

위성영상 RPC 카메라 모델로부터 외부표정요소 결정 Exterior Orientation Parameters Determination from Satellite Imagery RPC Camera Model

이호성¹⁾

Lee, Hyo Sung

Abstract

This paper proposes method for determining exterior orientation parameters (EOPs) from the RPC mathematical camera model of the satellite image. SPOT satellite stereo pair is pre-tested using the proposed method. As results that, geopositioning errors are similar with those of the original EOPs. Differences between EOPs determined from the RPC and original EOPs were small. IKONOS Geo-level stereo pair is tested by the proposed method. Results of this method are compared with those of the RPC block adjustment method which have been verified in reported studies. Consequently, the proposed method showed accuracy similar to the RPC block adjustment method. The digital elevation models (DEMs) of sample area acquired by the two method almost did not have a difference.

Keywords : RPC camera model, Exterior orientation parameters, RPC block adjustment, Digital elevation model

요 지

본 연구에서는 위성영상의 RPC 카메라 모델로부터 외부표정요소 결정방법을 제안하였다. 제안한 방법을 이용하여 SPOT 위성영상을 이용한 선행실험을 한 결과, RPC로부터 결정된 외부표정요소와 원래의 외부표정요소의 차이는 미소하였으며, 지상좌표 추출에 있어서도 거의 유사한 결과 정확도를 얻었다. 그리고 제안한 방법을 IKONOS 위성의 Geo레벨 입체영상에 적용한 후, RPC 블럭조정방법에 의한 위치결정 정확도와 비교한 결과, 유사한 결과를 나타냈으며, 두 방법으로 획득한 샘플지역의 DEM 또한 큰 차이를 보이지 않았다.

핵심용어 : RPC 카메라 모델, 외부표정요소, RPC 블럭조정, DEM

1. 서 론

최근 고해상도 위성영상에서 제공하는 RPC(Rational Polynomial Coefficient)카메라 모델은 위성의 기하학적 궤도요소와 자세정보 등의 복잡성을 대체하고, 신속·간편한 위치결정을 위해 개발되어진 대체센서 모델이다(Grodecki 등, 2001). RPC의 위치결정 적합도는 물리적 센서모델의 결과와 거의 차이가 없다는 것을 기존연구를 통해 입증되었다(Dowman 등, 2000; Dial, 2000; Di 등, 2001; Tao 등, 2002). RPC는 기본적으로 센서의 내부표정요소(Interior Orientation Parameters; IOPs)와 라인(또는 시간)의 변화에 따른 외부표정요소(Exterior Orientation

Parameters; EOPs)로부터 생성된 수학적 카메라 모델이므로(Dial, 2000; Grodecki, 2001) 내·외부표정요소로 구성된 물리적 카메라 모델과는 상호연관성이 있으며, 이러한 관계는 수학적 모델로부터 물리적인 모델로의 복원이 가능하다고 추정할 수 있다. 그렇다면, 고해상도 위성에 탑재된 측위와 자세제어 장비만으로 결정된 하위레벨의 RPC와 입체영상을 제공받았을 경우 제공 RPC로부터 대략적인 위성센서의 외부표정요소를 구할 수 있을 것이고, 이로부터 현지관측 지상기준점을 이용하여 보다 정밀한 외부표정요소를 결정할 수 있다. 이렇게 결정된 외부표정요소는 제공되는 RPC의 위치결정 정확도보다 향상된 결과를 가져올 수 있다.

1) 정희원 · 서울대학교 지구환경과학부 Post-Doc.(E-mail:hyosunglee@hanmail.net)

이와 관련하여 Di 등(2003)은 프레임(Frame) 항공영상과 Linear Array HRSC(High Resolution Stereo Camera) 항공영상의 내·외부표정요소를 이용하여 RPC를 구한 후, 이로부터 여러 단계별 높이를 가진 격자간격의 기준점을 생성시켜 DLT와 Space Resection(SR) 방법으로 내부표정요소와 영상중심 또는 라인별 외부표정요소를 구하였다. 그 결과 원래의 내·외부표정요소와는 큰 차이가 없음을 확인하였다. 특히 HRSC 항공영상의 경우, 한 라인에 대한 외부표정요소를 구하기 위해서 계수간의 상관도 발생 가능성이 큰 DLT 대신 SR 방법을 적용하였다. 그러나 SR 방법 또한 외부표정요소 결정을 위해선 입력 초기치가 요구되므로 이에 대한 정확한 정보를 취득할 수 없는 IKONOS 위성영상의 경우에는 적용하기가 다소 어려울 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 RPC로부터 외부표정요소 추출 방법을 제안하고, 제안방법을 이용하여 고해상도 위성의 입체영상 하위레벨에서 제공하는 RPC를 이용하여 위치결정 정확도를 향상시키는데 그 목적을 두고자 한다. 이를 위해 먼저 외부표정요소가 미리 결정되어있는 SPOT 위성영상을 이용하여 RPC를 추출하였다. 추출한 RPC로부터 외부표정요소 초기치 산출을 위한 DLT 적용방법을 개발하고, 외부표정요소 초기치와 지상기준점 및 번들조정(Bundle Adjustment) 방법을 적용하여 최종 외부표정요소

를 결정한 후, 원래의 외부표정요소와 비교하여 제안방법의 타당성을 제시하고자 한다. 또한 제안방법을 적용하여 IKONOS Geo레벨 입체영상에서 제공하는 RPC로부터 보다 정밀한 외부표정요소를 결정하고자 하며, 이로부터 지상좌표를 추출하여 그 정확도를 제시한 후, 기존연구에서 검정된 RPC 블럭조정에 의한 위치결정 정확도 향상기법과 비교·검토해보고자 한다.

2. RPC를 이용한 외부표정요소 결정방법

IKONOS와 같은 고해상도 푸쉬브룸(Push-Broom)센서 위성영상의 RPC는 일반적으로 그림 1(a)의 순서에 의해 생성되어지며(Grodecki, 2001; Di 등, 2003), 구체적인 내용은 다음과 같다.

먼저 외부표정요소 획득에 있어서는 IKONOS 위성영상의 경우, 제공레벨에 따라 기준점을 사용하지 않고 위상에 탑재된 측위와 자세제어 장비로부터 획득한 시간대별 카메라의 자세와 위치자료만으로 획득하는 경우와 이와 함께 지상관측 기준점을 사용하여 엄밀하게 획득하는 경우로 나눌 수 있다.

두 번째, 그림 2에서 보는바와 같이 단 영상에서 일정한 간격의 영상좌표(C, L)와 대상지역의 최저·최고 높이 범위 내의 단계별 지상높이(Z)를 선정한다.

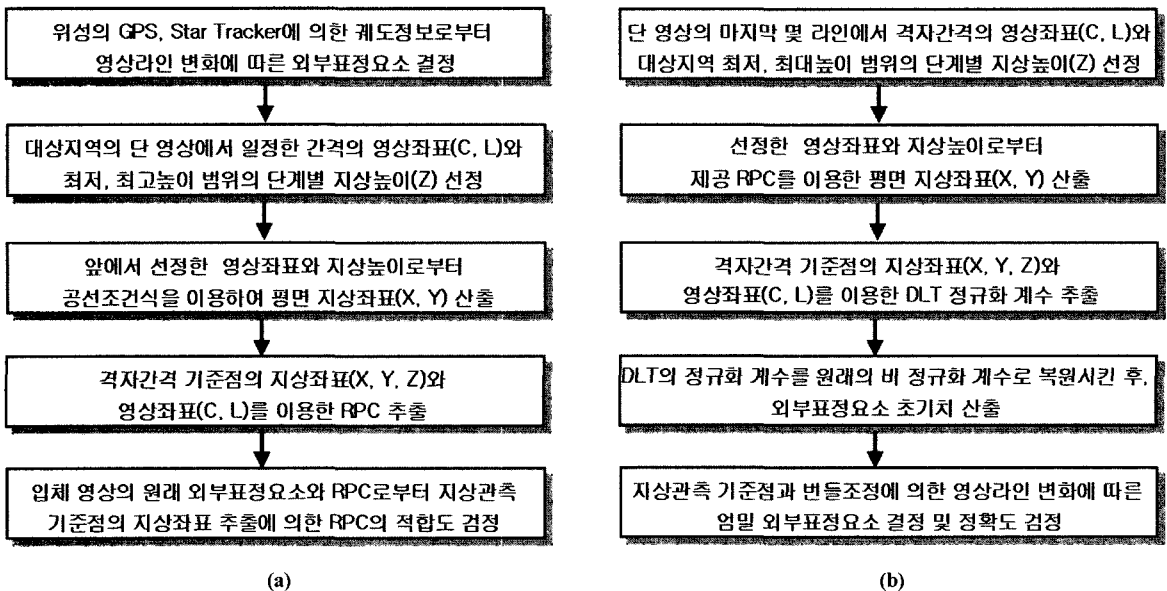


그림 1. 단 영상에서 RPC 추출 순서도 (a)와 RPC로부터 외부표정요소 결정 순서도 (b)

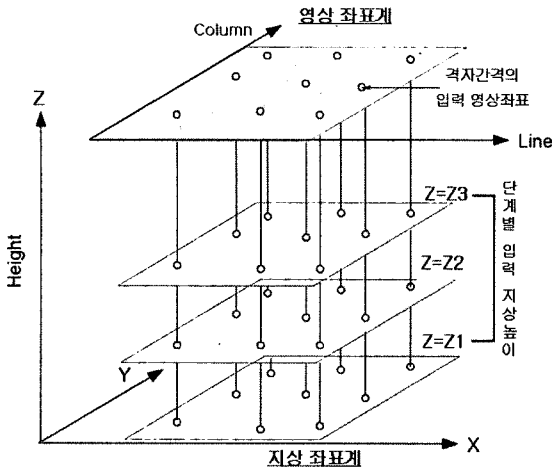


그림 2. RPC 추출 개념도(Grodecki, 2001)

세 번째, 라인(또는 시간)변화에 따른 외부표정요소와 공선조건(식 (1)), 그리고 앞에서 선정한 영상좌표와 지상높이를 이용하여 지상평면좌표(X, Y)를 산출한 후, 구한 지상평면좌표와 지상높이, 영상좌표들을 RPC 추출을 위한 기준점(이하 격자간격 기준점)으로 활용한다.

마지막으로 격자간격 기준점들로부터 최소제곱법과 반복계산으로 RPC를 추출한다. 만일 입체영상에 대한 RPC를 추출하였다면 이를 이용하여 관측한 지상기준점의 지상좌표를 구한 후, 원래의 외부표정요소로부터 구한 지상기준점의 지상좌표와 비교하여 RPC의 적합도를 확인할 수 있다.

$$X = X_0 + (Z - Z_0) \frac{m_{11} \cdot C + m_{21} \cdot L - m_{31} \cdot f}{m_{13} \cdot C + m_{23} \cdot L - m_{33} \cdot f}$$

$$Y = Y_0 + (Z - Z_0) \frac{m_{12} \cdot C + m_{22} \cdot L - m_{32} \cdot f}{m_{13} \cdot C + m_{23} \cdot L - m_{33} \cdot f} \quad (1)$$

여기서, X, Y, Z, C, L 는 영상 내 임의 지점의 지상좌표와 영상좌표 Column과 Line이며, X_0, Y_0, Z_0 는 라인별 렌즈 중심의 지상좌표이다. $m_{11} \dots m_{33}$ 는 라인별 렌즈 중심의 자세(ω, ϕ, κ)에 대한 회전행렬요소이며, f 는 렌즈의 초점 거리이다.

반대로 RPC로부터 영상의 외부표정요소를 획득할 수 있다면, 지상기준점을 이용한 보다 정밀한 라인별 센서 모델링이 가능할 것이며, 이를 이용한 공선조건식으로부터 정확도가 향상된 위치결정이 가능할 것으로 판단한다. 본 연구에서 제안한 RPC로부터 외부표정요소 결정방법의 순

서는 그림 1(b)과 같다. 제안방법의 핵심적인 부분은 푸쉬 브룸 영상 몇 라인에 대하여 격자간격 기준점을 선정하고, 이로부터 정규화 DLT 계수를 구한 후, 원래의 DLT 계수로 환산하여 외부표정요소 초기치를 계산하는 것이다. 순서도의 자세한 내용은 다음과 같다.

첫 번째, 위성영상 RPC를 이용하여 격자간격의 기준점을 획득한다. 격자간격 기준점의 영상좌표와 지상좌표 획득방법은 단영상의 RPC로부터 대상영역의 대략적인 최소와 최고높이를 고려하여 단계별 높이(H) 값을 미리 지정하고, 영상의 첫 번째(또는 마지막) 라인(Line)에서 시작하여 아래(또는 위)방향으로 두·세 개의 라인만을 이용한 라인좌표(L)와 칼럼(Column) 방향의 수십 내지 수백화소 정도 간격의 칼럼좌표(C)를 취득한다(그림 3). 여기서, 지상높이의 범위가 대상지역의 높이 범위에서 크게 벗어나면 정확한 외부표정요소의 획득이 어려우므로 지상높이의 대략적인 정보를 알아야만 한다. 다행히 IKONOS의 경우 메타(Meta)자료에서 기준높이와 Offset 높이를 제공하므로 접근이 불가능한 지역의 경우, 제공되는 높이정보를 이용하여 범위를 정해도 될 것이라 판단한다. 그리고 DLT 적용을 위한 기준방법은 기준점을 영상의 모든 영역에 골고루 분포하게끔 선정 한 후, 이들로부터 DLT 계수와 외부표정요소 초기치를 구하였다(유복모 등, 2001; Chen, 1997; Di 등, 2004). 그러나 이 방법은 프레임(Frame) 영상 중심의 외부표정요소를 구하기 위한 방법으로써 본 연구에서 구하고자 하는 푸쉬브룸 센서의 첫 라인 또는 마지막 라인의 외부표정요소 초기치와는 많은 차이가 있을 수 있다. 따라서 이러한 문제를 해결하기 위해 맨 아래 또는 마지막의 몇 라인만을 선택하는 것이다. 영상에서 첫 라인 또는 마지막 라인을 선택할지의 판단은 위성센서의 영상취득 방식이 SPOT과 IKONOS 위성과 같이 영상을 북에서 남으로 취득하는 디센딩 노드(Descending Node)방식의 경우는 영상의 첫 라인부터 기준점을 선정하고, KOMPSAT 위성과 같은 어센딩 노드(Ascending Node)방식은 그 반대 방향으로 취득하기 때문에 영상의 마지막 라인부터 격자간격 기준점을 선정하면 된다. 만일 영상과 RPC가 TM(Transverse Mercator) 또는 UTM(Universal Transverse Mercator)과 같은 국지적 좌표체계로 후처리 되어 제공된다면 앞에서 언급한 궤도특성과는 상관없이 맨 마지막 라인부터 격자간격 기준점을 취득하면 되겠다.

두 번째, RPC 모델 식을 테일러 시리즈에 의한 선형화 방법으로 X (남북방향), Y (동서방향) 각각에 대하여 식 (2)

와 같이 편미분을 한 후, 관측방정식을 구성하고, 이를 최소제곱법에 의한 반복계산으로 평면위치(X, Y)를 취득한다. 단, RPC는 -1과 1사이의 정규화(Normalized) 계수로 이루어졌으므로 식 (2)와 식 (3)에 적용되어질 영상좌표와 지상좌표 또한 정규화 된 값이 입력되어야 한다. 이렇게 하여 격자간격 기준점에 대한 영상좌표와 지상좌표를 모두 획득하게 된다.

$$l = F(l) + \frac{\partial l}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial l}{\partial y} \Delta y, \quad c = F(c) + \frac{\partial c}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial c}{\partial y} \Delta y \quad (2)$$

$$F(l) = \frac{RPC_1(ix, iy, h)}{RPC_2(ix, iy, h)}, \quad F(c) = \frac{RPC_3(ix, iy, h)}{RPC_4(ix, iy, h)} \quad (3)$$

여기서, l, c 는 영상의 정규화 된 Line과 Column이며, $\Delta x, \Delta y$ 는 정규화 된 $X, Y(x, y)$ 의 초기 근사값에 대한 보정량이고, $F(l), F(c)$ 는 x, y 의 초기치(ix, iy)와 정규화 된 $H(h)$ 를 이용하여 산출한 영상좌표의 근사값이다. $RPC_1(ix, iy, h) = [a_1, a_2 \dots a_{20}] [1 \quad iy \quad ix \quad h \dots h_3]$ 이며, $a_i (i=1 \dots 20)$ 는 RPC의 첫 번째 계수 항이다.

세 번째, 격자간격 기준점의 지상좌표가 광역의 위·경도좌표인 경우, 국지적 위치표현에 용이한 UTM 평면직각좌표로 변환한 후, 영상좌표와 지상좌표를 이용하여 DLT 계수를 구한다(식 (4)). 이때 앞에서 구한 기준점의 분포가 영상에서 라인방향으로 좁은 영역으로 밀집하여 분포해 있기 때문에 DLT 계수를 구하기 위한 행렬구성에 있어서 특이행렬 발생의 가능성이 높다. 따라서 이러한 현상을 방지하기 위하여 앞에서 구한 기준점의 모든 좌표를 정규화시킨 후, 이로부터 DLT 계수를 구한다.

마지막으로, 앞에서 구한 정규화된 DLT 계수를 정규화 이전의 계수값으로 환산하여 내·외부표정요소의 초기치를 계산한다(식 (5)). 계산한 초기치와 현지관측 기준점을 이용하여 번들조정으로 정교한 라인별 외부표정요소를 구한 후,

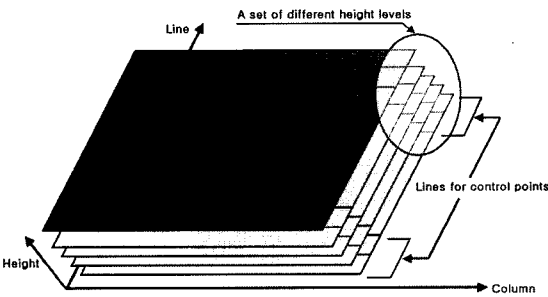


그림 3. 푸쉬브룸 센서위성의 단 영상에 대한 제곱 RPC로부터 DLT 적용을 위한 격자간격 기준점 획득법위

현지관측 검사점으로 정확도를 확인한다(박병욱, 1991).

$$c \left(\frac{C - C_{of}}{C_{sf}} \right) = \frac{l_1 \cdot x \left(\frac{X - X_{of}}{X_{sf}} \right) + l_2 \cdot y \left(\frac{Y - Y_{of}}{Y_{sf}} \right) + l_3 \cdot h \left(\frac{H - H_{of}}{H_{sf}} \right) + l_4}{l_9 \cdot x \left(\frac{X - X_{of}}{X_{sf}} \right) + l_{10} \cdot y \left(\frac{Y - Y_{of}}{Y_{sf}} \right) + l_{11} \cdot h \left(\frac{H - H_{of}}{H_{sf}} \right) + 1}$$

$$l \left(\frac{L - L_{of}}{L_{sf}} \right) = \frac{l_5 \cdot x \left(\frac{X - X_{of}}{X_{sf}} \right) + l_6 \cdot y \left(\frac{Y - Y_{of}}{Y_{sf}} \right) + l_7 \cdot h \left(\frac{H - H_{of}}{H_{sf}} \right) + l_8}{l_9 \cdot x \left(\frac{X - X_{of}}{X_{sf}} \right) + l_{10} \cdot y \left(\frac{Y - Y_{of}}{Y_{sf}} \right) + l_{11} \cdot h \left(\frac{H - H_{of}}{H_{sf}} \right) + 1} \quad (4)$$

$$OS = l_9 \frac{X_{of}}{X_{sf}} + l_{10} \frac{Y_{of}}{Y_{sf}} + l_{11} \frac{H_{of}}{H_{sf}},$$

$$L_1 = \left[\frac{l_1}{X_{sf}} + \frac{C_{of}}{C_{sf}} \cdot \frac{l_9}{X_{sf}} \right] \cdot \frac{C_{sf}}{1 - OS}$$

$$L_2 = \left[\frac{l_2}{Y_{sf}} + \frac{C_{of}}{C_{sf}} \cdot \frac{l_{10}}{Y_{sf}} \right] \cdot \frac{C_{sf}}{1 - OS},$$

$$L_3 = \left[\frac{l_3}{H_{sf}} + \frac{C_{of}}{C_{sf}} \cdot \frac{l_{11}}{H_{sf}} \right] \cdot \frac{C_{sf}}{1 - OS}$$

$$L_4 = \left[(l_4 \cdot C_{sf}) + C_{of} - (l_1 \cdot \frac{X_{of}}{X_{sf}} + l_2 \cdot \frac{Y_{of}}{Y_{sf}} + l_3 \cdot \frac{H_{of}}{H_{sf}}) \cdot C_{sf} + (OS \cdot C_{of}) \right] / (1 - OS)$$

$$L_5 = \left[\frac{l_5}{X_{sf}} + \frac{L_{of}}{L_{sf}} \cdot \frac{l_9}{X_{sf}} \right] \cdot \frac{L_{sf}}{1 - OS},$$

$$L_6 = \left[\frac{l_6}{Y_{sf}} + \frac{L_{of}}{L_{sf}} \cdot \frac{l_{10}}{Y_{sf}} \right] \cdot \frac{L_{sf}}{1 - OS}$$

$$L_7 = \left[\frac{l_7}{H_{sf}} + \frac{L_{of}}{L_{sf}} \cdot \frac{l_{11}}{H_{sf}} \right] \cdot \frac{L_{sf}}{1 - OS},$$

$$L_8 = \left[(l_8 \cdot L_{sf}) + L_{of} - (l_5 \cdot \frac{X_{of}}{X_{sf}} + l_6 \cdot \frac{Y_{of}}{Y_{sf}} + l_7 \cdot \frac{H_{of}}{H_{sf}}) \cdot L_{sf} + (OS \cdot L_{of}) \right] / (1 - OS)$$

$$L_9 = \frac{(l_9 / X_{sf})}{1 - OS}, \quad L_{10} = \frac{(l_{10} / Y_{sf})}{1 - OS}, \quad L_{11} = \frac{(l_{11} / H_{sf})}{1 - OS} \quad (5)$$

여기서, $l_1 \dots l_{11}$ 은 DLT의 정규화계수이며, $L_1 \dots L_{11}$ 은 원래의 값으로 환산된 DLT의 비정규화 계수이다. x, y, z, c, l 은 격자간격 기준점의 정규화 되어진 지상좌표와 영상좌표이다. $X_{of}, Y_{of}, H_{of}, X_{sf}, Y_{sf}, H_{sf}$ 는 지상좌표 X, Y, H 에 대한 Offset과 Scale factor이다. $C_{of}, L_{of}, C_{sf}, L_{sf}$ 는 영상좌표 Column과 Line에 대한 Offset과 Scale factor이다.

3. 적용실험 및 결과분석

3.1 SPOT 위성영상 RPC로부터 외부표정요소 결정

먼저 제안한 방법으로 수학적 모델인 RPC로부터 물리적 모델인 외부표정요소로의 복원능력 검토를 위하여 궤도 및 자세자료 등을 제공하는 SPOT 위성을 이용한 예비실험을 수행하고자 한다. 사용된 SPOT 위성영상은 ERDAS IMAGINE 소프트웨어(ver. 8.5)에서 예제파일로 제공하는 미국 캘리포니아 팜 스프링스 지역의 전정색(Panchromatic) 입체영상이다(그림 4). 촬영지역의 지상면적은 약 60×60km이며, 해상력은 10m이다. 라인별 외부표정요소 추출을 위한 기준점과 검사점은 사용 소프트웨어에서 제공하는 이자료를 활용하였으며, 위치자료의 지상좌표 정확도는 15.0m이다.

실험을 위하여 먼저 대상지역의 Clarke 1866 타원체로부터 UTM 투영방식에 의한 평면직각좌표 20개의 지상관측점을 영상전체에 골고루 분포하게끔 선정하였으며, 이 중 10점은 기준점, 10점은 검사점으로 활용하였다. 취득한 지상관측점을 이용하여 번들조정기법에 의한 영상라인의 변화에 따른 외부표정요소를 결정하였다. 결정한 외부표정요소에서 라인별 센서중심의 위치변화와 자세변화는 1차 다항식을 적용하였다. 앞에서 언급한 공선조건(식 (1))을 이용하여 최저·최고범위내의 단계별 지상높이와 일정한 격자간격의 영상좌표, 결정한 라인별 외부표정요소

를 이용하여 지상평면좌표를 산출한 후, 이들을 RPC 추출을 위한 격자간격 기준점으로 활용하였다. 격자간격 기준점을 이용하여 좌·우영상 각각에 대하여 RPC를 추출하였으며, 라인별 외부표정요소에 대한 RPC의 적합도를 알아보기 위하여 좌·우영상 RPC로부터 20개 지상관측점에 대한 지상좌표를 구하였다. 표 1은 20개 지상관측점에 대하여 원래의 라인별 외부표정요소로 구한 지상좌표와 RPC로부터 구한 지상좌표와의 절대값의 차이를 나타낸 것이다.

다음으로 좌·우 영상 각각에 대하여 마지막 3개 라인과 600 화소 칼럼간격의 영상좌표를 선정하고, 단계별 지상높이는 대상지역의 최저높이(70m)와 최고높이(3500m) 범위에서 350m 간격으로 선정하였다. 그리고 RPC 모델 식의 테일러 선형화 방법(식 (2)), 선정한 영상좌표와 지상높이를 이용하여 지상평면좌표를 획득하였다. 이로써 좌·우 영상 각각에 대하여 330개의 격자간격 기준점을 취득하였으며, 이들 기준점은 다시 정규화된 DLT 계수를 구하는데 활용하였다. DLT의 정규화 계수를 원래의 비정규화 DLT 계수로 환산하여 내부표정요소(초점거리와 주점변위량)와 외부표정요소 초기치를 구하였다. 여기서 DLT로 구한 주점변위량은 극히 미소하였다. 구한 초기치의 신뢰도를 알아보기 위해 원래의 라인별 외부표정요소 상수항 및 초점거리와의 절대치의 차이를 구한 결과, 좌측영상에서는 $|ΔX_0|=0.43m$, $|ΔY_0|=4.75m$, $|ΔZ_0|=5.27m$, $|Δω|=$

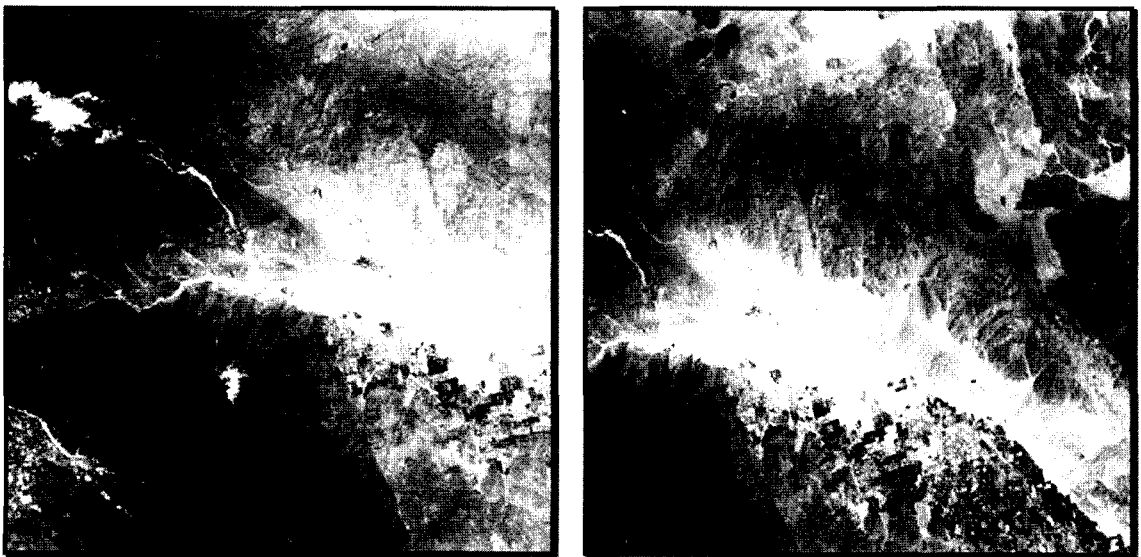


그림 4. 실험에 사용된 SPOT 위성의 입체영상(크기: 6000화소×6000화소)

1° 08', $|\Delta\phi| = 0^\circ 10'$, $|\Delta\alpha| = 1^\circ 34'$, $|\Delta f| = 0.05\text{mm}$, 우측영상에서는 $|\Delta X_0| = 4.12\text{m}$, $|\Delta Y_0| = 4.41\text{m}$, $|\Delta Z_0| = 5.56\text{m}$, $|\Delta\omega| = 1^\circ 32'$, $|\Delta\phi| = 0^\circ 22'$, $|\Delta\alpha| = 0^\circ 48'$, $|\Delta f| = 0.32\text{mm}$ 의 차이가 발생하였다. 위치와 회전요소는 원래 값과의 차이가 각각 6.0m, 2.0° 이내의 결과를 보였으므로 지상기준점을 이용하여 정교한 외부표정요소를 구하기 위한 초기 값으로는 양호한 결과라고 판단된다.

DLT로 구한 외부표정요소 초기치와 지상기준점을 이용하여 번들조정으로 라인변화에 따른 외부표정요소 다항식을 결정하였고, 초점거리는 DLT로부터 직접구한 좌, 우영상의 결과값 중 번들조정에 의한 검사점의 위치오차 결과가 적은 좌측영상의 초점거리를 사용하였다. 표 2는 원래의 외부표정요소 다항식과 RPC로부터 복원한 외부표정요소 다항식에 대한 상수항의 절대값 차이를 나타낸 것이다. 표 3은 원래의 외부표정요소와 복원된 외부표정요소로부터 산출된 검사점의 지상좌표 결과정확도를 나타낸 것이다.

이상의 결과에서 SPOT 위성영상의 라인변화에 따른 외부표정요소로부터 추출한 RPC의 위치결정 능력은 원래의 외부표정요소와는 거의 차이가 없었다(표 1). 표 2의 결과에서 RPC로부터 결정된 외부표정요소의 위치요소는 최대 6m 이내, 회전요소는 최대 04' 이내의 차이를 보임으로써 원래의 외부표정요소로는 완벽하게 복원되지 않았다. 이 결과는 번들조정에 있어서 초점거리, 사용 기준점과 적용 경중률에 따라 외부표정요소가 약간씩 달리 나타날 수 있을 것이라 판단한다. 그러나 회전요소의 경우, DLT로 구한 입력 초기치에 비해 원래 회전요소와의 차이가 대폭 줄었음을 알 수 있다. 결정된 라인별 외부표정요소의 위치결정 정확도는 원래 외부표정요소와 거의 비슷한 결과를 나타냈다(표 3). 여기서, RPC로부터 구한 외부

표정요소가 Di(2003)가 제안한 SR 방법에 비해 원래 요소와는 약간의 차이가 있으나 위치결정에 있어서는 큰 차이가 없었다. 따라서 실험을 통해 푸쉬브룸 센서의 영상에서 제공하는 RPC로부터 정규화 DLT, 지상기준점과 번들조정을 적용하여 라인별 외부표정요소를 미소한 오차범위 내에서 복원할 수 있었으며, 위치결정에 있어서 신뢰할 수 있는 라인별 외부표정요소를 구할 수 있었다.

3.2 IKONOS 영상의 제공 RPC로부터 외부표정요소 결정

본 연구에 사용된 IKONOS 위성영상은 2001년 1월 10일에 경남 양산시 일대(지상면적 약 7×7km)를 인트랙(In-track) 방식으로 관측 수집한 Geo레벨의 전정색 입체영상이다(그림 5). IKONOS 위성의 입체영상 취득방식은 인트랙과 크로스트랙(Cross-track) 두 가지 방식 모두 가능하며, 인트랙 방식은 입체영상을 거의 동시에 취득할 수 있기 때문에 두 영상간의 지형지물 변화가 거의 없다는 장점이 있다. 지상기준점은 입체영상에서 30점을 대상영역 내에서 골고루 분포하게끔 선정하였으며, 이 중 10점은 외부표정요소 결정을 위한 번들조정 기준점으로, 20점은 검사점으로 활용하였다. 지상기준점의 지상좌표 획득에 있어서는 GPS 수신기 LEICA SR9500, Geotracer, DSNP 총 10대를 이용하여 3, 4등 삼각점 3점과 1등 수준점 2점을 연결한 정적·상대측위법에 의한 삼각측량 방식으로 획득하였다. 지상좌표와 동일한 지점의 영상좌표는 ERDAS IMAGINE 소프트웨어(ver. 8.5)를 사용하여 화소이하의 단위로 독취하였다.

외부표정요소 결정을 위한 실험은 SPOT 위성영상을 이용한 선행실험과 동일한 방법으로 실시하였다. 다만 IKONOS 영상에서 제공되는 RPC로부터 격자기준점 생성

표 1. 라인별 외부표정요소와 RPC로부터 구한 20개 지상관측점의 지상좌표 차

Coordinates	X	Y	Z
RMSE	0.30m	0.20m	0.23m
Maximum Difference	0.78m	0.52m	0.48m

표 3. 원래의 외부표정요소와 RPC로부터 획득한 외부표정요소의 위치결정 정확도

Coordinates	RMSE X	RMSE Y	RMSE Z
Original EOPs	12.70m	11.75m	14.40m
Regenerated EOPs	12.30m	8.25m	15.79m

표 2. 원래의 라인별 외부표정요소와 RPC로 구한 라인별 외부표정요소의 상수항의 차

OP differences	$ \Delta X_0 $	$ \Delta Y_0 $	$ \Delta Z_0 $	$ \Delta\omega $	$ \Delta\phi $	$ \Delta\alpha $
Left Image	1.3m	4.3m	5.7m	00' 08"	00' 01"	03' 46"
Right Image	3.8m	4.0m	5.9m	00' 02"	00' 00"	01' 02"

시 WGS 84 타원체 기준의 위·경도좌표와 타원체고는 국지적 표현에 용이한 UTM좌표와 타원체고로 변환하였으며, 적용지역에 대한 UTM 좌표계의 원점은 남북방향으로 적도, 동서방향으로 동경 129도를 기준으로 하였다. 격자 기준점과 DLT로부터 산출된 초점거리는 IKONOS 위성센서 한 화소크기가 12 μ m일 때(eh-d.com, 2002) 약 8m 정도였으며, 원래 초점거리 (10m)와는 2m 정도의 차이를 보였다. 이는 제공되는 RPC가 광역의 WGS84 타원체 위·경도 좌표로 이루어진 계수인데 반해 본 연구에서 DLT 계수 산정을 위해 적용된 격자기준점의 좌표계는 국지적 UTM 평면직각좌표계로 후처리되어 표현되었기 때문이라 판단된다. DLT로부터 결정된 초점거리와 외부표정요소 초기치, 지상기준점을 이용하여 번들조정으로 영상라인의 변화에 따른 외부표정요소 다항식을 결정하였다(표 4). 결정된 외부표정요소의 정확도를 파악하기 위해 검사점의 지

상좌표를 획득하였으며, 샘플지역에 대하여 영역기반매칭(Area Based Matching)방법을 적용하여 DEM을 추출하였다(그림 6, 그림 7). 그리고 본 연구에서 제안한 기법의 신뢰성 파악을 위해 기존연구에서 검정된 IKONOS 입체영상의 위치결정 정확도 향상방법 즉, RPC 블럭조정방법(Grodecki 등, 2003; Fraser 등, 2003)을 적용하여 동일 검사점과 동일 샘플지역에 대한 지상좌표 및 DEM을 획득하고, 이를 상호 비교하였다(그림 6, 그림 7). 여기서, RPC 블럭조정에 의한 DEM은 먼저 지상기준점을 이용한 RPC 블럭조정으로 RPC를 업데이트 한 후, PCI 소프트웨어(ver. 8.2)의 RPC를 이용한 DEM 작성용 툴(Tool)에 입력하여 생성시킨 것이고, DEM의 고도차 영상은 밝은 색 일수록 차이가 큰 값이 되게 설정하였다.

결정된 외부표정요소의 상수항 X_0 , Y_0 좌표로부터 영상을 북에서 남쪽방향 순으로 취득하였음을 알 수 있다(표

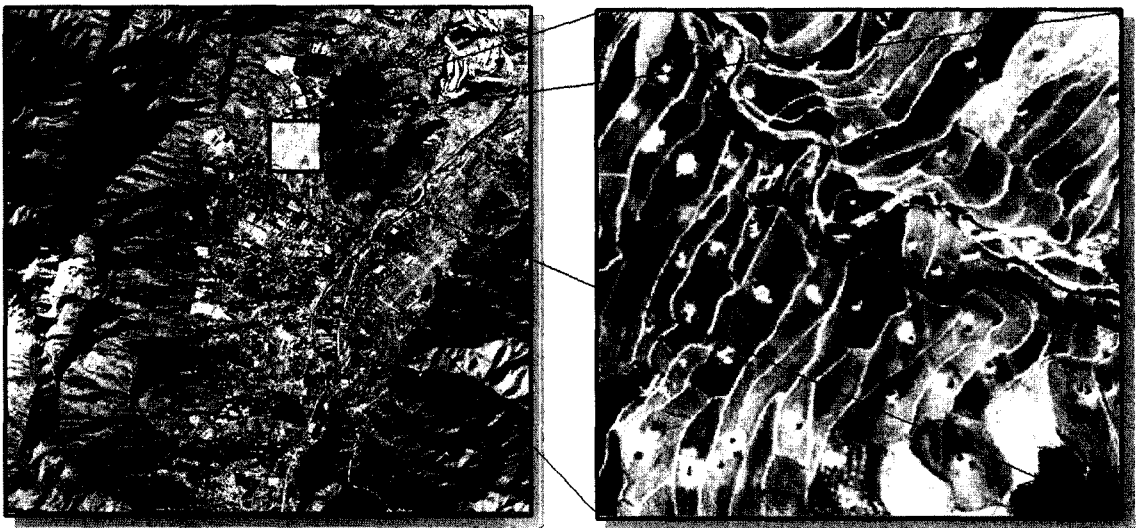


그림 5. IKONOS 첫 번째 획득영상(크기: 7000화소×7000화소) 및 DEM 추출을 위한 샘플지역(크기: 500화소×500화소)

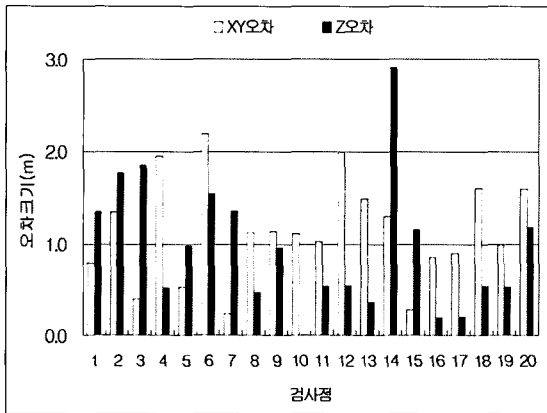
표 4. 촬영 대상지역에 대한 IKONOS 위성영상의 라인변화에 따른 외부표정요소 다항식

EOPs	First Scan Image	Second Scan Image
X_0	$570693.839 + 0.300L$	$490713.139 + 0.300L$
Y_0	$4117948.037 + 0.965L$	$3777714.467 + 0.962L$
Z_0	$599577.288 + 0.000L$	$622088.829 - 0.000L$
ω	$-0.32578 + 5.406 \times 10^{-08}L - 1.607 \times 10^{-13}L^2$	$0.21811 + 6.043 \times 10^{-08}L - 2.807 \times 10^{-13}L^2$
ϕ	$0.08950 + 4.724 \times 10^{-07}L - 1.344 \times 10^{-14}L^2$	$-0.03644 + 4.716 \times 10^{-07}L - 9.275 \times 10^{-14}L^2$
κ	$-0.00093 + 8.391 \times 10^{-08}L + 1.332 \times 10^{-11}L^2$	$-0.00073 - 9.508 \times 10^{-08}L + 3.637 \times 10^{-11}L^2$

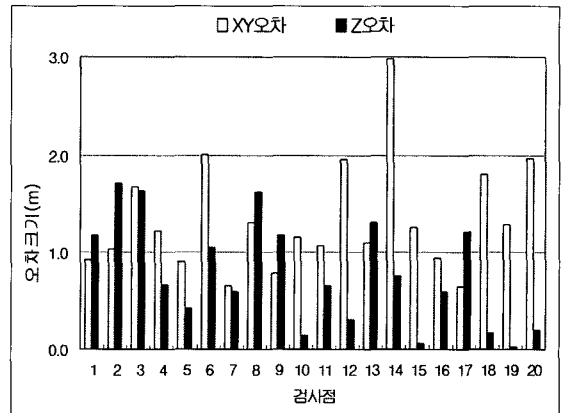
4). 그리고 두 지점의 X_0, Y_0 좌표를 이용하여 궤도경사각을 계산한 결과 적도를 축으로 첫 번째 영상은 97.8° , 두 번째 영상은 97.4° 로서 원래 궤도경사각 98° 와는 1° 이하의 차이를 보이고 있는 반면, Z_0 좌표는 원래 촬영고도 680km 와는 많은 차이를 보이고 있다. 이는 지구의 곡률을 고려하지 않은 평면직각좌표의 국지적 적용원점(위도 0° , 경도 129°)을 기준으로 하여 결정된 높이기 때문이라 판단된다.

그림 6에서 보는바와 같이 검사점의 지상좌표 추출결과는 결정된 외부표정요소를 이용한 경우, 평면위치의 RMSE와 최대오차는 각각 1.26m , 2.2m 이고, 높이의 RMSE와 최대오차는 각각 1.17m , 2.9m 이었다. 업데이트한 RPC를 이

용한 경우, 평면위치의 RMSE와 최대오차는 각각 1.40m , 3.0m , 높이의 RMSE와 최대오차는 각각 0.90m , 1.7m 이었다. 또한 두 방법에 의한 DEM의 고도차 영상을 작성한 결과(그림 7), 표준편차는 0.55m , 최대높이 차이는 4.00m 이었다. DEM 제작을 위한 본 연구의 적용 매칭방법과 PCI 적용방법이 다를 수 있으므로 이러한 점을 감안할 때 비교적 비슷한 결과라 판단한다. 따라서 적용 검사점과 샘플지역만을 이용하여 비교했을 때 본 연구에서 제시한 방법은 전반적으로 기존방법의 결과와 유사한 결과 정확도를 나타내었다.

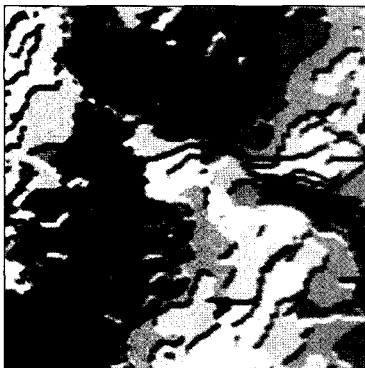


(a)

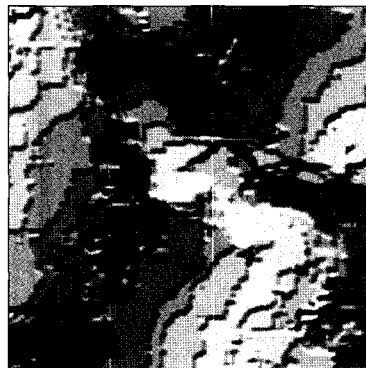


(b)

그림 6. (a) 외부표정요소 다항식을 이용하여 구한 검사점의 지상좌표 오차, (b) RPC 블럭조정방법으로 구한 검사점의 지상좌표 오차



(a)



(b)



(c)

그림 7. (a) RPC로부터 결정된 외부표정요소를 이용하여 제작한 DEM, (b) PCI 소프트웨어를 이용하여 제작한 DEM, (c) 두 방법에 의한 DEM의 고도차 영상

4. 결 론

위성영상 RPC는 센서 내·외부표정요소의 물리적인 특성을 반영한 카메라 모델이므로 본 연구는 이를 이용한 물리적인 모델의 복원가능성을 제시하고, RPC로부터 외부표정요소 결정방법을 제안하였다. 제안한 방법을 이용하여 SPOT 위성영상을 이용한 예비실험을 한 결과, 원래 외부표정요소와는 위치요소에 있어서 6.0m 이내, 회전요소는 0.4' 이내의 차이를 보였으며, 검사점의 지상좌표 추출에 있어서는 원래의 외부표정요소를 이용한 결과오차와 거의 비슷한 결과를 보였다.

그리고 제안한 방법으로 IKONOS Geo레벨 입체영상에서 제공하는 RPC로부터 외부표정요소를 결정한 후, 검사점의 위치를 구하고, DEM을 작성하였다. 이들 결과를 기존의 위치결정 정확도 향상기법 즉, RPC 블록조정 방법과 비교한 결과, 제안방법의 위치결정 능력은 기존방법과 거의 유사하였다. 따라서 실험결과를 토대로 RPC를 이용한 영상라인 변화에 따른 외부표정요소 결정방법의 타당성을 제시할 수 있었으며, 초기 제공되는 고해상도 위성영상의 부정확한 RPC 모델로부터 보다 정확한 위치결정을 위한 정밀 센서모델링 기법을 제안 할 수 있었다.

감사의 글

본 연구수행을 위해 영상자료를 제공해주신 경상대학교 안기원 교수님과 측량 및 지형정보연구실에 감사드립니다.

참고문헌

박병욱 (1991), SPOT 위성데이터를 이용한 수치표고모델 생성에 관한 연구, 박사학위논문, 서울대학교, pp. 34-70.
유복모 (2001), 현대 디지털 사진측량학, 문운당, pp. 245-248.
ch-d.com, 성균관대학교 (2002), IKONOS 위성영상을 이용한 1/5,000 수치지도 제작 연구, 위아 주식회사, http://www.spaceimagingasia.com/service/pds_a.htm.
Chen, F. J. (1997), Application of Least-Squares Adjustment Technique to Geomatic Camera Calibration and Photogrammetric

Flow Visualization, NASA Langley Research Center, Virginia, <http://techreports.larc.nasa.gov/ltrs/PDF/1997/mtg/NASA-97-43iis-fjc.pdf>.
Dial, G. (2000), IKONOS Satellite Mapping Accuracy, *Proceedings of American Society for Photogrammetry & Remote Sensing Annual Conference*, ASPRS, Washington D.C., CD-ROM.
Di, K., Ma, R., and Li, R. (2001), Deriving 3-D Shorelines from High Resolution IKONOS Satellite Images with Rational Functions, *Proceedings of American Society for Photo-grammetry & Remote Sensing Annual Conference*, ASPRS, St. Louis, Missouri, CD-ROM.
Di, K., Ma, R. and Li, R. X. (2003), Rational Functions and potential for Rigorous Sensor Model Recovery, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, ASPRS, Vol. 69, No. 1, pp. 33-41.
Di, K. and Li, R. (2004), CAHVOR Camera Model and Its Photogrammetric Conversion for Planetary Application, *Journal of Geophysical Research, American Geophysical Union*, Vol. 109, E04004, pp. 1-9.
Dowman, I. and Dolloff, J. T. (2000), An Evaluation of Rational Functions for Photogrammetric Restitution, *Proceedings of International Archives of Photogrammetry & Remote Sensing*, IAPRS, Amsterdam. Vol. 33, Part B3, pp. 254-266.
Fraser, C. S. and Hanley, H. B. (2003), Bias Compensation in Rational Functions for Ikonos Satellite Imagery, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, ASPRS, Vol. 69, No.1, pp. 53-57.
Grodecki, J. (2001), IKONOS Stereo Feature Extraction-RPC Approach, *Proceedings of American Society for Photogrammetry & Remote Sensing Annual Conference*, ASPRS, St. Louis, Missouri, CD-ROM.
Grodecki J. and Dial, G. (2001), IKONOS Geometric Accuracy, Spaceimaging, Thornton, <http://www.spaceimaging.com/techpapers/default.htm>.
Grodecki, J. and Dial, G. (2003), Block Adjustment of high-Resolution Satellite Images Described by Rational Polynomials, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, ASPRS, Vol. 69, No. 1, pp. 59-68.
Di, K., Ma, R., and Li, R. X. (2003), Rational Functions and potential for Rigorous Sensor Model Recovery, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, ASPRS, Vol. 69, No. 1, pp. 33-41.
Tao, C. V. and Hu, Y. (2002), 3D Reconstruction Methods Based on the Rational Function Model, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, ASPRS, Vol. 68, No. 7, pp. 705-714.

(접수일 2005. 3. 1, 심사일 2005. 3. 23, 심사완료일 2005. 3. 24)