

지상기준점 추가에 의한 IKONOS RPC 갱신 Modification of IKONOS RPC Using Additional GCP

방기인* · 정수** · 김경옥*** · 조우석****

Bang, Ki-In · Jeong, Soo · Kim, Kyung-Ok · Cho, Woo-sug

要 旨

RFM은 OGC(Open GIS Consortium)에서 권고하는 지구관측영상에 대한 표준기하모델 중 하나이다. 또한 RFM은 1m의 공간해상도를 제공하는 상업목적의 위성 IKONOS의 최종 사용자를 위한 센서 모델로서 RPC를 RFM을 위한 매개변수로서 영상과 함께 제공하고 있다. 그러나 영상의 최종사용자가 더욱 정확한 공간정보의 획득을 위해 추가적인 노력을 시도하는 경우, IKONOS는 물리적 센서모델을 위한 보조적인 정보의 제공이 미흡하기 때문에 추상적인 센서모델이나 수학적인 센서모델을 도입하게 된다. Pushbroom DLT와 같은 추상적인 센서모델을 적용하기 위해서는 영상 전체에 고르게 분포하는 다수의 GCP를 판측해야 하며, RFM과 같은 수학적인 센서모델을 적용하기 위해서도 더욱 많은 수의 GCP가 필요하게 된다. 따라서 가장 효율적인 방법은 가장 적은 수의 기준점을 이용하여 영상과 함께 제공되는 RPC를 개선하는 방법이다. 본 논문에서는 소수의 추가적인 GCP를 이용하여 IKONOS의 RPC를 개량하는 2가지 방법을 제안한다. 첫 번째는 소수의 지상기준점과 normalized cubic 내에 설치된 가상의 기준점을 이용하여 RPC를 갱신하는 방법이고, 두 번째는 매개변수에 대한 관측을 도입하여 1~5개의 소수 지상기준점 만으로 RPC를 갱신하는 방법이다. 본 연구에서 갱신된 RPC는 검사점을 통해 검증한 결과 갱신 전보다 RMSE가 50% 정도 개선된 것을 확인할 수 있었다.

ABSTRACT

RFM is the one of the sensor models which is proposed by Open GIS Consortium (OGC) as image transfer standard. And it is the sensor model for end-users using IKONOS, a commercial pushbroom satellite, imagery which provide about 1m ground resolution. Parameters called RPC which is IKONOS RFM coefficients are serviced to end-users. But if some users try to make additional effort to get rigorous geo-spatial information, it is necessary to apply mathematic or abstract sensor models, because vendors don't offer any ancillary data for physical sensor models such as satellite orbit and navigation. Abstract sensor models such as pushbroom Direct Linear Transform (DLT) require many GCPs well distributed in imagery, and mathematic sensor model such as RFM, polynomials need much more GCPs. Therefore RPC modification using additional a few GCPs is the best solution. In this paper, two methods are proposed to modify RPC. One is method to use pseudo GCPs generated in normalized cubic, and another method uses parameters observations and a few GCPs. Through two methods, we get improvement of accuracy 50% and over.

* 한국전자통신연구원 공간정보기술센터 (E-mail: kiinbang@etri.re.kr)

** 한국전자통신연구원 공간정보기술센터 (E-mail: sungsoo@etri.re.kr)

*** 한국전자통신연구원 공간정보기술센터 (E-mail: kokim@etri.re.kr)

**** 정희원 및 이사, 인하대학교 토목환경공학부 (E-mail : wcho@inha.ac.kr)

1. 서 론

Pushbroom 위성영상을 위한 센서모델은 항공사진에서 사용되는 공선조건식을 개량한 방법과 위성역학을 이용하여 궤도를 모델링하는 방법등으로 대표되는 물리적 센서모델과 물리적인 조건으로부터 추상화된 매개변수를 파생시킨 DLT와 같은 추상적 센서모델이 있다. 또한 센서의 종류에 관계없이 다양한 영상에 적용이 가능한 다항식, RFM과 같은 수학적 센서모델도 광학위성영상에 적용될 수 있다.

이러한 센서모델들 중에서 특히, RFM (Rational Function Model)은 수학적 센서모델의 한 종류이며, OGC에서 지구관측영상을 위한 기하보정 모델로 권고하는 일반화된 센서모델이다. 또한 IKONOS 영상 공급업체는 영상구매자에게 RPC라는 RFM 센서모델의 매개변수를 제공하고 있다. RFM은 다항식의 비로 구성이 되며, 물리적, 기하학적인 조건에 자유롭기 때문에 다양한 센서의 영상에 적용이 될 수 있다는 장점을 가지고 있다. 그러나 3차항 까지 전개되는 RFM은 매개변수의 수가 수십 개에 이르기 때문에 사용자가 직접 매개변수를 구하는 경우 많은 수의 지상기준점(Ground Control Points)을 요구하게 된다.

이러한 이유로 RFM 매개변수를 사용자가 직접 구하는 방법은 실용적인 면에서 어려움이 많다. 그러나 제공되는 RFM 매개변수가 사용자가 요구하는 정확도를 제공하지 못하는 경우 사용자가 스스로의 센서모델을 갱신할 필요가 있다. 이러한 경우 IKONOS 위성영상은 SPOT이나 KOMPSAT과 같이 영상을 촬영하는 동안의 위성의 궤도정보를 추가로 제공하지 않기 때문에 물리적 센서모델의 도입은 어려움이 있다.

Pushbroom DLT, Extended DLT 처럼 위성궤도정보로부터 보다 자유로운 추상적 센서모델은 물리적 센서모델의 대안으로 적용될 수 있지만, 다수의 지상기준점 확보가 불가피하다. 따라서 제공되는 RPC 데이터를 최대한 활용하는 방법이 가장 효율적인 대안이 될 것이다. RPC를 개량하는 방법은 필요한 지상기준점의 수를 최소화 할 수 있으며, 영상과 함께 제공되는 RFM 센서모델을 사용자가 유지할 수 있게

됨으로써 새로운 센서모델을 수용하는 과정에서 오는 추가적인 노력이 절약되고, 다른 사용자와의 호환성도 유지하게 된다.

2. RFM 센서모델

RFM(Rational Function Model)은 OGC에서 Image Transfer Standard로 제안된 센서모델로서 Polynomial model, Grid interpolation model, Universal real-time image geometry model과 함께 Real-time에 적합한 4가지 geometry model 중 하나로 정의된 수학적 센서모델이다. 따라서 RFM은 실시간 사용에 적합한 일반적인 모델(Generic model)로서 위성의 궤도나 표정 요소 없이 다수의 지상기준점을 이용하여 위성영상 센서모델링이 가능하다. 식 (1)은 RFM의 일반적인 형태를 보여주고 있다.

$$\begin{aligned} r_n &= \frac{P_1(X_n, Y_n, Z_n)}{P_2(X_n, Y_n, Z_n)} \\ c_n &= \frac{P_3(X_n, Y_n, Z_n)}{P_4(X_n, Y_n, Z_n)} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, 지상좌표 (X_n, Y_n, Z_n) 와 영상좌표 (r_n, c_n) 는 offset value와 scale value를 이용하여 -1.0과 1.0사이의 범위로 영상 및 지상좌표를 정규화(Normalization) 시킨 좌표이다. 위의 수식에서 알 수 있듯이 RFM은 다항식의 비로 표현이 된다. 각각의 다항식은 다양한 차수로 구성이 될 수 있으며, 분모는 동일한 다항식으로 설정하거나 또는 다르게 설정할 수 있다. 본 논문에서 소수의 지상기준점으로 갱신하고자 하는 IKONOS의 RFM은 Line과 Sample에 대한 분모를 동일한 다항식으로 설정하고 있다. ($P_2 = P_4$)

3차원 공간좌표 지상좌표 X, Y, Z (또는 latitude, longitude, height)의 고차함수로 구성된 다항식 P_1 을 자세히 살펴보면 식 (2)과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned}
 P_1 &= \sum_{i=0}^{m_1} \sum_{j=0}^{m_2} \sum_{k=0}^{m_3} a_{ijk} X^i Y^j Z^k \\
 &= a_0 + a_1 Z + a_2 Y + a_3 Z + a_4 ZY + a_5 ZX \\
 &+ a_6 YX + a_7 Z^2 + a_8 Y^2 + a_9 X^2 + a_{10} ZYX \\
 &+ a_{11} Z^2 Y + a_{12} Z^2 X + a_{13} Y^2 Z + a_{14} Y^2 X \\
 &+ a_{15} ZX^2 + a_{16} YX^2 + a_{17} Z^3 + a_{18} Y^3 + a_{19} X^3 \\
 &(0 \leq (i+j+k) \leq 3, 0 \leq i \leq 3, 0 \leq j \leq 3, 0 \leq k \leq 3)
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

OGC문서에서 제안되는 RFM과 IKONOS에서 제공하는 RPC계수를 고찰해보면, 다항식 P_1 에서 각각 지상기준점 좌표 X, Y, Z 는 최대 3차식 이하이고 X, Y, Z 는 각각 합도 3차 이하로 제한된다. 식 (2)을 바탕으로 식(1)을 3차식의 다항식으로 구성하면 RFM은 다음과 같이 식 (3)으로 표현될 수 있다.

일반적으로 식(2) $a_0 \sim a_3$ 의 1차항의 계수는 Optical projection의 왜곡량, $a_4 \sim a_9$ 의 2차항의 계수들은 지구곡률, 대기 굴절, 렌즈왜곡과 같은 오차를 나타낸다. 그리고 $a_{10} \sim a_{19}$ 의 3차항 계수들은 그 이외의 나머지 왜곡들을 보정한다. 따라서 RFM은 본질적으로 Polynomial Model을 확장한 것이며, 또한 많은 다른 센서모델들의 일반적인 형태(Generic Form)이기도 하다.⁽¹⁾

$$\begin{aligned}
 r_n &= \frac{(1, Z, Y, X \dots Z^3, Y^3, X^3) \cdot (a_0, a_1 \dots a_{19})^T}{(1, Z, Y, X \dots Z^3, Y^3, X^3) \cdot (1, b_1 \dots b_{19})^T} \\
 c_n &= \frac{(1, Z, Y, X \dots Z^3, Y^3, X^3) \cdot (c_0, c_1 \dots c_{19})^T}{(1, Z, Y, X \dots Z^3, Y^3, X^3) \cdot (1, b_1 \dots b_{19})^T}
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

3. IKONOS RPC

IKONOS 위성영상의 외부표정요소 또는 센서 모델링을 위한 물리적 정보는 일반 사용자에게 제공되지

않는다. 영상을 구매한 사용자에게는 RPC라는 RFM 센서모델을 위한 매개변수가 제공될 뿐이다.

IKONOS의 RFM 모델은 영상의 행과 열 좌표에 대해 20개의 항으로 구성된 3차 다항식의 비로 표현된다. 따라서 모두 80개의 항이 존재하게 되며 RPC는 RFM 80개의 매개변수와 2차원 영상좌표와 3차원 지리좌표의 Scale과 Offset으로 구성되어 있다. 그러나 행과 열에 대한 다항식의 비를 보면 분모항이 서로 같고, 그 중에서 상수항은 1.0으로 정해져 있으므로 이러한 사항을 고려한 RPC의 유효 매개변수의 수는 59개가 된다. 따라서 IKONOS의 RFM은 59(20+20+19)개의 미지수를 갖는 센서모델이고 사용자가 모든 매개변수를 처음부터 직접 구할 경우 최소 30개의 기준점이 필요하게 된다.

표 1. IKONOS RPC 자료

Name	Description
LINE_OFF	image row coordinate offset value
SAMP_OFF	image column coordinate offset value
LAT_OFF	ground latitude offset value
LONG_OFF	ground longitude offset value
HEIGHT_OFF	ground height offset value
LINE_SCALE	image row coordinate offset scale
SAMP_SCALE	image column coordinate offset scale
LAT_SCALE	ground latitude offset scale
LONG_SCALE	ground longitude offset scale
HEIGHT_SCALE	ground height offset scale
LINE_NUM_COEFF	numerator of row term
LINE_DEN_COEFF	denominator of row term
SAMP_NUM_COEFF	numerator of column term
SAMP_DEN_COEFF	denominator of column term

표 (1)은 IKONOS 영상과 함께 제공되는 RFM 계수인 RPC 자료에 대한 개략적인 설명이다.

표에서 보는바와 같이 RPC 자료는 정규화된 좌표에 대한 정보와 3차식으로 구성되는 IKONOS RFM에 대한 매개변수의 내용을 포함하고 있다.

그림 1. 은 본 논문에서 사용된 RPC 파일의 일부 모습을 보여주고 있다. 그림 3, 4는 본 연구를 위해 사용된 IKONOS 영상으로서 2001년에 촬영된 대전지

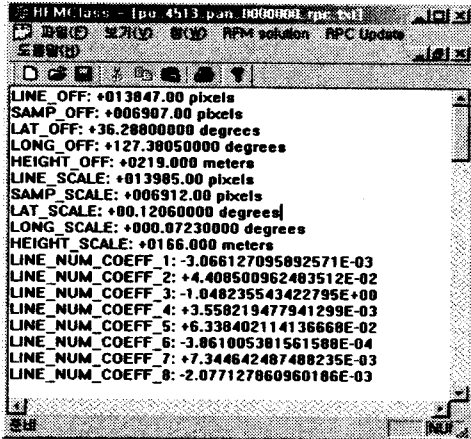


그림 1. IKONOS RPC 예

역 영상이다.

이 영상에 대한 40점 이상의 지상기준점을 GPS 측량을 통해 획득하였고, 이들 기준점 중에서 15점을 RPC 갱신을 위해 모델링에 사용하고, 나머지 기준점들을 갱신 성과에 대한 정확도 측정을 위해 검사점으로 사용하였다. 표 2, 3은 본 논문에서 소개한 두 가지 방법을 이용하여 RPC를 갱신한 정확도를 분석, 정리한 것이다.

4. RPC 갱신

가. Pseudo GCPs in Normalized Cubic

추가로 관측된 소수의 기준점을 이용하여 RPC를 갱신하고자 하는 경우 미지수 보다 적은 관측방정식의 수로 인해 적절한 해를 구하기 어렵게 된다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위해 의사기준점을 설치할 필요가 있다. 스테레오 IKONOS 위성영상에서 주어진 RPC를 이용하여 3차원 공간에 의사기준점을 설치하여 RPC의 1차식 계수를 갱신한 연구도 진행된 바 있다.

기존의 연구에서는 스테레오 영상의 RPC를 이용하여 영상에서 특징점을 찾아 공간전방교회를 통해 WGS84 좌표계의 3차원 의사기준점을 설치하였다.⁽¹⁰⁾ 그러나 본 논문의 방법은 스테레오 영상이 아닌 단일 영상의 RPC만을 이용하는 것이 가능하고, 공간전방교회의 과정에서 발생하는 오차를 피하기 위해 정

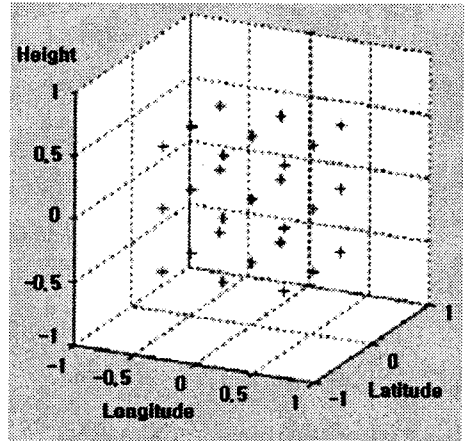


그림 2. Normalized cubic에서 관측된 3차원 기준점

규화된 좌표값을 사용하는 RFM의 특성을 이용한다.

-1.0 ~ +1.0 사이의 값으로 각 축의 범위가 제한되는 공간상에 영상에 관계된 모든 3차원 좌표가 포함되므로 정규화된 입방체(normalized cubic) 내에 안정적으로 격자분포를 갖는 의사기준점을 임의로 설치할 수 있게 된다.(그림 2)

의사기준점의 3차원 공간좌표와 2차원 영상좌표는 다음과 같이 결정한다. 먼저 정규화된 3차원 공간상에서 필요한 수만큼의 임의의 점 좌표를 추출한다. 3차원 점의 추출은 사용자가 결정한 분포를 따를 수도 있고, 랜덤하게 필요한 수만큼 추출할 수도 있다. 단지 정규화된 3차원 공간 내에 필요한 수만큼의 점들이 고르게 분포하도록 추출한다. 추출된 점의 정규화된 2차원 영상좌표는 제공된 RPC를 이용하여 계산한다. 제공된 RPC로 계산된 정규화된 영상좌표 또한 -1.0에서 +1.0사의 값을 갖게된다.

이러한 방법으로 결정된 의사기준점은 RFM 함수의 매개변수(RPC)를 계산할 수 있는 만큼의 방정식을 구성하는데 이용되게 된다. RFM은 적어도 30점 이상의 기준점을 요구하므로 소수의 추가된 지상기준점과 사용자가 결정한 의사기준점을 이용하여 필요한 기준점의 수를 만족시킬 수 있게되므로 이를 통하여 RPC를 갱신할 수 있다.

IKONOS RPC 계수를 구하기 위한 관측방정식은 식(4)과 같이 표현될 수 있다. 식(4)은 비선형방정식

인 RFM을 선형화 하여 최소제곱법을 적용하는 행렬식을 나타내고 있다. 식(5), (6)는 RFM을 구성하는 비선형다항식을 테일러시리즈로 선형화 시킨 것이다. 여기서, F, G 는 각각 영상의 행좌표와 열좌표에 해당되는 RFM방정식이고, F_0, G_0 는 F, G 를 테일러시리즈를 이용하여 선형화하는 경우 초기값을 나타내고 있으며 이 값은 제공된 RPC를 이용하여 결정한다. 즉 RFM의 초기값은 제공된 RPC를 이용하여 결정하게 된다. 이 때 pseudo GCPs에 대한 가중치를 Real GCPs의 가중치보다 작게 하여 GPC 측량에 의해 취득된 GCPs 성과에 의해 RPC가 효과적으로 갱신되도록 한다.

Pseudo GCPs의 가중치는 제공된 RPC의 정확도에 준하여 결정한다. 제공된 RPC의 정확도는 Real GCPs를 검사점으로 활용하여 제공된 RPC에 의해 계산된 3차원 좌표와 Real GCPs의 좌표를 비교 분석하여 오차량을 계산하고 이를 pseudo GCPs의 가중치로 결정한다. Real GCPs의 가중치는 측량오차를 기준으로 결정한다. 정확한 측량오차를 결정하기 어려울 경우, pseudo GCPs의 가중치보다 충분히 크게 하여 추가된 소수의 지상기준점 효과가 적용될 수 있도록 한다.

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial F}{\partial a_i} & \dots & \frac{\partial F}{\partial b_i} & \dots \\ \frac{\partial G}{\partial c_i} & \dots & \frac{\partial G}{\partial b_i} & \dots \\ \vdots & & \vdots & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} da_i \\ db_i \\ dc_i \\ db_i \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x - F_0 \\ y - G_0 \\ \vdots \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$F = c_n = F_0 + \sum_0^{19} \frac{\partial F}{\partial a_i} da_i + \sum_1^{19} \frac{\partial F}{\partial b_i} db_i \quad (5)$$

$$G = r_n = G_0 + \sum_0^{19} \frac{\partial G}{\partial c_i} dc_i + \sum_1^{19} \frac{\partial G}{\partial b_i} db_i \quad (6)$$

4. Addition Parameters Observation

소수의 기준점으로 RPC를 갱신하고자 하는 방법은 관측방정식의 부족이라는 문제에 부딪히게 된다. 앞의 방법은 이러한 문제점을 극복하기 위해 pseudo GCPs를 정규화된 3차원 공간 내에 선정하였다. 추가로 설치되는 의사기준점에 의해 관측방정식이 필요한 수만큼 증가하므로 최소제곱법에 의한 RPC의 갱신이 가능하게 된다.

두 번째 방법은 동일한 문제를 해결하기 위해 의사기준점을 설치하지 않고, 매개변수 관측방정식을 적용하여 필요한 수의 관측방정식을 추가로 구성하게 된다. 매개변수 관측방정식이란 최소제곱법을 이용하여 주어진 방정식의 해를 구하는 경우, 방정식에 포함되는 매개변수를 관측의 일부로 설정하여, 이러한 관측에 대한 방정식을 구성하여 최소제곱법에 추가시키는 조정계산기법이다. 매개변수 관측방정식을 적용하면, 매개변수 만큼의 방정식 수가 증가하게 되어 RPC를 갱신하는데 필요한 방정식의 수를 충족시킬 수 있게 된다.

식(7)은 매개변수 관측방정식과 추가 관측된 지상기준점에 의한 RFM 관측방정식으로 구성된 최소제곱 행렬식을 나타내고 있다. 행렬 J의 1~59행까지는

$$\begin{bmatrix} 1 & & & & & & \frac{\partial F}{\partial a_i} \\ & \ddots & & & & & \vdots \\ & & \ddots & & & & \frac{\partial F}{\partial b_i} \\ & & & \ddots & & & \vdots \\ & & & & 1 & & \frac{\partial G}{\partial c_i} \\ & \frac{\partial F}{\partial a_i} & \dots & \frac{\partial F}{\partial b_i} & \dots & & \vdots \\ & \frac{\partial G}{\partial c_i} & \dots & \frac{\partial G}{\partial b_i} & \dots & & \vdots \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & & \vdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} da_i \\ db_i \\ dc_i \\ db_i \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{1o} - da_1 \\ \vdots \\ x - F_0 \\ y - G_0 \\ \vdots \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{a_1} \\ \vdots \\ V_x \\ V_y \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (7)$$

59개의 RFM 매개변수(RPC)에 대한 관측방정식으로 구성된 행이고, 그 이후의 행들은 추가 지상기준점으로 구성된 RFM 관측방정식으로 구성된다. 매개변수 관측방정식에서 매개변수에 대한 관측값은 제공된 RPC 값이 사용된다. 제공된 RPC를 매개변수 관측으로 설정하여, 매개변수에 대한 관측값과 잔차의 향으로 방정식을 구성하게 된다.

위에서 설명한 두 가지 방법의 가장 큰 어려움은 관측방정식의 수를 높이기 위해 도입된 의사기준점에 의한 RFM 관측방정식 또는 매개변수 관측방정식에 대한 가중치와 실제 관측된 지상기준점에 대한 가중치의 결정이다. 의사기준점에 의한 RFM 관측방정식과 매개변수에 의한 관측방정식은 추가로 도입되는 실제 지상기준점과 비교하여 상대적으로 작은 가중치를 갖게 함으로써 추가된 지상기준점에 의해 RPC 갱신되는 효과를 얻을 수 있다. 이를 위해 추가된 지상기준점을 이용하여 제공된 RPC의 오차를 계산하고, 이를 의사기준점 또는 RPC 매개변수 관측의 가중치를 결정하는 지표로 사용한다. 추가된 지상기준점에 의한 RFM 관측방정식은 획득될 당시의 관측 정확도를 기준으로 가중치를 결정하게 된다.

5. 결 론

Normalized Cubic내에 설치한 pseudo GCPs와 RFM 매개변수(RPC)에 대한 관측방정식을 도입하여 소수의 지상기준점(본 연구에서 1~5점) 만으로 RPC를 갱신하는 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 영상은 2장의 IKONOS 영상으로서, 2001년에 11월에 촬영된 대전지역 영상이다. 표 2, 3은 지상기준점의 수를 점진적으로 증가시키며 RPC 갱신 효과를 검사점을 통해 분석한 결과로서, 검사점에 대한 RMSE 오차를 pixel 단위로 나타낸 것이다. 검사점은 두 영상에서 각각 47점과 45점을 사용하였으며, 이들 검사점의 RPC 갱신 전 오차는 표 4와 표 5에서 알 수 있듯이 RMSE 오차가 최소 3 pixel에서 16 pixel 이른다.

표 6과 7은 정규화된 공간에 설치된 의사기준점과 5개의 지상기준점을 사용하여 RPC를 갱신한 결과를 자세히 기술하고 있으며, 표 8과 9는 매개변수 관측과

지상기준점 5점을 사용하여 RPC를 갱신한 결과를 자세히 기술하고 있다.

검사점에 대한 오차 평가는 다음과 같은 방법으로 이루어졌다. 앞에서 기술된 두 가지 방법으로 RPC를 갱신한 후에 갱신된 RPC를 이용하여 40여 점의 검사점에 대한 영상좌표 값을 계산하고, 이 값을 이미 알고있는 영상좌표 값과 비교하여 pixel 단위로 나타냈다.

RPC 갱신 효과에 미치는 가장 큰 영향은 제공되는 지상기준점의 수와 정확도와 분포이다. 즉 지상기준점의 질과 양에 따른 효과가 여타의 센서모델 실험에서와 마찬가지로 중요한 요인으로 작용하고 있다. 반면, 지상기준점에 부여되는 가중치의 효과는 제공되는 RPC의 정확도에 의해 결정되는 값 이상으로 주어진다 해도 RPC 갱신효과에는 큰 영향을 미치지 않는다. 즉, 고의적인 가중치의 평가절하만 없다면, RPC 갱신의 효과는 유사한 결과로 나타나게 된다.

참고 문헌

1. Gene Dial, Jacek Grodecki, "Block Adjustment With Rational Polynomial Camera Models" ACSM-ASPRS, 2002, Proceeding CD.
2. C.S. Fraser, H.B. Hanley, T. Yamakawa, "High-Precision Geopositioning from IKONOS Satellite Imagery", ACSM-ASPRS, 2002, Proceeding CD.
3. C. Vincent TAO, Yong HU, "Image Rectification Using A Generic Sensor Model - Rational Function Model", International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. Vol. XXXIII, Part B3. Amsterdam, 2000, pp. 874-881
4. Ki-In Bang, "Abstract Sensor Model for IKONOS Level 2 Images", ISRS2001, 2001, pp. 49-52.
5. Ki-In Bang, "Analysis of EOC Sensor Model" FIG WORKING WEEK, 2001, pp. 57-65.
6. Ki-In Bang, "Pseudo Image Composition and Sensor Models Analysis of SPOT Satellite

Imagery for Inaccessible Area”, Korean Society of Remote Sensing”, 2001, Vol. 17, pp. 33-34.

7. OpenGIS Consortium, "The OpenGIS Abstract Specification, Topic 7 : The Earth Imagery Case Ver 4.0", 1999, pp. 2-23.
8. Yong Hu, C. Vincent Tao, "Updating Solutions of The Ratioal Function Model Using Additional Control Information" PE&RS, Vol. 68, No. 7, July 2002, pp. 715-723.
9. 이동구, "Rational Function Model을 이용한 Pushbroom 위성영상 센서모델에 관한 연구", 인하대학교 석사학위 논문, 2002.
10. 이재빈, "고해상도 위성영상의 RPC 모델을 이용한 3차원 지형자료 추출에 관한 연구", 서울대학교 석사학위 논문, 2002.

표 2. Normalized cubic내의 pseudo GCPs를 이용한 방법의 오차(unit: pixels)

num GCPs	RMSE (po_pan_000)		RMSE (po_pan_001)	
	Column	Row	Column	Row
	0	3.89	5.36	3.09
1	2.37	2.34	2.43	5.12
2	2.38	2.35	1.99	5.07
3	2.00	2.09	2.01	4.74
4	1.68	2.21	1.94	3.82
5	1.55	2.29	1.85	3.71

표 3. 매개변수 관측방정식을 이용한 방법의 오차 (unit: pixels)

num GCPs	RMSE (po_pan_000)		RMSE (po_pan_001)	
	Column	Row	Column	Row
	0	3.89	5.36	3.09
1	3.89	3.62	2.88	8.74
2	2.63	3.30	2.47	7.71
3	2.11	3.26	2.10	7.21
4	1.94	3.13	2.02	5.65
5	1.65	2.62	2.01	3.99

표 4. RPC 갱신 전 검사점 오차 (po_pan_000)

ID	Error(pixel)	
	Sample	Line
1	5.05	-5.61
2	2.80	-5.69
3	3.58	-3.40
4	3.08	-5.98
5	5.50	-5.92
6	-0.04	-4.06
8	2.07	-6.15
9	4.42	-4.70
10	7.19	-3.41
11	3.15	-4.13
12	4.25	-3.61
13	0.50	-9.85
14	-3.39	-9.02
16	2.14	-3.89
18	3.14	-5.63
19	5.94	-4.75
20	3.01	-4.13
21	5.41	-6.13
22	4.11	-2.79
23	3.71	-4.07
24	2.22	-4.08
26	4.01	-4.98
27	1.80	-3.96
28	4.27	-4.03
31	2.90	-4.40
32	3.97	-2.16
33	3.30	-4.80
36	6.71	-5.31
38	5.02	-5.75
39	5.21	-2.84
40	2.95	-5.17
41	1.92	-1.82
42	1.31	-11.18
44	3.39	-5.26
45	5.47	-4.85
46	3.52	-5.45
50	2.72	-4.83
51	4.44	-4.30
52	2.85	-6.53
25	3.40	-5.20
29	3.66	-6.61
30	2.58	-4.13
34	3.68	-4.53
35	5.83	-7.42
37	3.47	-2.75
43	3.86	-5.14
47	2.88	-7.24
RMSE	3.89	5.36

표 5. RPC 갱신 전 검사점 오차 (po_pan_001)

ID	Error(pixel)	
	Sample	Line
1	-1.30	-17.49
2	-1.07	-27.05
3	-1.71	-14.34
4	-3.82	-18.41
5	-1.05	-16.99
6	-1.63	-14.86
8	-2.52	-17.31
9	-1.70	-14.48
10	0.76	-14.66
11	-1.97	-14.39
12	-2.54	-16.04
13	-4.65	-20.52
14	-11.16	-18.01
16	-4.66	-15.45
18	-3.18	-15.82
19	-0.96	-14.92
20	-1.79	-14.56
21	-0.24	-16.37
22	-1.53	-12.48
23	-2.31	-14.74
24	-4.35	-14.26
26	-1.07	-15.68
27	-3.47	-14.97
28	-0.94	-15.09
31	-3.35	-14.73
32	-2.14	-14.74
33	-2.61	-15.83
36	1.26	-16.48
38	-1.06	-16.65
39	0.95	-14.22
40	-3.51	-15.84
41	-4.30	-13.29
42	-5.05	-20.24
44	-4.31	-17.48
45	-0.99	-19.42
46	-2.64	-16.47
50	-2.04	-16.94
51	-1.91	-16.36
52	-3.65	-17.73
25	-3.08	-15.74
29	-2.23	-17.13
30	-3.18	-14.23
34	-1.45	-15.33
43	-1.02	-16.02
47	-2.44	-17.72
RMSE	3.09	16.42

표 6. Data Cubic과 GCPs 5점을 이용한 RPC 갱신 결과 (po_pan_000)

ID	Error(pixel)	
	Sample	Line
1	1.56	-2.75
2	0.01	-2.31
3	1.13	0.50
4	0.85	-2.10
5	1.59	-3.19
6	-2.30	-1.55
8	-0.59	-2.00
9	-0.09	-1.65
10	2.94	-0.36
11	0.87	-1.43
12	1.27	0.12
13	-2.03	-5.78
14	-6.20	-5.15
16	-1.44	0.55
18	0.28	-0.33
19	1.17	-0.91
20	0.01	0.01
21	2.86	-2.14
22	0.00	-0.01
23	0.00	0.01
24	0.00	0.00
26	-0.27	-0.77
27	-1.00	0.09
28	-0.23	-0.64
31	-0.55	-0.08
32	1.28	1.20
33	0.21	-1.84
36	2.67	-2.58
38	1.55	-3.04
39	1.60	-0.14
40	-0.52	-1.21
41	-0.17	0.66
42	-1.85	-8.37
44	0.50	-0.94
45	1.40	-1.50
46	-0.64	-2.59
50	0.06	-0.73
51	1.30	-0.23
52	-0.62	-2.20
25	1.40	-1.85
29	1.21	-1.19
30	-0.49	0.22
34	0.86	1.04
35	2.12	-2.65
37	0.00	0.00
43	1.35	0.06
47	1.03	-4.53
RMSE	1.55	2.29

표 7. Data Cubic과 GCPs 5점을 이용한 RPC 갱신 결과 (po_pan_001)

ID	Error(pixel)	
	Sample	Line
1	0.04	-6.72
2	1.13	-15.51
3	1.63	-1.43
4	2.11	-3.69
5	0.19	-5.34
6	-0.67	-5.31
8	2.74	-1.19
9	0.21	-0.94
10	3.05	-0.18
11	-0.91	-3.94
12	-0.96	-2.70
13	-1.71	-4.78
14	-6.91	-0.15
16	-2.58	0.10
18	-1.22	2.13
19	2.05	2.13
20	-0.01	0.00
21	2.94	-1.70
22	0.00	0.00
23	0.00	0.00
24	0.00	0.00
26	1.05	-0.18
27	-0.04	-1.20
28	1.10	-1.00
31	2.35	4.20
32	-0.10	-2.92
33	2.16	3.06
36	2.97	-3.21
38	0.62	-4.21
39	1.88	-3.38
40	-1.01	-1.59
41	-3.37	-3.76
42	-2.65	-6.07
44	-0.05	-1.75
45	1.26	-4.87
46	-1.13	-4.29
50	1.08	-1.41
51	1.10	-1.94
52	-1.33	-2.31
25	-0.50	2.21
29	-0.30	2.00
30	-1.62	0.36
34	0.23	2.55
43	0.19	-0.26
47	0.00	0.00
RMSE	1.85	3.71

표 8. 매개변수 관측과 GCPs 5점을 이용한 RPC 갱신 결과 (po_pan_000)

ID	Error(pixel)	
	Sample	Line
1	0.95	-1.90
2	-0.77	-1.60
3	0.30	0.99
4	1.94	-2.90
5	1.18	-2.93
6	-2.50	-1.84
8	-0.51	-1.98
9	0.40	-1.45
10	2.92	-0.29
11	1.18	-2.29
12	1.95	-1.03
13	-2.05	-6.59
14	-6.08	-5.62
16	-0.67	-0.51
18	0.81	-2.43
19	0.88	0.22
20	0.27	-0.57
21	2.60	-2.36
22	-0.09	0.11
23	0.44	-0.25
24	-0.37	-0.02
26	0.83	-1.41
27	-1.69	0.68
28	0.59	-0.65
31	-0.46	0.22
32	0.84	1.47
33	0.73	-2.05
36	1.92	-2.76
38	1.52	-3.50
39	0.73	0.13
40	-0.46	-1.10
41	-0.21	0.14
42	-3.54	-8.15
44	0.08	-0.62
45	1.74	-1.60
46	-0.66	-2.11
50	-0.05	-1.23
51	0.98	0.09
52	-0.14	-2.94
25	1.44	-3.36
29	1.50	-3.60
30	0.31	-1.16
34	1.48	-1.22
35	3.13	-3.99
37	0.43	-0.27
43	1.95	-1.98
47	1.00	-5.81
RMSE	1.65	2.62

표 9. 매개변수 관측과 GCPs 5점을 이용한 RPC 갱신 결과 (po_pan_001)

ID	Error	
	Sample	Line
1	1.60	-1.55
2	2.40	-9.93
3	2.17	2.92
4	3.39	-10.04
5	0.52	-4.24
6	0.16	-5.63
8	2.39	-3.61
9	0.44	-0.66
10	2.14	-0.81
11	-0.60	-7.13
12	-0.89	-5.83
13	-2.70	-7.66
14	-8.00	-3.62
16	-2.76	-1.86
18	-1.73	0.47
19	1.05	6.16
20	0.00	0.00
21	2.32	-2.60
22	0.00	0.00
23	0.00	0.00
24	0.00	0.00
26	1.26	-1.19
27	0.08	2.68
28	1.45	-1.12
31	1.19	2.41
32	0.70	-0.24
33	1.72	-1.14
36	1.74	-4.82
38	-0.04	-6.78
39	2.34	-1.57
40	-0.97	-0.28
41	-2.75	-5.37
42	-4.72	-6.71
44	-0.81	-0.81
45	0.73	-5.51
46	-0.44	-2.38
50	0.17	-3.31
51	0.89	0.13
52	-1.69	-3.63
25	-0.88	0.58
29	-0.71	1.89
30	-1.45	-1.96
34	0.06	1.44
43	0.55	-1.68
47	0.00	0.00
RMSE	2.01	3.99

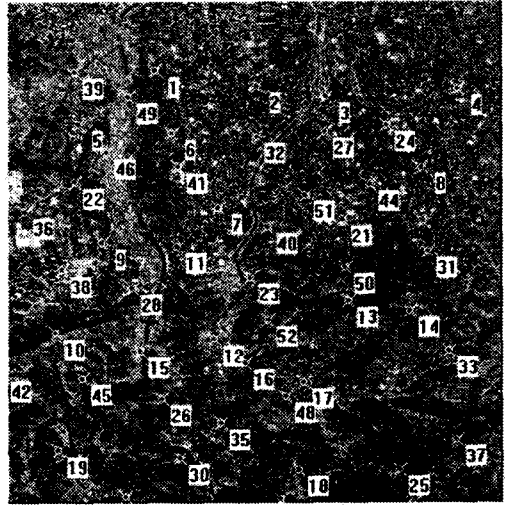


그림 3. IKONOS 영상 (po_pan_000)

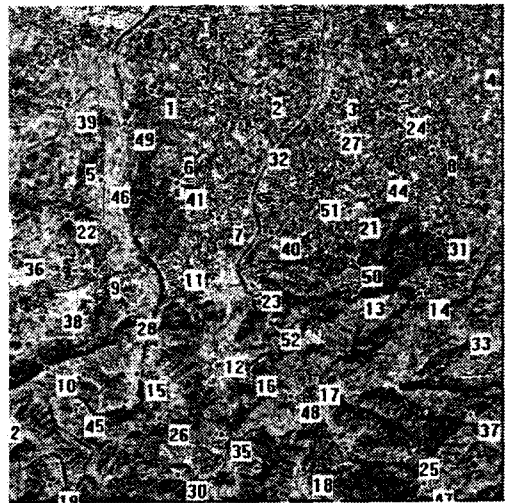


그림 4. IKONOS 영상(po_pan_001)