

ALOS PRISM 画像の標定プログラムの作成と シミュレーションデータを用いたプログラムの検証

Development of a Program for Orientation of ALOS PRISM Images and its Verification Using Simulation Data

神谷 泉

By Izumi KAMIYA

Abstract: I developed an orientation program for ALOS PRISM images with open algorithms in order to determine error factors and to improve geometric accuracy. The program can adjust all or part of the following errors: photographic coordinates, position and attitude of the satellite, ground coordinates of the control points, the mounting angles of the radiometers, the principle distances, principle the positions. The program was verified using simulation data generated from ADS40's. The error factors of the simulation data were investigated; the principle distances were the primary factor, and attitude of the satellite was the secondary. Method of the investigation for the simulated data may be applicable in PRISM's.

Keywords: PRISM, orientation, adjustment, error factor, ADS40

1. はじめに

ALOS (Advanced Land Observing Satellite : 陸域観測技術衛星) に搭載される PRISM (Panchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo Mapping : パンクロマチック立体視センサ) は、地上基準点を用いない 1:25,000 地形図の作成を目的のひとつとしている¹⁾。高分解能人工衛星画像を用いたマッピングシステムは、既に商用システムとして実用化しており、PRISM にも対応することが期待されるが、そのアルゴリズムの詳細は公開されていない。そこで、PRISM の幾何学的な誤差要因の解明と標定精度の向上を目指し、公開されたアルゴリズムによる標定プログラムを作成した。また、作成したプログラムを、ADS40 データから作成した PRISM のシミュレーションデータに適用し、誤差要因の分析を行った。本稿では、その結果を報告する。

2. PRISM について

PRISM は、前方視、直下視、後方視の 3 つの放射計からなる。画素間隔は地上 2.5m、B/H は 1.0 である。各放射計の焦点面上には、6 個あるいは 8 個の 1 次元 CCD が配置されている。ALOS の位置は、2 周波搬送波 GPS 受信機のデータを使用して決定される。PRISM の姿勢は、高精度恒星センサ、ADS (Angular Displacement Sensor : 高周波角度センサ) 等のデータを使用して決定される¹⁾。

3. 誤差モデルと調整方法

本研究では、以下の観測値に誤差があるとしたモデルを採用した。人工衛星画像の標定では、衛星の位置と姿勢を時間の多項式で表す場合が多いが²⁾、本研究では、ALOS PRISM の位置と姿勢の決定精度が高いため、衛星の位置と姿勢の誤差を時間の多項式で表すことにした。なお、ピクセル番号、ライン番号は実数値として扱っている。

(a) ピクセル番号の計測値から計算される写真座標

- (b) ライン番号の計測値から計算される衛星の位置と姿勢
- (c) 各基準点の地上座標の計測値
- (d) 各放射計の取り付け角の計測値
- (e) 各放射計の画面距離
- (f) 各放射計の主点位置

ここでは、(c)～(f)を付加パラメータと呼ぶ。(a)～(f)に対応する観測方程式は、以下のとおりである。

- (a) 全ての像点に関する写真座標の観測値が、地上点と投影中心を結ぶ線と焦点面の交点に一致する。
- (b) 像点を観測した全ての時刻における衛星の位置と姿勢の誤差が 0 である。
- (c) 基準点の地上座標の計測値の誤差が 0 である。
- (d) 放射計の取り付け角の計測値の誤差が 0 である。
- (e) 放射計の画面距離の誤差が 0 である。
- (f) 放射計の主点位置の誤差が 0 である。

衛星の位置と姿勢の誤差は時間の多項式で与えられるが、同一の多項式の係数が適用される範囲を、ここではタイムゾーンと呼ぶ。標定プログラムに対して、各画像がどのタイムゾーンに属するかを指定することができる。この機能は、観測日（あるいはパス）の異なるデータを使用したブロック調整を想定している。

標定プログラムは、衛星の姿勢の誤差を ECR（Earth Centered Rotating Coordinate System：地球に固定された地心座標系）で規定するか、衛星座標系（衛星に固定された座標系）で規定するかを選択することができる。長いパスを同時に調整する場合は、衛星が地心を向く状態を保持しようとするため、ECR で時間の多項式として表現できる回転と、衛星座標系で時間の多項式として表現できる回転は異なる。より良い誤差モデルを選択できるよう、この機能を設けた。

写真座標の観測方程式を導く式は、以下のとおりである。観測方程式は、ECR で記述される。なお、PRISM の幾何学的定義³⁾には、画面距離は使用されないが、仮想的に 1m とした。また、CCD 座標の Z 成分が正の値となるように定義されているため、これに従った。衛星座標系における投影中心の位置と、姿勢の誤差のクロスタームは、微小なため無視した。

（姿勢の誤差を ECR で規定する場合）

$$G_i = kR(A_S(H_S, t_{li}^{(b)}))S_I^{(b)}(t_{li}^{(b)})R(A_{RI})R_I\{X_{li} + A_{XI}\} + O^{(b)}(t_{li}^{(b)}) + A_O(H_O, t_{li}^{(b)}) + S_I^{(b)}(t_{li}^{(b)})O_I \quad (1)$$

（姿勢の誤差を衛星座標系で規定する場合）

$$G_i = kS_I^{(b)}(t_{li}^{(b)})R(A_S(H_S, t_{li}^{(b)}))R(A_{RI})R_I\{X_{li} + A_{XI}\} + O^{(b)}(t_{li}^{(b)}) + A_O(H_O, t_{li}^{(b)}) + S_I^{(b)}(t_{li}^{(b)})O_I \quad (2)$$

$$X_{li} = \begin{bmatrix} x_{li}^{(b)} + v \\ y_{li}^{(b)} + v \\ c_I \end{bmatrix} \quad \text{放射計 } I \text{ における地上点 } i \text{ の CCD 座標（写真座標と画面距離）}$$

$$\begin{bmatrix} x_{li}^{(b)} \\ y_{li}^{(b)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_I(p_{li}^{(b)}) \\ v_I(p_{li}^{(b)}) \end{bmatrix} \quad \text{放射計 } I \text{ における地上点 } i \text{ のピクセル番号の計測値 } p_{li}^{(b)} \text{ から計算した写真座標}$$

$$t_{li}^{(b)} = t_I(l_{li}^{(b)}) \quad \text{放射計 } I \text{ における地上点 } i \text{ のライン番号の計測値 } l_{li}^{(b)} \text{ に対応する時刻}$$

v 残差（何に対する残差かは、適宜判断）

$(u_I(p), v_I(p))$ 放射計 I のピクセル番号 p の写真座標 $(u_I(\cdot), v_I(\cdot))$ が既知の関数

- $(p_{li}^{(b)}, l_{li}^{(b)})$ 放射計 I における地上点 i のピクセル番号、ライン番号の観測値
 G_i 地上点 i の地上座標 (ECR)
 $t_I(l)$ 放射計 I のライン番号 l を観測した時刻 ($t_I(\cdot)$ が既知の関数)
 $S_I^{(b)}(t)$ 時刻 t の衛星の姿勢の観測値 (衛星座標系のベクトルを ECR に変換する回転行列) ($S_I^{(b)}(\cdot)$ が既知の関数)
 R_I 放射計 I の CCD 座標のベクトルを衛星座標に変換する回転行列
 $O^{(b)}(t)$ 時刻 t の ECR における衛星座標系の原点 (衛星の質量中心) の観測値 ($O^{(b)}(\cdot)$ が既知の関数)
 O_I 衛星座標系における放射計 I の投影中心の位置

$$A_O(H_O, t) = \begin{bmatrix} h_{Ox0} + h_{Ox1}t + h_{Ox2}t^2 + h_{Ox3}t^3 + \dots \\ h_{Oy0} + h_{Oy1}t + h_{Oy2}t^2 + h_{Oy3}t^3 + \dots \\ h_{Oz0} + h_{Oz1}t + h_{Oz2}t^2 + h_{Oz3}t^3 + \dots \end{bmatrix} \quad \text{衛星の位置の誤差}$$

$$A_S(H_S, t) = \begin{bmatrix} h_{S\omega0} + h_{S\omega1}t + h_{S\omega2}t^2 + h_{S\omega3}t^3 + \dots \\ h_{S\phi0} + h_{S\phi1}t + h_{S\phi2}t^2 + h_{S\phi3}t^3 + \dots \\ h_{S\kappa0} + h_{S\kappa1}t + h_{S\kappa2}t^2 + h_{S\kappa3}t^3 + \dots \end{bmatrix} \quad \text{衛星の姿勢の誤差}$$

$$A_{XI} = \begin{bmatrix} h_{xl} \\ h_{yl} \\ h_{cl} \end{bmatrix} \quad \text{主点位置と画面距離の誤差}$$

$$A_{RI} = \begin{bmatrix} h_{RI\omega} \\ h_{RI\phi} \\ h_{RI\kappa} \end{bmatrix} \quad \text{放射計の取り付け角の計測値の誤差}$$

$$R \begin{pmatrix} \omega \\ \phi \\ \kappa \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & -\sin \omega \\ 0 & \sin \omega & \cos \omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & \sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \kappa & -\sin \kappa & 0 \\ \sin \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{回転行列}$$

観測方程式は、(1) (2) から k を消去して、 $x_{li}^{(b)}$ 、 $y_{li}^{(b)}$ について解くと、観測方程式が得られる。

$$x_{li}^{(b)} + v = \{c_I + h_{cl}\} \frac{b_1}{b_3} - h_{xl} \quad (3)$$

$$y_{li}^{(b)} + v = \{c_I + h_{cl}\} \frac{b_2}{b_3} - h_{yl} \quad (4)$$

ここで、 $b_1 \sim b_3$ は、以下に示すベクトル B の成分である。

(姿勢の誤差を ECR で規定する場合)

$$B = R_I^T \{R(A_{RI})\}^T \{S_I^{(b)}(t_{li})\}^T \{R(A_S(H_S, t_{li}))\}^T \{G_i - O^{(b)}(t_{li}) - A_O(H_O, t_{li}) - S_I^{(b)}(t_{li})O_I\} \quad (5)$$

(姿勢の誤差を衛星座標系で規定する場合)

$$B = R_I^T \{R(A_{RI})\}^T \{R(A_S(H_S, t_{li}))\}^T \{S_I^{(b)}(t_{li})\}^T \{G_i - O^{(b)}(t_{li}) - A_O(H_O, t_{li}) - S_I^{(b)}(t_{li})O_I\} \quad (6)$$

写真座標の観測方程式の微係数は、数値微分を使用して求めた。調整に使用しない付加パラメータは、その観測方程式に対して、大きな重みを与えることにより、事実上固定した。正規方程式は、数値計算の誤差を避けるため⁴⁾、ガウス法の一つである LU 分解を使用して解いた。

なお、PRISM の場合は、軌道高度にくらべ基準点の比高が小さいため、調整計算で画面距離、主点位置を決定

することは困難であるが、後述のシミュレーションデータに用いた ADS40 ではこれらを決定できる可能性があるため、誤差モデルに含めた。

4. シミュレーションデータについて

標定プログラムの動作を確かめるため、写真測量用スリーラインセンサーである ADS40⁵⁾ のデータを使用し、PRISM のシミュレーションデータを作成した。原データは、ADS40 の精度検証のため、株式会社パスコが 2002 年 4 月 24 日に撮影した ADS40 SP2 によるつくば地区の画像データである⁶⁾ (飛行高度約 2000m、画素間隔地上 0.20m)。このデータは、南北コース 7 コースと東西コース 2 コースからなるが、東西コースは基準点の数が少ないため、本研究では南北コースのデータのみを使用した。シミュレーションデータの作成においては、位置、姿勢及び内部標定要素を PRISM に合わせた形式に変換したが、画像部分はそのまま用いた。

つくば地区には、対空標識を設置した 26 点の基準点がある。ADS40 の精度検証⁶⁾ では、システム補正済画像 (Level 1) 上で基準点を計測したが、本研究では未補正画像 (Level 0) を使用するため、基準点の画像座標 (ピクセル番号、ライン番号) を単眼観測により再計測した。その結果、19 点の基準点が使用可能であった。基準点 No.5 の標高は 358m であるが、他の基準点の標高は 8 ~ 37m である。

PRISM とは異なり ADS40 は、1 つの航空カメラの焦点面上に前方視、直下視、後方視の CCD が配置されている。シミュレーションデータは、同一の方向を向く 3 つの仮想的な放射計があるものとして作成した。視線方向の違いは、焦点面上の CCD の配置位置の違いとしてモデルに取り入れた。

PRISM の幾何学的定義³⁾ では、CCD の画素の位置は、焦点面上の位置ではなく、光軸からの角度として、CCD 毎にピクセル番号の 2 次式で指定される。広角の ADS40 の光学系では、この指定方法が原因となり、大きな写真座標の誤差が発生する。そこで、本来 1 個である ADS40 の前方視、直下視、後方視の各 CCD (12,000 画素) を、仮想的に 12 個の CCD (1,000 画素) が透き間なく配置されているとモデル化し、それぞれに異なる 2 次式を使用することとした。その結果、指定方法に起因する写真座標 x (衛星の進行方向) の平均 2 乗誤差は 0.02 ~ 0.04 画素、最大誤差は 0.05 ~ 0.09 画素、写真座標 y (これと直交する方向) の平均 2 乗誤差は 0.11 ~ 0.13 画素、最大誤差は 0.25 ~ 0.30 画素となった。

ADS40 は航空機に搭載されているため、位置と姿勢の変動が大きい。しかし、それらは GPS/IMU⁷⁾ で計測されており、かなり信頼できる位置と姿勢のデータが得られるという点では、PRISM と類似している。その他、PRISM とシミュレーションデータでは、以下の違いがある。PRISM の前方視、直下視、後方視の視線方向は、23.8°、0°、-23.8° であるのに対し、ADS40 SP2 の視線方向は、28.4°、16.1°、-14.2° である。PRISM では、光が地上から衛星に伝播する間の地球の自転と、光行差を考慮する必要があるが、ADS40 ではこれらを考慮する必要がない。つくば地区の ADS40 のデータでは、ジオイド高を定数としてもよいが、PRISM では広域のジオイドモデルが必要となる場合がある。航空機と衛星の高度の違いにより、大気補正の数式が異なる。

5. シミュレーションデータを用いた標定プログラムの運用とシミュレーションデータの誤差要因の推定

5.1 共通次項

19 点の基準点のうち、18 点を既知点とし、残り 1 点を検証点とした場合の検証点残差を、その点の検証点残差とする。検証点を換えた 19 回の調整計算を行い、19 点の検証点残差の RMS (根 2 乗平均) を計算する。これを、ここでは総合検証点残差と呼ぶ。本研究では、平面位置と高さの総合検証点残差で、誤差モデルの良否を判断する。GPS/IMU の計測結果を信じ、補正を全く行わない場合 (以下、補正前とよぶ) の基準点残差は、表 1 のとおりであった。

5.2 タイムゾーンの指定方法と姿勢の誤差を規定する座標系の選択

付加パラメータの良否の比較の前に、タイムゾーンの指定方法と、姿勢の誤差を規定する座標系を選択するための比較を行った。タイムゾーンの指定方法は、全コースを 1 つのタイムゾーンとする方法 (全コース同一のタ

タイムゾーン) 南向きコースと北向きコースに分けてタイムゾーンを指定する方法(方向別のタイムゾーン) コースごとに別々のタイムゾーンを指定する方法(コース別のタイムゾーン)を比較した。姿勢の誤差を規定する座標系は、ECR と衛星座標系を比較した。これらの $3 \times 2 = 6$ 通りの方法を、付加パラメータを使用せずに、衛星の位置と姿勢の誤差の多項式の次数を変えて比較した(位置と姿勢の次数は同じとした)。結果は、図1のとおりであった。全コース同一のタイムゾーンを使用した場合は、姿勢の誤差を衛星座標系で規定の方が総合検証点残差が小さかった。一方、方向別のタイムゾーンまたはコース別のタイムゾーンを使用した場合は、両者の差は小さかった。

表1 補正前の基準点残差 単位:m

	X(E)	Y(N)	Z	$R = \sqrt{X^2+Y^2}$
平均	0.239	-0.154	1.061	0.340
ばらつき	0.178	0.147	0.258	0.135
RMSE	0.298	0.213	1.092	0.366

5.3 付加パラメータと多項式の次数の選択

5.2の結果に基づき、3種類のタイムゾーンの指定方法について、姿勢の誤差を衛星座標系で規定し、各付加パラメータの有無、1次までの衛星の位置の誤差の多項式の次数、1次までの衛星の姿勢の誤差の多項式の次数の全ての組み合わせについて、比較を行った。なお、衛星の姿勢の誤差を調整に使用する場合は、角の誤差を衛星の姿勢の誤差としても放射計の取り付け角の計測値の誤差としても違いが生じないため、直下視放射計の取り付け角の計測値の誤差は、常に0に固定した。

結果は表2~4のとおりであった。表で、網掛けの欄(付加パラメータ等の組み合わせ)は、その組み合わせから付加パラメータの一部を削除した組み合わせ、あるいは衛星の位置または姿勢の誤差の多項式の次数を減らした組み合わせで、総合検証点残差がより小さいものがあることを示す。また、赤太字の欄は、表中で平面位置あるいは高さの総合検証点残差が最小のものを示す。全コース同一のタイムゾーンを使用した場合は、平面位置及び高さの総合検証点残差を最小にする組み合わせは、ともに「衛星の位置の誤差(定数)+衛星の姿勢の誤差(定数)」であった。方向別のタイムゾーンを使用した場合とコース別のタイムゾーンを使用した場合は、平面位置及び高さの総合検証点残差を最小にする組み合わせは、ともに「画面距離の誤差+衛星の姿勢の誤差(定数)」であった。

使用した基準点は、No.5を除き比高が小さいため、衛星の位置の誤差と画面距離のどちらが真の誤差要因であるかを判断することは難しい。そこで、補正前、衛星の位置の誤差(定数)のみを考慮する場合、画面距離の誤差のみを考慮する場合について、基準点No.5を使用しない調整におけるNo.5と、全ての基準点を使用した調整における女体山山頂の高さの検証点残差を比較した。ここで、女体山山頂(写真1)は、一等三角点筑波山の東

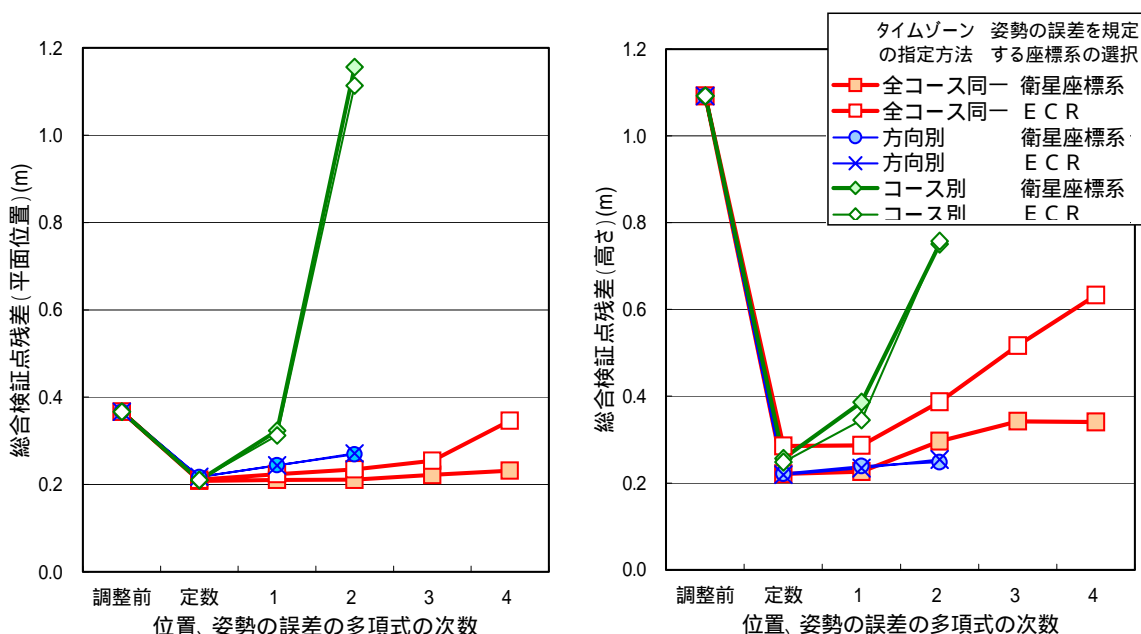


図1 タイムゾーンの指定方法、姿勢の誤差を規定する座標系の比較



写真1 女体山山頂

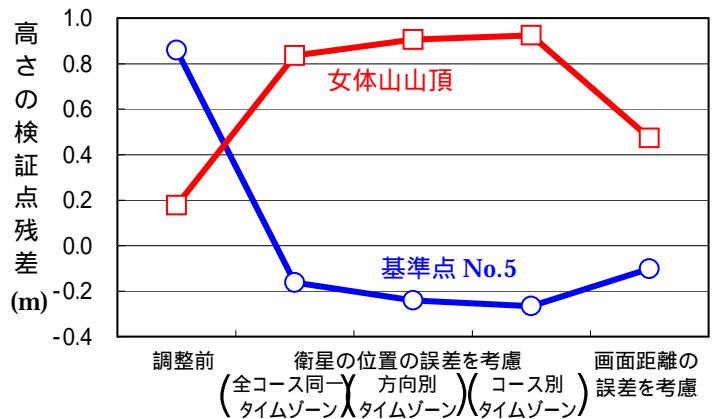


図2 標高の高い検証点での高さの検証点残差

約 2.4m にある女体山の最高点（露岩の頂部、標高 877.19m）である。山頂の高さは、国土地理院がアリダードを用いた平板測量で計測した結果を使用した。画像座標は、ADS40 の拡大画像をプリントアウトし、反射式実体鏡下で画像上にマークをつけた後、その位置を画面上で計測した。結果は、図2のとおりであった。

6. 考察

6.1 タイムゾーンの指定方法と姿勢の誤差を規定する座標系の選択

方向別のタイムゾーン、コース別のタイムゾーンでは、姿勢の誤差を ECR で規定しても、衛星座標系で規定しても、ほとんど同じ結果が得られた。これは、これらのタイムゾーンの指定方法では、同一タイムゾーン内の姿勢の変化は小さく、衛星座標系で同一の回転は、ECR でもほぼ同一の回転になるためと考えられる。一方、全コース同一のタイムゾーンでは、南向きコースと北向きコースで航空機の姿勢が反転するため、衛星座標で同一の回転が ECR ではほぼ逆の回転になるため、違いが現れたと解釈できる。

姿勢が大きく変動する場合、姿勢の誤差を衛星座標系で規定した方が総合検証点残差が小さかった。これは、ADS40 の IMU は、慣性空間上で一定の方向を向くプラットフォームではなく、ADS40 本体に直接マウントされており、ジャイロが衛星座標系にほぼ固定されているため、そのドリフトも衛星座標系でほぼ一定の値をとるためと解釈される。PRISM においても、高精度恒星センサと ADS が PRISM の光学ベンチに直接マウントされているため、姿勢の誤差を衛星座標系で規定した方がよいと予想される。

6.2 付加パラメータと多項式の次数の選択

補正前の基準点残差には、1.06m の高さのオフセットがあり（表1）、これを調整するには、衛星の位置（定数で十分）か、画面距離を変更する必要がある。表2～4をみると、衛星の位置の誤差（定数）、衛星の姿勢の誤差（定数）、画面距離の誤差、主点位置の誤差、放射計の取り付け角の計測誤差、基準点の地上座標の誤差のいずれか1つを選択する場合、衛星の位置の誤差と画面距離の誤差が、高さの総合検証点残差を減らすのに役立つことがわかる。また、表2～4の最善のものは、このどちらかと、衛星の回転（定数）の組み合わせである。これらの事実は、衛星の位置か画面距離を変更する必要があるという説明と整合する。

6.3 シミュレーションデータの誤差要因の推定

今回の調整に現れた ADS40 の誤差は、「衛星の位置の誤差（定数）+衛星の姿勢の誤差（定数）」か、「画面距離の誤差+衛星の姿勢の誤差（1次式）」で最もよく説明される。標高の高い基準点 No.5 と女体山山頂の高さの検証点残差（図2）をみると、画面距離に誤差があると考えた方が、検証点残差が小さくなる。

ところで、女体山山頂には、対空標識が設置されていない。しかし、山頂はドーム型をしており、頂部はわりと平坦であるため、ポイントング誤差（最高点を正確にポイントングできないことによる高さの誤差）は比較的小さいと考えられる。写真1の亀裂が画像上で明瞭に判読できたため、亀裂と最高点の間の高さの違いをポイントング誤差とする。この違いは、写真1のポールの帯の幅（20cm）の半分程度であるため、ポイントン

グ誤差は 0.1m と見積もられる。一方、反射式実体鏡を使用した立体観測において、マークを横視差方向に 0.5 画素ずらすと、マークが浮いている、あるいは沈んでいるように見えた。したがって、縦視差の計測に関しては 0.5 画素程度の再現性があると考えられる。ADS40 の前方視と後方視の間の B/H は 0.8 であり、画素間隔は女体山山頂で 0.11m であるため、高さの再現性は 0.07m と見積もられる。両者の 2 乗和の平方根をとり、女体山頂の高さの計測誤差は、0.13m と見積もられる。

表 2 では、画面距離の誤差を考慮する場合は、衛星の位置の誤差を考慮する場合とくらべ、女体山山頂の検証点残差が 0.36 ~ 0.46m 向上しており、これは見積もられた女体山山頂の計測誤差の 2.7 ~ 3.5 倍であるため、画面距離に誤差があったと考えられる。また、基準点 No.5 の検証点残差も、0.06 ~ 0.16m 向上しており、画面距離に誤差があったことと矛盾しない。

これらを考え合わせると、今回の調整に現れた ADS40 によるシミュレーションデータの誤差は、「画面距離の誤差 + 衛星の姿勢の誤差 (定数)」で説明されると考えるのが妥当である。

7. 結論

アルゴリズムの明確な ALOS PRISM の標定プログラムを作成し、ADS40 データから作成したシミュレーションデータを使用して、その動作を確認した。その過程で、観測方程式の微係数を数値微分で求める方法、調整に使用しないパラメータを観測方程式に大きな重みを与えることにより事実上固定する方法が正常に動作することが確認できた。ADS40 データを使用したシミュレーションデータの誤差要因をある程度解明することができ、同様の方法で、PRISM の誤差要因の解明ができると期待される。なお、本研究では、ADS40 を PRISM の幾何学的定義に無理やり合わせており、必ずしも ADS40 の精度検証とはなっていない。

謝辞

宇宙航空研究開発機構からは、共同研究協定に基づき、ALOS 及び PRISM に関する技術資料を開示していただいた。株式会社パスコからは、ADS40 に関する技術情報を提供していただいた。国土地理院の安藤久満技術専門員からは、女体山山頂の計測の記録を提供していただいた。ここに記して謝意を表す。なお、本研究は、国土地理院の特別研究「ALOS PRISM データの解析に関する研究」の一環として実施した。

参考文献

- 1) Iwata, T., Osawa, Y., and Kawahara, T.: Precision pointing management for the Advanced Land Observing Satellite (ALOS), 23rd International Symposium on Space Technology and Science, ISTS 2002-d-56, 2002.6
- 2) 高木幹男、下田陽久編：新編画像処理ハンドブック、東京大学出版会、pp.1189-1098, 2004.9
- 3) 宇宙開発事業団：PRISM センサモデル、NBF-00012A、35p、2002.10
- 4) 神谷泉：ALOS PRISM 画像の標定プログラムの作成について、日本写真測量学会平成 16 年度秋季学術講演会発表論文集、pp.197-198、2004.10
- 5) Eckardt, A., Braunecker, B., and Sandau, R.: Performance of the imaging system in the LH systems ADS40 airborne digital sensor, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. XXXIII, part B1, pp.104-109, 2000.7.
- 6) Yotsumata, T., Okagawa, M., Fukuzawa, Y, Tachibana, K., and Sasagawa, T.: Investigation for mapping accuracy of the Airborne digital sensor-ADS40, ISPRS Commission I Mid-Term Symposium in conjunction with Pecora 15/Land Satellite Information IV Conference, 2002.11. <http://www.isprs.org/commission1/proceedings/paper/00055.pdf>
- 7) Mostafa, M.M.R., and Hutton, J.: Direct positioning and orientation systems: How do they work? What is the attainable accuracy?, Proceedings, The American Society of Photogrammetry and Remote Sensing Annual Meeting, 2001.4. http://www.applanix.com/media/downloads/products/articles_papers/POSAV_2001_06_AirborneKinematic.pdf

