ADEOS/OCTS 画像の精密幾何補正法

Precise Geometric Correction of ADEOS/OCTS Imagery

橋本俊昭

Toshiaki HASHIMOTO

Abstract: ADEOS/OCTS is an optical sensor with a low resolution and a frequent observation period for mainly observing ocean color and temperature. The highly precise geometric correction is necessary for some applications such as multi-temporal analysis, generation of cloud free composite images, etc., where the accuracy of less than one pixel is preferable. But the accuracy by the system correction is not sufficient to those requirements.

The authors have developed the system for precise geometric correction of NOAA/AVHRR imagery. The system utilizes GCPs and is adaptable for any number of GCPs. The system has been modified for OCTS imagery.

In this paper, the differences of OCTS from other sensors like AVHRR are pointed out at first and the modifications for the geometric correction of OCTS imagery are described.

1. はじめに

1996年8月に打ち上げられた ADEOS (Advanced Earth Observing Satellite) には、海洋の水色及び水温のグローバルな観測を主目的とした OCTS (Ocean Color and Temperature Scanner) が搭載されている。OCTS のデータから雲なしコンポジット画像を作成したり、時系列の解析をしたりする時には、処理対象の各画像が高精度に幾何補正されている必要がある。

ところで、OCTS と同様な極軌道の低分解能高頻度観測の光学センサとしては、これまでに MOS-1/VTIR や NOAA/AVHRR が打ち上げられている。走査幾何学的にこれらのセンサの特性を比較すると表1のようになる。VTIR および AVHRR と比して OCTS の最も大きな特徴は、1 走査で10ラインを同時走査することとチルト機能を持つことである。このため、衛星位置情報の表現法が全く異なる AVHRR は当然のこと、VTIR とはかなり違った幾何補正処理が必要となる。

筆者らは、既に AVHRR 画像の放射量補正や幾何補正等の低次処理を行うシステムを開発した¹⁻³⁾。これは、GCP の少ない場合でも極力高い補正精度が得られるように工夫されたシステムである。また、VTIR についても幾何補正処理の実績があるが⁴⁾、これは衛星の位置・姿勢情報が利用できないため十分な数の GCP が得られる場合にのみ利用可能な手法である。

本研究では、既開発の AVHRR 用処理システムを OCTS 画像に対しても適用可能なシステムへ改良することを目的とする。

2. システム補正

本節では、OCTS 画像のシステム補正法を簡単に紹介し、その補正精度について述べる。

2.1 座標系の定義

幾何補正で用いる座標系を定義する。本手法では、以下の座標系を用いる (図1参照)。

- (1) 測地座標系……地上の任意地点を緯度・経度・標高で表す。
- (2) 地球固定座標系……原点を地球中心、Z 軸を北極方向、X 軸を経度 0° 方向とする右手系の座標系。

表 1 OCTS, VTIR, AVHRR の走査幾何学的比較

項 目	OCTS	VTIR	AVHRR
走 査 方 式	ウィスクブルーム	ウィスクブルーム	ウィスクブルーム
走 査 角	$\pm 45^\circ$	$\pm 38^\circ$	$\pm 55.4^\circ$
走 査 帯	10ライン/scan	なし (1ライン/scan)	なし (1ライン/scan)
チルト機能	あり ($-20^\circ \sim 20^\circ$)	なし	なし
衛星位置情報	3次元直交座標	<注 1>	ケプラーの軌道要素
衛星姿勢情報	(ロール, ピッチ, ヨー)	<注 2>	なし
GAC 処 理	チルトセグメント毎 (1/2 ~ 1/4 周回程度)	なし	1 周回程度毎

注 1 : 3次元直交座標上の値が与えられているが, 1シーン内で2点のみであり幾何補正には利用不可。

注 2 : 観測されているが成果品の中に無い。

図 1 地球固定座標系と衛星座標系

- (3) 軌道座標系……衛星の重心を原点, 衛星進行方向を x 軸, 直上方向を z 軸とする右手系の座標系。
- (4) 衛星座標系……衛星の重心を原点とし, 軌道座標系の各軸回りに衛星の傾き(ロール, ピッチ, ヨー)だけ回転した座標系。

- (5) 光学部座標系……光学系の光軸を x 軸, チルト軸を Y 軸とする右手系の座標系。原点は近似的に軌道座標系と一致させる。

2.2 システム補正法

地球固定座標系において以下のベクトルを定義する。これらのうち, P_s および V の各成分値は, 各走査帯毎に与えられる。

$P_s = (x_s, y_s, z_s)$: 衛星の位置ベクトル

$V = (v_x, v_y, v_z)$: 衛星の速度ベクトル

$G = (x_g, y_g, z_g)$: 観測地点の位置ベクトル

$n = (x_n, y_n, z_n)$: P_s の単位ベクトル
(衛星直上方向ベクトル)

$u = (u_x, u_y, u_z)$: V の単位ベクトル

センサが視準している方向を表す単位ベクトル(視線ベクトル)を d とすれば,

$$G = P_s + R \cdot d \quad (1)$$

が成立する。ただし, R はセンサと観測地点間の距離である。さらに, 観測地点は地球表面にあるから地球の赤道半径を A , 離心率を e として次式が成り立つ。

$$\frac{x_g^2 + y_g^2}{A^2} + \frac{z_g^2}{A^2(1-e^2)} = 1 \quad (2)$$

まず, 画像座標 (u, v) = (ピクセル番号, ライン番号) から走査角および走査時刻を求める。さらに, その走査時刻における上記の各ベクトルを求める。

つぎに, 衛星座標系における視線ベクトル d_s を求める。

焦点面における検地素子の位置を (m, n) とすると, 検地素子から光学部系中心を通るベクトル a は, 焦点距離を c として次式で表される (図 2 参照)。

$$a = (1, m/c, n/c) \quad (3)$$

図2 光学部座標系における視線ベクトル

このベクトルを走査ミラーに対して鏡面反射させた方向が視線ベクトルの方向となる。

光学部座標系において走査ミラーの法線ベクトル $\mathbf{h}$ は次式で表される。

$$\mathbf{h} = (-\sin(45^\circ), 0, -\cos(45^\circ)) \quad (4)$$

この法線ベクトルが、チルト角 τ 、走査角 θ の回転を受けたときの法線ベクトル $\mathbf{h}_s$ は、

$$\mathbf{h}_s = \begin{bmatrix} \cos(-\tau) & 0 & \sin(-\tau) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(-\tau) & 0 & \cos(-\tau) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\sin\theta \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \mathbf{h} \quad (5)$$

$$= \begin{bmatrix} -(\cos\tau - \sin\tau \cos\theta)/\sqrt{2} \\ \sin\theta/\sqrt{2} \\ -(\sin\tau + \cos\tau \cos\theta)/\sqrt{2} \end{bmatrix}$$

となる。衛星座標系における視線ベクトル $\mathbf{d}_s$ は $\mathbf{h}_s$ を用いて次式で求められる。

$$\mathbf{d}_s = \mathbf{a} - (2\mathbf{a} \cdot \mathbf{h}_s)\mathbf{h}_s \quad (6)$$

一般に、衛星の姿勢には傾きがある。この傾きを(ロール, ピッチ, ヨー) = (ω, ϕ, χ) の3成分で表現し、視線ベクトルを以下のように軌道座標系へ座標変換する。これらの3軸傾きも走査帯ごとに与えられている。

$$\mathbf{d}_o = \mathbf{T} \cdot \mathbf{d}_s \quad (7)$$

ここに、 $\mathbf{T}$ は3軸回りの回転マトリクスで以下のように表される。

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \cos\chi & -\sin\chi & 0 \\ \sin\chi & \cos\chi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\phi & 0 & \sin\phi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\phi & 0 & \cos\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\omega & -\sin\omega \\ 0 & \sin\omega & \cos\omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_1 & T_2 & T_3 \\ T_4 & T_5 & T_6 \\ T_7 & T_8 & T_9 \end{bmatrix} \quad (8)$$

なお、走査軸やチルト軸に取り付け誤差がある場合は、視線ベクトルを回転行列により適宜修正する必要がある。

この視線ベクトルを地球固定座標系で表現する。軌道座標系の z 軸方向は地球固定座標系の $\mathbf{n}$ に相当する。 y 軸および x 軸方向の地球固定座標系における単位ベクトル $\mathbf{m}$ および $\mathbf{k}$ は走査時刻における各ベクトルを用いて以下のように表現できる。

$$\mathbf{m} = \mathbf{n} \times \mathbf{u} = (x_m, y_m, z_m) \quad (9)$$

$$\mathbf{k} = \mathbf{m} \times \mathbf{n} = (x_k, y_k, z_k)$$

よって、視線ベクトルは地球固定座標系において次のように表される。

$$\mathbf{d} = \mathbf{S} \cdot \mathbf{d}_o = \begin{bmatrix} x_k & x_m & x_n \\ y_k & y_m & y_n \\ z_k & z_m & z_n \end{bmatrix} \cdot \mathbf{d}_o \equiv \begin{bmatrix} d_x \\ d_y \\ d_z \end{bmatrix} \quad (10)$$

式(1)、(2)および(10)より以下の式を得る。

$$aR^2 + 2bR + c = 0 \quad (11)$$

$$\begin{cases} a = \frac{d_x^2 + d_y^2}{A^2} + \frac{d_z^2}{A^2(1-e^2)} \\ b = \frac{x_s d_x + y_s d_y}{A^2} + \frac{z_s d_z}{A^2(1-e^2)} \\ c = \frac{x_s^2 + y_s^2}{A^2} + \frac{z_s^2}{A^2(1-e^2)} - 1 \end{cases}$$

式(11)を R について解き、解を式(1)に代入することにより観測地点の座標が得られる。

2.3 システム補正による精度

OCTS の標準プロダクトには、LAC データのレベル 1A では1走査帯当たり2ライン、LAC のレベル 1B1 および GAC のレベル 1A の場合には1走査帯当

表 2 システム補正による精度

ケース	レベル	観測日	軌道値	チルト角	GCP 数	画像上誤差* (pixel)		
						v_x	v_y	v
1	LAC 1B1	'96. 9. 3	予測値	0.01°	18	8.47	2.97	8.97
2	LAC 1B1	'96.10.16	決定値	-9.99°	10	11.26	1.24	11.32
3	LAC 1B1	'96.10.17	決定値	-10.01°	21	8.11	4.06	9.07
4	GAC 1A	'96.10.18	決定値	-9.99°	14	1.68	1.50	2.25

*) v_x : 航跡方向 v_y : 走査方向

図 3 システム補正による誤差分布

たり 1 ラインの地上座標が一定間隔のピクセル毎に与えられている。これらの座標値はシステム補正により得られたものである。これらの座標値の精度を GCP を用いて検討した。日本付近を観測した 4 種類の画像について検討した結果を表 2 に示す。また、ケース 3 および 4 の場合の各 GCP に対する誤差分布を図 3 に示す。両画像とも誤差ベクトルが画像の右上部より左下部へ流線状に分布しており、定性的な誤差を内包していることを窺わせる。

これらの結果より、決定軌道データを用いた場合でも画像の重ね合わせ処理等には不十分な幾何補正精度で

あり、GCP を用いた精密幾何補正が必要となることがわかる。

3. 共線条件を用いた精密幾何補正法

3.1 処理フロー

図 4 に、本研究における処理フローを示す。

3.2 共線条件式

高精度の幾何補正を行うには、衛星の位置 (X_0, Y_0, Z_0) および姿勢 (ω, ϕ, κ ; ロール, ピッチ, ヨー) を

図4 本システムの処理フロー

精度よく求める必要がある。そこで、これらの未知パラメータを写真測量における外部標定要素とみなし共線条件式から最解値を求める。

写真座標を地球固定座標と一致させると、投影中心（衛星位置）、画像上の点および地上の対象物が一直線上にあるという共線条件式は以下ようになる。

$$\begin{aligned}
 G_x &= -x \\
 -f \frac{w_1(X - X_0(L)) + w_2(Y - Y_0(L)) + w_3(Z - Z_0(L))}{w_7(X - X_0(L)) + w_8(Y - Y_0(L)) + w_9(Z - Z_0(L))} &= 0 \\
 G_y &= -y \\
 -f \frac{w_4(X - X_0(L)) + w_5(Y - Y_0(L)) + w_6(Z - Z_0(L))}{w_7(X - X_0(L)) + w_8(Y - Y_0(L)) + w_9(Z - Z_0(L))} &= 0
 \end{aligned} \quad (12)$$

f ：仮想焦点距離（任意の値でよい）

(X, Y, Z) ：対象物の地球固定座標

$(X_0(L), Y_0(L), Z_0(L))$ ：ライン番号 L での投影中心の地球固定座標

(x, y) ：対応する写真座標

(w_i) ：地球固定座標系から軌道座標系への変換行列

$$\begin{aligned}
 \mathbf{W} &= \begin{bmatrix} w_1 & w_2 & w_3 \\ w_4 & w_5 & w_6 \\ w_7 & w_8 & w_9 \end{bmatrix} = \mathbf{T} \cdot \mathbf{S}^T \\
 &= \begin{bmatrix} T_1 & T_2 & T_3 \\ T_4 & T_5 & T_6 \\ T_7 & T_8 & T_9 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_k & y_k & z_k \\ x_m & y_m & z_m \\ x_n & y_n & z_n \end{bmatrix}
 \end{aligned} \quad (13)$$

なお、写真座標 (x, y) は、衛星座標系における視線ベクトル $\mathbf{d}_s = (ds_x, ds_y, ds_z)$ を用いて次のように求められる。

$$x = -ds_x \cdot f / ds_z, y = -ds_y \cdot f / ds_z \quad (14)$$

3.3 未知数とすべき外部標定要素の検討

上記共線条件式において外部標定要素となるべきパラメータは衛星位置 (X_0, Y_0, Z_0) 、速度 (v_x, v_y, v_z) および衛星姿勢 (ω, ϕ, κ) であり、これらの値は走査帯毎に軌道予想値もしくは軌道決定値として与えられている。軌道予想値は観測直後に用いられ、決定値は観測3日後に得られる値である。そこで、これらの各観測値の精度が画像上の誤差に与える影響を調べた。観測値の精度としては、衛星位置および速度についてはスペック上の 3σ 値を用い、姿勢については予測値としてスペック上の姿勢精度の 3σ 値、決定値として同姿勢決定精度の 3σ 値を用いた。結果を表3に示す。

この結果より、最も信頼性(精度)の高いのは衛星速度であり、次いで衛星位置、衛星姿勢の順であることがわかる。衛星姿勢の誤差が画像上誤差の大半を占めることになる。そこで、GCPを用いて最確値を求める(未知数とする)パラメータとして、衛星姿勢を最優先とし、次の優先順位として衛星位置とした。また、衛星速度は未知数として扱わないこととした。

3.4 未知パラメータの表現法

標定計算における各パラメータは時間とともに変化するが、収束計算に当たっては、未知パラメータは微分可能な連続関数で表現することが望ましく、多項式、フーリエ級数、スプライン関数等が用いられる。

OCTS では、10ライン1走査帯を同時観測しているため、地上観測地点は走査帯毎に不連続となる。また、検地素子の焦点面における配置によるバンド間レジストレーションも生じる。LACのレベル1Aではこのようなレジストレーション誤差を含んでいる。一方、LACのレベル1B1およびGACのレベル1Aでは、OCTSの理想光軸の地上軌跡に最も近い画素を選択することによりレジストレーション誤差が除去されている。したがって、レジストレーション補正画像であれば、AVHRR用処理システムと同様に扱える。ここでは、LACのレベル1B1およびGACのレベル1Aを処理対象画像とし、AVHRR用処理システムと同様に未知パラメータをライン番号による多項式表現することとした。

衛星位置については、3次式で250m以内、4次式で23m以内の精度で表現できることが判った。

図5はOCTS標準プロダクト内の衛星姿勢データの実例である。この例では、ロールとヨーには約150ラ

表3 軌道要素の誤差による画像上誤差 (pixel)

軌道値	パラメータ	変動量	tilt=0°			tilt=-10°		
			vx	vy	v	vx	vy	v
予測値	X ₀ (km)	1.00	-.597	-1.108	1.258	-.352	-.932	.996
	Y ₀ (km)	1.00	.811	-1.033	1.314	.711	-.778	1.054
	Z ₀ (km)	1.00	-1.072	-.698	1.279	-1.356	-.668	1.512
	V _x (m/s)	1.00	.110	.004	.110	-.122	.021	.124
	V _y (m/s)	1.00	.110	.004	.110	-.106	.018	.108
	V _z (m/s)	1.00	.023	.001	.024	-.025	.004	.025
	roll (deg)	.30	.000	7.281	7.317	2.044	6.382	6.701
	pitch (deg)	.30	-7.646	-.152	7.313	-8.604	-1.481	8.731
	yaw (deg)	.30	7.898	.183	6.155	6.397	-1.090	6.489
決定値	X ₀ (km)	.15	-.189	-.166	.189	-.053	-.140	.149
	Y ₀ (km)	.15	.122	-.155	.197	.107	-.117	.158
	Z ₀ (km)	.15	-.161	-.105	.192	-.203	-.100	.227
	V _x (m/s)	.15	.017	.001	.017	-.018	-.003	.019
	V _y (m/s)	.15	.017	.001	.017	-.016	-.003	.016
	V _z (m/s)	.15	.004	.000	.004	-.004	-.001	.004
	roll (deg)	.155	.000	3.762	3.780	1.060	3.298	3.465
	pitch (deg)	.155	-3.950	-.076	3.821	-4.440	-.762	4.505
	yaw (deg)	.155	4.080	.092	3.180	3.303	-.565	3.351

図5 衛星姿勢データの実例

イン周期の微振動がみられ、その振幅はロールの場合が5ミリ度、ヨーの場合はその半分程度である。ピッチにも微振動は見られるが、その周期は明瞭ではなく振幅も小さい。これら微振動の振幅が画像上誤差に与える影響は表3より僅かである。これらの微振動を無視して低周波成分のみに注目すると、3成分とも大きな曲線状に変化していることが判る。しかし、その変動量はいずれも数10ミリ度程度であり、この変動量の画像上誤差への影響は10分の数画素程度である。

ADEOSの衛星姿勢は、地球センサ、精太陽センサおよび慣性基準装置により1秒毎に観測されている。この観測データに含まれる誤差はランダムな値とみるよりバイアス的な成分が卓越していると考えるのが妥当である。したがって、衛星姿勢は低次の多項式で表現可

表 4 未知数と検証点残差の関係

GCP数	未知数の個数	GCP 分布状況					
		ランダム分布		航跡方向偏在		走査方向偏在	
	$\omega \quad \phi \quad \kappa \quad X_0 \quad Y_0 \quad Z_0$	v_x	v_y	v_x	v_y	v_x	v_y
0	システム補正のみ	13.322	9.4848				
10	3 3 3 2 2 2	.1782	.1985				
	3 3 3 1 1 1	.2572	.2081				
	2 2 2 3 3 3	.1622	.2087				
	2 2 2 2 2 2	.2103	.2142				
	2 2 2 1 1 1	.3167	.1544				
	1 1 1 3 3 3	.2069	.1743				
	1 1 1 2 2 2	.2346	.1558				
	1 1 1 1 1 1	.3990	.2787				
	0 0 0 1 1 1	.5322	.2580				
4	1 1 1 1 0 1	.6548	.9317	1.8218	.7623	.7463	.8523
	1 1 1 1 1 0	.4769	.3347	1.7422	.4781	.4723	.4610
	1 1 1 1 1 1	.4926	.2625	1.6586	1.1353	.2047	.4914
	0 1 1 1 1 1	.4170	.2860	1.6120	.5838	.2741	.7816
	0 0 1 1 1 1	.3863	.2295	1.0087	.6523	.3578	.6971
	0 0 0 1 1 1	.5206	.2476	.4815	.7355	.4768	.7016
5	1 1 1 2 2 2	.2016	.2323	1.6378	1.4016	.2093	.4724
	1 1 1 1 1 1	.2882	.1439	1.6586	1.1353	.2047	.4914
	0 0 0 1 1 1	.4276	.2158	.5656	.7346	.4210	.4837
6	1 1 1 2 2 2	.1808	.3547	1.4511	1.1762	.3280	.4395
	1 1 1 1 1 1	.2934	.1834	.8186	.4030	.2080	.4721
	0 0 0 1 1 1	.4809	.2779	.5988	.9327	.4908	.4938
7	1 1 1 2 2 2	.1703	.1567	1.3922	1.2132	.3286	.4413
	1 1 1 1 1 1	.2890	.1911	.8186	.4030	.2151	.5027
	0 0 0 1 1 1	.4811	.2417	.6562	.9134	.4670	.4373
8	1 1 1 2 2 2	.1746	.1700	1.3931	1.2116	.3951	.4983
	1 1 1 1 1 1	.3468	.4961	1.1315	.7507	.1986	.4961
	0 0 0 1 1 1	.5048	.2738	.6578	.9112	.3906	.4044
3	0 0 0 1 1 1	.6798	.3782	.5359	1.5502	.6636	.9906
2	0 0 0 1 1 1	.4004	.6689	.6465	.6853	.5475	1.1835
1	1 1 0 0 0 0	2.0471	1.9251	1.4727	2.6584	3.1406	1.2975
	0 0 0 0 1 1	1.5385	2.6090	3.4143	8.7175	1.4363	3.2655
	1 0 0 0 0 1	2.2671	2.7350	1.6984	3.8626	4.3445	1.9271
	0 1 0 0 1 0	.8077	2.6746	3.3005	8.8052	.8095	3.3349

表5 未知数と検証点残差の関係（その2）

GCP 数	未知数の個数	LAC (No. 1)		LAC (No. 2)		GAC	
	ω ϕ κ X_0 Y_0 Z_0	v_x	v_y	v_x	v_y	v_x	v_y
0	システム補正のみ	13.322	9.4848	13.571	3.7882	2.6571	1.8511
10	1 1 1 2 2 2	.2346	.1558	.5989	.2843	.5326	.4496
	1 1 1 1 1 1	.3990	.2787	.5780	.4474	.4643	.4018
	0 0 0 1 1 1	.5322	.2580	.8023	.7682	.4218	.6871
7	1 1 1 2 2 2	.1703	.1567	.5895	.4106	.4894	.4691
	1 1 1 1 1 1	.2890	.1911	.5503	.6487	.4527	.4742
	0 0 0 1 1 1	.4811	.2417	.8087	1.0406	.5325	.8018
6	1 1 1 2 2 2	.1808	.3547	.6224	.3933	.4892	.4691
	1 1 1 1 1 1	.2934	.1834	.5704	.5838	.4517	.4742
	0 0 0 1 1 1	.4809	.2779	.8049	1.5879	.5325	.8018
5	1 1 1 2 2 2	.2016	.2323	.6425	.7587	.5021	.4748
	1 1 1 1 1 1	.2882	.1439	.5940	1.0333	.4865	.4894
	0 0 0 1 1 1	.4276	.2158	.9102	.9434	.3849	.8107
4	1 1 1 1 0 1	.6548	.9317	.5697	.8299	.3841	.4506
	1 1 1 1 1 0	.4769	.3347	.5528	.8029	.3590	.5003
	1 1 1 1 1 1	.4926	.2625	.5186	.6298	.4297	.5347
	0 1 1 1 1 1	.4170	.2860	.6354	.8079	.4220	.4765
	0 0 1 1 1 1	.3863	.2295	.6343	.8338	.3433	.8020
	0 0 0 1 1 1	.5206	.2476	.7573	.8458	.3273	.7860
3	0 0 0 1 1 1	.6798	.3782	.7886	.8670	.3187	.8199
2	0 0 0 1 1 1	.4004	.6689	.7970	.7569	.5840	.4882
1	1 1 0 0 0 0	2.0471	1.9251	.7717	.9704	.4078	.6017

能で、その定数項を優先的に未知数とすればよい。

3.5 GCP 数に応じた共線条件式の解法

画像によっては被雲や陸域が少ないなどの理由から十分な数の GCP を取得できないことがある。GCP が少ない時にどのパラメータを未知数とすればよいかが問題となる。この問題の解決に当たっても、AVHRR 用処理システムを参考にした。すなわち、GCP 数に応じて未知数とするパラメータを変えた時の検証点の残差を求めるという実験を行った。

AVHRR 用処理システムの場合、未知パラメータはケプラーの軌道要素およびヨーイングとしたが、OCTS では衛星位置と姿勢である。また、衛星姿勢による誤差が大きいと考えられる。

レベル 1B1 の LAC 画像(表2のケース3に対応)を用いた実験結果を表4に示す。表中、「未知数の個数」が各パラメータを表す多項式のうちの次数の係数ま

でを未知数とするかを表しており、1が定数項のみ、2が定数項と1次項、そして0は未知数としないことを表している。また、システム補正時の残差が表2の結果と異なるが、これは用いている数学モデルの違いによるものと考えられる。

まず、本手法の適用性を検証するために画像内に10個の GCP が偏在なく分布している場合について未知数の個数を様々に変化した場合の検証点の画像上残差を求めた。その結果、GCP がランダムに散在している場合は各パラメータの高々定数項のみを未知数とすれば0.5画素以内の精度で幾何補正可能なことが判った。GCP1個に対して2個の未知数を求めることができるので、GCP が4個以上得られれば衛星位置・姿勢の定数項のみを未知数とすればよいと考えられる。そこで、GCP4個の場合について同様の実験を行った。GCP の配置として、ランダム分布している場合(表中の「ランダム分布」)、ライン方向にほぼ1列に分布し

ている場合（同「航跡方向偏在」）およびピクセル方向にはば1列に分布している場合（同「走査方向偏在」）の3ケースについて検討した。その結果、GCPがランダム分布の場合は衛星位置・姿勢の定数項のみを未知数とすればよいが、偏在している場合には十分な精度が得られなかった。そこで、未知数の個数を変化させて実験したところ、GCPの分布に関わらず最も高精度が得られるのは衛星位置の定数項のみを未知数とした場合であった。それでは、衛星位置・姿勢の定数項を未知数にした方がよいGCP数と衛星位置のみの定数項を未知数にした方がよいGCP数の境界はどこにするかが問題となる。そこで、GCP数を5、6、7、8個とした場合について実験を行った。その結果、GCP6個以上では前者、4～5個の時は後者がよいことが判った。

次の問題は、GCPが4個未満の時の対応である。GCPが2～3個の時は、精度的には不十分なものの4個の時と同様に衛星位置の定数項のみを未知数とした場合が最も高精度であった。GCPが1個の場合は、衛星姿勢のうちロールおよびピッチを未知数とした場合が最も良かった。なお、この場合の「ランダム分布」は画像の中央部にGCPがある場合、「航跡方向偏在」はライン方向には中央部でピクセル方向に端部にGCPがある場合、「走査方向偏在」はライン方向・ピクセル方向とも端部にGCPがある場合を示している。AVHRRの例にならうなら、GCP1個の場合は平行移動を行えばよく、今回の結果はこれと同じ効果を有している。

他の画像に対しても同様の実験を行った。表2のケース1、3および4の各画像に対して実施した結果を表5に示す。ケース3に相当するのはLAC(No. 1)で、表4中のGCPがランダム分布と同じであり、ケース1、4に相当するのがそれぞれLAC(No. 2)、GACである。GCP数が5の場合では、衛星位置・姿勢の定数項を未知数にした方が衛星位置の定数項のみを未知数としたときより精度が高いが、これは表4の場合ほどGCPが極端に偏在していないからであり、両表は同じような結果を示している。

以上の検討より、GCP数に対する未知パラメータを以下のようにする。

表6 GCP数と未知パラメータの関係

GCP数	未知パラメータ					
1	ω_0	ϕ_0				
2～5				X_{00}	Y_{00}	Z_{00}
6～	ω_0	ϕ_0	α_0	X_{00}	Y_{00}	Z_{00}

4. 結 論

衛星位置および衛星姿勢の最確値を、写真測量で用いられる共線条件式を利用して求める手法を開発した。さらに、雲などの影響により充分な数のGCPが得られない場合にどの標定要素を未知変量とするのが効果的かについて検討し、少数のGCPでも適用可能なものとした。

今後、検討・開発すべき機能として以下の点が上げられる。

- (1) GCP数と未知量にすべきパラメータの関係は、GCPが偏在している場合がクリティカルである。しかし、GCPがランダムに分布している場合は未知量にすべきパラメータを増やしてより高精度の補正が可能である。GCPの分布状況を定量表現（例えば1次回帰式に対する相関係数）し、未知量にすべきパラメータをGCP数だけでなくこの定量化した数値によっても可変とすることが効果的である。
- (2) 本手法は、レジストレーション誤差を含むLACのレベル1Aには対応しておらず、この処理レベルの画像を対象にする場合は、事前にレジストレーション補正を行う必要がある。

おわりに

NOAA/AVHRR用に開発された解析プログラムパッケージPaNDA (Package for NOAA Data Analysis) は、OCTSに対する処理機能を追加してPANDA (Package for ADEOS and NOAA Data Analysis) となった。本研究で開発した手法は、このPANDAに採用されている。

(受付日1997.6.2, 受理日1997.9.12)

参考文献

- 1) 橋本「環境モニタリングのための NOAA AVHRR 画像の高速・高精度処理と応用に関する研究」, 東京大学学位論文, 1992
- 2) 橋本, 村井「地上基準点数に応じた NOAA AVHRR 画像の幾何補正」, 写真測量とリモートセンシング, 1993, Vol. 32, No. 5, pp13-18
- 3) PaNDA 委員会「PaNDA 導入ガイド」, 1993
- 4) 橋本, 村井, 垣内, 内田, 「写真測量の原理を用いた VTIR 画像の幾何補正」, 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, 1989, pp85-88

[校正時追記]

- (1) 残念ながら, ADEOS は1997年 6 月30日にその機能を停止してしまったが, 本年法は, 後継機の ADEOS-II/GLI 等に適用可能である。
- (2) 地上局における処理ソフトウェアを改修した結果, システム補正による幾何補正精度は 1 ~ 2 画素程度 (LAC 換算) まで向上した。