研 究 速 報
UDC 621.397.3：681.3：621.396.946

地上基準点が少ないときのNOAA AVHRR画像幾何補正

Geometric Correction of NOAA AVHRR Imagery with Few GCPs

橋 本 俊 昭*・村 井 俊 治*
Toshiaki HASHIMOTO and Shunji MURAI

1. は じ め に

人工衛星から取得される画像データには多くの幾何学的歪が含まれている．このような画像データを利用するには，この歪を除去しその利用目的に応じた地図座標に変換する必要がある．気象衛星NOAAのAVHRR (Advanced Very High Resolution Radimeter) 画像の場合は，軌道予想値のみを用いたシステム補正がよく利用される．通常，軌道予想値には誤差が含まれており，衛星姿勢の傾きもあるので，システム補正済画像にもまだ歪が残っている．そこで，さらに正確な画像が必要な場合は画像上および地上で座標が既知の点（地上基準点：GCP）を多数用いて精密幾何補正が行われる．

十分な数のGCPが得られれば，精密な幾何補正が行えるのは明らかであるが，画像によっては雲等の影響で多数のGCPが得られないことも多い．このような場合の対処法としては，①少ないGCPを用いてできる限り正確な補正を行う，②近隣の受信局で受信した雲の少ない画像から多数のGCPを取得して軌道要素を正確に推定し，その軌道要素を当該地域に外挿法で適用する，③雲の少ない数日前の画像から多数のGCPを取得して軌道要素を正確に推定し，その軌道要素を当該時刻に外挿法で適用する，といった方法が考えられる．このうち，②は別の地域の画像の入手，処理を必要とし得策ではない．③は①より高精度が期待できるが曇天の続いた時や雲に覆われることの多い地域では適用しにくい．そこで，本研究では①の方法について検討を行う．なお，③の方法についても今後検討する予定である．

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) を精度よく求める必要がある．そこで，これらの未知変量を写真測量における外部評定要素とみなし，共線条件式から解を求める．衛星位置は地心からの距離R，赤道面からの離角u，軌道傾斜角i，昇交点経度Ωにより表現する．各パラメータは時間と共に変化するのでライン番号の関数で表現する．

地上座標は地心座標系で表す．また，画像座標は航跡方向をx，軌道法線方向をzとする右手系とする．このとき，投影中心(センサ位置)，画像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のようになる．(図1参照)

$$Gx = -x - f\frac{w_1(X-X_0(L))+w_2(Y-Y_0(L))+w_3(Z-Z_0(L))}{w_7(X-X_0(L))+w_8(Y-Y_0(L))+w_9(Z-Z_0(L))} = 0$$

$$Gy = -y - f\frac{w_4(X-X_0(L))+w_5(Y-Y_0(L))}{w_7(X-X_0(L))+w_8(Y-Y_0(L))}$$

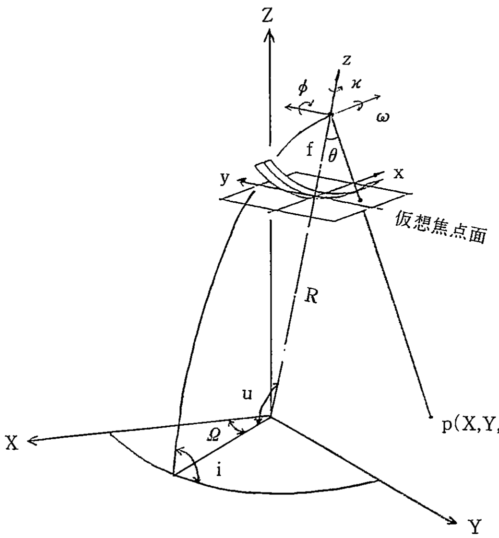

図1　共線条件

*東京大学生産技術研究所　第5部

$$\frac{+w_6(Z-Z_0(L))}{+w_9(Z-Z_0(L))}=0$$

f：仮想焦点距離（任意の値でよい）

（X，Y，Z）：対象物の地上座標

$(X_0(L), Y_0(L), Z_0(L))$：ライン番号Lでの投影中心の地上座標

（x，y）：対応する画像座標

画像座標（Lライン，Pピクセル）に対し，

$x=0$，$y=f\cdot\tan\theta$

$\theta=(P-2049/2)\cdot\Delta\theta$

$\Delta\theta$；ステップ角

(W_1)：回転行列

$$W=K_X(\omega)K_Y(\phi)K_Z(\kappa)K_Y(u^*)K_X(i^*)K_Z(\Omega^*)$$

$$=\begin{pmatrix} W_1 & W_2 & W_3 \\ W_4 & W_5 & W_6 \\ W_7 & W_8 & W_9 \end{pmatrix}$$

$K_M(N)$：M軸回りに角度Nの回転行列

ただし，$u^*=u-90°$，$i^*=90°-i$，$\Omega^*=\Omega-180°$とする．

$$K_X(N)=\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos N & \sin N \\ 0 & -\sin N & \cos N \end{pmatrix},$$

$$K_Y(N)=\begin{pmatrix} \cos N & 0 & -\sin N \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin N & 0 & \cos N \end{pmatrix},$$

$$K_Z(N)=\begin{pmatrix} \cos N & \sin N & 0 \\ -\sin N & \cos N & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} X_0(L) \\ Y_0(L) \\ Z_0(L) \end{pmatrix}=K_Z(-\Omega^*)K_X(-i^*)K_Y(-u^*)\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ R \end{pmatrix}$$

3．パラメータの近似式表現

未知変量R，u，iおよびΩは次の軌道6要素で表せる．これらの値は米国海洋大気庁から毎日送られて来る衛星軌道予想情報より得られる．

a：軌道長半径　　e：軌道離心率

i：軌道傾斜角　　λ：昇交点経度

w：近地点引数　　M：平均近地点離角

衛星の運動を地球と衛星の2質点間の引力による運動と考えると次のケプラーの法則が成り立つ．

$$M=E-e_0\sin E$$

この時，軌道面上における衛星位置（R，v）は次式で求められる．ただし，vは近地点方向と衛星位置のなす角である．

$$R=a_0(1-e_0\cos E)$$

$$v=2\tan^{-1}\left(\sqrt{\frac{1+e_0}{1-e_0}}\ \tan\left(\frac{E}{2}\right)\right)$$

未知変量uは，定義より$u=w+v$として与えられる．昇交点経度λは春分点から測った値である．これを地心座標系における昇交点経度Ωに直すには春分点経度λ_Gを加えて，$\Omega=\lambda+\lambda_G$とすればよい．

軌道要素の予想値が正確であれば，未知変量のうちR，u，iおよびΩは以上のように与えられ，残る未知変量は姿勢に関するパラメータ（ω，φ，κ）だけとなる．しかし，軌道要素の予想値は正確でないという報告がなされており[1]，R，u，iおよびΩも未知変量として取り扱う．

本来，λ_0，w_0およびM_0（それぞれλ，wおよびMの元期時刻における値）は直線的に変化し，他の要素は一定の値を採るべきものであるが，実際は摂動により変動する．そのため，米国海洋大気庁では実際の衛星の追跡結果を利用して軌道要素の予想値を算出している．そこで，実際の軌道予想値がどのような値をとるのかを2週間にわたって2期間について調べてみた．その結果の一部を図2および表1に示す．これらの結果をみると，時々異常値をとることがあるが，経時的な変動量の大きさは非常に小さい．軌道予想値の値そのものは不正確であっても経時的な変動量の大きさは同程度と仮定すれば，数日程度の間ではλ_0，W_0およびM_0の3要素は線形に変化し，他の要素は一定値とみなしてよい．ただし，軌道予想値を使う場合は1日のみのデータだけを使うのではなく，数日間のデータの傾向を調べて特異なデータを避けるようにする必要がある．また，e_0，i_0およびa_0については数日間のトレンドから線形変化するものとして扱ったほうが精度がよい．

つぎに各パラメータを時間（ライン）に関する簡単な近似式（多項式が望ましい）で表現することを考える．前述の結果より，同要素の経時的な変動は無視できるものとすれば，定義より，iは定数項，Ωは1次式で表現可能である．衛星はだ円軌道を周回しているのでRは周期関数となる．また，uにも周期成分が含まれる．しかし，1シーン程度であれば多項式表現も可能である．パラメータがどのような近似式で表現できるかシミュレーションにより検討した．ケプラーの式から得られる値を真値とし，真値から最小二乗法により近似式を求める．近似式による近似値と真値との差は近似式表現による潜在的な誤差といえる．この潜在的な誤差が画像上でどの程度の歪になって表れるかを評価するために，共線条件式にこれらの誤差を強制的に付加したときの残差を求めた．その結果が表2である．なお，近似式表現についての検討を行ったパラメータはRおよびuであり，近似式

研　究　速　報

表1　軌道要素の経時変化

軌道要素	単　位	平均値回り		直線回帰	
		$\varepsilon_{S.D.}$	ε_{max}	$\varepsilon_{S.D.}$	ε_{max}
e_0		.1282E-4	.2108E-4	.4408E-5	.8443E-5
i_0	deg	.001050	.001975	.3968E-3	.7658E-3
a_0	km	.04155	.06948	.00334	.00697
w_0	deg			.23323	.39446
λ_0	deg			.01261	.01296
M_0	deg			.23319	.39511
w_1	deg/d	.07357	.17612		
λ_1	deg/d	.1257E-3	.1815E-3		
M_1	deg/d	.06407	.12026		

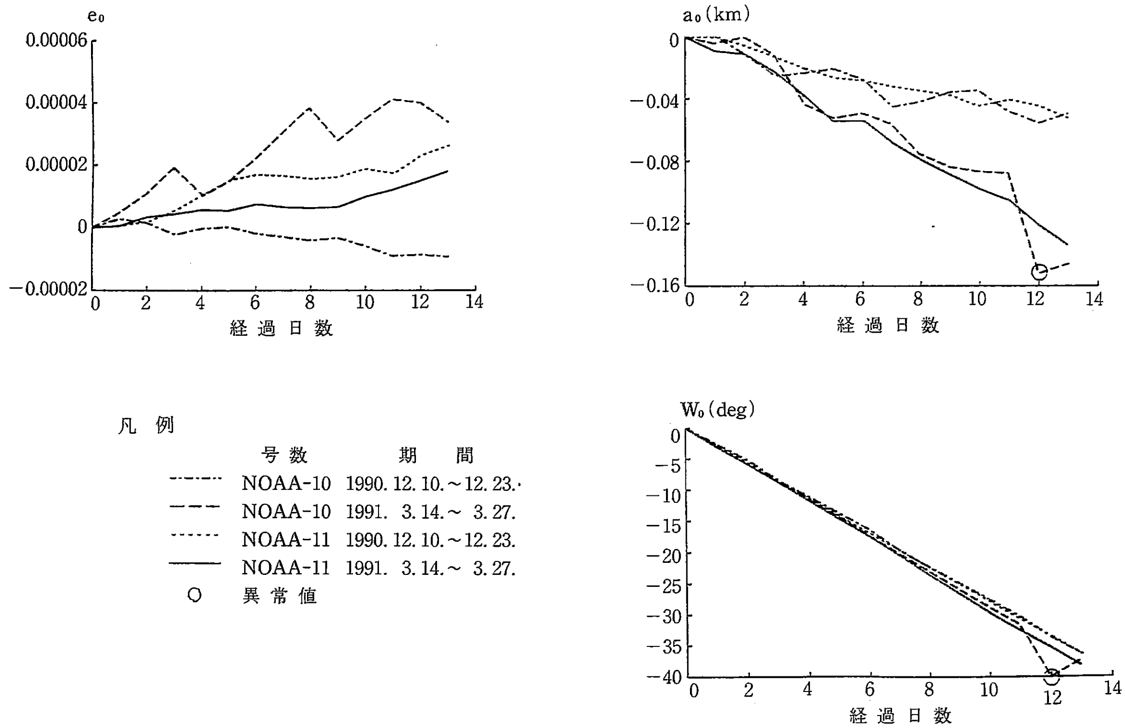

図2　軌道要素の経時変化

を求める時間範囲は1シーンのほぼ最大値である15分とGAC (Global Area Coverage) データの最大値である251分とした．

この結果から，画像1シーン程度の時間内ではR，uともに1次式～2次式で表現可能であり，Rについては三角関数を併用すればさらによいことがわかる．GACデータの場合は周期成分を表現するために三角関数を用いる必要がある．なお，三角関数において，周期Tの誤差は数秒程度までは結果にほとんど影響せず未知数とする必要はない．また，E_0，v_0の誤差はそれぞれR_0，u_0に吸収されてしまう．

姿勢に関するパラメータ（ω，ϕ，κ）は大きな変動はないと考えられるので定数または1次式で表現できるものとする．

結局，各パラメータを次のように表現することにする．

R	：定数とcos
u	：1～2次式（GACでは1次式とsin）
Ω	：1次式
i	：定数
ω，ϕ，κ	：定数または1次式

表2　近似式による誤差とそれによる画像上の残差

時間範囲	近似式	パラメータ	近似式の誤差*		εmaxによる残差**	
			$\varepsilon_{S.D.}$	ε_{max}	V_x	V_y
15分	1次式	R u	.01989 .0000214	.04116 .0000395	.00000 .22386	.01947 .00000
	2次式	R u	.002956 .0000002	.005255 .0000004	.00000 .00227	.00249 .00000
	定数とcos+	R	.00049	.00111	.00000	.00052
	1次式とsin++	u	.0000013	.0000027	.01530	.00000
251分	定数とcos+	R	.01486	.02972	.00000	.01343
	1次式とsin++	u	.0000230	.0000330	.18702	.00000

＊）誤差の単位はR：km，u：rad　　＊＊）残差の単位はpixel

＋）$R=R_0+R_1\cos(2\pi(t-t_0)/T+E_0)$

＋＋）$u=u_0+u_1t+u_2\sin(2\pi(t-t_0)/T+v_0)$

（Tは周期，E_0，v_0は元期時刻における値）

4. 結　　論

NOAA AVHRR画像の幾何補正法として，写真測量で利用される共線条件を用いた方法を提案した．本方法では，外部標定要素が時間（ライン）の関数として表されるが，各パラメータに対して最適な関数形を提案した．今後は，未知変量とすべきパラメータの優先順位を決めて，GCPが少ないときにどのパラメータを修正すべきか検討する．　　　　（1991年5月23日受理）

参 考 文 献

1) W. J. Emery, J. Brown, Z. P. Nowak, 'AVHRR Image Navigation: Summary and Review' Photogrammetric Engineering and Remote Srensing, 1989, Vol. 55, No. 8, pp 1175-1183