

고해상도 인공위성 영상데이터의 기하보정을 위한 RFM의 적용 The Application of RFM for Geometric Correction of High-Resolution Satellite Image Data

안기원* · 임환철** · 서두천***

Ahn, Ki-Won · Lim, Hwan-Chul · Seo, Doo-Chun

요 旨

본 연구에서는 상업용 고해상도 위성인 IKONOS 위성 영상의 기하보정 방법에 대해 알아보기 위해 기존에 쓰여왔던 다항식모델과 위성의 보조데이터 없이 기하보정이 가능한 RFM을 적용하여 각각의 차수와 기준점의 수에 따른 정확도를 비교·분석하였다. 또한 RFM 계수산출을 위한 최소제곱법의 수치적 불안정성을 극복하기 위하여 Tikhonov 정규화기법을 도입하여 적용하였다. RFM 적용 결과, 기존의 2차원 다항식 모델에 비해 평균제곱근오차를 2 pixel 이상 감소시킬 수 있었다.

ABSTRACT

In this study, in order to discuss the geometric correction methods of high-resolution IKONOS satellite image, the existing polynomial model and RFM which is able to rectify satellite image without auxiliary data are applied to IKONOS satellite image data. Then the accuracy of ground point versus number of GCPs and each order of RFM are assessed. A numerical instability is removed by application of Tikhonov regularization method. As the results of this study, the root mean square errors of RFM is decreased more than 2 pixels in comparison with the two dimensional polynomial model.

1. 서 론

오늘날 항공사진은 지형도 제작의 중요한 수단이지만 촬영 및 도화 비용 등, 막대한 예산이 소요되므로 보다 경제적이고 효율적인 지도제작기법의 도입이 필요하게 되었다. 인공위성영상은 항공사진에 비하여 주기적이고 광범위하게 영상을 취득할 수 있으며, 비접근지역에 대한 관측을 신속하고 경제적으로 행할 수 있으므로 표고의 추출, 주제도의 작성 및 토지피복분류, 환경변화분석, 식생조사 등 많은 분야에 활용이 가능하다.

1986년에 발사된 SPOT 위성이 공간해상력 10m의 입체영상을 제공함으로써 위성영상을 이용한 지도제작이 시도되어 지도제작분야의 실용성 및 효율성에 대한 기대가 증대되었다. 하지만 이러한 위성영상의 장점에도 불

구하고 지도제작분야에서의 활용성이 적었던 것은 항공사진에 비해 공간해상도가 약 5~80m 정도로 낮기 때문에 중측적 또는 대측적의 지도제작에 적용하기 어려웠다. 그러나 1999년 9월에 발사된 미국 Space Imaging사의 IKONOS위성은 1m 해상도의 panchromatic 영상과 4m 해상도의 multispectral 영상을 제공하므로, 지형·지물의 분포상황 등을 정확히 파악할 수 있으며, 또한 1m 해상도의 영상은 축척 1:10,000 이상의 대축척지도를 제작할 수 있기 때문에 위성영상을 이용한 수치지도 제작 및 갱신이 용이하다.

고해상도의 위성데이터를 사용하여 대축척지도를 작성하기 위해서는 높은 정밀도의 기하보정이 필요하지만 고해상도 위성(IKONOS 등)의 경우 위성의 궤도요소와 외부표정요소와 같은 위치 추산력 자료(ephemeris data) 등의 보조자료를 제공하지 않으므로 이를 이용한 엄밀한 모델을 적용할 수 없으며 또한 보조자료를 필요로 하지 않는 일반적 센서 모델로서 기존 영상의 기하보정을 위해 기준점의 지상 및 영상의 평면위치(X, Y)만을 이용하

*경상대학교 토목공학과 교수(경상대학교 부속 공학연구원 책임연구원)

**경상대학교 토목공학과 석사과정 졸업

***한국 항공우주연구원 연구원

는 다항식 모델을 주로 사용해왔다.

고해상도 위성영상을 활용하기 위한 연구로는 Li 등이 IKONOS 위성영상을 항공사진으로 모의제작하여 기준점의 숫자와 분포에 따른 기하학적인 정확도를 분석하였으며¹⁾ Tao 등은 항공사진에 RFM(rational function model)을 이용하여 기하보정한 후 IKONOS 영상에 적용할 수 있음을 보였으며,²⁾ Toutin 등은 IKONOS 영상과 함께 제공되는 meta data를 이용한 엄밀한 모델과 RFM을 비교 분석하여 그 가능성을 나타내었다.³⁾

국내에서는 손흥규 등이 SPOT 위성영상을 이용하여 궤도매개변수모델, 시간다항식모델과 RFM을 각각 적용하여 3차원위치를 결정하여 정확도를 나타내었으며⁴⁾ 이효성 등은 IKONOS 위성데이터의 일부지역을 사용하여 RFM의 매개변수를 추출한 후 그 정확도를 나타내었다.⁵⁾

따라서, 본 연구에서는 일반적 센서모델로서 기준점의 높이값을 고려한 3차원 지상좌표(X, Y, Z)를 이용하는 기하보정방법인 Rational Function Model을 IKONOS의 위성영상에 적용한 후 그 정확도를 검증하고 그 결과를 2차원 기하보정방법과 비교하고자 하였다.

2. Rational Function Model(RFM)

위성영상을 이용하여 기하보정을 할 경우 영상공간과 대상물공간사이의 함수관계를 이용하여 왜곡을 보정할 수 있는 기하학적인 센서모델이 필요하다. 여기에는 물리적 센서모델과 일반적 센서모델, 두 가지 종류의 센서모델이 있다.²⁾ 물리적 센서모델은 공선조건식처럼 엄밀한 형태이며, 해석삼각측량에 의한 조정에 적합하다.

그러나 물리적인 센서 모델은 센서에 의존적이며 센서가 다른 형태일 경우 각기 다른 모델들을 필요로 한다. 위와 같은 이유로 센서 탑재체와 센서의 형태에 좌우되지 않는 일반적인 형태의 센서 모델의 개발이 필요하다.

RFM은 일반적 센서모델의 한 종류로, 위성의 궤도정보를 얻을 수 없는 경우나 위성 궤도에 대한 정보가 불확실하여 물리적 센서모델로는 기하보정을 수행할 수 없는 경우에 사용된다. 이 모델은 프레임, 푸시부름, 휘스 크부름, 파노라믹, SAR같은 다양한 센서에서 취득된 데이터의 기하보정에 적용될 수 있다. 또한 최근 발사된 IKONOS 위성데이터도 궤도정보와 같은 위성 보조데이터 대신 RFM 계수를 사용자에게 제공하므로 영상에 포함되어 있는 각종 기하학적인 왜곡을 보정하도록 하고

있다.

2.1 RFM의 기본이론

RFM이란 원래 다항식의 특수한 형태이며, 지상기준점과 이에 대응하는 영상의 점 사이의 기하학적 관계를 고차 다항식의 비 형태로 표현한 것이다. 영상좌표(x, y)와 이에 대응하는 지상좌표(X, Y, Z) 사이의 관계는 식 (2-1)과 같다.

$$x = \frac{P1(X, Y, Z)}{P2(X, Y, Z)} \quad y = \frac{P3(X, Y, Z)}{P4(X, Y, Z)} \quad (2-1)$$

P는 다음 식 (2-2)와 같은 형태의 다항식이다.⁶⁾

$$P(X, Y, Z) = \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^i \sum_{k=0}^j a_n X^{i-j} Y^{j-k} Z^k \quad (2-2)$$

여기서, N은 다항식 차수이며, a_n 은 rational function의 계수(RFC: Rational Function Coefficient)를 나타내며 RPC(Rapid Positioning Capability) 데이터라고도 불린다. 아래첨자 n은 $n = (i \cdot (i + 1) \cdot (i + 2))/6 + (j \cdot (j + 1)) + k$ 로 정의되며 각 다항식 계수의 총 개수는 $((N + 1) \cdot (N + 2) \cdot (N + 3))/6$ 개이다. 예를 들어 N이 3인 경우 20개의 계수를 가지는 3차 다항식이 된다.

$$\begin{aligned} P(X, Y, Z) = & a_0 + a_1X + a_2Y + a_3Z + a_4X^2 + a_5XY \\ & + a_6XZ + a_7Y^2 + a_8YZ + a_9Z^2 + a_{10}X^3 + a_{11}X^2Y \\ & + a_{12}X^2Z + a_{13}XY^2 + a_{14}XYZ + a_{15}XZ^2 + a_{16}Y^3 \\ & + a_{17}Y^2Z + a_{18}YZ^2 + a_{19}Z^3 \end{aligned} \quad (2-3)$$

식 (2-1)을 3차 다항식의 행렬형태로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} x &= \frac{(1XYZ \dots YZ^2Z^3) \cdot (a_0 a_1 \dots a_{19})^T}{(1XYZ \dots YZ^2Z^3) \cdot (1b_1 \dots b_{19})^T} \\ y &= \frac{(1XYZ \dots YZ^2Z^3) \cdot (c_0 c_1 \dots c_{19})^T}{(1XYZ \dots YZ^2Z^3) \cdot (1d_1 \dots d_{19})^T} \end{aligned} \quad (2-4)$$

일반적으로 광학적인 투영에 의해 발생하는 왜곡은 1차 다항식으로서 보정될 수 있는 반면, 지구곡률, 대기굴절과 렌즈왜곡과 같은 경우의 보정은 2차 다항식으로 근사적으로 나타낼 수 있으며, 높은 차수의 구성요소를 가진 다른 알려지지 않은 왜곡들은 3차 다항식을 사용함으로써 조정할 수 있으므로 RFM의 최대 차수는 3차로 제

한되어 있다.

RFM의 각 차수에 대한 형태를 볼 때, 공선조건식, 투영변환 모델, 직접선형변환 모델들은 1차식의 RFM의 형태로 나타나며, 분모가 1일 때의 RFM의 경우에는 3차 다항식 모델을 나타낸다.

예를 들어, P2=P4인 경우의 1차식은 식 (2-5)와 같이 DLT와 유사한 형태로 다음과 같이 나타내어진다.

$$\begin{aligned} x &= \frac{a_0 + a_1 X + a_2 Y + a_3 Z}{1 + b_1 X + b_2 Y + b_3 Z} \\ y &= \frac{c_0 + c_1 X + c_2 Y + c_3 Z}{1 + b_1 X + b_2 Y + b_3 Z} \end{aligned} \quad (2-5)$$

RFM에 사용된 영상좌표와 지상좌표는 offset과 scale factor에 의하여 정규화된 값으로 -1.0에서 +1.0의 범위를 가지고 있다. offset과 scale factor의 적용은 다음 식 (2-6)과 같다.⁷⁾

$$\begin{aligned} x &= \frac{(x_u - x_o)}{x_s} & y &= \frac{(y_u - y_o)}{y_s} \\ X &= \frac{(X_u - X_o)}{X_s} & Y &= \frac{(Y_u - Y_o)}{Y_s} & Z &= \frac{(Z_u - Z_o)}{Z_s} \end{aligned} \quad (2-6)$$

여기서,

- x, y : 정규화된 영상좌표
- X, Y, Z : 정규화된 지상좌표
- x_u, y_u : 정규화되지 않은 영상좌표
- X_u, Y_u, Z_u : 정규화되지 않은 지상좌표
- x_o, y_o : 영상좌표의 offset 값
- X_o, Y_o, Z_o : 지상좌표의 offset 값
- x_s, y_s : 영상좌표의 scale factor
- X_s, Y_s, Z_s : 지상좌표의 scale factor

offset은 식 (2-7)과 같이 각 좌표의 평균값을 나타낸다.

$$\begin{aligned} x_o &= \frac{1}{n} \sum x_u & y_o &= \frac{1}{n} \sum y_u \\ X_o &= \frac{1}{n} \sum X_u & Y_o &= \frac{1}{n} \sum Y_u & Z_o &= \frac{1}{n} \sum Z_u \end{aligned} \quad (2-7)$$

scale factor는 식 (2-8)과 같이 나타내어진다.

$$\begin{aligned} x_s &= \max(|x_{\max} - x_o|, |x_{\min} - x_o|) \\ y_s &= \max(|y_{\max} - y_o|, |y_{\min} - y_o|) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X_s &= \max(|X_{\max} - X_o|, |X_{\min} - X_o|) \\ Y_s &= \max(|Y_{\max} - Y_o|, |Y_{\min} - Y_o|) \\ Z_s &= \max(|Z_{\max} - Z_o|, |Z_{\min} - Z_o|) \end{aligned} \quad (2-8)$$

2.2 최소제곱법에 의한 계수추출

최소제곱법으로 RFC를 구하기 위하여, 식 (2-4)를 잔차항 v_x, v_y로 정리하면 다음 식 (2-9)와 같다.

$$\begin{aligned} B v_x &= [1XYZ \dots Z^3 - xX - xY \dots - xZ^3] \cdot J - x \\ D v_y &= [1XYZ \dots Z^3 - yX - yY \dots - yZ^3] \cdot K - y \end{aligned} \quad (2-9)$$

여기서,

$$\begin{aligned} B &= (1XYZ \dots YZ^2Z^3) \cdot (1b_1 \dots b_{19})^T \\ J &= (a_0 a_1 \dots a_{19} \ b_1 b_2 \dots b_{19})^T \\ D &= (1XYZ \dots YZ^2Z^3) \cdot (1d_1 \dots d_{19})^T \\ K &= (c_0 c_1 \dots c_{19} \ d_1 d_2 \dots d_{19})^T \end{aligned}$$

위의 두 방정식을 같이 나타내면 관측방정식은 식 (2-10)과 같이 나타내어진다.

$$\begin{bmatrix} V_r \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J \\ K \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R \\ C \end{bmatrix} \quad (2-10)$$

위의 관측방정식에 최소제곱법을 적용하면 식 (2-11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} T^T W T I - T^T W G &= 0 \\ I &= (T^T W T)^{-1} T^T W G \end{aligned} \quad (2-11)$$

여기서, 경중률 W는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} W &= \begin{bmatrix} W_x & 0 \\ 0 & W_y \end{bmatrix} \\ W_x &= \begin{bmatrix} \frac{1}{B_1^2} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{1}{B_2^2} & 0 & \vdots \\ \vdots & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \frac{1}{B_n^2} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$W = \begin{bmatrix} \frac{1}{D_1^2} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{1}{D_2^2} & 0 & \vdots \\ \vdots & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \frac{1}{D_n^2} \end{bmatrix} \quad (2-12)$$

위 정규방정식에서 경중률의 초기값 $W^{(0)}$ 를 단위행렬로 주고 RFC의 초기값 $I^{(0)}$ 를 구하는 것을 최소제곱법을 이용한 직접해법이라고 하며 직접해법으로 구한 초기값 $I^{(0)}$ 의 RFC를 이용해서 재계산한 B와 D를 $W^{(0)}$ 에 대입하여 종료조건에 만족할 때까지 반복 계산하여 $I^{(0)}$ 를 구하는 것을 반복해법이라고 한다.

2.3 정규방정식의 조정

측정한 값들로부터 근사함수를 만드는 최소제곱법과 같은 역문제(inverse problem)의 경우, 문제들 자체의 비선형 구조로 인하여 不定置(ill-posed)된 구조를 지니고 있다. 특히 어떤 매개변수가 최소제곱법에 의해 잘못 결정되었거나, 많은 수의 매개변수가 최소제곱법을 이용하기 위하여 필요한 측정수보다 더 큰 경우에 생기는 不定置 문제를 풀기 위해서는 적당한 정규화 기법이 필요하다.

여기서는 정규방정식 (2-13)의 T가 측정시 생기는 오차 등으로 인하여 보통 불량조건이 되어 정규방정식이 不定置된 구조를 가지게 된다. 결과적으로 측정된 기준점과 검사점의 오차가 반복계산과정에서 기복하게 된다.

이런 경우 결과값이 수렴하도록 하기 위해서 T^TWT 를 변환하여 조건을 바꾸어야 한다. 가장 간단한 방법으로 T^TWT 에 단위행렬 E의 작은 배수를 더해 주는 것이다.

T^TWT 는 주로 대칭행렬이고 양의 정부호이므로, $T^TWT + h^2E$ 는 $[h^2, h^2 + \|T^TWT\|]$ 의 고유치를 가지게 된다.

그러므로 정규화 계수 h가 증가할 때 조건수는 $(h^2 + \|T^TWT\|)/h^2$ 보다 작아지므로 불량조건이 아님을 알 수 있다. 위 변환된 값을 식 (2-11)에 대입하면 다음과 같은 식 (2-13)로 정규화된다.

$$(T^TWT + h^2E)I - T^TWG = 0 \quad (2-13)$$

이러한 방법을 Tikhonov 정규화 기법이라 하고, 이 식

은 식 (2-14)와 같이 최소제곱법을 변형하여 유도하였다.⁸⁾

$$\|TI - G\|_2 + h^2\|I\|^2 = \min \quad (2-14)$$

정규화한 후 식 (2-13)을 이용하여 다음과 같은 식 (2-15)로 반복계산을 한다.

$$I_{(0)} = I^{(0)}, v_{(0)} = G \\ I_{(s)} = I_{(s-1)} + (T^TWT + h^2E)^{-1}T^TWv_{(s-1)} \quad s = 1, 2, \dots \quad (2-15)$$

이와 같이 근사값을 이용하는 전통적인 다항식을 사용하면 진동하는 경향이 있으며, 이로 인해 다항식 근사값에서 종종 평균적인 근사 오차를 상당히 초과하는 오차 범위를 발생시키는 반면, RFM은 정규화로 인해 더 나은 보간 특성을 가지며 특히 균일하게 오차를 분포시킬 수 있다.

3. 데이터 처리 및 결과분석

3.1 사용데이터

본 연구에서 사용된 IKONOS 인공위성데이터는 위도 35.2°~35.3°, 경도 128.6°~128.7° 사이의 경남 창원시와 그 외 지역을 포함하는 영상이다. 그림 1은 사용된 영상

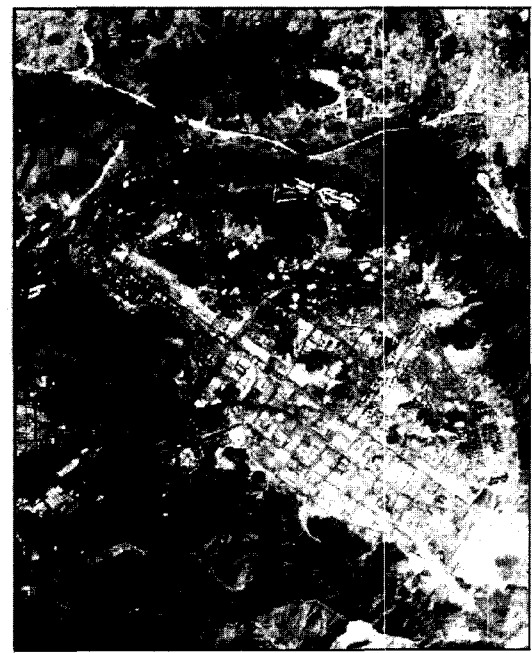


그림 1. 실험 영상

표 1. 위성 보조 데이터

특성	항목
센서	IKONOS-2
취득 시간	2000-02-13 01:57
과장대수	Pan.: 1 band Multi.: 4 bands
태양 방위각	148.7759°
태양 고도각	35.73780°
방사 해상력	11 bits per pixel
취득 방식	Cross scan, Along scan
공간 해상력	1.00 m
투영	UTM, 52 zone
타원체	WGS84
좌표 : 1	N 35.29999778°E 128.58934534°
좌표 : 2	N 35.30036150°E 128.71599676°
좌표 : 3	N 35.16998498°E 128.71645084°
좌표 : 4	N 35.16962300°E 128.59000189°
영상크기	Pan.: 11,516×14,460 (col.×row)

으로 공간해상도(GSD)가 1m인 panchromatic 영상 데이터이다. 영상크기는 11,516×14,460 pixels(column×row)로서 지상면적은 약 166.5 km²이다.

위성 데이터의 처리레벨은 위치 추산력 자료를 이용하여 지구타원체로 보정한 표준기하보정(GEO: standard geometrically corrected) 데이터이다. 이 데이터는 래스터 형태의 영상데이터와 ASCII 형태의 meta data, header data, RPC data를 갖고 있다. 영상데이터는 수집 당시의 방사해상도는 11 bit이지만 컴퓨터의 수치적인 처리를 위하여 16 bit로 변환되어 저장되어 있으며, 파일저장방식은 원격탐사 데이터의 일반적인 저장방식인 GeoTiff 방식으로 저장되어 있다.

meta data는 크게 product order, source image, product space 및 product component의 네 부분으로 구성되어 있으며 데이터에는 영상의 취득방식, GSD, 태양고도 및 방위각, 취득일 등의 정보가 저장되어 있다. header data에는 투영방식, 영상 좌측상단의 지도좌표(미터 단위), 영상크기, 화소크기 등이 기록되어 있다. 본 연구에 사용된 데이터의 제원은 표 1과 같다.

3.2 기하보정

IKONOS 위성의 경우 궤도 요소, 센서 탑재체, 위치 추산력 데이터와 같은 영상요소에 대한 정보가 제공되고 있지 않고 있으며, 앞으로 방사될 상업용 고해상도

위성들 또한 이들 정보를 제공하지 않을 계획이다. 따라서 공선조건식을 기본으로 하는 엄밀한 모델을 적용할 수가 없으므로 센서모델에서 대상물과 영상 공간 사이의 변환을 물리적인 영상화 과정이 필요 없는 일반적인 함수로서 표현되는 일반적 센서모델을 사용할 수 있다. 이런 함수는 주로 다항식과 같은 형태로 나타내어진다. 본 연구에서는 센서의 보조 데이터 없이 기하보정을 할 수 있는 모델로서 기존에 주로 사용된 다항식 모델과 함께 대체모델인 RFM을 이용하여 기하보정을 수행하였다.

3.2.1 지상 기준점 선정

IKONOS 위성의 panchromatic 데이터의 경우 공간 해상력이 1m이므로 기준점 좌표를 획득할 때보다 정확한 값이 요구된다. 기준점의 선정은 표고의 전 범위에 걸쳐 영상에 균등하게 배치되도록 하였으며 그 지상좌표는 축척 1:500 수치지도에서 독취하는 것을 원칙으로 하였다. 1:500수치지도가 제작되어있지 않은 시외지역의 25개점에 대해서는 부득이 축척 1:5,000 수치지도로부터 독취하였다. 또한 영상에서 삼각점이 관측되는 일부 점에 대해서는 삼각점을 직접 답사한 후, 현장에서 현장의 위치상태와 영상의 위치를 비교하면서 영상좌표를 독취하여 총 55점의 지상기준점을 얻었다. 획득한 지상기준점의 분포상태를 그림 2에 나타내었다.

3.2.2 다항식모델

다항식에 의한 기하보정방법은 영상 전체에 걸쳐서 선정된 지상기준점들을 사용하여 최소제곱법으로 다항식계수를 찾은 후, 변환식에 적용하여 기하보정을 행하는 방법이다. 원 영상과 보정 영상 사이의 관계 다음 식 (3-1)과 같은 다항식으로 나타내어진다.

$$\begin{aligned} x &= a_0 + a_1X + a_2Y + a_3XY + a_4X^2 + a_5Y^2 \dots \\ y &= b_0 + b_1X + b_2Y + b_3XY + b_4X^2 + b_5Y^2 \dots \end{aligned} \quad (3-1)$$

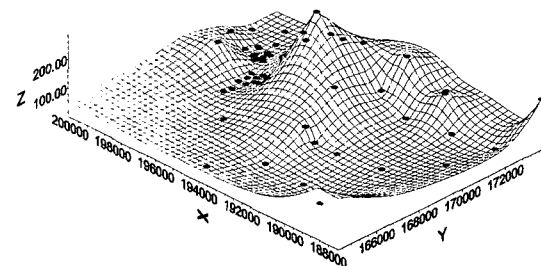


그림 2. 지상 기준점의 분포

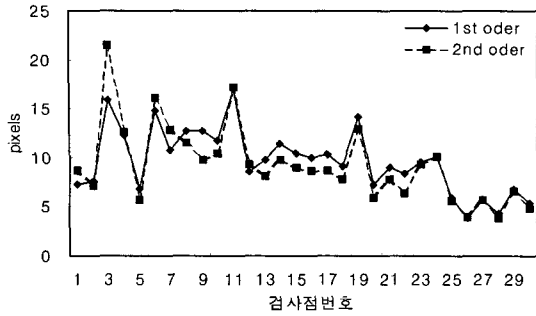


그림 3. 검사점 30점(검사점 I의 경우)의 각 점의 오차

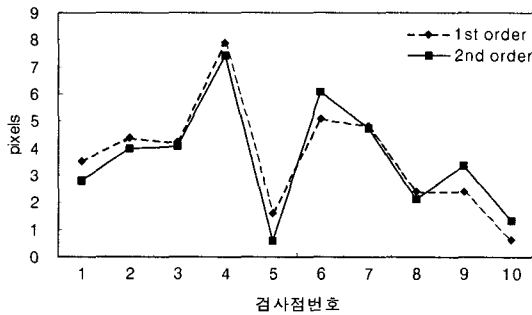


그림 4. 검사점 10점(검사점 II의 경우)의 각 점의 오차

좌표변환식의 적용에 있어서는 위 다항식을 최대 2차 식까지 적용하였다. 좌표변환식은 변환 후 지상좌표에 대응하는 영상의 크기를 결정하는 주변환식과, 보정될 영상의 화소값을 결정하는 역변환식으로 나누어지며, 역변환식이 구하여지면 보정할 영상의 각 화소값을 원영상에서 찾은 후 이들을 재배열한다.

다항식모델의 경우 1차식과 2차식을 각각 적용하였으며, 기준점 선정시 총 55점 중 1차식과 2차식 모두에 대하여 기준점으로 25점과 45점을 각각 사용한 경우로 나누어 평가하였다. 이 경우 기준점으로 25점만을 사용한 경우의 검사점 I은 30점이 되고, 45점을 사용하였을 경우인 검사점 II는 10점이 된다. 표 2와 그림 3과 4는 다항식 보정 결과를 평가하기 위해서 선정된 검사점 각각에 대한 오차를 화소단위로 나타낸 것이다.

3.2.3 RFM에 의한 기하보정

RFM에 의한 기하보정방법 또한 다항식에 의한 방법과 마찬가지로 영상 전체에 걸쳐서 고루 선정된 지상 기준점들을 사용하여 최소제곱법으로 RFC의 초기값을 찾은 후, 반복법에 의해 최종 RFC를 구하여 이를 변환식에 적용하여 기하보정을 행하는 방법이다. RFM을 이용

표 2. 검사점의오차 (단위: pixels)

경우	검사점 번호	1차식	2차식
	1	7.26	8.66
	2	7.52	7.07
	3	15.88	21.52
	4	12.23	12.65
	5	6.81	5.73
	6	14.85	16.15
	7	10.77	12.85
	8	12.68	11.54
	9	12.75	9.76
	10	11.71	10.37
	11	17.03	17.25
	12	8.59	9.26
	13	9.78	8.10
	14	11.38	9.76
검사점 I	15	10.37	8.96
	16	9.95	8.61
	17	10.34	8.68
	18	9.05	7.74
	19	14.11	12.90
	20	7.27	5.97
	21	9.02	7.83
	22	8.29	6.35
	23	9.48	9.31
	24	10.08	10.07
	25	5.88	5.57
	26	3.83	3.98
	27	5.67	5.67
	28	4.29	3.87
	29	6.81	6.62
	30	5.34	4.84
	RMSE	10.18	10.05
검사점 II	31	3.52	2.79
	32	4.37	3.98
	33	4.24	4.06
	34	7.91	7.41
	35	1.60	0.57
	36	5.08	6.06
	37	4.80	4.73
	38	2.40	2.11
	39	2.42	3.34
	40	0.64	1.35
	RMSE	4.19	4.15

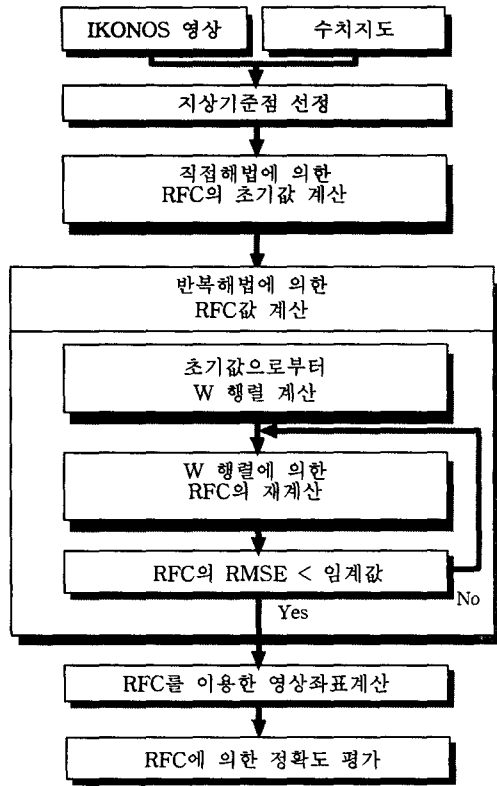


그림 5. RFC 추출 순서도

하여 RFC를 구하는 순서는 그림 5와 같다.⁵⁾

RFM은 일반적으로 다음 식 (3-2)과 같은 다항식의 형태로 나타낼 수 있다.

$$x = \frac{P1(X, Y, Z)}{P2(X, Y, Z)} = \frac{\sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^i \sum_{k=0}^j a_n \cdot X^{i-j} \cdot Y^{j-k} \cdot Z^k}{\sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^i \sum_{k=0}^j b_n \cdot X^{i-j} \cdot Y^{j-k} \cdot Z^k}$$

$$y = \frac{P3(X, Y, Z)}{P4(X, Y, Z)} = \frac{\sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^i \sum_{k=0}^j c_n \cdot X^{i-j} \cdot Y^{j-k} \cdot Z^k}{\sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^i \sum_{k=0}^j d_n \cdot X^{i-j} \cdot Y^{j-k} \cdot Z^k} \quad (3-2)$$

위의 식과 같이 RFM을 적용할 경우, 각 다항식의 차수와 여러 가지 경우에 대해서 각기 필요한 기준점의 수가 틀리게 된다. 다음 표 3은 각각의 경우에 따른 RFC의 수와 계산에 필요한 최소한의 기준점의 수를 나타내

표 3. RFM의 데이터 구성

RFM 차수	경우	RFC 수	필요한 최소 기준점수
1	P2 ≠ P4	14	7
	P2 = P4	11	6
	P2 = P4 ≡ 1	8	4
2	P2 ≠ P4	38	19
	P2 = P4	29	15
	P2 = P4 ≡ 1	20	10
3	P2 ≠ P4	78	39
	P2 = P4	59	30
	P2 = P4 ≡ 1	40	20

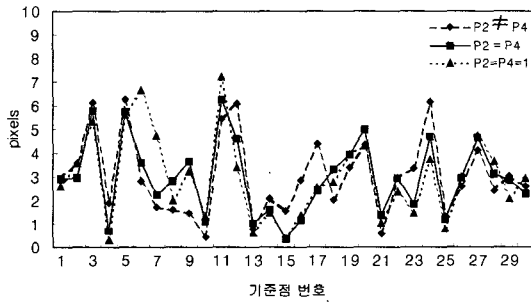


그림 6. 1차식을 이용한 RFM의 오차

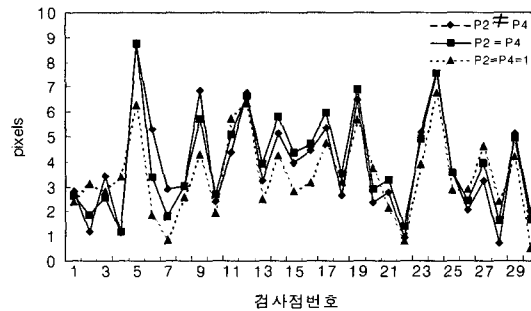


그림 7. 2차식을 이용한 RFM의 오차

고 있다. RFM의 적용 후 산출된 여러 경우의 결과를 비교하기 위해 최대 3차식까지 P2 ≠ P4, P2 = P4, P2 = P4 = 1의 9가지 경우에 대해 실험하였다.

RFM의 적용에 있어서 1차식과 2차식의 경우, 기준점으로 25점, 검사점으로는 30점을 사용하였으며 3차식의 경우, 기준점으로 45점, 검사점으로 10점을 사용하였다. 그림 6, 7, 8과 표 4는 RFM 보정결과를 평가하기 위해서 선정된 검사점의 각 차수별 평균제곱근오차를 나타낸

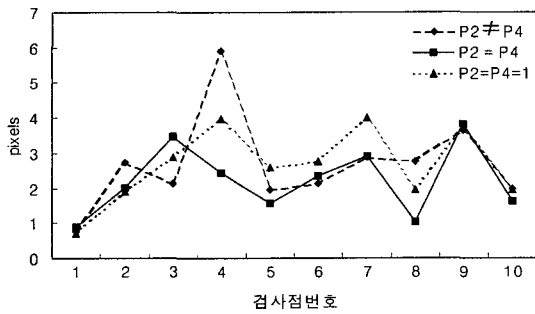


그림 8. 3차식을 이용한 RFM의 오차

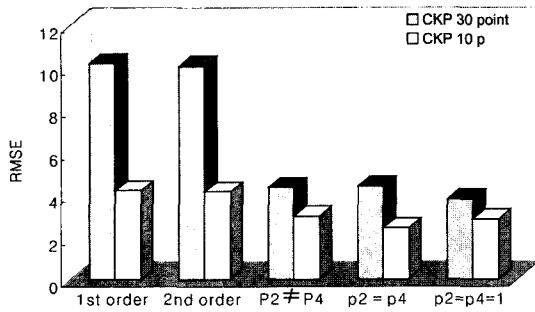


그림 9. 각 검사점의 평균제곱근오차

것이다.

그림 9는 보정결과를 평가하기 위해서 각각의 다항식과 RFM의 검사점의 숫자에 대한 평균제곱근오차를 화소단위로 나타낸 것이다. 여기서 검사점 30점에 대한 RFM 결과는 2차식을 적용한 결과이며 검사점 10점의 RFM 결과는 3차식을 적용한 결과이다.

위 결과로 볼 때 3차식을 적용한 RFM의 P2=P4인 경우가 가장 나은 결과를 나타냄을 알 수 있다. 여기서 P2=P4의 경우 계수행렬 B와 D가 같으므로 산출된 계수의 숫자는 총 59개으로써 이에 대해 산출된 RFM의 계수

를 나타내면 다음 표 5와 같다.

3.3 결과분석

본 연구에서는 상업용 고해상도 위성인 IKONOS 위성영상의 기하보정방법에 대해서 비교 분석하였다. 먼저 기하보정을 위한 센서모델인 물리적 센서모델과 일반적 센서모델에 관해 알아보았다.

IKONOS 위성의 경우, 물리적 센서모델링에 필요한 각종 보조데이터를 제공하지 않으므로 본 연구에서는 일

표 5. 산출된 Rational Function Coefficient

No.	계수 행렬		
	A	B	C
1	-0.003149	1.000000	-0.001302
2	0.997493	-0.095957	0.004125
3	0.001682	-0.207488	0.995220
4	-0.011212	0.340806	-0.008232
5	-0.090987	-0.040541	-0.002431
6	-0.207977	-0.039607	-0.085122
7	0.342022	0.058955	0.012070
8	0.002023	-0.146035	-0.206002
9	0.006961	0.205342	0.343066
10	-0.005314	-0.319836	-0.006826
11	-0.041957	0.000390	0.000056
12	-0.037906	-0.001211	-0.042748
13	0.065781	0.002147	-0.003136
14	-0.144985	0.001113	-0.037944
15	0.206383	-0.002767	0.071167
16	-0.315793	-0.001595	0.007479
17	-0.000044	0.000191	-0.145108
18	0.002894	0.000030	0.209054
19	0.004108	-0.003598	-0.312039
20	0.001625	-0.002239	-0.000309

표 4. 기준점과 검사점의 평균제곱근오차(단위: pixels)

차수	경우	P2 ≠ P4			P2 = P4			P2 = P4 = 1		
		RMSE	최소오차	최대오차	RMSE	최소오차	최대오차	RMSE	최소오차	최대오차
1	기준점	3.71	0.82	5.89	4.41	0.55	6.66	4.75	0.436	6.69
	검사점	3.46	0.45	6.26	3.36	0.35	6.27	3.46	0.29	7.23
2	기준점	1.99	0.15	4.41	2.23	0.12	5.07	2.84	0.01	6.13
	검사점	4.34	0.73	8.64	4.40	1.19	8.73	3.78	0.51	6.77
3	기준점	1.57	0.01	2.63	2.22	0.06	6.19	2.29	0.03	6.65
	검사점	2.99	0.76	5.91	2.40	0.88	3.81	2.83	0.70	3.99

반적 센서모델 중 다항식모델과 RFM을 비교하였다.

총 55점의 기준점을 이용하여, 다항식의 경우 1차식과 2차식을 이용하였으며 각 경우에 대해 검사점 30점과 10 점에 대한 평균제곱근 오차를 산출하였다. RFM의 경우, 최대 3차식까지 보정하였으며, 각각의 차수에 $P2 \neq P4$, $P2=P4$, $P2=P4=1$ 의 9가지 경우에 대해 평균제곱근오차를 나타내었다.

연구결과, 다항식모델은 기준점으로 25점을 선정하였을 경우, 검사점의 평균제곱근오차가 1차식과 2차식 각각 10.18, 10.05 pixel로서 매우 크게 나타났으며, 45점의 기준점을 사용하였을 경우, 각각 4.19, 4.15 pixel로 나타났다. 이에 비해, RFM은 3차식을 사용한 $P2=P4$ 인 경우, 검사점 평균제곱근오차가 2.40 pixel로서 가장 좋은 결과를 나타내었으며, 2차식을 적용한 RFM의 경우, 4.35, 4.40, 3.78 pixel로서 기준점으로 45점을 사용한 다항식모델과 비슷한 값을 나타내었다.

하지만 다항식모델의 경우, 지상 기준점으로 X와 Y의 2차원 좌표만을 사용하므로 기복변위가 완전히 보정이 되지 않아서 기복변위가 결과에 크게 영향을 주지 않을 때에 적용할 수 있다. 또한 높은 차수의 다항식은 오차가 작게 표현되므로 검사점이 맞는 것처럼 보이지만 검사점 사이에서 나타나는 기복 때문에 더 큰 오차가 발생할 수 있다.

RFM의 경우에는 3차식이 2차식보다 나은 결과를 보임을 알 수 있으며 특히 3차식에서 $P2 \neq P4$ 의 경우 기준점은 가장 작은 평균제곱근오차를 나타내었지만 검사점의 경우 $P2=P4$ 와 3차 다항식모델의 형태인 $P2=P4=1$ 보다 더 크게 나타나는 것으로 보아 RFM의 경우 기준점의 배치와 숫자에 민감하다는 것을 알 수 있다. 이는 기준점의 지상좌표 선정 시 수치지도를 사용하여 생긴 오차와 검사점의 수가 기준점에 비해 작아서 생긴 결과라고 생각된다. 위 결과로 볼 때 RFM을 이용하는 경우, 엄밀한 물리적 센서모델보다 정확도는 떨어지지만, RFM의 장점인 센서로부터의 독립성과 실시간 계산을 고려하여 본다면, 정확하고 충분한 기준점을 이용할 경우 정확도와 효율적인 면에서 크게 도움이 될 것이다.

4. 결 론

고해상도 위성인 IKONOS 위성영상의 기하보정을 위하여 기존에 많이 사용하던 2차원 다항식모델과 새로운

대체모델인 RFM을 이용하여 각각의 차수와 기준점 수에 따른 정확도를 비교 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. RFM의 경우, 2차식에 비해 3차식이 정확도가 높았으며, 특히 3차식 중에서도 $P2=P4$ 의 경우에 가장 좋은 결과를 나타내었다.

2. 위성데이터 판매시에 WGS84 경위도 좌표계로 제공되는 RFM의 계수를 사용하지 않고 직접 그 계수를 산출·적용함으로써 좌표변환과정없이 기하보정할 수 있었다.

3. 기존의 2차원 다항식모델과 RFM의 영상 기하보정 정밀도를 비교한 결과, RFM을 이용하여 평균제곱근 오차를 2 회소 이상 향상시킬 수 있었다.

위의 결과로 볼 때 기준점을 충분하고 정확하게 획득할 수 있다면, 회소이하단위의 정확도를 가질 수 있을 것이다. 또한 더 나은 결과를 위해서는 영상구입시 제공되는 RFM의 계수와의 비교 분석을 통한 연구가 필요할 것이다.

감사의 글

본 연구는 2000년도 한국과학재단 특장기초 연구(과제명: 국토기본도 제작을 위한 고해상도 인공위성데이터의 활용방안 연구, 과제번호: 2000-2-311000-003-3)에 수행된 연구의 일부로 연구비를 지원해 주신 한국과학재단과 데이터 구입에 협조하여 주신 e-HD.com에 감사드립니다.

참고문헌

1. Li, R., Zhou, G., Yang, S., Tuell, G., Schmidt, N. J. and Fowler, C., "A study of the potential attainable Geometric Accuracy of IKONOS satellite imagery", IAPRS, Vol. 33, Part. B4, 2000, pp. 587-595.
2. Tao, C. V. and Hu, Y., "Image rectification using a generic sensor model - rational function model", IAPRS, Vol. 33, Part. B3, 2000, pp. 359-366.
3. Toutin, T. and Cheng, P., "Demystification of IKONOS", Earth Observation Magazine, Vol. 9, No. 7, 2000.
4. 손흥규, 박정환, 송영선, 정진석, "고해상도 위성영상을 이용한 3차원 위치결정 정확도에 관한 연구", 대한토목학회 학술발표회 논문집, 2001.
5. 이효성, 김혜진, 유기윤, 김용일, "IKONOS 위성영상의

- Rational Function 계수추출에 관한 연구”, 대한토목학회 학술발표회 논문집, 2001.
6. Yang, X., “Accuracy of rational function approximation in photogrammetry”, ASPRS Annual Convention, Washington DC, 2000.
 7. Grodeki, J., “IKONOS stereo feature extraction - RPC approach”, ASPRS Annual Conference, St. Louis. Missouri, 2001.
 8. Golub, G. H., Hansen, P. C. and O’leary, D. P., “Tikhonov regularization and total least squares”, SIAM Journal on Matrix Analysis and Applications, Vol. 21, No. 1, 2000, pp.185-194.
-

(2002년 2월 5일 원고접수)