

# 인공위성영상 전처리시스템의 RPC(Rational Polynomial Coefficients) 기하보정모듈 생성

서두천\*, 이동한\*\*

## The Generation of RPC Geometric Correction Module for the Pre-Processing System of Satellite Image

Doo-Chun Seo\*, Dong-Han Lee\*\*

### Abstract

The main objective of this study is to develop RPC geometric correction module for the pre-processing systems of the satellite image. For this purpose, the Terrain-Independent I, Terrain-Independent II and Terrain-Dependent III have been applied in tests with KOMPSAT-1 EOC and SPOT PAN images.

### 초 록

본 연구는 인공위성 영상의 전처리 시스템에 사용되기 위한 RPC 기하보정 모듈을 개발하는 것이다. 이를 위하여, Terrain-Independent I, Terrain-Independent II 및 Terrain-Dependent의 3가지 방법이 KOMPSAT-1, SPOT PAN 영상에 적용되었다.

키워드 : RFM, RPC, 기하보정모듈(geometric correction module), 센서모델링(sensor modeling)

### 1. 서 론

인공위성자료로부터 지상의 3차원 위치를 결정하기 위한 과정 중 필수적이고, 기본적인 과정이 센서모델링이다. 센서모델링이란 촬영당시의 위성 또는 항공기에 부착되어 있는 센서와 촬영 대상인 지표면과의 기하학적 관계를 복원하는 과정을 의미한다. 이 센서모델링의 정확도에 따라 최종 결과물인 3차원 위치정보의 정확도가 크게

좌우된다.

지도 제작에 주로 이용되는 항공사진의 경우는 공선조건식을 기본으로 3차원 위치정보를 추출하나, 위성영상인 경우 그 기본적인 원리는 항공사진과 동일하나 IRS-1C, KOMPSAT-1, SPOT과 같이 pushbroom 방식으로 영상을 취득하는 경우, 위성의 센서중심 및 자세가 시간에 따라 계속 변화하기 때문에 항공사진의 경우보다 다소 복잡하다.

\* 우주응용센터 원격탐사그룹/dcivil@kari.re.kr

\*\* 우주응용센터 원격탐사그룹/dhlee@kari.re.kr

센서모델링은 카메라(센서) 투영중심, 사진상의 점, 지상물체간의 기하학적인 관계를 규명하는 방법에 따라 물리적모델(physical model), 추상적 모델(abstract model) 및 일반적모델(generalized model)의 세 가지로 크게 구분되며, 본 연구에서 개발하고자 하는 RPC(Rational Polynomial Coefficient)는 추상적 모델의 한 종류이다.

RPC는 RFM(Rational Function Model)에서 추출된 계수를 의미하는 것으로, RFM은 위성의 궤도정보를 얻을 수 없는 경우나 궤도에 대한 정보가 불확실하여 물리적 센서모델로는 지형보정을 수행할 수 없는 경우에 사용한다. 또한 이 모델은 frame, pushbroom, whiskbroom, panoramic 및 SAR 등 다양한 센서에서 취득한 위성 영상의 지형보정에 적용될 수 있다. 또한 최근 발사된 고해상도의 상업용 위성인 IKONOS-2, QuickBird-2 위성자료에서도 RFM형태의 위성정보를 제공하고 있다.

본 연구에서는 위성 영상자료중 위성의 보조 데이터를 사용자에 제공하지 않는다는 가정 하에, 이 보조데이터를 대신하여 사용자가 영상을 기하보정할 수 있는 RPC 생성알고리즘을 개발하고 그 정확도를 검증하고자 한다.

## 2. 수학적 방법

RFM은 촬영 대상공간상에 존재하는 지형지물의 3차원좌표와 이에 대응하는 영상좌표간의 기하학적인 관계를 비례다항식의 형태로 표현하는 모델이다. 이 모델은 2차원 평면내에서 좌표변형에 사용되는 고차다항식을 기본방정식으로 개발된 모델로서, 지상 3차원 좌표(X,Y,Z)와 이에 대응하는 영상좌표(r, c)를 비례다항식 형태로 표현하면 식(1)과 같다.

$$r_n = \frac{P1(X_n, Y_n, Z_n)}{P2(X_n, Y_n, Z_n)} \quad c_n = \frac{P3(X_n, Y_n, Z_n)}{P4(X_n, Y_n, Z_n)} \quad (1)$$

위의 식(1)에서 지상좌표(X, Y, Z)와 영상좌표(r, c)는 수학적 안정성을 높이기 위해 -1.0과 1.0 사이의 좌표값으로 정규화시켜 사용하며, 정규화

의 방법은 식(2)와 같다.

$$r_n = \frac{r - r_o}{r_s}, \quad c_n = \frac{c - c_o}{c_s},$$

$$X_n = \frac{X - X_o}{X_s}, \quad Y_n = \frac{Y - Y_o}{Y_s}, \quad Z = \frac{Z - Z_o}{Z_s} \quad (2)$$

여기서,  $r_o, c_o, X_o, Y_o, Z_o$ 와  $r_s, c_s, X_s, Y_s, Z_s$ 는 사용된 영상과 지상의 기준점 좌표로부터 계산되는 offset과 scale factor로 식(3)과 같이 계산된다.

$$r_o = \frac{r_{\max} + r_{\min}}{2}, \quad r_s = \frac{r_{\max} - r_{\min}}{2}$$

$$c_o = \frac{c_{\max} + c_{\min}}{2}, \quad c_s = \frac{c_{\max} - c_{\min}}{2}$$

$$X_o = \frac{X_{\max} + X_{\min}}{2}, \quad X_s = \frac{X_{\max} - X_{\min}}{2}$$

$$Y_o = \frac{Y_{\max} + Y_{\min}}{2}, \quad Y_s = \frac{Y_{\max} - Y_{\min}}{2}$$

$$Z_s = \frac{Z_{\max} - Z_{\min}}{2}, \quad Z_o = \frac{Z_{\max} + Z_{\min}}{2} \quad (3)$$

RFM을 구성하는 다항식인  $P1, P2, P3$  및  $P4$ 는 일반적으로 최대 3차항까지로 제한되며 이들 다항식의 구성방식은 식(4) 및 식(5)와 같다.

$$P(X, Y, Z) = \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^i \sum_{k=0}^j a_n X^i Y^j Z^k \quad (4)$$

$$P(X, Y, Z) = a_0 + a_1 X + a_2 Y + a_3 Z + a_4 X^2 + a_5 X Y + a_6 X Z + a_7 Y^2 + a_8 Y Z + a_9 Z^2 + a_{10} X^3 + a_{11} X^2 Y + a_{12} X^2 Z + a_{13} X Y^2 + a_{14} X Y Z + a_{15} X Z^2 + a_{16} Y^3 + a_{17} Y^2 Z + a_{18} Y Z^2 + a_{19} Z^3 \quad (5)$$

여기서,  $N$ 은 다항식 차수,  $a_n$ 은 RPC를 나타내며 아래첨자인  $n$ 은  $n = \frac{i \cdot (i+1) \cdot (i+2)}{6} + \frac{j \cdot (j+1)}{2} + k$ 로 정의된다. 그러므로 각 다항식 계수의 총 개수는  $\frac{(N+1)(N+2)(N+3)}{6}$ 이다. 예를 들어  $N$ 이 3인 경우에는 3차다항식을 형성하게 되는데 이때 분자항 계수는 20개, 분모항 계수는 상수 1을 제외한 19개로 이루어지므로 총 39개의 계수가 존재하게 된다.

RPC를 구성하는 각 차수항중 1차항 계수는 투영왜곡, 2차항 계수는 지구곡률, 대기굴절, 렌즈왜곡 그리고 3차항 계수는 이들 이외의 나머지 왜곡들을 보정하게 된다.

## 2.1 Iterative & Direct Least Square Solution

다수의 지상기준점과 영상기준점을 이용하여 최적의 RPC를 생성하는 방법으로 최소제곱법을 기본으로 직접법과 반복법의 두 가지 방법이 있다. 식(1)을 행렬식의 형태로 표현하면 식(6)과 같다.

$$c = \frac{(1 \ X \ Y \ Z \dots \ YZ^2 \ Z^3)(a_0 \ a_1 \ a_2 \ a_3 \dots \ a_{18} \ a_{19})^T}{(1 \ X \ Y \ Z \dots \ YZ^2 \ Z^3)(1 \ b_1 \ b_2 \ b_3 \dots \ b_{18} \ b_{19})^T} \quad (6a)$$

$$r = \frac{(1 \ X \ Y \ Z \dots \ YZ^2 \ Z^3)(c_0 \ c_1 \ c_2 \ c_3 \dots \ c_{18} \ c_{19})^T}{(1 \ X \ Y \ Z \dots \ YZ^2 \ Z^3)(1 \ d_1 \ d_2 \ d_3 \dots \ d_{18} \ d_{19})^T} \quad (6b)$$

식(6)을 다음과 같이  $v_c, v_r$ 로 변형한 후,

$$v_c = \frac{1}{B} \frac{X}{B} \frac{Y}{B} \frac{Z}{B} \dots \frac{YZ^2}{B} \frac{Z^3}{B} - \frac{cX}{B} - \frac{cY}{B} - \frac{cZ}{B} \dots - \frac{cYZ^2}{B} \frac{cZ^3}{B} \quad J - \frac{c}{B} \quad (7a)$$

$$v_r = \frac{1}{D} \frac{X}{D} \frac{Y}{D} \frac{Z}{D} \dots \frac{YZ^2}{D} \frac{Z^3}{D} - \frac{rX}{D} - \frac{rY}{D} - \frac{rZ}{D} \dots - \frac{rYZ^2}{D} \frac{rZ^3}{D} \quad K - \frac{r}{D} \quad (7b)$$

여기서  $v_c, v_r$ 는 영상좌표 관측치의 잔차이고,

$$B = (1 \ X \ Y \ Z \dots \ YZ^2 \ Z^3)(1 \ b_1 \ b_2 \ b_3 \dots \ b_{18} \ b_{19})^T$$

$$J = (a_0 \ a_1 \dots \ a_{18} \ a_{19} \ b_1 \ b_2 \dots \ b_{18} \ b_{19})$$

$$D = (1 \ X \ Y \ Z \dots \ YZ^2 \ Z^3)(1 \ d_1 \ d_2 \ d_3 \dots \ d_{18} \ d_{19})^T$$

$$K = (c_0 \ c_1 \dots \ c_{18} \ c_{19} \ d_1 \ d_2 \dots \ d_{18} \ d_{19}) \text{ 이다.}$$

식(7)을  $n$ 개의 기준점에 대하여 적용하고 행렬식으로 표현하면 식(8)과 같다.

$$V_c = W_c \ M \ J - W_c \ C \quad (8)$$

식(8)의 RFM 관측방정식 중  $J$ 행렬이 RPC이다. 여기서  $W_c$ 는 weight matrix로  $W_c = I$ 로 가정하여  $J$ 행렬을 계산하면 RFM의 직접법이다.

$$J = (M^T M)^{-1} \cdot M^T C \quad (9)$$

반복법은 직접법으로 구하여진 첫 번째 RPC 행렬인  $J^{(0)}$ 를 이용하여  $B$ 행렬을 계산하고 이를 다시 관측방정식으로 형성하여 RPC 행렬인  $J$ 를 산출하면 되며, 반복법이 식(9)의 직접법보

다는 weight matrix를 고려하므로 보다 더 엄밀한 RPC를 생성할 수 있다.

RPC생성의 편리성과 컴퓨터의 연산속도 향상을 위해 식(8)의 칼럼항에 라인항을 고려하여 관측방정식을 형성하면 식(10)과 같다. 이 경우 라인과 관계되는  $W_r, N, K, R, D$  행렬을 고려하여 표현하면 식(11)과 같다.

$$\frac{V_c}{V_r} = \frac{W_c}{W_r} \frac{M}{N} \frac{J}{K} - \frac{W_c}{W_r} \frac{C}{R} \quad (10)$$

$$V = W^T I - W G \quad (11)$$

식(11)의 최소제곱법의 일반해는 다음과 같다.

$$I = (T^T \cdot W^2 \cdot T)^{-1} \cdot (T^T \cdot W^2 \cdot G) \quad (12)$$

## 2.2 Tikhonov 정규화 기법

RFM은 지상점의 비례다항식으로 영상점을 나타내고, RPC는 지상기준점을 최소제곱법으로 산출한다. 그러나 최소제곱법은 원칙적으로 ill-posedness라는 수치적 불안정성을 피할 수 없다. 특히 기준점들이 계측오차를 포함하고 있거나, 기준점의 분포상황이 불량하여 실제 지형상황을 잘 표현하지 못하는 경우 수치적 불안정은 더욱 심각해진다. 또한 RFM의 구성 다항식이 고차다항식(2차항 이상)인 경우 계수항이 수렴하지 않고, 진동하는 경우가 자주 발생한다. 이러한 수치적 불안정성과 수렴속도의 향상을 위해 식(12)의 정규방정식인  $T^T W^2 T$ 에 positive definite한 정규화 함수를 더하는 Tikhonov 정규화 기법을 적용하였다.

식(12)에 정규화 계수인  $h^2 E$ 를 포함시켜 정리하면 식(13)과 같다.

$$I = (T^T W^2 T + h^2 E)^{-1} \cdot (T^T W^2 G) \quad (13)$$

식(13)에서  $E$ 는 단위행렬(identity matrix)이며  $h$ 는 정규화계수이다. 위에서 설명한 Tikhonov 정규화기법과 최소제곱법을 반복 적용하여 RPC를 계산하는 과정은 다음과 같다.

$$I_{(0)} = 0, W_{(0)} = W(I_{(0)}) = E \quad (14)$$

$$I_{(s)} = I_{(s-1)} + (T^T W_{(s-1)}^2 T + h^2 E)^{-1} \cdot T^T W_{(s-1)}^2 \nu_{(s-1)} \quad (15)$$

여기서  $W_s = W(I_{(s)})$ ,  $\nu_{(s)} = G - T I_{(s)}$   
 $s = 1, 2, 3 \dots$

식(13)과 같은 Tikhonov 정규화 함수가 수치적으로 안정된 해를 구하기 위해서는 적절한 정규화 계수가 결정되어야 한다. 이러한 정규화 계수를 결정하는 방법은 식(13)의  $h$ 를 변화시키면서 최적의 RPC가 산출될 때의  $h$ 를 결정한다. 기존 연구 결과에서 적용된  $h$ 는  $0.0002 \leq h \leq 0.008$ 의 특정한 값을 정규화계수로 채택하고 있다. 구체적으로 Tao 등(2000)은 60개의 기준점과 249개의 검사점을 사용하여  $h$ 가 0.001에서, 김용일(2001) 등은 0.002를 적용하였다. 즉  $h$ 는 기준점과 검사점의 분포특성 또는 지형특성에 따라 그 값이 일정하지 않음을 알 수 있다.

본 연구에서 정규화 계수인  $h$ 를 결정하기 위해서, RFM의 모델식이  $P_2 \neq P_4$ 인 2차 다항식에 대하여 기준점 990점과 검사점 71,724점을 사용하여 결정하였다.  $h$ 값의 범위는  $1.0 \times 10^{-4}$ 에서  $2.0 \times 10^{-2}$ 까지, 임계값은  $1.0 \times 10^{-8}$ 을 적용하였다. 반복회수는 모두 6회 이하에서 수렴하였으며, 그 결과는 그림 1과 같다.

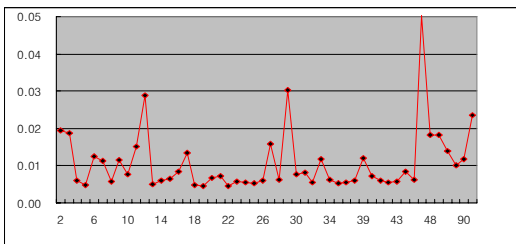


그림 1. 정규화계수(h)의 결정

그림 1의 정규화계수에 따른 오차분포를 살펴보면, RMSE의 대부분의 값이 0.02 pixel 이하의 오차로 나타났다. 적용된 정규화계수의 최적치 구간은 0.0018에서 0.0025사이에서 비교적 안정된

형태를 보였다. 이중  $h = 0.0022$ 에서 칼럼과 라인의 RMSE가 0.0039 pixel과 0.0051 pixel, 최소값으로 -0.2269 pixel, 최대값으로 0.3190 pixel로 가장 양호한 값이 산출되었다.

### 3. 실험데이터 생성

위성영상의 전처리시스템은 기본적으로 단영상만을 대상으로 처리하기 때문에 2차원상의 영상좌표로부터 3차원 지상좌표를 계산할 수 없다. 따라서, RPC를 생성하기 위하여 필요한 높이값을 추출할 수 있는 방법을 모색해야 한다.

이러한 높이값을 추출할 수 있는 방법은 다음과 같이 세 가지 정도이다.

#### 1) Terrain-Independent I

단영상으로부터 가상 3차원 객체공간상의 점들을 추출하기 위해 임의의 지상 높이값  $Z$ 를 부여하고 이에 해당하는 평면 지상좌표  $(X, Y)$ 를 추출하는 방법

#### 2) Terrain-Independent II

입체영상인 경우에는 외부에서 제공되는 지상 높이값이 없어도 지상 3차원 좌표를 생성할 수 있다. 즉 공선조건식을 기본으로 두 영상내에 존재하는 매칭점을 이용하여 공간교차이론을 적용하면 지상의 3차원 좌표를 생성할 수 있다.

#### 3) Terrain-Dependent

이 방법은 외부에서 DEM이나 수치지도와 같이 높이와 평면지상좌표가 제공될 경우 적용될 수 있는 방법이다.

#### 3.1 Terrain-Independent I

KOMPSAT-1 전처리시스템에서 지상좌표를 계산하는 방법은 물리적모델의 한 종류인 Look Vector Modeling으로 그림 2와 같은 순서에 의해 결정된다. 이 모델은 위성에 부착된 GPS 센서, Gyro 센서, Star 센서로부터 측정된 위성보조데이

터만으로 관측된 영상의 지상좌표를 결정한다.

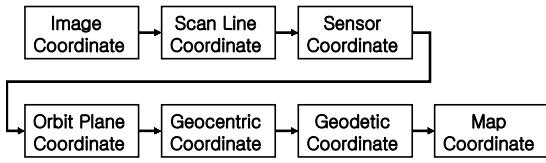


그림 2. Look Vector Modeling

그림 2의 과정 중 실제 지상좌표를 계산하는 부분은 다섯 번째의 Geocentric Coordinate 부분이다. 이 과정에서 가상의 지상 3차원 좌표를 계산하는 방법은 다음과 같다.

공선조건식을 기본으로 영상의 각 pixel에 해당하는 위성의 위치와 자세를 계산한 후의 지상좌표는 식(16)과 같다.

$$\begin{matrix} X \\ Y \\ Z \end{matrix} = \begin{matrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \end{matrix} + \frac{1}{k} M^t \begin{matrix} x \\ y \\ z \end{matrix} = \begin{matrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \end{matrix} + \begin{matrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{matrix} \quad (16)$$

위의 식에서  $(x, y, z)$ 는 영상좌표계를 센서좌표계로 변환하였을 때 각 영상의 좌표이며,  $k$ 는 축척계수이다. 그리고 직교회전행렬( $M$ )은 위성의 ECEF상의 지심좌표계를 센서좌표로 회전시키는 회전행렬이다.

$k$ 를 소거하여, 지상  $X, Y$ 에 대하여 정리하면 식(17)과 같다.

$$\begin{aligned} X &= X_s + (Z - Z_s) \frac{x_p}{z_p} \\ Y &= Y_s + (Z - Z_s) \frac{y_p}{z_p} \end{aligned} \quad (17)$$

위의 식(17)에서  $Z$ 는 지상표고( $H$ ), 타원체고( $h$ ) 및 지오이드고( $\Delta h$ )로 구성된다. 그러나 단영상의 경우 지상표고는 zero로 가정하고, 반복계산법에 의하여 지상좌표를 계산한다.

먼저, 영상의 임의 라인을 관측할 때, 위성 직하점(nadir point)에 대한 지심위도(Geocentric latitude)는 식(18)과 같다.

$$\phi_0 = \tan^{-1} \frac{Z_s}{(X_s^2 + Z_s^2)^{1/2}} \quad (18)$$

식(18)에서 계산된  $\phi_0$ 를  $\phi$ 의 초기값으로 가정하여, 묘유선의 곡률반경( $N$ )과  $Z$ 를 계산하면 다음과 같다.

$$N = \frac{a_e}{(1 - e_e^2 \sin^2 \phi)^{1/2}} \quad (19)$$

$$Z = (N(1 - e_e^2) + H) \sin \phi \quad (20)$$

식(20)으로부터 계산된  $Z$ 를 식(17)에 대입하여 개략적인  $X, Y$ 를 계산한다. 계산된 3차원 지심좌표로부터 식(21)을 이용하여 다시 위도를 계산한다.

$$\phi = \tan^{-1} \frac{Z_s}{(X_s^2 + Z_s^2)^{1/2}} \frac{N + H}{N(1 - e_e^2) + H} \quad (21)$$

식(21)에서 지구 타원체상의 높이는 가정하여 계산하는데, 만약  $H$ 가 zero이면, 식(21)은 반경( $N$ )이 소거되는 형태이다. 식(21)로부터 계산된 위도와 식(18)에서 계산된 초기값의 차이를 계산하고 이 값의 차이가 임계값보다 크면 식(19)~식(21)은 반복 계산하여 최종적인 지상좌표를 결정한다. 본 연구에서 적용된 임계값은  $1.0 \times 10^{-8}$ 이다.

RPC 생성을 위한 지상기준점은 식(17)과 식(21)을 기본으로 하여 계산하였으며, 지상기준점은 지심좌표( $X, Y, Z$ )형태로 산출하였다. 사용되는 영상좌표는 영상의 평면상에 고루 분포될 수 있도록 일정한 격자 간격으로 취득하며, 이때 각 격자점마다의 3차원 지상좌표는 식(21)의  $H$ 를 변화시키면서 여러 점을 추출하였다. 즉 임의 격자점의 한 영상좌표인  $(c, r)$ 과 이에 해당하는 지상좌표는 높이에 따른  $n$ 개의 지상좌표( $X_{1 \sim n}, Y_{1 \sim n}, Z_{1 \sim n}$ )가 획득된다.

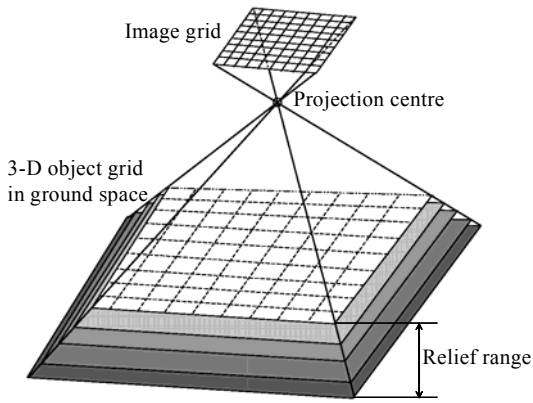


그림 3. RPC 생성을 위한 지상기준점 추출 개념도

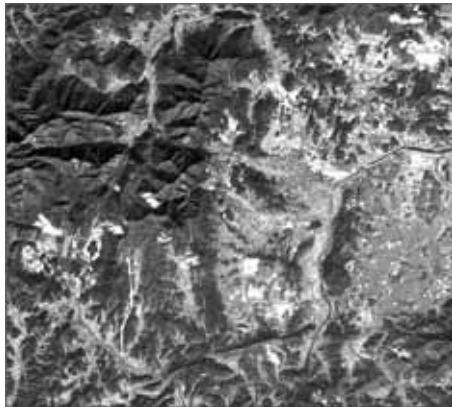


그림 4. 사용된 영상데이터

사용된 KOMPSAT-1 EOC 영상은 2001년 11월 27일 경사각 -15.29도에서 관측한 대전지역 영상이다. 그림 4는 Terrain-Independent I 실험에 사용된 영상이며 이 지역의 최대표고는 약 540 m 정도이다. 검사점은 X, Y의 10 pixel 간격으로 총 71,724점을 산출하였다.

RFM은 기준점의 분포 상태에 따라 정확도가 각기 다르게 나타나고, 지형의 특성을 모두 반영하기 위해서는 최대한 많은 기준점을 사용할수록 정확도가 향상될 것이다. 그러나 많은 기준점으로 인하여 프로그램의 처리속도가 급격히 낮아지므로 적절한 수의 기준점을 사용하여야 한다.

표 1. 설계 레이어 총수에 따른 정확도(표고)

Layer No.(Z)	GCP No.	Iter. No.	RMSE(pixel)	
			Col	Line
0	90	50	27.9406	0.3266
1	180	50	0.0135	0.0976
2	270	5	0.0013	0.0039
3	360	4	0.0014	0.0063
4	450	4	0.0014	0.0022
5	540	4	0.0014	0.0034
6	630	4	0.0014	0.0064
7	720	5	0.0014	0.0039
8	810	4	0.0014	0.0038
9	900	4	0.0014	0.0056
10	990	4	0.0014	0.0154

표 2. 설계 레이어 총수에 따른 정확도(평면)

Layer No.(X,Y)	GCP No.	Iter. No.	RMSE(pixel)	
			Col	Line
6	210	15	0.0019	0.0023
7	320	5	0.0015	0.0025
8	360	5	0.0015	0.0056
9	450	4	0.0014	0.0018
10	605	4	0.0013	0.0033
11	720	4	0.0013	0.0040
12	780	4	0.0015	0.0077
13	980	3	0.0013	0.0017
14	1125	3	0.0015	0.0184
15	1280	3	0.0014	0.0486

표 1과 표 2는 표고와 평면의 설계 레이어별 정확도를 나타낸 값이다. 표고인 경우 설계 레이어가 3이상인 경우에 비교적 안정된 값을 보이고 평면에서는 9~13 정도로 구분할 경우 비교적 안정된 값을 보인다. 본 연구에서는 표고 레이어 총수는 4로, 그리고 평면 분할은 9를 선택하였다. 최종적으로 획득한 총 기준점과 검사점수는 각각 450점과 71,724점이다.

이들 두 표를 살펴보면 기준점 수가 많아질수록 정확도의 증가가 없으며, 오히려 약간 저하되는 경우가 있음을 알 수 있다. 이것은 기준점 특성, RFM 해석상의 문제 등 다양한 부분이 관계하고 있을 것으로 생각되며, 향후 이 부분에 대하여도 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.

### 3.2 Terrain-Independent II

입체영상이 제공될 경우에는 엄밀센서모델의 결과 계산된 외부표정요소와 두 영상의 매칭점을 이용하여 지상좌표를 계산하고 이를 이용하여 RPC를 산출한다.

본 연구에서는 수동으로 기준점과 검사점을 선정하지 않고 수치적인 bucketing 기법을 도입하여 일정한 격자 간격의 균등한 표고 분포가 형성되도록 하였다. 기준점을 획득하는 단계는 다음과 같은 4 단계로 구성되어 있다.

- <1단계> 매칭된 결과 중 상관계수가 임계값 이상의 값을 가지는 좌우 영상좌표만을 선택
- <2단계> 대상지역의 영상을 칼럼과 라인방향으로 1×m 크기가 되도록 격자망을 구성
- <3단계> 각 격자망마다 높이 분포상태를 고려하여 5개의 범위로 구분한 후, 각 높이 범위내 한 점씩 취득한다. 따라서 이론적인 기준점의 수는 1×m×5개이다.
- <4단계> 영상좌표에 대한 기준점의 지상좌표(X, Y, Z)는 엄밀센서모델링 후 결정된 외부표정요소와 좌우 영상좌표를 공간교차이론을 적용하여 산출

검사점의 선정방법도 기준점의 선정방법과 동일하나 기준점과의 중복을 피하기 위하여 높이 범위의 중앙값과 한 격자 영역내 중앙에 위치하는 두 점을 선정하였으므로 이론적인 검사점의 수는 1×m×2개이다. 검사점의 지상좌표(X, Y, Z) 중 위치요소(X, Y)는 엄밀센서모델링에서 결정된 값을 사용하였으며, 높이요소(Z)는 국립지리정보원이 제작한 축척 1:5,000 수치지도로부터 만들어진 수치표고모델에서 위치요소에 대응하는 표고를 추출하여 사용하였다. 위와 같은 방법으로 기준점과 검사점을 추출하기 위하여 적용된 격자망의 크기는 10×10이며, 임계 상관값으로 0.95를

적용하였다. 최종적으로 획득한 총 기준점과 검사점수는 574점(기준점: 388개, 검사점: 186개)이다. 사용된 영상데이터는 그림 5와 표 3과 같으며, 그림 5의 하얀 선으로 표시한 영역이 실제 엄밀센서모델로부터 수치표고모델이 생성된 부분이다.

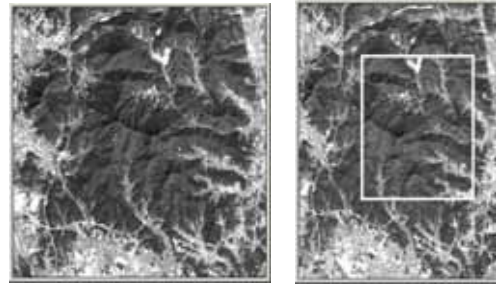


그림 5. 사용된 SPOT PAN 좌, 우 영상

표 3. SPOT PAN 보조데이터

List	Left image	Right image
Satellite NO.	SPOT-1	SPOT-2
Instrument ID	HRV2	HRV1
Spectral mode	PAN	PAN
GRS(K-J)	303-275	304-275
Date of acquisition	Nov. 3, 1998	Nov. 3, 1998
Preprocessing level	Level 1A	Level 1A
Scene center (Lat.,Log.)	37°20' 52" 126°44' 22"	37°20' 52" 126°54' 48"
Scene orientation angle	12.8°	7.8°
Angle of incidence	L 17.9°	R 30.4°
Sun azimuth	169.2°	160.4°

### 3.3 Terrain-Dependent

실험에 사용된 데이터는 2002년 9월 26일 KOMPSAT-1 EOC 센서로 경남 김해 일원을 촬영한 영상이다. RPC를 생성하기 위해 필요한 지상기준점은 축척 1:5,000 수치지도에서 획득하였으며, 이에 해당하는 영상기준점은 수치지도의 주변 지형지물의 위치상태와 영상의 위치를 비교하면서 픽셀 이하단위까지 읽었다. 획득된 총 기준점은 69점(기준점 44점, 검사점 25점)정도이다. 그림 6은 기준점의 평면 분포상태를 사용된 영상과 함께 나타낸 것이다.

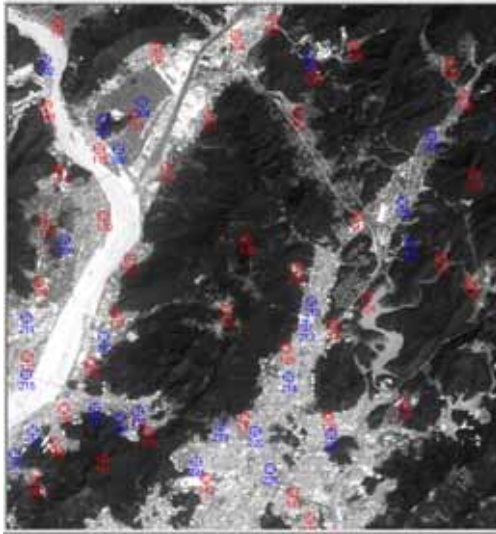


그림 6. 기준점 분포 현황도(Red: GCP, Blue: CHK)

#### 4. 평가 및 고찰

실험에 사용된 3개의 각기 다른 실험데이터에 대하여 다음과 같은 내용을 실험하였다.

- 1) 각기 다른 세 종류의 실험데이터에 9개의 각기 RFM을 적용하여 각 데이터 별, 모델 별 정확도 평가.
- 2) 직접해와 반복해의 계산된 RPC 정확도 비교 평가
- 3) 각 환경별 최적의 RFM 모델의 결정

표 4. RFM의 9개 모델

Case	Poly. order	No.of RFCs	Minimum GCPs
$P_2 \neq P_4$	3	78	39
	2	38	19
	1	14	7
$P_2 = P_4$	3	59	30
	2	29	15
	1	11	6
$P_2 = P_4 \equiv 1$	3	40	20
	2	20	10
	1	8	4

표 4는 적용된 9개의 모델 각각에서 산출되는 RPC 수와 필요한 최소기준점 수를 나타낸 것이다. 여기서  $P_2 = P_4 \equiv 1$ 인 경우는 중, 저해상도 위성영상의 기하보정에 적용된 일반다항식모델과 같은 형태이며,  $P_2 = P_4$ 이면서 1차 다항식을 최소제곱법의 직접법으로 산출하면 DLT(Direct Linear Transformation)와 같다.

모델식 결정에 있어서는 먼저 각 환경별로 구성된 모델식으로부터 앞 절의 계수결정 단계에 따라 미지계수인 RPC를 결정한다. RPC가 결정되면 지상좌표( $X, Y, Z$ )를 식(1)에 대입하여 영상좌표( $c, r$ )를 산출한 후, 산출된 영상좌표와 검사점과의 잔차로부터 기준점과 검사점의 평균제곱근오차를 각 영상데이터들마다 계산하여 모델식의 적합 여부를 평가하였다.

#### 4.1 Terrain-Independent I

앞 절에서도 설명한 바와 같이 이 방법은 RPC를 계산하는데 필요한 높이값이 필요하지 않으므로 위성 전처리 시스템에 적용될 수 있는 방법이다. 표 5는 총 450점의 기준점으로부터 RPC를 추출하여, 이를 검사점에 적용하여 계산된 RMSE와 오차의 최대값을 픽셀단위로 나타낸 것이다.

표 5. Terrain-Independent I 경우의 RMSE

Case	Order	RMSE(pixel)			Max Error (pixel)
		Col.	Line	Ave.	
$P_2 = P_4 \equiv 1$	1	1.7163	0.0616	4.9886	1.2144
	2	0.0047	0.0018	0.0256	0.0036
	3	-	-	-	-
$P_2 = P_4$	1	1.0700	0.7455	3.1382	0.9221
	2	0.0020	0.0019	0.0076	0.0020
	3	-	-	-	-
$P_2 \neq P_4$	1	0.0458	0.0018	0.0965	0.0324
	2	0.0014	0.0018	0.0046	0.0016
	3	3.1621	184.705	39040.8	130.63

RFM의  $P_2 = P_4 \equiv 1$ ,  $P_2 = P_4$ ,  $P_2 \neq P_4$ 의 2차 다항식 형태가 비교적 양호한 결과값을 산출되었으며, 임계값인  $1.0 \times 10^{-8}$ 에 수렴하는 반복회수도 모두 2~5회 정도로 수렴속도가 비교적 안정적 이었다.



정확도가 가장 우수한 경우는  $P2 \neq P4$ 의 2차식인 경우 평균 RMSE가 0.0046 pixel 정도이고 최대 오차가 0.0016 pixel 정도로 산출되어 위성 보조데이터를 사용한 Look Vector 모델링과 거의 같은 정도로 산출될 수 있음을 알 수 있다. 따라서 전처리 시스템에 적용될 수 있는 KOMPSAT-1 EOC 영상의 RPC인 경우 투영왜곡과 지구곡률, 대기굴절, 렌즈왜곡을 보정하는 2차 다항식만으로도 충분한 정확도를 확보할 수 있음을 알 수 있다.

#### 4.2 Terrain-Independent II

표 6은 SPOT 입체 영상으로부터 계산된 지상좌표를 이용하여 RPC를 추출하고, 이 RPC를 이용하여 검사점(186점)에 대한 지상좌표를 계산하였다. 검사점에 대한 비교 자료로는 축척 1:5,000 수치지도로부터 생성된 DEM으로부터 매칭결과와 공간간차이론으로 계산된 평면좌표에 해당하는 표고값으로 비교하였다.

RPC의 추출 정확도는 0.5 pixel이하로 지상좌표를 결정할 수 있었으며,  $P2 \neq P4$ 의 2차인 경우 그 정확도가 가장 우수하였다. 이 결과는 SPOT PAN 영상의 엄밀센서모델링 결과(위성위치; 1차 다항식, 위성자세;  $w, \phi$  고정,  $\kappa$  1차 다항식)인 8.305 m 정도와 비교하여 볼때 그 정확도의 저하는 거의 없는 것으로 판단된다.

이 실험에서도 추출된 RPC를 이용할 경우, 사용자의 요구정확도에 만족하는 기하보정 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

표 6. Terrain-Independent II 경우의 RMSE

Case	Order	RMSE(pixel)			Max Error (pixel)
		Col	Line	Ave.	
$P2 = P4 = 1$	1	0.353	0.359	0.356	1.346
	2	0.339	0.363	0.351	1.496
	3	0.351	0.373	0.362	1.589
$P2 = P4$	1	0.330	0.368	0.350	1.402
	2	0.326	0.391	0.360	1.477
	3	0.337	0.403	0.371	1.912
$P2 \neq P4$	1	0.331	0.361	0.346	1.453
	2	0.196	0.246	0.222	0.996
	3	0.905	0.383	0.695	11.556

#### 4.3 Terrain-Dependent

표 7의 결과는 수치지도에서 획득된 지상기준점으로부터 RPC를 계산한 후, 이를 이용한 검사점의 정확도를 나타낸 것으로 적용된 9개의 각기 다른 RFM에 대하여  $P2 = P4$ 의 3차 다항식의 경우를 제외하면 모두 약 0.5 픽셀 정도의 정확도를 획득할 수 있음을 알 수 있다.

표 7. Terrain-Dependent II 경우의 RMSE

Case	Order	RMSE(pixel)			Max Error (pixel)
		Col.	Line	Ave.	
$P2 = P4 = 1$	1	0.519	0.533	0.526	1.042
	2	0.462	0.529	0.497	1.060
	3	0.507	0.469	0.488	1.013
$P2 = P4$	1	0.508	0.557	0.533	1.072
	2	0.506	0.560	0.534	1.030
	3	3.854	5.719	4.876	19.171
$P2 \neq P4$	1	0.510	0.528	0.519	1.005
	2	0.505	0.521	0.513	0.930
	3	0.347	0.490	0.424	0.943

RPC의 결과와 일반 다항식의 1차 다항식인 Affine모델의 경우와 정확도가 유사하게 나타났다. 이것은 사용된 기준점의 정확도 문제, 기준점 분포, 사용된 기준점 수 등 다양한 원인이 있을 수 있다. 즉 위성영상의 공간해상력에 따른 기준점 획득시 오차는 피할 수 없으며, RFM 구성 다항식의 차수에서도 나타난 것처럼 중저해상도 위성 영상인 경우 3차이상 RPC를 사용할 경우 정확도 향상은 크게 기대하기 어렵다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 위성 영상자료중 위성의 보조데이터를 사용자에게 제공하지 않는다는 가정하에, 보조데이터를 대신하여 사용자가 영상을 기

하보정 할 수 있는 RPC 생성알고리즘을 개발하여 정확도를 검증한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 위성 전처리시스템에 적용될 수 있는 Terrain-Independent I 인 경우, KOMPSAT-1 EOC 영상의 물리적 센서모델로부터 모델을 추출한 결과인 검사점에 대한 정확도 (RMSE)가  $10^{-3}$  pixel로 정도로 오차가 산출되어, RPC 모델이 KOMPSAT-1 영상의 물리적 센서모델을 대체할 수 있음이 확인되었다.
- (2) 개발된 RPC 추출 프로그램으로 각기 다른 위성영상에 대해서도 실험한 결과, 소요정확도를 확보할 수 있었을 뿐만 아니라 프로그램의 안정성을 검증할 수 있었다.

향후 연구에서는 실제 고해상도 위성영상자료를 이용하여 RPC 모델의 적합도를 실험 검증하여야 할 것이며, 프로그램의 안정성, 처리속도, 정확도 향상 방안에 대해서도 추가적인 연구가 필요할 것이다.

## 6. 참고 문헌

1. 공공원격탐사센터 홈페이지, <http://krsc.kari.re.kr/>
2. Hu, Y. and Tao, C. V., "An improved solution to the Rational Function Model using additional control information", 2000 ASPRS Annual conference. Washington, D.C., 2000, 4 pages(CD-ROM).
3. Lee, H. S., Kim, H. J., Yu, K. Y. and Kim, Y. I., "A Study on the Rational Function Coefficients Generation from IKONOS Satellite Image", Proceeding of KSCE 2001 Annual Conference, Seoul, 2001, CD-ROM, 4 pages.
4. Tao, C. V., Hu, Y., Mercer, J. B. and Schnick, S. "Image rectification using a generic sensor model - rational functional model", International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 33, Part B3, 2000, pp. 874-881.
5. Orun, A. B. and Natarajan, K., "A modified bundle adjustment software for SPOT imagery and photography tradeoff", Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 60, No. 12, 1994, pp. 1017-1023.
6. Zhang, Y., Tao, C. V. and Mercer, B. , "Accuracy assessment of DEM with respect to high resolution satellite imagery", 2000 ASPRS Annual conference. Washington, 2000, D.C. : 8 pages(CD-ROM).