

RFM을 이용한 고해상도 위성영상의 지형보정

손홍규* · 정진석** · 박정환*** · 윤공현***

Sohn, Hong-Gyoo · Jeong, Jin-Sock · Park, Choung-Hwan · Yoon, Kong-Hyun

1. 서론

최근 세계 여러 나라에서 고해상도 위성영상의 취득이 가능한 다양한 센서를 부착한 위성을 발사하면서 지도제작 분야에 많은 관심이 집중되고 있다. 위성영상을 이용한 측량 및 지형공간정보 분야의 본격적인 발달은 입체영상의 촬영이 가능한 프랑스 SPOT-1호(1986년) 위성 발사와 함께 시작되어, 최근에는 해상도 5.8m급의 흑백 영상을 제공하고 있는 IRS-1C(1997년)와 IRS-1D(1998년)가 발사되어 운영중이며 미국의 경우 탑재센서 ETM+(Enhanced Thematic Mapper)가 장착된 LANDSAT-7(1999년)을 발사하여 해상도 15m급 다중분광영상을 제공하고 있다. 1999년 9월에는 상업용 위성영상의 또 다른 장을 열게 한 해상도 1m의 IKONOS 위성이 미국 Lockheed Martin사를 중심으로 한국제적 협력 국가들과 공동으로 발사되어 운용 중에 있다. 우리나라의 경우 1999년 12월에 국내 최초의 다목적 실용위성(Korea Multi-Purpose Satellite; KOMPSAT)인 아리랑 1호가 캘리포니아주 반덴버그 공군기지에서 발사되어 해외 위성자료를 활용하던 국토개발, 해양, 과학탐사 분야 등의 이목이 집중되었다.

위성영상을 이용한 지도제작분야에 있어 중요 업무인 정사영상을 생성하기 위해서는 먼저 위성영상의 모델링이 수행되어야 한다. 이러한 모델링은 여러 가지 방법으로 수행될 수 있으며 그 방법들은 센서의 특성에 따라 달리 적용되고 있다. 한편, 센서의 특성과는 무관한 새로운 모델링 방법인 RFM(Rational Function Model)이 캐나다의 Calgary 대학에서 연구되어 발표되었다(Tao, 2000). 이에 본 연구에서는 센서의 보조자료 없이 일반적인 모든 고해상도 위성영상의 정사영상제작이 가능한 RFM 알고리즘을 SPOT 위성영상과 KOMPSAT 위성영상에 각각 적용하여 그 정확도를 검증해보고자 한다.

2. Rational Function Model을 이용한 편위수정

지구를 촬영한 위성영상을 이용하여 정사영상을 제작하기 위해서는 기본적으로 영상과 지구공간상의 상관관계를 알아야 한다. 그 관계를 기하학적 모델링 방법으로 해석할 수 있으며 가장 일반적으로 외부표정요소를 시간의 함수로 표현한 Polynomial Modeling(Bahr, 1976)과

*연세대학교 공과대학교 사회환경건축공학부 토목전공 조교수
**연세대학교 공과대학교 사회환경건축공학부 토목전공 석사과정
***연세대학교 공과대학교 사회환경건축공학부 토목전공 박사과정

위성의 궤도요소를 이용한 Orbit Parameter Modeling(Makki, 1992) 등이 있다. RFM은 센서의 기하학적 모델은 지상좌표나 영상좌표의 오차를 포함하고 있다는 가정 하에

그 오차를 최소화하는 매개변수들을 계산하여 이들 매개변수를 이용하여 임의의 지상좌표에 대한 영상내 위치를 계산해 낸다.

2.1 Rational Function Model

RFM은 기본적으로 polynomial 모델의 일반적인 형태이다. 다시 말하자면, 영상좌표에 대응하는 지상좌표간의 관계를 나타내는 여러 개의 다항식 모델(polynomial model)을 사용하여 그 비율로 해석한 방법을 RFM방식이라 한다. 다음은 RFM의 일반식을 나타낸다.

$$\begin{aligned} x_n &= \frac{A(X_n, Y_n, Z_n)}{B(X_n, Y_n, Z_n)} \\ y_n &= \frac{C(X_n, Y_n, Z_n)}{D(X_n, Y_n, Z_n)} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, x_n, y_n 은 n 번째에 해당하는 영상 좌표의 행, 열 값이며, X_n, Y_n, Z_n 은 그 영상 좌표와 대응하는 공간상의 3차원 지상좌표이다. RFM의 적용에 있어 지상좌표에 대한 다항식 차수는 최대 3차로 제한된다. 투영에 의한 왜곡은 1차 다항식으로 조종될 수 있으며, 지구곡률, 대기보정, 렌즈왜곡 등에 관한 보정은 2차 다항식, 그리고 나머지 다른 왜곡들은 3차 다항식에 의해 조정되기 때문이다. A, B, C, D 는 각각의 polynomial model 식으로 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} A = \sum_{i=0}^{m_1} \sum_{j=0}^{m_2} \sum_{k=0}^{m_3} a_{ijk} x^i y^j z^k &= a_0 + a_1 X + a_2 Y + a_3 Z + a_4 XY + a_5 YZ + a_6 XZ \\ &+ a_7 X^2 + a_8 Y^2 + a_9 Z^2 + a_{10} XYZ + a_{11} YX^2 + a_{12} ZX^2 \\ &+ a_{13} XY^2 + a_{14} ZY^2 + a_{15} XZ^2 + a_{16} YZ^2 + a_{17} X^3 + a_{18} Y^3 + a_{19} Z^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B = \sum_{i=0}^{m_1} \sum_{j=0}^{m_2} \sum_{k=0}^{m_3} b_{ijk} x^i y^j z^k &= b_0 + b_1 X + b_2 Y + b_3 Z + b_4 XY + b_5 YZ + b_6 XZ \\ &+ b_7 X^2 + b_8 Y^2 + b_9 Z^2 + b_{10} XYZ + b_{11} YX^2 + b_{12} ZX^2 \\ &+ b_{13} XY^2 + b_{14} ZY^2 + b_{15} XZ^2 + b_{16} YZ^2 + b_{17} X^3 + b_{18} Y^3 + b_{19} Z^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C = \sum_{i=0}^{m_1} \sum_{j=0}^{m_2} \sum_{k=0}^{m_3} c_{ijk} x^i y^j z^k &= c_0 + c_1 X + c_2 Y + c_3 Z + c_4 XY + c_5 YZ + c_6 XZ \\ &+ c_7 X^2 + c_8 Y^2 + c_9 Z^2 + c_{10} XYZ + c_{11} YX^2 + c_{12} ZX^2 \\ &+ c_{13} XY^2 + c_{14} ZY^2 + c_{15} XZ^2 + c_{16} YZ^2 + c_{17} X^3 + c_{18} Y^3 + c_{19} Z^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
D = \sum_{i=0}^{m_1} \sum_{j=0}^{m_2} \sum_{k=0}^{m_3} d_{ijk} x^i y^j z^k = & d_0 + d_1 X + d_2 Y + d_3 Z + d_4 XY + d_5 YZ + d_6 XZ \\
& + d_7 X^2 + d_8 Y^2 + d_9 Z^2 + d_{10} XYZ + d_{11} YX^2 + d_{12} ZX^2 \\
& + d_{13} XY^2 + d_{14} ZY^2 + d_{15} XZ^2 + d_{16} YZ^2 + d_{17} X^3 + d_{18} Y^3 + d_{19} Z^3
\end{aligned} \tag{2}$$

여기서, $a_{ijk}, b_{ijk}, c_{ijk}, d_{ijk}$ 은 rational function의 계수값(RFCs)을 나타낸다.

$$\begin{aligned}
x = \frac{A(X, Y, Z)}{B(X, Y, Z)} &= \frac{\sum_{i=0}^{m_1} \sum_{j=0}^{m_2} \sum_{k=0}^{m_3} a_{ijk} X^i Y^j Z^k}{\sum_{i=0}^{m_1} \sum_{j=0}^{m_2} \sum_{k=0}^{m_3} b_{ijk} X^i Y^j Z^k} \\
y = \frac{C(X, Y, Z)}{D(X, Y, Z)} &= \frac{\sum_{i=0}^{m_1} \sum_{j=0}^{m_2} \sum_{k=0}^{m_3} c_{ijk} X^i Y^j Z^k}{\sum_{i=0}^{m_1} \sum_{j=0}^{m_2} \sum_{k=0}^{m_3} d_{ijk} X^i Y^j Z^k}
\end{aligned} \tag{3}$$

여기서, x, y 는 영상좌표(unit : pixel)이고, X, Y, Z 는 영상좌표에 대응하는 3차원 지상좌표(ground control point)이다. 식 (3)을 행렬 형태로 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
x &= \frac{(1 \ X \ Y \ Z \ \dots \ X^3 \ Y^3 \ Z^3) \cdot (a_0 \ a_1 \ \dots \ a_{19})^T}{(1 \ X \ Y \ Z \ \dots \ X^3 \ Y^3 \ Z^3) \cdot (1 \ b_1 \ \dots \ b_{19})^T} \\
y &= \frac{(1 \ X \ Y \ Z \ \dots \ X^3 \ Y^3 \ Z^3) \cdot (c_0 \ c_1 \ \dots \ c_{19})^T}{(1 \ X \ Y \ Z \ \dots \ X^3 \ Y^3 \ Z^3) \cdot (1 \ d_1 \ \dots \ d_{19})^T}
\end{aligned} \tag{4}$$

여기서, $(a_0, a_1, a_2 \dots d_{17}, d_{18}, d_{19})$ 은 Rational Function 계수(RFCs)이고, 다항식의 차수에 의해 RFCs의 개수가 구해지면, 그 미지수를 풀기 위한 최소 지상기준점의 수가 결정된다.

2.2 최소제곱법에 의한 풀이

최소제곱법을 사용하여 RFC를 풀기 위해서는 먼저 식(3)을 RFC에 대해 선형화 시켜야 한다. 선형화 시키면 다음과 같은 관측방정식을 만들 수 있다.

$$\begin{aligned}
V_x &= \left[\frac{1}{B_M} \ \frac{X}{B_M} \ \frac{Y}{B_M} \ \frac{Z}{B_M} \ \dots \ \frac{Y^3}{B_M} \ \frac{Z^3}{B_M} \ \frac{-xX}{B_M} \ \frac{-xY}{B_M} \ \dots \ \frac{-xY^3}{B_M} \ \frac{-xZ^3}{B_M} \right] \cdot M_1 - \frac{x}{B_M} \\
V_y &= \left[\frac{1}{D_M} \ \frac{X}{D_M} \ \frac{Y}{D_M} \ \frac{Z}{D_M} \ \dots \ \frac{Y^3}{D_M} \ \frac{Z^3}{D_M} \ \frac{-yX}{D_M} \ \frac{-yY}{D_M} \ \dots \ \frac{-yY^3}{D_M} \ \frac{-yZ^3}{D_M} \right] \cdot M_2 - \frac{y}{D_M}
\end{aligned} \tag{5}$$

여기서 $(1 \ X \ Y \ Z \ \dots \ X^3 \ Y^3 \ Z^3) \cdot (1 \ b_1 \ \dots \ b_{19})^T = B_M$

$(1 \ X \ Y \ Z \ \dots \ X^3 \ Y^3 \ Z^3) \cdot (1 \ d_1 \ \dots \ d_{19})^T = D_M$

$(a_0 \ a_1 \ \dots \ a_{19} \ b_1 \ b_2 \ \dots \ b_{19})^T = M_1$

$$(c_0 \ c_1 \ \dots \ c_{19} \ d_1 \ d_2 \ \dots \ d_{19})^T = M_2 \text{이다.}$$

윗 식을 다시 정리하면 식 (6)을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} B_M V_x &= [1 \ X \ Y \ Z \ \dots \ Y^3 \ Z^3 - xX - xY \ \dots \ -xY^3 - xZ^3] \cdot M_1 - x \\ B_M V_y &= [1 \ X \ Y \ Z \ \dots \ Y^3 \ Z^3 - yX - yY \ \dots \ -yY^3 - yZ^3] \cdot M_2 - y \end{aligned} \quad (6)$$

여기서, V_x, V_y 는 잔차를 타나낸다. 만약 n 개의 기준점이 주어졌다면 다음과 같은 관측방정식이 성립된다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & N \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} I \\ J \end{bmatrix} \\ V & \quad A \quad \Delta l \quad P \end{aligned} \quad (7)$$

$$M = \begin{bmatrix} 1 & X_1 & \dots & Z_1^3 & -x_1 X_1 & \dots & -r_1 Z_1^3 \\ 1 & X_2 & \dots & Z_2^3 & -x_2 X_2 & \dots & -r_2 Z_2^3 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & X_n & \dots & Z_n^3 & -x_n X_n & \dots & -r_n Z_n^3 \end{bmatrix}, \quad N = \begin{bmatrix} 1 & X_1 & \dots & Z_1^3 & -y_1 X_1 & \dots & -y_1 Z_1^3 \\ 1 & X_2 & \dots & Z_2^3 & -y_2 X_2 & \dots & -y_2 Z_2^3 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & X_n & \dots & Z_n^3 & -y_n X_n & \dots & -y_n Z_n^3 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$I = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}, \quad J = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} \quad (9)$$

여기서, V 는 잔차항이며, A 항은 계수행렬, Δl 은 구하고자 하는 미지의 RFCs 값, P 항은 교차벡터이다. 위의 관측방정식을 최소제곱법에 적용하여 해석하면 다음과 같은 과정을 통해 해를 구할 수 있다.

$$V = A \Delta l - P \quad (10)$$

$$\Delta l = (A^T A)^{-1} A^T P \quad (11)$$

3. 자료처리 및 결과

본 연구에서는 RFM을 SPOT-P 영상과 KOMPSAT 영상에 적용하여 검사점에 대한 정확도 검정을 수행하였다. 먼저 SPOT-P 영상은 충청도 청양지역으로 산악지형이 대부분을 차지하고 있다. 이에 반해 KOMPSAT 영상은 대전 도심지역으로 평평한 구릉지이다. RFM

에 사용할 기준점은 SPOT의 경우 GPS측량을 통한 총 36점의 정밀한 지상기준점을 취득하였으며, KOMPSAT의 경우는 국립지리원에서 제공하는 1/5,000 수치지도를 이용하여 총 37점의 지상기준점을 취득하였다. 각각의 지상기준점에 대응하는 영상좌표는 ERDAS IMAGINE 8.4를 사용하여 관측하였다. 한편 본 연구에 사용된 프로그램은 Microsoft Visual C++를 이용하여 개발하였다.

그림 1은 대상지역의 SPOT 영상이며, 그림 2는 대상지역에 대해 절취한 KOMPSAT 영상이다.

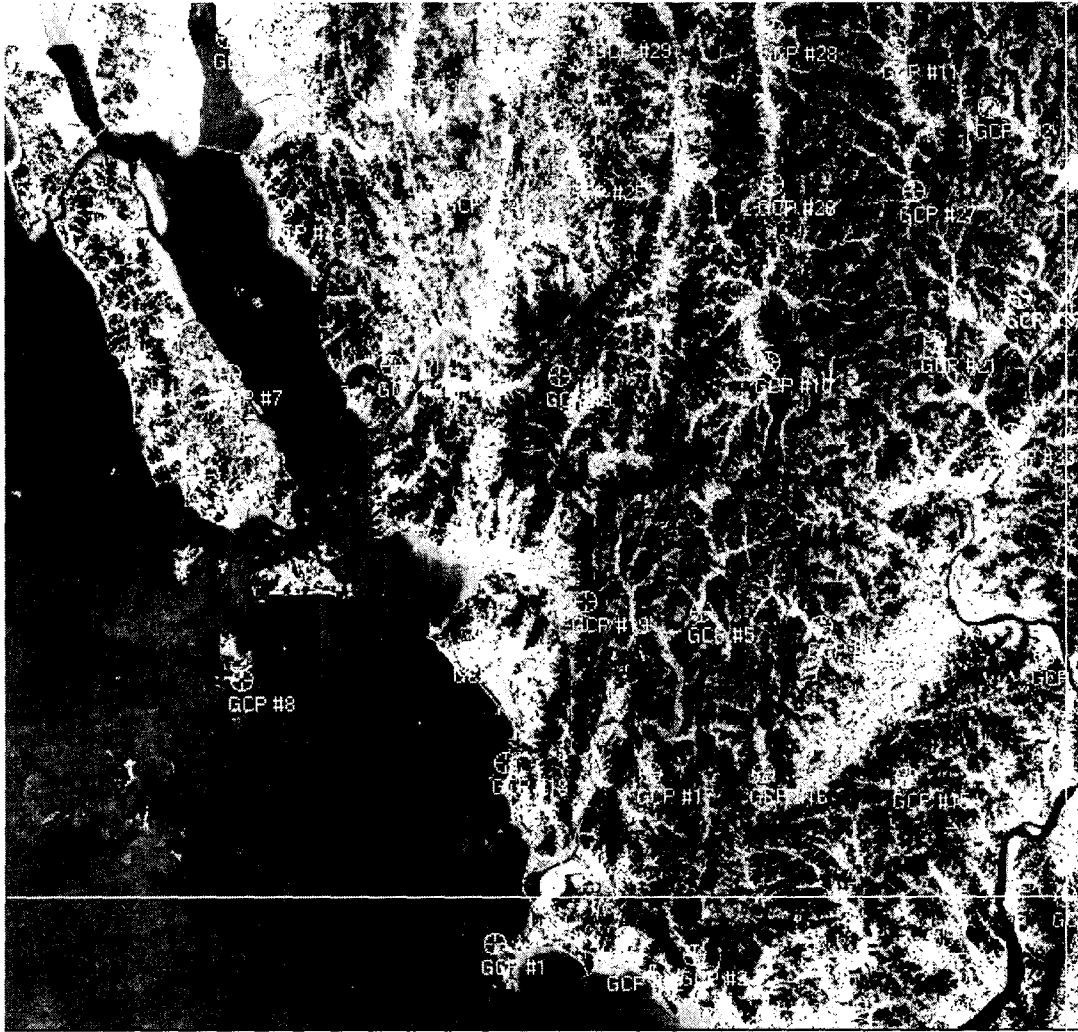


그림 1. SPOT 위성영상(60km×60km)과 GCP 분포도 (총 36점)



그림 2. KOMPSAT 위성영상(5.3km×6km)과 GCP분포도 (총 37점)

본 연구에서는 총 6가지 경우의 RFM에 대해 실험을 수행하였다. 그러나 기준점의 부족으로 $B \neq D$ (3차)인 경우에 대해서는 실험을 수행하지 못하였다. 다음의 표 1은 각각의 경우에 따른 RFCs의 개수와 계산에 필요한 최소 기준점의 수를 보여주고 있다.

표 1. RFM 계수 선택에 따른 필요 지상기준점의 수

다항식	경우	RFCs	Minimum GCP	CKPs 수	
				SOPT	KOMPSAT
2차	$B \neq D$	38	19	17	18
	$B=D$	29	15	21	22
	$B=D=1$	20	10	26	27
3차	$B \neq D$	78	39	-	-
	$B=D$	59	30	6	7
	$B=D=1$	40	20	16	17

표 2는 각각의 실험에 대한 결과를 보여주고 있다. 검사점에 대한 정확도 평가에 있어, 산악지형이 대부분인 SPOT 영상의 경우는 3차의 경우 $B=D=1$ 인 가장 단순한 RFM에서 좋은 결과를 보였으며, 2차의 경우 역시 마찬가지였다. 도심지역이 대부분인 KOMPSAT 영상에 대해서도 유사한 결과를 나타내었다.

표 2. 기준점과 검사점 영상좌표의 표준편차(unit : pixel)

Case		B≠D		B=D		B=D=1	
적용영상	다항식	GCPs	CCPs	GCPs	CCPs	GCPs	CCPs
SOPT	2차	0.057	0.986	0.131	0.767	0.148	0.605
	3차	-	-	0.505	1.211	0.086	1.486
KOMPSAT	2차	0.098	2.431	0.015	2.067	0.149	1.529
	3차	-	-	0.165	2.398	0.166	2.250

4. 결론

RFM을 이용하여 산악지역에 해당하는 SPOT 위성영상(60km×60km)과 평탄한 도심을 이루고 있는 KOMPSAT 위성영상(5.3km×6km)에 적용시킨 결과를 살펴보면 2차 다항식의 경우 평균적으로 1.5 pixel 정도의 정확도를 보여주고 있으며, 3차 다항식의 경우는 2 pixel 정도의 평균오차가 발생하고 있다. 또한 표2.의 결과를 보면 알수 있듯이 SPOT 위성영상과 KOMPSAT 위성영상을 같은 방법으로 프로그램을 하였음에도 불구하고 결과에 다소 차이가 생기는데 이는 SPOT의 경우 정밀한 지상좌표를 사용하였고, KOMPSAT의 경우는 수치 지도를 이용하여 생기는 오차라고 사료된다. 이 결과로 보았을 때 RFM을 이용한 모델링이 엄밀 센서 모델링보다 미소한 차이로 정확도가 떨어지나, RFM의 특성인 시간의 단축과 계산의 단순함을 고려하면 빠른 시간에 간단한 방법을 이용하여 지형보정할 경우 정확도면이나 효율성면에서도 효과적인 방법이 될 수 있다.

5. 참고문헌

1. Seeber, G., 1993, Satellite Geodesy
2. Bahr, H. P., 1976, "Geometric Models for Satellite Scanner Imagery", ISP 13th Congress, Commission III, Helsinki, Finland
3. Makki, S. A., 1991, "Photogrammetric Reduction and Analysis of Real and Simulated SPOT Imageries", Purdue University
4. Mackie, J. B., 1985
5. Novak, K., 1992, "Rectification of Digital Imagery", Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 58, No.3, pp. 339-344.
6. TAO, C.V., HU, Y., 2000, "Image Rectification Using a Generic Sensor Model-Rational Function Model", ISPRS, Vol. 33, Part B3, pp.874-881.
7. Web Site : <http://www.opengis.org>