

リモートセンシングによる

1B-6

画像ナビゲーションの幾何モデル

星 仰*
(茨城大学)

鷹野 信行**
(筑波大学)

1. はじめに

人工衛星はあらかじめ高度、速度、軌道等設定されているが、実際はその計画軌道周辺を微小変動しながら周回している。このためセンサーによる観測区域にズレが生じ、観測されるべき地点が観測されなかつたり重複してスキャンされる地点が生じる。したがって、得られた画像データを利用する前の処理として幾何補正を施す際、データ収集時における衛星高度、位置、センサーの傾きといった情報は不可欠となってくる。そこでまず最初に、新たに設定した3次元測定を行う幾何モデルを用いて画像歪と各変動量との関係を探り、これを基にあるシーン内における任意の時刻の衛星の正確な位置・姿勢を割り出す仮想画像ナビゲーションシステムの基礎的な研究を行う。

2. 軌道衛星の諸条件

3次元計測を行うモデルとして、図1のようなモデルを設定する。斜め前方方向と鉛直方向に視準された2台の固体センサーを搭載し、斜め方向のセンサーがスキャンした後、同じラインを通る鉛直方向のセンサーがスキャンすることによりステレオ画像が収集され、デジタルな方法により3次元測定が行われる。

軌道高度hにおける重力加速度をg'とすると地球表面R(地球中心Oからの距離をRとする)の時の加速度gとの関係は、式(2.1)で与えられる¹⁾。

$$g' : g = R^2 : h^2 \tag{2.1}$$

また、対地速度vおよび衛星周期Tは力学的法則から式(2.2)、(2.3)が成り立つ。

$$v = \sqrt{g'h} \tag{2.2} \quad T = 2\pi h/v \tag{2.3}$$

なお、ここでは地球を球と仮定し半径R=6,370kmを用いている。軌道高度h=600~900kmとすると、v=7.40~7.56(km/s)、T=96.6~102.9(minutes)となり、これをまとめると表1ようになる。また、太陽同期準回帰軌道を取り、その軌道傾斜角は約99度、斜め方向の探査角は0.54度としている。

3. 地上座標系

画像データとして国土地理院発行の標高データを用いる。経度方向にX軸、緯度方向にY軸をとり、標高値をZ座標として3次元座標系に置き換え、以下、これを地上座標系(X, Y, Z)とする。軌道上のセンサーが微小変動したときの画像データに与える影響を考え、センサーの正規の軌道からの3次元的ズレ量(Δx, Δy, Δz)と3軸上の微小回転量(Δω, Δφ, Δκ)を考慮して画像データを作成する。

撮影軸の傾きによる各軸の周りの回転マトリクスをR(ω), R(φ), R(κ)とすると、

$$R(\omega, \phi, \kappa) = R(\omega) \cdot R(\phi) \cdot R(\kappa) = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}$$

となり、地上座標系での衛星位置を(X₀, Y₀, Z₀)、カメラ座標系上の点(x, y, z)とした時、次式からセンサーの傾きと地上座標との関係が得られる。

$$\left. \begin{aligned} X - X_0 &= (Z - Z_0) \frac{a_{11}x + a_{12}y - a_{31}Z}{a_{13}x + a_{23}y - a_{33}Z} \\ Y - Y_0 &= (Z - Z_0) \frac{a_{12}x + a_{22}y - a_{32}Z}{a_{13}x + a_{23}y - a_{33}Z} \end{aligned} \right\} \tag{3.1}$$

4. 標定要素の変動量

画像データは連続時間の中で得られるので、衛星の位置と姿勢の変動量も表2のデータ²⁾をもとに任意の時間関数f(t)として表す必要がある。その際の近似関数として以下の4次式を用いる。

$$f(t) = f_0 + f_1 \cdot t_1 + f_2 \cdot t_1^2 + f_3 \cdot t_1^3 + f_4 \cdot t_1^4 \tag{4.1}$$

f(t) = y とすると式(4.1)における係数f₀~f₄は、次式で誤差の総和を示すQが最小となるように決定される。

$$Q = \sum_{i=1}^n (f_0 + f_1 \cdot t_i + f_2 \cdot t_i^2 + f_3 \cdot t_i^3 + f_4 \cdot t_i^4 - y_i)^2 \tag{4.2}$$

式(4.2)の両辺をf₀~f₄で偏微分して0とおくと以下のようなになる。

$$\frac{\delta Q}{\delta f_i} = 2 \sum_{i=1}^n (f_0 + f_1 \cdot t_i + f_2 \cdot t_i^2 + f_3 \cdot t_i^3 + f_4 \cdot t_i^4 - y_i)^2 \cdot t_i = 0 \tag{4.3}$$

これは $f_0 \sim f_4$ に関する連立1次方程式であり、これを解いて係数 $f_0 \sim f_4$ は求められる。

この式(4.3)と表2のデータをもとにズレ量($\Delta x, \Delta y, \Delta z$)、回転量($\Delta \omega, \Delta \phi, \Delta \kappa$)をそれぞれ以下のように時刻 t の4次式で表す。

- (1) ローリング： 軌道方向(x軸)の周りの回転量 $\omega(t) = \omega_0 + \omega_1 \cdot t + \omega_2 \cdot t^2 + \omega_3 \cdot t^3 + \omega_4 \cdot t^4$
- (2) ピッチング： 走査方向(y軸)の周りの回転量 $\phi(t) = \phi_0 + \phi_1 \cdot t + \phi_2 \cdot t^2 + \phi_3 \cdot t^3 + \phi_4 \cdot t^4$
- (3) ヨーイング： 鉛直方向(z軸)の周りの回転量 $\kappa(t) = \kappa_0 + \kappa_1 \cdot t + \kappa_2 \cdot t^2 + \kappa_3 \cdot t^3 + \kappa_4 \cdot t^4$
- (4) Δy : 走査方向への変動量 $y(t) = y_0 + y_1 \cdot t + y_2 \cdot t^2 + y_3 \cdot t^3$
(走査方向への変動量は表2に含まれていないため、1秒間に約12m移動すると仮定している。)
- (5) Δh : 衛星の高度変化量 $h(t) = h_0 + h_1 \cdot t + h_2 \cdot t^2 + h_3 \cdot t^3 + h_4 \cdot t^4$
(設定高度を800kmとしている。)
- (6) Δx : 軌道方向への変動量 $X(t) = X(0) + \sum_{t=0}^{k=1} v(t)$
式(2.2)、(2.3)と次式により求める。

これらの各々が単独で発生したときの画像データのズレ量($\Delta X, \Delta Y$)にどれだけ影響があるかを求めると図2、図3のようになる。この分析地区内においては、移動量($\Delta x, \Delta y, \Delta z$)と回転量($\Delta \omega, \Delta \phi, \Delta \kappa$)による変位が打ち消し合い、衛星の変動による画像歪は極めて小さくなっている。

5. おわりに

本研究による画像ナビゲーションシステムは前方スキャナと後方スキャナの画素のズレ量から軌道の微小回転量と移動量を求めるための試算を実施したものである。この結果、軌道の3軸の移動量からスキャナの走査方向(Y軸方向)へのズレ量がある程度幾何的にずれるかを図2のように求めることができた。また、軌道の3軸の微小回転量と移動量の総和として図3のようなYのズレ量があることが明らかになった。これらの成果をもとにして、今後、より現実的な画像ナビゲーションシステムに必要な幾何モデルを作成していく予定である。

参考文献

- 1) 星 仰 : リモートセンシング工学の基礎, 森北出版, p.74~p.81, 1984.
- 2) 日本測量協会: 現代測量学, 写真測量②, No.7, p.309~p.414, 1985.

表1 一般的な軌道条件

高度(km)	速度(km/s)	周期(minutes)
600	7.56	96.6
650	7.53	97.7
700	7.50	98.7
750	7.48	99.7
800	7.45	100.8
850	7.43	101.9
900	7.40	102.9

表2 LANDSATの軌道条件

	画像位置 画像中心からの時刻	ロール角 $\times 10^{-3} \text{rad}$	ピッチ角 $\times 10^{-3} \text{rad}$	ヨー角 $\times 10^{-3} \text{rad}$	高度 km
1	-13.8	-5.763	-0.877	6.622	914.609
2	-10.35	-5.775	-0.748	6.639	914.547
3	-6.90	-5.745	-0.740	6.559	914.489
4	-3.45	-5.692	-0.824	6.531	914.431
5	0.0(中心)	-5.623	-0.969	6.462	914.374
6	3.45	-5.569	-0.114	6.401	914.316
7	6.90	-5.547	-1.305	6.371	914.258
8	10.35	-5.577	-1.442	6.409	914.200
9	13.8	-5.676	-1.518	6.523	914.149
平均		-5.664	-1.062	6.506	914.375

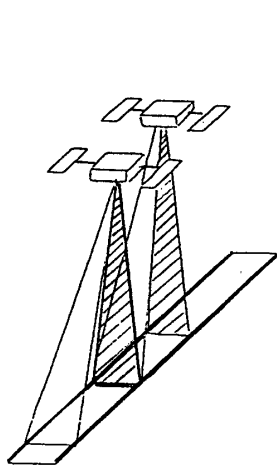


図1 3次元測定を行うためのモデル

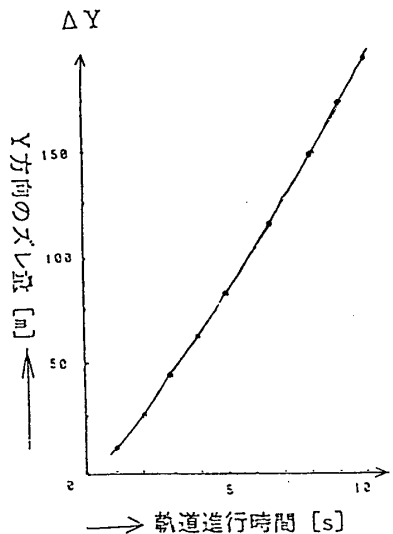


図2 移動によるYのズレ量

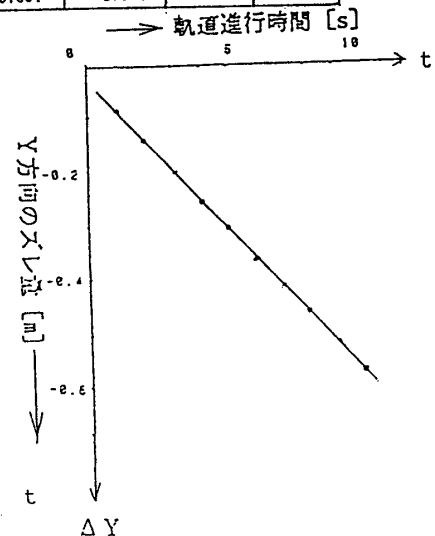


図3 移動と回転によるYのズレ量