研究速報
UDC 528.716.061

地上基準点が少ないときのNOAA AVHRR画像の幾何補正（2）

Goemetric Correction of NOAA AVHRR Imagery with Few GCPs（2）

橋本俊昭*・村井俊治*
Toshiaki HASHIMOTO and Shunji MURAI

1．はじめに

前報[1]において，写真測量の原理を用いた幾何補正法を提案した．そして，各パラメータ（外部標定要素）の最適な表現式を示した．本報では，GCPの数に応じてどのパラメータを未知変量とすべきかについて検討した結果を報告する．

2．未知変量とすべきパラメータの検討

前報では，衛星位置を地心距離R，赤道面からの離角u，軌道傾斜角iおよび昇交点経度Ωで表現した．しかし，GCPの少ない場合の対処法として前報で示した③の方法（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，当該時刻に外挿法で適用する）に対しては，軌道要素が直接推定できる方が望ましい．そこで，以下の軌道6要素および衛星姿勢要素（ω，ϕ，κ：ロー，ピッチ，ヨー）を求めるべきパラメータとする．

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：平均近点角

1個のGCPに対して2個の共線条件式が立てられる．GCPの少ないときには決定できる未知変量の個数が限られてくるので，どのパラメータを未知変量扱いにするかを決めなければならない．そこで，次の2条件により未知変量の数を減らした．

① パラメータ間に強い相関があるときは，それらのうち代表1つを未知としほかは固定値とする．

② 時間的に変動の少ないパラメータは未知変量としない．

まず，共線条件式に強制的に誤差を与えたときの残差パターンを求めた（図1参照，図中縦の破線は航跡，横の破線は赤道を示す）．これらの残差のパターンからパラメータ間の相関係数を求めた．なお，衛星搭載の時計と受信局の時計の間の誤差のために画像全体が航跡方向に引きずられたような歪が起こりやすいということはよく知られている[2]．そこで，受信時刻tも誤差要因として相関関係を調べた．その結果は表1のとおりである．この結果より，M_0，w_0，ϕおよびt，M_1とw_1，λ_0とωにはそれぞれ強い相関がある．また，e_0の誤差の影響は近地点や遠地点付近から離れた地域（図では下端部付近が遠地点に相当）では航跡方向に卓越しており，M_0やM_1等と相関が高い．

米国海洋大気庁の軌道予想値の経時的変動量が小さいものほど予想精度が高いと仮定して，前報に示した軌道要素の変動量に対する画像上の残差を計算した結果を表2に示す．この結果から航跡方向（vx）および走査方向（vy）について影響の大きい順にパラメータを並べると以下のようになる．

vx：w_0，$M_0>w_1$，$M_1>e_0$

vy：$\lambda_0>i_0>M_0>e_0$

以上の検討より，未知変量とすべきパラメータの優先順位を以下のように決めた．

M，$\Omega>\kappa$，e，i>a

w，ωおよびϕは未知変量としない

（vxが卓越しているときはMを優先，vyが卓越しているときはΩを優先）

ただし，Ωはλを地心座標系で表したものである．

3．共線条件式の線形化

共線条件式は非線形方程式なので，解を求めるためにテーラー展開により近似値の回りに線形化し，最小二乗法により補正量を求めて逐次近似法により収束計算する必要がある．共線条件式を未知変量の回りに線形化すると以下のようになる．

$$Gx^0+vx+\frac{\partial Gx}{\partial M}\Delta M+\frac{\partial Gx}{\partial \Omega}\Delta\Omega+\frac{\partial Gx}{\partial i}\Delta i$$

$$+\frac{\partial Gx}{\partial a}\Delta a+\frac{\partial Gx}{\partial e}\Delta e+\frac{\partial Gx}{\partial \kappa}\Delta\kappa=0$$

*東京大学生産技術研究所　第5部

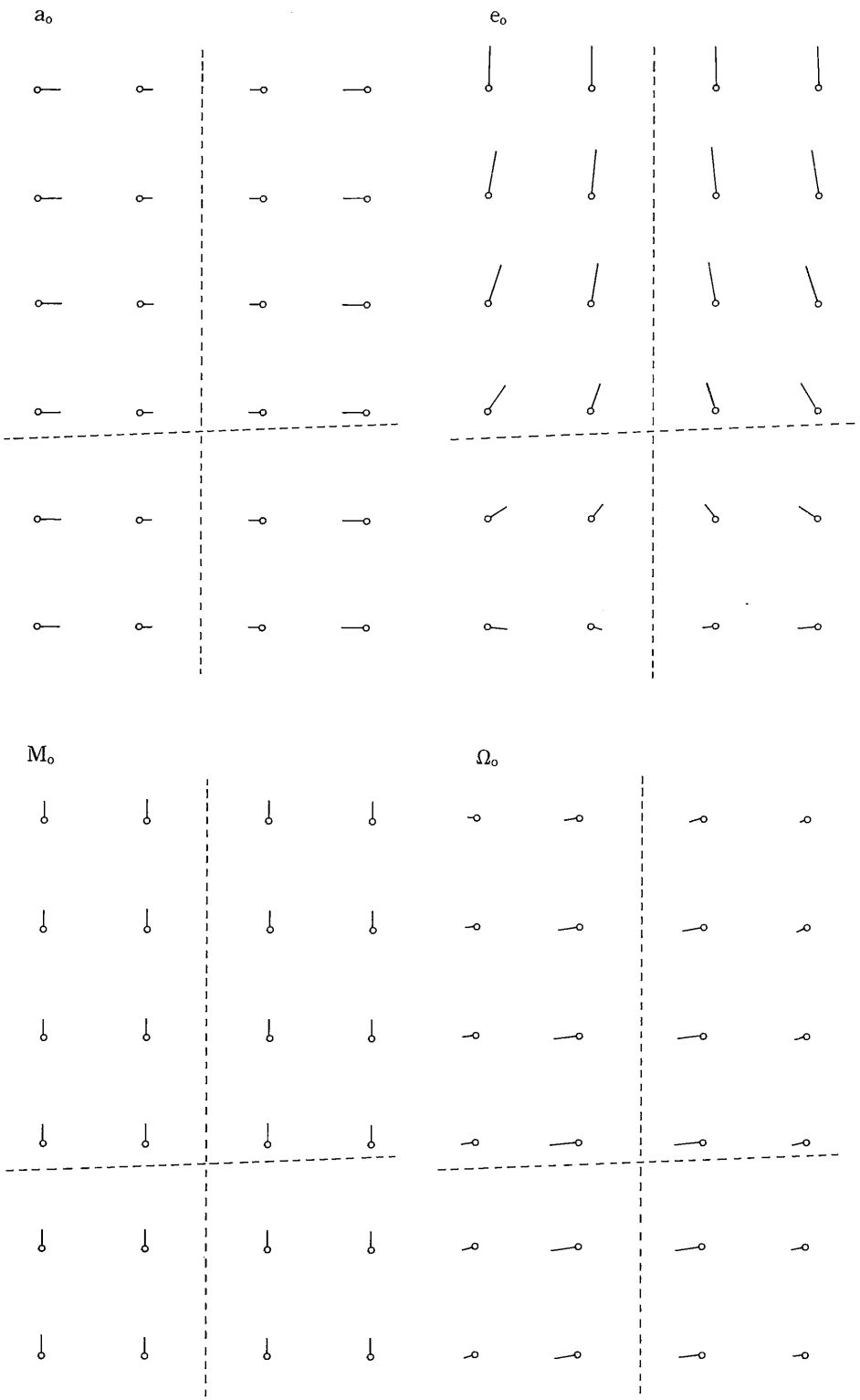

図1　軌道要素の変動による残差パターン（一部）

表1　パラメータ間の相関関係

	e_0	i_0	a_0	w_0	λ_0	M_0	w_1
e_0	1.00000						
i_0	-.00002	1.00000					
a_0	.27768	.00095	1.00000				
w_0	.80284	-.00017	-.00001	1.00000			
λ_0	-.13923	.23960	.00033	-.17351	1.00000		
M_0	.80326	-.00017	-.00001	.99999	-.17351	1.00000	
w_1	.41464	-.00007	-.00001	.84608	-.14686	.84561	1.00000
λ_1	-.06784	-.18759	.00004	-.13849	.89783	-.13842	-.16373
M_1	.41500	-.00007	.00025	.84624	-.14688	.84577	.99999
$\varkappa$	.00073	-.14591	.00125	.00073	.01826	.00073	.00085
ϕ	-.80239	.00020	-.00055	-.99951	.17340	-.99951	-.84545
ω	-.00039	.33536	-.00123	-.00000	.91650	-.00000	-.00001
t	.80183	-.01525	.00056	.99808	-.23424	.99808	.84398

	λ_1	M_1	$\varkappa$	ϕ	ω	t
λ_1	1.00000					
M_1	-.16373	1.00000				
$\varkappa$	-.00963	.00085	1.00000			
ϕ	.13838	-.84561	-.00100	1.00000		
ω	.78644	-.00001	-.00000	.00000	1.00000	
t	-.19316	.84414	-.00041	-.99758	-.05770	1.00000

表2　パラメータの経時変化による残差

パラメータ	変動量	画像上残差（PIXEL）	
		vx	vy
e_0	.1276E-4	.1155	.0217
i_0 (deg)	.001051	.0069	.0480
a_0 (km)	.04180	.0000	.0198
w_0 (deg)	.23323	23.0806	.0249
λ_0 (deg)	.01261	.1951	.9945
M_0 (deg)	.23319	23.0435	.0403
w_1 (deg/d)	.07357	4.1706	.0008
λ_1 (deg/d)	.1256E-3	.0011	.0059
M_1 (deg/d)	.06405	3.6141	.0030

$$Gy^0+vy+\frac{\partial Gy}{\partial M}\Delta M+\frac{\partial Gy}{\partial \Omega}\Delta\Omega+\frac{\partial Gy}{\partial i}\Delta i$$
$$+\frac{\partial Gy}{\partial a}\Delta a+\frac{\partial Gy}{\partial e}\Delta e+\frac{\partial Gy}{\partial \varkappa}\Delta\varkappa=0$$

ここで，^{0}および（vx，vy）は近似値および残差を表している．また，各パラメータの初期近似値は軌道予想値から得られる値を用いる．

4．GCP数に応じた未知変量の決定

GCP数が少ないときにどのパラメータを未知変量にすべきかを決定するために，シミュレーションデータおよび実際の観測データであるLAC（Local Area Coverage）データを用いた実験を行った．シミュレーションデータを用いた場合は，GCPの地上座標および画像座標の両者とも誤差がなく，衛星姿勢の傾きもない場合であり，本手法の原理的な適用性を示している．LACデータを用いた場合は，GCPの地上座標および画像座標の両者に誤差が含まれている可能性があり，衛星姿勢の傾きもある可能性が高い場合であり，本手法の実用上の適用性を示している．実験では，GCP数に応じて未知変量とするパラメータを変えたときの検証点の残差を求めた．検証点の数は，シミュレーションデータの場合が10点，LACデータの場合が6点である．実験ケースの選択（未知変量とするパラメータの選択）に当たっては，2．で

表3　未知数と検証点残差の関係

GCP数	未知数の個数 M	Ω	i	e	a	$\varkappa$	シミュレーションデータ vx	シミュレーションデータ vy	LACデータ vx	LACデータ vy
0	システム補正のみ						44.7522	1.76706	17.2960	6.65532
1	1	0	0	0	0	0	.20115	1.76247	3.01945	6.65520
2	2	1	0	0	0	0	.10481	.04470	1.63964	6.45327
	1	2	0	0	0	0	.14931	.07820	1.60889	4.96519
3	2	2	1	0	0	0	.02084	.07768	1.26535	4.19561
	2	2	0	0	0	1	.00858	.02494	1.29031	4.20818
	2	1	1	0	0	1	.01061	.02287	1.29865	4.14881
	2	1	0	0	1	1	.01027	.04642	1.26385	.80799
	2	1	0	1	0	1	.00661	.04800	1.43866	1.79665
4	2	2	1	1	0	1	.00060	.00189	1.47055	1.56004
	2	2	0	1	1	1	.00485	.01560	1.42514	1.18892
	2	2	1	0	1	1	.00471	.01510	1.36451	.088091
	2	1	1	1	1	1	.00031	.00074	1.42512	1.18946
	2	1	1	0	1	2	.02148	.01703	1.03808	.84640
	2	1	1	1	0	2	.00245	.00173	.86861	1.80222
5	2	2	1	1	1	1	.00028	.00116	1.06253	.80074
	2	2	1	1	1	2	.00023	.00118	.99626	.65560
	3	2	1	2	0	1	.00008	.00017	1.22994	1.14388
	3	2	2	1	0	1	.00136	.00209	＊＊＊	＊＊＊
	3	2	1	0	1	2	.00046	.01859	.90160	.65726
	3	2	1	1	0	2	.00025	.00144	.85707	.96612
	3	2	1	1	1	1	.00030	.00116	1.08385	.65531
6	2	2	1	1	1	1	.00017	.00085	1.14459	.86769
	2	2	1	1	1	2	.00021	.00083	1.01355	.65990
	3	2	1	1	1	2	.00017	.00084	.97795	.66246
	3	2	1	0	1	2	.00048	.01895	.93080	.69257
	3	2	1	2	1	2	.00007	.00008	1.11878	1.63027
	3	2	2	2	1	1	.00008	.00016	＊＊＊	＊＊＊
	3	2	1	2	1	1	.00006	.00009	＊＊＊	＊＊＊
7	2	2	1	1	1	1	.00027	.00107	＊＊＊	＊＊＊
	2	2	1	1	1	2	.00022	.00109	.84116	.64648
	3	2	1	1	1	1	.00026	.00107	＊＊＊	＊＊＊
	3	2	1	0	1	2	.06012	.01521	.73266	.70250
	3	2	1	2	1	1	.00007	.00009	8.38219	2.07203
	3	2	1	1	1	2	.00019	.00109	.79345	.65265
	3	2	1	2	1	2	.00007	.00008	1.79084	1.52381

（＊＊＊：未計算または残差が非常に大きい），（単位：ピクセル）

の考察結果を考慮して決めた．また，同じパラメータの中では次数の低い項を優先した．

実験結果を表3に示す．シミュレーションデータの場合はパラメータを高次にするほど高精度になるが，LACデータの場合はパラメータを高次にしても精度は上がらず，逆に精度が低下する場合もある．これは，GCPの座標取得誤差の影響と考えられる．また，2．で考察した未知変量とすべき優先順位については，軌道長半径a以外は妥当な結果であった．これは，パラメータ間の相関の影響（aはほかのいずれのパラメータとも相関が低い）によるものと考えられる．

以上の検討結果から，未知変量とすべきパラメータをGCP数に応じて以下のように決定した．なお，e_0は近地点や遠地点付近を撮影した画像に適用する．

GCP数	未知変量
1：	M_0またはΩ_0
2：	M_0, Ω_0, M_1またはΩ_1
3：	M_0, M_1, Ω_0, a_0, $\varkappa_0$
4：	M_0, M_1, Ω_0, i_0, a_0, $\varkappa_0$, $\varkappa_1$
5：	M_0, M_1, M_2, Ω_0, Ω_1, i_0, a_0, $\varkappa_0$, $\varkappa_1$
6～：	M_0, M_1, M_2, Ω_0, Ω_1, i_0, (e_0,)a_0, $\varkappa_0$, $\varkappa_1$

5．結　　論

軌道要素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用い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パラメータ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．今後は，本報で得られたGCP数と未知変量とすべきパラメータの関係の妥当性についてより多くの画像について実験を行う．

（1991年7月19日受理）

参 考 文 献

1) 橋本，村井「地上基準点が少ないときのNOAA AVHRR画像の幾何補正」，生産研究，1991，43巻8号，pp44-47.
2) W.J. Emery, J. Brown, Z.P. Nowak, 'AVHRR Image Navigation: Summary and Review' Photogrammetric Engineering and Remote Srensing, 1989, Vol. 55, No. 8, pp1175-1183.