LANDSAT-4 MSSステレオ画像による 3 次元座標測定

Three Dimensional Measurement by LANDSAT-4 MSS Stereo Image

土屋 清*, 建石隆太郎*
信田 昌男*

*Kiyoshi Tsuchiya, Ryutaro Tateishi
Masao Shida*

Abstract: In an attempt to explore the applicability of satellite imaging data to cartography for an area without GCP's, 3 dimensional analysis is made on an overlapped area of Landsat-4 MSS data of Japan. The analysis based on the computation of the three dimensional location of 53 well identifiable test points indicates the following features. Mean error in 3 components of elevation, pixel and line coordinate system are: +609 m, -125 m (westward) and -2295 m (southward) respectively and that standard deviation of the errors corresponding to each item are 409 m, 45 m and 44 m respectively. It is confirmed that extremely high order of accurate informations are required on the orbit and attitude of the space craft for a cartographic application of satellite stereo imageries in an area where ground control points are not available.

概 要: 人工衛星からのステレオ画像を用いて地形の 3 次元情報を求めようとする計画が各国において既に進行中である。¹⁾²⁾ 本研究では, LANDSAT-4 の MSS 画像の重複部分を用いて 3 次元座標の測定誤差を求めた。

一対のステレオ画像中から 53 点の対応点を人間の目で選び, GCP なしで 3 次元座標を求めた結果は, 1 : 25,000 の地形図から読み取った値を真値としたときつぎのようになった。誤差の平均値は, 標高, 走査方向, ライン方向 (衛星の進行方向が負) のそれぞれにおいて, + 609 m, - 125 m (西方向), - 2295 m (南方向) であった。誤差の平均値まわりの標準偏差は, 同じ順序で, 409 m, 45 m, 44 m であった。

1 はじめに

地形の 3 次元情報を人工衛星ステレオ画像から求めようとする計画には, フランスの SPOT, 日本の ERS, アメリカの MAPSAT, STEREOSAT などがある。スペーシャトル搭載センサとしては, アメリカの LFC, 西ドイツのツァイス社製カメラ RMK A30/23³⁾, ステレオ MOMS などがあり, 既に実現している。

宇宙から地形の 3 次元情報を得る主目的の 1 つは, 未だ 5 万分の 1 程度の大縮尺地図のない地域における地形図作成である。このような地域では GCP を取ることは不可能であり, GCP なしで 3 次元座標を求めることが必要となる。

3 次元情報を収集するための上記の計画に用いられ

るセンサは, 大別してカメラとリニアレイセンサの 2 種類であり, いずれも姿勢安定性追求のため機械的可動部のないセンサである。これに対し, LANDSAT MSS は, 回転ミラーという機械的可動部を持った, 本来 3 次元情報収集のために設計されたセンサではない。しかしながら, MSS 画像は隣り合うシーンで重複部をもつために, 重複部分を立体視して地形を 3 次元的に知覚する判読は, 今までに行なわれている。しかし, デジタル処理で地形点の 3 次元座標を GCP なしで求めた例はない。

本研究では, 今後の人工衛星からの 3 次元情報収集のための参考データとすべく, 現在容易に入手可能な人工衛星ステレオ画像の 1 つである LANDSAT-4 の MSS 画像を用いて GCP なしで 3 次元座標で求めた。

2 使用したデータ

使用した LANDSAT データは, LANDSAT-4 MSS の

* 千葉大学工学部

「写真測量とリモートセンシング」vol. 24, No.2, 1985

写真 1 LANDSAT-4 MSSステレオ画像

未補正のデータで、つぎの隣り合う 2 シーンである。

右画像 (東) : パスーロウ 107-35

1982 年 10 月 22 日撮影

左画像 (西) : パスーロウ 108-35

1982 年 10 月 13 日撮影

写真 1 は、上記 2 シーンの 7 バンドバルク補正画像である。ここでバルク補正の写真を掲載したのはこれが宇宙開発事業団で提供している写真であるからである。本研究で使用したのは未補正画像データである。

3 次元座標の計算において使用した LANDSAT CCT 内の注記データは、つぎのとおりである。

①人工衛星の位置データ (x, y, z)

地球固定座標系における 4.096 秒毎の座標

②人工衛星の速度データ (x, y, z)

地球固定座標系における 4.096 秒毎の速度ベクトル

③人工衛星の姿勢データ (ω, ϕ, κ)

4.096 秒毎のロール, ピッチ, ヨー角

④時間に関するデータ

画像中心の観測時刻 t_c

走査の往復時間 t_r

1 画素当りの観測時間 t_s

これらのデータにより特定画素の観測時刻が求まる。

(式 7 参照)

⑤MSS 回転ミラーに関するデータ

このデータにより画素番号からミラー角が求まる。(式 2 参照)

文献⁴⁾⁵⁾から引用したデータは、つぎのとおりである。

①MSS センサの人工衛星内の設置ズレを示す回転マトリクス⁴⁾(式 3 参照)

②地球固定座標系 (NASA) と同座標系 (日本) との原点のズレ⁵⁾(式 6 参照)

3 方 法

本研究は、以下の方法にしたが行なわれた。

図 1 53 テスト点の分布

(1) テスト点の収集

カラーディスプレイに拡大表示された左右MSS画像と1:25,000の地形図とを人間の目で照合し、53点のテスト点を収集した(図1参照)。テスト点は、できるだけ一様な分布になるように選んだ。テスト点は、はっきり識別できる点という条件により、必然的に陸域と水域との境界近辺の点が多くなった。表1は、テスト点の左右画像における画素番号、ライン番号および緯度、経度、標高を示したものである。

(2) テスト点の3次元座標の計算

テスト点の左右画像における画素番号、ライン番号および第2節で述べた諸データを用いて、テスト点の緯度、経度、標高を求めた。この詳細は、第5節において述べる。

(3) 誤差の検討

(2)において求めた3次元座標と地形図から読み取った3次元座標とを比較し、その誤差を検討した。

図2 MSS視準座標系 A_1 ($O_1; x_1, y_1, z_1$)と
MSSセンサ座標系 A_2 ($O_2; x_2, y_2, z_2$)

4 座標系および座標変換

本研究で用いられた座標系は以下のとおりである。

(1) MSS視準座標系 $A_1 = (x_1, y_1, z_1)^t$

原点: MSS回転ミラーの中心

z 軸: 視準方向。ミラーの回転に応じて動く。

x 軸: 回転ミラーの回転軸。衛星の進行方向を正とする。

y 軸: 右手系直交座標系により定まる。

(2) MSSセンサ座標系 $A_2 = (x_2, y_2, z_2)^t$

MSS回転ミラーが回転中心にある場合のMSS視準座標系 A_1 と一致する。MSSセンサ座標系における z 軸は、ほぼ地球の中心方向に固定されている。

A_2 と A との座標変換は次式で表わされる。(図2参照)

$$A_2 = MA_1 \quad M = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \quad (\text{式1})$$

$$\text{ここで } \theta = 2 \cdot A \cdot \exp \{ -\beta \cdot (P_x - 1) \cdot t_s \} \cdot \sin [W \cdot \{ t_0 + (P_x - 1) \cdot t_s \}]$$

(式2)

θ : ミラー角。回転中心において $\theta = 0$

P_x : 未補正画像中の画素番号

A, β, t_s, t_0, W : 定数。CCT内に記録されている。

(式2)は、参考文献4)の3-1あるいは参考文献

6)を参照のこと。

(3) 衛星固定座標系 $A_3 = (x_3, y_3, z_3)^t$

原点: 座標系 A_1, A_2 と同じ

z 軸: 地球の中心方向

x 軸: 衛星の飛行方向

y 軸: 右手系直交座標系により定まる。

MSSが人工衛星内に理想的に設置されている場合は、座標系 A_3 は座標系 A_2 に一致する。

A_3 と A_2 との座標変換は次式で表わされる。

$$A_3 = NA_2$$

$$N = \begin{pmatrix} 1 & 0.049 \times 10^{-3} \\ -0.049 \times 10^{-3} & 1 \\ -1.397 \times 10^{-3} & 0.232 \times 10^{-3} \\ 1.397 \times 10^{-3} & -0.232 \times 10^{-3} \\ 1 \end{pmatrix} \quad (\text{式3})$$

回転マトリクス N の値は、文献4)による。

(4) 衛星軌道座標系 $A_4 = (x_4, y_4, z_4)^t$

原点: 座標系 A_1, A_2, A_3 と同じ

z 軸: 地球の中心方向

x 軸: 衛星の飛行方向

y 軸: 右手系直交座標系により定まる

表1 テ ス ト 点

テスト点 番 号	右画像		左画像		東 経 (度)	北 緯 (度)	標 高 (m)
	画素番号	ライン番号	画素番号	ライン番号			
1	773	701	3144	398	139.723022	36.490906	94.0
2	838	1059	3218	755	139.688751	36.221756	14.0
3	830	1069	3208	766	139.681549	36.214890	17.0
4	805	1084	3185	781	139.663010	36.206116	14.0
5	844	1091	3224	787	139.685913	36.197235	14.0
6	634	1057	3010	755	139.561508	36.240997	17.0
7	558	1092	2933	791	139.505936	36.222275	20.0
8	527	1144	2905	844	139.476517	36.186569	23.0
9	465	1146	2844	847	139.437469	36.190323	21.0
10	820	1271	3205	968	139.633301	36.067230	8.0
11	827	1273	3212	969	139.637497	36.065063	8.0
12	844	1286	3229	983	139.645264	36.053757	9.0
13	761	1293	3143	990	139.591721	36.056625	10.0
14	776	1314	3161	1011	139.596863	36.039520	10.0
15	758	1316	3142	1013	139.585007	36.039780	10.0
16	829	1320	3213	1016	139.628784	36.030609	9.0
17	624	1445	3009	1144	139.475586	35.957184	19.0
18	710	1489	3097	1186	139.519135	35.917053	7.0
19	803	1501	3192	1198	139.574249	35.899780	14.4
20	795	1519	3184	1216	139.565567	35.888504	15.0
21	821	1519	3211	1216	139.582367	35.884735	13.0
22	616	1694	3007	1394	139.417953	35.774796	110.0
23	597	1698	2987	1398	139.405075	35.773514	120.0
24	607	1700	2998	1398	139.411163	35.771042	112.0
25	610	1712	3002	1411	139.410233	35.761902	120.0
26	626	1713	3018	1412	139.420319	35.759506	119.0
27	534	1758	2926	1459	139.353790	35.734055	127.0
28	495	1790	2887	1490	139.322876	35.715225	95.0
29	355	1940	2750	1643	139.204987	35.616272	125.0
30	463	1945	2860	1646	139.271301	35.603668	285.0
31	312	1953	2707	1656	139.176285	35.610367	165.0
32	300	1956	2696	1659	139.168381	35.609985	165.0
33	427	1962	2823	1664	139.245712	35.593903	125.0
34	396	1968	2793	1670	139.225082	35.592148	125.0
35	488	1968	2880	1670	139.282501	35.584366	132.0
36	470	1969	2867	1670	139.270432	35.585724	135.0
37	801	2112	3205	1809	139.447250	35.449600	60.0
38	812	2113	3215	1810	139.453339	35.449219	56.7
39	814	2121	3218	1818	139.453369	35.443314	55.5
40	219	681	2586	386	139.378784	36.553299	460.0
41	222	688	2591	391	139.380569	36.548340	450.0
42	219	691	2588	395	139.377213	36.546387	470.0
43	37	860	2408	565	139.228607	36.438126	265.0
44	97	861	2468	566	139.265961	36.431931	229.0
45	26	874	2398	580	139.219131	36.428452	215.0
46	185	904	2556	608	139.311859	36.393188	135.0
47	16	934	2388	640	139.200165	36.385666	115.0
48	22	972	2396	678	139.196381	36.357529	90.0
49	64	981	2438	686	139.220642	36.346985	78.0
50	54	983	2428	689	139.213760	36.346069	78.0
51	97	1032	2471	737	139.230438	36.306458	57.0
52	29	1088	2404	794	139.176605	36.271454	50.0
53	42	1098	2418	803	139.183716	36.262848	50.0

座標系 A_3 が衛星の姿勢変動と共に動く衛星に固定された座標系であるのに対し、座標系 A_4 は姿勢変動に対して独立している。

A_4 と A_3 との座標変換は次式で表わされる。

$$A_4 = RPY A_3 \quad (\text{式 4})$$

$$R = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & -\sin \omega \\ 0 & \sin \omega & \cos \omega \end{pmatrix} \quad P = \begin{pmatrix} \cos \phi & 0 & \sin \phi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \phi & 0 & \cos \phi \end{pmatrix}$$

$$Y = \begin{pmatrix} \cos \kappa & -\sin \kappa & 0 \\ \sin \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

ω, ϕ, κ : それぞれ衛星の姿勢変動ロール角, ピッチ角, ヨー角で CCT 内に記録されている。

(5) 地球固定座標系 (NASA) $A_5 = (x_5, y_5, z_5)^t$

原点 : 地球の中心

z 軸 : 北極方向

x 軸 : 赤道面内経度 0° 方向

y 軸 : 赤道面内東経経度 90° 方向

A_5 と A_4 との座標変換は次式で表わされる。(図 3 参照)

$$A_5 = F A_4 + S \quad (\text{式 5})$$

S は、地球固定座標系における衛星の位置であり、CCT 内に記録されている。回転マトリクス F は、地球固定座標系における衛星の位置 S 、速度ベクトル V は、CCT 内に記録されている。シフトベクトル E は、衛星の位置 S から容易に求められる。

S : 地球固定座標系 A_5 における人工衛星の位置ベクトル

V : 同座標系における人工衛星の速度ベクトル

E : 同座標系における地球の自転による衛星位置のシフトベクトル

図 3 衛星軌道座標系 A_4 (O_4 ; x_4 y_4 z_4) と地球固定座標系 A_5 (O_5 ; x_5 y_5 z_5)

(6) 地球固定座標系 (日本) $A_6 = (x_6, y_6, z_6)^t$

日本の国土地理院が地図作成に利用している地球固定座標系 A_6 と NASA が用いている地球固定座標系 A_5 とは、原点が次式のように少しずれている。

$$A_6 = A_5 + J \quad J = \begin{pmatrix} 147 \\ -509 \\ -686 \end{pmatrix} \quad \text{単位 : m} \quad (\text{式 6})$$

ベクトル J の値は、文献 5) による。

(7) 緯度・経度・標高座標系 A_7

本研究では、日本の地形図を用いているために、 A_7 と A_6 との座標変換においては、ベッセル回転楕円体を用いた。

5 3 次元座標測定

5.1 手 順

テスト点の 3 次元座標測定は、つぎの手順で行なわれた。

- (1) 左右両画像においてテスト点の観測時刻を求める。
- (2) (1) で求めた時刻における衛星の位置 S_r (右画像) S_l (左画像) を地球固定座標系 A_6 において求める。
- (3) 地球固定座標系 A_6 におけるテスト点の観測方向 D_r (右画像) D_l (左画像) を求める。

S_r, S_l : 計算により求められたテスト点観測時の人工衛星の位置

D_r, D_l : 計算により求められたテスト点の観測方向ベクトル

M : 2 観測光線 (S_r, D_r), (S_l, D_l) の交差点

T : 地形図から読み取られたテスト点の位置

I : 観測光線 (S_r, D_r) と、テスト点 T を含む回転楕円体面との交点

J : 観測光線 (S_l, D_l) と、テスト点 T を含む回転楕円体面との交点

図 4 2 観測光線の交差点 M とその誤差表示のための座標系

- (4) テスト点の3次元座標を2直線 (S_r , D_r), (S_l , D_l) の交差点として求める。一般にこの2直線は、ねじれの位置にあるため、最短距離の中点 M を交差点とした。(図4参照)

上記の手順の詳細を以下に述べる。

5.2 テスト点の観測時刻

テスト点の観測時刻 t は、次式により計算される。

$$t = t_c + \{IFIX((L_N - 1)/6) - 200\} \times t_r + (P_X - P_C) \times t_s \quad (\text{式7})$$

t_c : 画像中心の観測時刻

L_N : テスト点のライン番号

t_r : 走査の往復時間 (= 73.42 milli sec)

P_X : テスト点の画素番号

P_C : 時刻 t_c において観測された画素の画素番号

t_s : 1画素当りの観測時間 (= 0.009958 milli sec)

(式7)中の定数 t_c , t_r , t_s は、CCT内に記録されており、 L_N , P_X は、既知である。 P_C は不明であるが、これは次の理由による。MSSのシーンの切り出しに際し、先ず画像中心時刻 t_c が定められ、時刻 t_c に観測していた走査帯を i としたとき、 $(i - 200)$ から $(i + 199)$ の走査帯と1シーンとして切り出している。このとき、時刻 t_c において走査帯 i の何番目の画素を観測していたかの記録はCCT内にはない。

P_C が不明であるため、本研究では、 $P_C = 1620$ と仮定した。これは、時刻 t_c において走査ラインの中央を観測していることを意味する。この場合、観測時刻 t は、最大で走査の往復時間の半分 ($t_r / 2 = 36.71$ milli sec) の誤差が含まれる。この時間に衛星は地球固定座標系において約350 m移動する。

5.3 人工衛星の位置

地球固定座標系 A_5 における人工衛星の位置は、4.096秒毎に時間の関数として与えられている。したがって、テスト点の観測時刻 t における人工衛星の位置は、内挿計算によって求められる。さらに座標変換式(式6)により地球固定座標系 A_6 における位置 S_r (または S_l)が求められる。

5.4 観測方向

MSS視準座標系 A_1 におけるテスト点の観測方向

図5 MSS視準座標系 A_1 における観測方向ベクトル D
図中の格子は、MSSが鉛直下向を観測している場合における24検知素子の地球表面の観測位置関係を示している。

ベクトルは、7バンドを基準に考えると図5に示したようになり、次式で表わされる。

$$(79 \times \{MOD(L_N - 1, 6) - 2.5\}, 182, 705300)^t \quad (\text{式7})$$

L_N : ライン番号

MOD : フォートランの関数。 $L_N - 1$ を6で割った余りを示す。

(式7)で表わされた座標系 A_1 における観測方向ベクトルは、図6に示された流れにしたがって座標系 A_6 における観測方向ベクトル D_r (または D_l)に変換される。

6 3次元座標測定の結果

53点のテスト点に対して、第5節の方法にしたがって地球固定座標系(日本) A_6 における3次元座標を求め、これを緯度経度標高座標系 A_7 に変換した。計算されたこの値と地形図から読み取った値とを比較し、誤差を求めた。緯度経度の平面誤差は、これを走査方向(単位:m)とライン方向(単位:m, 走査方向と直交する方向、衛星の進行方向が負)に変換した。緯線と走査方向とのなす角は、用いた画像と地形図とを照合した結果 9.9° であった。

表2は、誤差を走査方向(m), ライン方向(m), 標高(m)で示したものである。表2中のa, b, c,

D : 観測方向ベクトル

$a \rightarrow b$: 矢印は, a から b が求められることを示す

図 6 地球固定座標系 (日本) A_6 における観測方向ベクトルを求める計算の流れ

d, e, f, g は, 図 4 中のそれと対応している。すなわち, a, b は, 右画像における観測光線がテスト点を含む回転楕円体と交わる点 I の走査方向, ライン方向の誤差を示している。ここでテスト点を含む回転楕円体とは, 中心を保ちつつ地球回転楕円体を拡大あ

るいは縮小してテスト点を通るようにした地球回転楕円体と相似な回転楕円体のことである。c, d は, 左画像における同様の誤差である。e, f, g は, 2 観測光線の交差点 M の走査方向, ライン方向, 標高の誤差を示している。

図 7 画素番号に対する走査方向の誤差

表2 テスト点の誤差

テスト点 番 号	右 画 像		左 画 像		交 会 点		
	走査方向 (a)	ライン方向 (b)	走査方向 (c)	ライン方向 (d)	走査方向 (e)	ライン方向 (f)	標 高 (g)
1	-185.	-2435.	78.	-2315.	-90.	-2374.	1213.
2	-205.	-2392.	72.	-2224.	-112.	-2306.	1275.
3	-209.	-2374.	-55.	-2276.	-157.	-2324.	711.
4	-221.	-2365.	21.	-2270.	-137.	-2316.	1116.
5	-213.	-2332.	-13.	-2193.	-147.	-2261.	921.
6	-233.	-2360.	-49.	-2162.	-156.	-2260.	846.
7	-137.	-2356.	-59.	-2191.	-102.	-2273.	355.
8	-216.	-2349.	-32.	-2237.	-131.	-2292.	849.
9	-216.	-2318.	3.	-2254.	-109.	-2285.	1017.
10	-217.	-2336.	45.	-2253.	-128.	-2293.	1214.
11	-258.	-2350.	24.	-2168.	-163.	-2257.	1300.
12	-244.	-2316.	5.	-2230.	-162.	-2272.	1149.
13	-213.	-2376.	-76.	-2212.	-163.	-2293.	627.
14	-218.	-2328.	23.	-2204.	-132.	-2265.	1113.
15	-218.	-2355.	4.	-2189.	-137.	-2271.	1023.
16	-217.	-2352.	-82.	-2194.	-171.	-2272.	621.
17	-289.	-2391.	-140.	-2282.	-226.	-2336.	686.
18	-226.	-2370.	-37.	-2155.	-153.	-2262.	868.
19	-190.	-2342.	28.	-2213.	-114.	-2276.	1004.
20	-171.	-2477.	28.	-2340.	-102.	-2408.	920.
21	-250.	-2326.	-15.	-2213.	-171.	-2269.	1085.
22	-191.	-2366.	-54.	-2326.	-133.	-2345.	637.
23	-150.	-2345.	-69.	-2288.	-115.	-2316.	376.
24	-197.	-2352.	-35.	-2120.	-128.	-2235.	745.
25	-168.	-2341.	3.	-2215.	-95.	-2278.	790.
26	-199.	-2315.	-36.	-2204.	-131.	-2259.	754.
27	-186.	-2249.	-83.	-2238.	-139.	-2243.	477.
28	-170.	-2403.	-67.	-2253.	-121.	-2328.	476.
29	-141.	-2296.	-71.	-2258.	-104.	-2277.	322.
30	-167.	-2358.	-22.	-2260.	-97.	-2309.	674.
31	-178.	-2292.	-142.	-2216.	-158.	-2254.	168.
32	-160.	-2368.	-101.	-2306.	-128.	-2337.	276.
33	-185.	-2295.	-109.	-2268.	-147.	-2281.	351.
34	-165.	-2287.	-40.	-2233.	-101.	-2260.	577.
35	-204.	-2320.	-369.	-2344.	-282.	-2333.	504.
36	-153.	-2387.	-7.	-2295.	-82.	-2340.	677.
37	-262.	-2164.	-47.	-2051.	-188.	-2106.	995.
38	-213.	-2323.	-37.	-2194.	-153.	-2258.	813.
39	-240.	-2338.	-19.	-2212.	-165.	-2274.	1018.
40	-49.	-2296.	-25.	-2324.	-34.	-2310.	111.
41	-159.	-2362.	-24.	-2235.	-79.	-2298.	625.
42	-92.	-2358.	59.	-2284.	-3.	-2321.	700.
43	-53.	-2368.	-121.	-2230.	-98.	-2299.	-214.
44	-89.	-2335.	-104.	-2252.	-99.	-2294.	-71.
45	-76.	-2327.	-105.	-2259.	-96.	-2293.	-134.
46	-94.	-2382.	-92.	-2299.	-93.	-2341.	7.
47	-40.	-2370.	-137.	-2291.	-105.	-2331.	221.
48	-54.	-2400.	-76.	-2327.	-69.	-2363.	-78.
49	-83.	-2376.	-79.	-2263.	-80.	-2319.	18.
50	-55.	-2330.	-63.	-2286.	-60.	-2308.	-35.
51	-59.	-2338.	-96.	-2253.	-83.	-2296.	57.
52	-51.	-2384.	-159.	-2318.	-124.	-2351.	404.
53	-135.	-2371.	-187.	-2236.	-170.	-2304.	144.
平均値	-169.	-2347.	-52.	-2244.	-125.	-2295.	609.
平均値まわりの標準偏差	64.	45.	73.	56.	45.	44.	409.

図8 ライン番号に対するライン方向の誤差

誤差の偏りを示すために誤差の平均を求めた。

3次元座標の誤差の平均値は、表2に示したように、走査方向、ライン方向、標高のそれぞれにおいて-125 m (西方向), -2295 m (南方向), 609 mである。また、誤差の平均値まわりの標準偏差は、同じ順序で45 m, 44 m, 409 mである。

図7は、表2中のaとcを統合して表示したもので、画素番号に対する図4中の点I, Jの走査方向の誤差を示している。

図8は、表2中のbとdを統合して表示したもので、ライン番号に対する図4の点I, Jのライン方向の誤差を示している。

7 誤差の検討

第6節で示された誤差の要因にはつぎのものがある。

(1) 人工衛星の位置データの誤差

LANDSATは常時、地上観測所において、距離、距離変化率、仰角、方位角が観測され、この観測データに基づいて軌道計算がなされる。計算された軌道と新たに得られた観測データとの差が、ある限度以上にな

ると、再び軌道計算が行われ軌道が修正される。CCT内に記録されている位置データは、この軌道を基に4.096秒毎の位置を求めたものであり、数km程度(10 km以内)の誤差は普通のことである。この位置データの誤差の正確な大きさは不明であるが、1シーン内での誤差の大きさは、時間と共にゆるやかに変化するだけではぼ一定とみなしてよい。

(2) 人工衛星の速度データの誤差

LANDSATの速度データは、(1)と同様に軌道計算の結果導き出されたものである。本研究の3次元座標測定において、速度データの誤差は、(式5)の回転マトリクス F の計算に誤差を生じさせ、最終的にテスト点の観測方向 D_r (または D_l)に誤差を生じさせる。しかし、速度データの誤差の大きさは不明である。ただ、人工衛星の位置データは、絶対的には(1)で述べたように大きな誤差を含んでいるが、相対的には大きな誤差を含んでいないと考えられるため、速度データの誤差もさほど大きくないと予想できる。

(3) 人工衛星の姿勢データの誤差

LANDSAT-3以前では、姿勢は大気中に含まれる CO_2 から放射される電磁波を観測して求めているが、

LANDSAT-4では、スタートラッカーによって姿勢を求めるようになり改善された。しかし、LANDSAT-4の初期においては、その姿勢精度はあまりよくなく、使用した画像の撮影時期では、3軸の各々において 3σ で200 arc secであった⁹⁾。この値を、地表観測点の平面位置誤差に換算すると約680 mである。LANDSAT-4は、その後30 arc secまで姿勢精度が改善された。

(4) 観測時刻の誤差

LANDSATは、3次元座標測定用に設計されていないため、特定画素の厳密な観測時刻を求めることはできない。第5.2節で述べたように、最大36.71 milli secの誤差の可能性がある。この時間にLANDSATは、地球固定座標系において約350 m移動する。この観測時刻の誤差の大きさは、シーンを通じて一定である。

(5) ミラー角の誤差

(式2)で計算されるミラー角 θ には、誤差が含まれている。その大きさは不明であるが、図7に示した曲線の画素方向の誤差の傾向は、ミラー角 θ の計算誤差によるものと推測できる。この傾向は、地表観測点の画素方向の誤差が約0 mから西側へ約230 mの間を変動していることを示している。

(6) MSSセンサの設置ズレのデータの誤差

MSSセンサの人工衛星内での設置ズレは、(式3)の回転マトリクス N により示される。この設置ズレは、地表観測点の平面位置誤差に換算すると約1 km程度である。このデータ N の誤差の大きさは不明である。仮りに誤差がデータの $1/10$ の大きさであるとすれば、その誤差は、地表観測点の平面位置誤差に換算して約100 mとなる。

(7) 回転楕円体面とジオイド面との差

地球固定座標系(日本) A_6 において求められた3次元座標は、ベッセル回転楕円体を用いて緯度経度標高 A_7 に変換されている。すなわち、回転楕円体面上にある2点の標高は等しい。一方、地形図の標高は、ジオイド面に基づいている。すなわち、等ジオイド面上にある2点の標高は等しい。ベッセル回転楕円体面は、基準ジオイド面と水準原点において一致しているが、水準原点から北西に離れるにしたがいベッセル回転楕円体面の方が高くなり、南東に離れるにしたがい低くなる¹⁰⁾。北海道では約50 m、九州では約30 m程ベッセル回転楕円体面の方が高い。本研究の対象地域は、水準原点から遠くとも100 kmの地域であるのでその差は、数m程度である。

(8) 地形図の読み取り誤差

本研究では、1 : 25,000の地形図を人間の目で読み取った。この測定誤差は、厳密には調べていない。地形図上で0.5 mmの読み取り誤差があると仮定すれば、これは12.5 mに相当する。等高線間隔は10 mであるので、標高の読み取り誤差は5 mを超えないと思われる。

(9) 画素サイズによる誤差

左右両画像のステレオ対応点同志のズレは最大 $1/2$ 画素と考えられる。1画素の大きさは、79 m $\times$ 57 mあるから、最大約40 mの誤差が考えられる。

上記の要因のうち、地表観測点の平面位置誤差が100 m以上となるものは、要因(1), (3), (4), (5)である。また、100 m以下のものは、要因(8), (9)である。要因(2)の大きさは不明である。要因(6)の大きさは地表観測点の平面位置誤差にして100 m以下であると推測できる。要因(7)は、標高に約数mの誤差を生じさせる。

また、上記の要因のうち、誤差の大きさがシーンを通じて一定あるいは、ほぼ一定であるものは、要因(1), (2), (3), (4), (6), (7)である。このうち要因(1), (3), (4)は、上に述べたように大きな誤差をもつ。図8に示したようにライン方向の誤差が大きく目偏っているのはこの理由によると推測できる。また、これらの要因(1), (2), (3), (4), (6), (7)による誤差の大きさは、シーンに依存するため、表2中の誤差の平均値は、シーンにより変化するはずである。

要因(5)の誤差は、走査方向に連続的に変化する。表2の最下欄、誤差の平均値まわりの標準偏差において、走査方向の誤差(aおよびc)が64 m, 73 mと、ライン方向の誤差(bおよびd)の45 m, 56 mよりも大きいのは、この理由による。

一方、測定点毎にランダムに変化する誤差は、要因(8)および(9)である。

LANDSAT-4 MSSの隣接シーンのB/H比は、0.21と低い値である。これは、1画素走査方向にずれると標高に換算して $57/0.21 = 271$ mの誤差を生じさせることを意味する。このため、表2のgに示したように標高の誤差が大きな値をもっている。

8 結論と展望

本研究により、LANDSAT-4 MSSの隣接するステレオ画像からGCPなしで3次元座標を求めたときの誤差

が明らかにされた。

今後の3次元情報収集を目的とした人工衛星においては、以下の改善が期待できる。

- (1) Global Positioning Systemによる位置データ、速度データの改善（位置： x, y, z の各々において 1σ が10 m）
- (2) 高精度スターセンサーによる姿勢データの改善（3軸の各々において 1σ が5 arc sec）
- (3) 回転ミラーのような可動部を用いられるため、ミラー角の誤差は含まれない。
- (4) リニアアレイセンサにおいて、特定画素の観測時刻が正しく求められる。
- (5) リニアアレイセンサにおいて、画素サイズがLANDSAT MSSより小さくなる。（10 mないし20 m）

一方、GCPのない地域において標高を求める場合、回転楕円体面とジオイド面とその差をどう扱うかは今後の課題である。

9 謝 辞

本研究の遂行にあたり、NOAAのHoward W. Warriner氏および宇宙開発事業団の新井康平氏、嶋野洋介氏か

らLANDSATに関する貴重な情報の提供を受けたことに対し、また国土地理院の小牧和雄氏から測地に関する貴重な情報の提供を受けたことに対し、深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 建石隆太郎「三次元測定のための人工衛星」写真測量とリモートセンシング vol. 18, No. 3, 1979
- 2) 建石隆太郎「地形図作成のための宇宙データの取得と処理」写真測量とリモートセンシング vol. 23, No. 2, 1984
- 3) 村井俊治「スペースシャトル用宇宙写真測量カメラ」写真測量とリモートセンシング vol. 23, No. 4, 1984
- 4) GSFC, NASA 'LANDSAT-4 TO GROUND STATION INTERFACE DESCRIPTION (REVISION 7)' August 1983
- 5) GSFC, NASA 'TM X-70868 GODDARD EARTH MODELS 5 AND 6'
- 6) 宇宙開発事業団「ランドサットMSSデータCCTフォーマット説明書（スーパーストラクチャ）」1982年12月8日
- 7) 宇宙開発事業団「地球観測データ利用ハンドブック」1982年11月
- 8) EROS Data Center 'LANDSAT MSS CCT FORMAT, VERSION 1.0'
- 9) 新井康平「ランドサット4号TMセンサーのラジオメトリック、幾何学的性能及び利用検証の現状」日本リモートセンシング学会誌 vol. 3, No. 2, 1983
- 10) 西修二郎「日本の天文ジオイドについて」国土地理院時報 No. 55, 1981