 0.3 画素に相当し、計測精度の推定量とほぼ一致している。内的精度は地上点座標の分散共分散行列の推定量から得られる平均分散の平方根で、モデルの適合性と幾何学的安定性などを示す指標である。検証点での RMS 誤差である外的精度と共に標定の精度評価に用いられる。表-8、表-9 によれば内的精度と外的精度の乖離は少なく、モデルを安定化するためには必要最小限 4 点の GCP でよいことが分かる。また、Kobe-AT と Kobe-Osaka の 800m という標高差は、モデルの安定性を見るのにいい指標である。起伏が大きい地形はモデルを高さ方向に不安定にする。このときでもアフィンモデルは高い計測精度を与えることが分かる。

(2) MOMS-2P 画像標定結果

実験に用いた MOMS-2P 衛星画像は、MOMS-2P Stereo Module の 2 台センサを用いて撮影されたステレオ画像であり、Australia Melbourne 大学の Fraser 教授より貸与されたデータである。撮影範囲は、オーストラリアとドイツ国境地域を撮影した走査方向 50km、衛星進行方向 150km の地域である。センサのオフナディ

ア角は 21.4 度、飛行高度は 400km であり、基線高度比は約 0.8 と良好である。標定点地上座標計測には地形図が使用されたが、精度などの詳細は不明である。テストフィールドの諸元を表-10 に、標定点の分布を図-13 に示す。

表-11 に MOMS テストフィールドでの標定結果を示す。MOMS-2P には軌道情報計測のために GPS および Star Tracker が搭載されていたが、本実験ではそのデータが得られなかったため、調整計算の初期値として撮影角 ω, ϕ, κ をそれぞれ 0, 23.4, 0 度 ($\phi = 23.0$ は MOMS-2P センサの設計値)、飛行高度の概算値を 400km とし初期軌道情報とした。また、1 シーンのストリップが 150km と長いこと、基準点を含めた標定点の地上座標が地形図を用いて計測されていることから、基準点を SPOT 画像解析の場合に比べて増やし、12, 9 点設置した。その他の解析条件については、先の SPOT 画像解析と同様である。なお、地上座標系として平面直角座標系と同様の投影法を用いる UTM 座標系を用いた。両者の違いは地図投影に伴う投影歪を相対的に抑えるために導入される縮尺率が異なることである (投影原点において UTM 座標系は 0.9996、平面直角座標系は 0.9999 の縮尺率)。MOMS-2P の解像度 18m とストリップ長 150km を考慮すれば、平面直角座標系を用いる場合との違いは実質上問題とはならない。

先の実験結果と同様に、アフィン投影モデルは安定

かつ高精度の標定結果を示した。SPOTの解像度10mに比べてMOMS-2Pは18mであるから、1画素以内の外的精度を達成している。

6. 結論

長焦点、狭画角のセンサでは、従来の中心投影モデルを適用した場合にオーバーパラメタリゼーションを起こす。この論文では、これに代わりアフィン投影モデルを適用することでより安定した標定が行えることを示した。SPOTの1シーンでは4点のGCPで平面高さ方向とも1画素以内(地上6m)の外的精度を得た。主な結果は次のようである。

- アフィン投影モデルでは画像空間と対象空間の線形関係はすべてパラメータが吸収するので、少ないパラメータで安定した標定ができる。また先験的な軌道情報も必要ない。但し、地球曲率などの非線形歪は、本文中で議論した方法(4.(3)c))か、付加パラメータで除去しなければならない。
- アフィン投影モデルは2つの仮定を置いている。このうち衛星の等速直進運動の仮定については、対象空間を表すのに地図投影座標系を使うことで成立が保障される。デカルト座標系を用いる場合は、非線形軌道に起因する付加パラメータを導入する必要がある場合がある。一方、画角が十分狭いという仮定は、狭画角の高解像度衛星画像(IKONOS衛星の場合センサー画角が約0.92度)では成立する。しかし、SPOT、MOMS-2P画像のように比較的大きな画角を持っている場合は、中心投影画像を繰り返しの過程でアフィン画像に変換する処理が必要である(4.(3))。

謝辞：この研究の一部は文部科学省科学研究費平成13年度基盤C(一般) 課題番号13650592「精密な変位・変形計測のためのデジタル写真測量システムの開発」で行った。

参考文献

- 1) 岩崎 信夫：宇宙工学概論，丸善プラネット，pp.103-113, 1998.
- 2) 宇宙開発事業団地球観測センター編集：地球観測データハンドブック-SPOT編-，リモートセンシング技術センター，1989.
- 3) 岡本 厚：人工衛星 CCD ラインスキャナー画像の解析：その1，日本写真測量学会平成元年度年次学術講演会発表論文集，pp.95-98., 1989.
- 4) 岡本 厚：人工衛星 CCD ラインスキャナー画像の解析：その2，日本写真測量学会平成元年度年次学術講演会発表論文集，pp.77-80, 1989.
- 5) 岡本 厚，赤松 慎市：人工衛星 CCD ラインスキャナー画像の解析特性その1：比高が小さい場合，日本写真測量学会平成3年度年次学術講演会発表論文集，pp.37-42, 1991.
- 6) 岡本 厚，赤松 慎市：人工衛星 CCD ラインスキャナー画像の解析特性 その2：比高が大きの場合，日本写真測量学会平成3年度年次学術講演会発表論文集，pp.61-66, 1991.
- 7) 岡本 厚，服部 進，長谷川 博幸，Ye Myint：アフィン変換繰り返しによる人工衛星ラインスキャナー画像の解析，日本写真測量学会平成6年度年次学術講演会発表論文集，pp.15-24, 1994.
- 8) 岡本 厚，服部 進，長谷川 博幸：高分解能人工衛星 CCD ラインスキャナー画像解析への一考察，日本写真測量学会平成8年度秋期学術講演会発表論文集，pp.129-134, 1996.
- 9) 岡本 厚，緒方 徹，服部 進，長谷川 博幸，赤松 慎市：高分解能人工衛星 CCD ラインスキャナー画像解析問題の諸特性，日本写真測量学会平成9年度年次学術講演会発表論文集，pp.207-214, 1997.
- 10) 岡本 厚，三田 哲雄，服部 進，服部 進，長谷川 博幸，小野 徹，赤松 慎市，家島 大輔：SPOT 画像の標定解析とその精度検証，日本写真測量学会平成10年度秋期学術講演会発表論文集，pp.73-78, 1998.
- 11) 岡本 厚，服部 進，長谷川 博幸，橘 菊雄，三田 哲雄，小野 徹，赤松 慎市：人工衛星ラインスキャナー画像の解析問題の実証的特性，日本写真測量学会平成10年度年次学術講演会発表論文集，pp.127-132, 1998.
- 12) 徐 剛，辻 三郎：3次元ビジョン，共立出版，1998.
- 13) 野村 正七：地図投影法，日本地図センター，1979.
- 14) 山川 毅，小野 徹，服部 進，赤松 慎一：線形変化を仮定した人工衛星画像の標定モデルの有効性 - その1 - 平面直角座標系における衛星軌道の直進性，日本写真測量学会平成12年度年次学術講演会発表論文集，pp.177-180, 2000.
- 15) 山川 毅：高解像度人工衛星ラインスキャナー画像の標定手法，京都大学工学研究科修士論文，2001，2001.
- 16) 山川 毅，小野 徹，服部 進：高解像度衛星画像の幾何学的解析のためのシミュレーション，日本写真測量学会平成13年度年次学術講演会発表論文集，2001.
- 17) CelesTrak WWW: <http://celestrak.com/> (2002.2)
- 18) Fritsch, D. and Stallmann, D.: Rigorous Photogrammetric Processing of High Resolution Satellite Imagery, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol.33, CDROM, 2000.
- 19) Gagan, D.J.: Practical Aspects of Topographic Mapping from SPOT Imagery, *Photogrammetric Record*, 12(69), pp.349-355, 1987.
- 20) Hattori, S., Fraser, C., Ono, T. and Hasegawa, H.: An Alternative Approach to the Triangulation of SPOT Imagery, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol.32, CDROM, 2000.
- 21) Kornus, W., Lehner, M. and Schroeder, M.: Geometric in-flight calibration of the stereoscopic line-CCD scanner MOMS-2P, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol.55, pp.59-71, 2000.

- 22) Kratky, V.: Rigorous photogrammetric processing of SPOT images at CCM Canada, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol.44, pp.53-71, 1989.
- 23) Kruck, E. and Lohmann, P.: Aerial Triangulation of CCD Line-Scanner Images. *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing Commission I Symposium*, pp.1-6, 1986.
- 24) MOMS-2P on PRIRODA: <http://www.nz.dir.de/moms2p/> (2002.2)
- 25) Pearson, F.: Map Projections: Theory and Applications. CRC Press, 1990.
- 26) Okamoto, A.: Orientation and Construction of Models, Part III: Mathematical Basis of the Orientation Problem of One-Dimensional Central-Perspective Photographs, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol.47(4), pp.335-347, 1981.
- 27) Okamoto, A.: Orientation Theory of CCD Line Scanner Images. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol.27, Part.B3, Commission III, pp.609-617, 1988.
- 28) Okamoto, A., Akamatsu, S. and Hasegawa, H.: Orientation Theory for Satellite CCD Line-Scanner Imageries of Mountainous Terrains, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol.29, Part.B2, Commission II, pp.205-209, 1992.
- 29) Okamoto, A., Akamatsu, S. and Hasegawa, H.: Orientation Theory for Satellite CCD Line-Scanner Imageries of Hilly Terrains, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol.29, Part.B2, Commission II, pp.217-221, 1992.
- 30) Okamoto, A., Fraser, C., Hattori, S., Hasegawa, H. and Ono, T.: An Alternative Approach to the Triangulation of SPOT Imagery, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol.32, Part.B4, pp.457-462, 1998.
- 31) Okamoto, A., Fraser, C. and Hattori, S.: The Geometric Characteristics of Six Alternative Triangulation Models for Satellite Imagery, *Proceedings of American Society for Photogrammetry and Remote Sensing Annual Conference*, CDROM, 1999.
- 32) Trinder, J.C., Donnelly, B.E. and Keong, K.L.: SPOT Mapping Software for WILD AVIOLYT BC2 Analytical Plotter, *Proceedings of IGARSS '88 Symposium*, Edinburgh, Scotland, 13-16 Sept, 1988.
- 33) Westin, T.: Precision Rectification of SPOT Imagery, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol.56(2), pp.247-253, 1990.

(2002.2.19 受付)

ORIENTATION OF SATELLITE LINE SCANNER IMAGES BASED ON AFFINE PROJECTION

Susumu HATTORI, Takeshi YAMAKAWA, Tetsu ONO
and Hiroyuki HASEGAWA

Affine projection based orientation procedures are presented for middle and large scale mapping from satellite line scanner images. The affine projection model is far better adaptable to satellite sensors which are featured by a narrow view angle than conventional central perspective models. And it has an advantage of not needing precise orbital information in orientation. The paper summarizes a sequence of the theories and verifies their validity with experiments on SPOT and MOMS stereo images, in which half a pixel accuracy was obtained for both the images with minimum required (4-9) GCPs.