

선형 푸시브룸 센서모델의 번들조정 정확도 및 외부표정요소추정 정확도 분석

Investigation on the Accuracy of bundle Adjustments and Exterior Orientation Parameter Estimation of Linear Pushbroom Sensor Models

김태정¹⁾

Kim, Tae Jung

Abstract

In this paper, we investigate the accuracy of various sensor models developed for linear pushbroom satellite images. We define the accuracy of a sensor model in two aspects: the accuracy of bundle adjustments and the accuracy of estimating exterior orientation parameters. The first accuracy has been analyzed and reported frequently whereas the second accuracy has somewhat been neglected. We argue that the second accuracy is as important as the first one. The second accuracy describes a model's ability to predict satellite orbit and attitude, which has many direct and indirect applications. Analysis was carried out on the traditional collinearity-based sensor models and orbit-based sensor models. Collinearity-based models were originally developed for aerial photos and modified for linear pushbroom-type satellite images. Orbit-based models have been used within satellite communities for satellite control and orbit determination. Models were tested with two Kompsat-1 EOC scenes and GPS-driven control points. Test results showed that orbit-based models produced better estimation of exterior orientation parameters while maintained comparable accuracy on bundle adjustments.

Keywords : Kompsat-1, Sensor Model, Bundle Adjustments, Collinearity, Satellite Orbit

요 지

이 논문에서는 선형 푸시브룸 방식으로 촬영한 위성영상에 대한 다양한 센서모델들의 정확도를 비교분석하고자 한다. 특히 이 논문에서는 센서모델의 정확도를 번들조정의 정확도와 외부표정요소추정의 정확도로 분리하여 고찰하려고 한다. 번들조정 정확도는 수립된 센서모델이 얼마나 기준점에 잘 부합하는 가를 알려주는 척도로 이제까지 대부분의 센서모델 정확도 분석에 사용되어온 기준이다. 이에 반하여 외부표정요소추정의 정확도는 센서모델이 얼마나 정확하게 촬영당시의 위성의 궤도 및 자세를 예측할 수 있는지의 척도로서 매우 중요한 요소임에도 불구하고 기존의 연구에서 간과해온 부분이다. 이 논문에서는 여러 센서모델 중에서 사진측량분야에서 주로 사용하는 변형된 공선방정식기반 모델과 위성지상국 또는 자세제어분야에서 주로 사용하는 궤도좌표계 및 자세각에 기반한 모델의 정확도를 비교분석하고자 한다. 실험은 다목적실용위성 1호 EOC 영상과 GPS 수신기에서 취득한 기준점을 사용하였다. 실험결과 번들조정 정확도는 두 모델이 큰 차이를 보이지 않는 것으로 나타났으나 외부표정요소추정 정확도는 궤도좌표계 및 자세각에 기반한 모델이 더 나은 성능을 보였다.

핵심용어 : 다목적실용위성 1호, EOC 영상, 번들조정, 공선방정식, 위성궤도

1. 서 론

1999년에 발사된 다목적실용위성 1호기에 이어 다목적

실용위성 2호기가 2005년 말에 발사가 계획되어 있는 등, 우리나라도 바야흐로 본격적으로 인공위성을 위한 지구 관측이 실용화되어가고 있다. 이에 따라 위성영상으로부터

1) 정회원 · 인하대학교공과대학 지리정보공학과 조교수(E-mail:tezid@inha.ac.kr)

터 정확한 위치정보를 추출할 수 있는 센서모델 기술의 확보가 더욱 중요해지고 있다. 특히 다목적실용위성 2호기와 같이 1m급의 높은 해상도를 가지는 위성영상의 경우는 정확한 센서모델의 사용여부에 따라서 영상으로부터 얻을 수 있는 지형정확도가 크게 좌우된다.

이 논문에서 센서모델은 센서좌표 또는 영상좌표와 이에 해당하는 지표면의 좌표와의 수학적 관계를 의미한다. 센서모델은 영상 촬영에 사용한 센서 또는 카메라의 종류와 센서가 탑재된 플랫폼의 종류, 그리고 촬영방식에 따라서 다양한 형태로 표현될 수 있다. 이 논문에서는 여러 형태의 위성센서 중에서 선형 푸시브룸 CCD를 이용하여 촬영한 위성센서에 국한하여 고찰하기로 한다.

SPOT 위성영상이 본격적으로 활용되기 시작한 1980년대 초부터 현재까지 다양한 센서모델이 발표되어왔다. 이들은 크게 물리적모델과 일반적모델로 구분할 수 있다 (McGlone, 1996; 김태정 등, 2000). 물리적 모델이란 초점거리, CCD 화소의 크기와 같은 센서의 물리적인 파라미터 및 위성궤도, 자세정보와 같은 위성의 물리적인 파라미터를 사용하여 영상과 지상의 관계를 설명하는 모델이다. 대표적인 물리적 모델로는 항공사진측량분야에서 개발된 공선방정식을 위성영상에 맞도록 변형된 모델¹⁾ (Gugan and Dowman, 1988; Orun and Natarajan, 1994) 과 위성 궤도좌표계 및 자세각에 기반한 모델²⁾이 있다 (Wolff, 1985; Radhadevi et al., 1998; SPOT Image, 2002). 일반적 모델이란 이러한 물리적 파라미터를 배제함으로써 개발된 모델이 특정 위성이나 센서에 의존적이지 않고 다른 종류의 센서에서도 사용할 수 있도록 개발된 모델을 의미한다. 선형 푸시브룸 방식의 위성영상을 위한 일반적 모델로는 흔히 “추상적 모델”이라고도 불리는 직접선형변환(Direct Linear Transform) 모델(Gupta and Hartley, 1997)과 IKONOS 위성의 센서모델로 채택된 유리함수모델(Rational Function Model; Tao, 2001)이 있다.

이 논문의 목적은 선형 푸시브룸 센서의 물리적 센서모델인 위치-오일러각 모델과 궤도-자세각 모델을 대상으로 이들 모델의 정확도를 비교분석하는 데에 있다. 특히 이 논문에서는 센서모델의 정확도를 번들조정 정확도와 외부표정요소추정 정확도로 구분하여 각각의 측면에서 센서모델의 성능을 분석하고자 한다.

기준에 발표되었던 많은 센서모델관련 연구에서 흔히 센서모델의 정확도는 번들조정 정확도와 동일시되어 왔다. 번들조정이란 카메라 초점에서 출발하여 영상의 특정 픽셀을 통과하는 광선(“번들”)이 제공된 기준점에 최대한 일치되도록 센서모델의 계수들을 “조정”하는 과정을 의미한다. 즉, 제공된 기준점을 사용하여 최소제곱법 등과 같은 추정방식을 통해서 센서모델의 계수를 구하는 과정이다. 번들조정 정확도는 “번들조정” 과정을 거처서 수립된 센서모델을 이용하여 계산된 기준점 좌표와 실측된 기준점 좌표의 차이로 나타낼 수 있다. 번들조정 정확도가 높으면 영상의 특정 픽셀에 해당하는 지상좌표값을 보다 정확하게 계산할 수 있으므로 영상으로부터 보다 높은 지형정확도를 추출할 수 있다. 센서모델을 수립하는 목적이 대부분 영상으로부터 정확한 지형정확도를 추출하는 데에 있으므로 많은 경우에 번들조정 정확도 만으로도 원하는 센서모델의 성능을 표현하는 데에는 충분하였다고 볼 수 있다(Gugan and Dowman, 1988; Orun and Natarajan, 1994; 김태정 등, 2000).

이 논문에서 외부표정요소추정의 정확도는 번들조정 과정을 통해서 추정된 센서모델의 계수들 즉 센서의 외부표정요소가 얼마나 참값에 가까운 지를 설명하는 척도로 정의한다. 이제까지 발표된 센서모델링 관련 논문에서 외부표정요소추정의 정확도가 별도로 분석된 경우는 거의 없었다. 그 이유는 앞서 설명한 데로 센서모델 수립의 목적이 대부분 높은 지형정확도의 확보에 있었고 또한 중심투영(Perspective)방식으로 촬영된 항공영상의 경우는 외부표정요소추정 정확도가 사실상 번들조정 정확도와 다르지 않기 때문이다.

그러나 선형 푸시브룸 방식으로 촬영한 위성영상은 항공영상과 달리 외부표정요소추정 정확도를 번들조정 정확도와 동일시 할 수 없다. 항공영상의 외부표정요소는 주어진 영상에 대해서 상수값이나 선형 푸시브룸 방식 영상의 경우는 시간에 따른 비선형적함수이다. 따라서 번들조정결과 외부표정요소가 참값이 아닌 국지적 최소값(Local Minimum)으로 수립하게 되는 경우가 종종 발생한다. 이러한 이유로 만약 센서모델 수립의 목적이 촬영한 당시의 정확한 위성의 위치 및 자세, 즉 위성의 외부표정요소를 추출하는 데에 있다면 외부표정요소추정의 정확도는 반드시 번들조정 정확도와 구분해서 고려해야 한다. 특히, 비접근지역의 모델링이나 기상위성의 영상항법(Image Navigation) 처리와 같이 영상으로부터 정확한

1) “위치-오일러각 모델”로 칭하기로 한다.

2) “궤도-자세각 모델”로 칭하기로 한다.

궤도 및 자세를 모델링하기 위해서는(Kim et al, 2004) 센서모델의 번들조정 정확도 뿐만 아니라 반드시 센서모델의 외부표정요소 추정 정확도를 분석해야 할 것으로 생각된다.

이 논문에서는 다목적실용위성 1호 EOC 영상과 GPS 수신기로부터 얻어진 기준점을 이용하여 변형된 공선방정식기반 모델과 궤도좌표계 및 자세각에 기반한 모델로 센서모델을 수립하고 각각의 모델의 번들조정 정확도와 외부표정요소추정 정확도를 분석한다. 이를 통하여 선형 푸시부름 영상의 경우는 외부표정요소추정의 정확도를 반드시 번들조정 정확도와 분리하여 고찰해야 한다는 것을 입증하고자 한다. 아울러, 두 모델 중에서 어떤 방식이 정확한 외부표정요소추정에 적합한지 판별하고자 한다. 먼저 다음 장에서는 두 모델에 대해서 간략히 비교설명을 하기로 한다.

2. 위치-오일러각 모델 및 궤도-자세각 모델

2.1 위치-오일러각 모델

선형 푸시부름센서를 설명하기 위한 센서모델 중 가장 대표적인 모델로 전통적으로 항공영상의 센서모델로 사용한 공선방정식을 변형한 모델이 있다. Gagan and Dowman (1988)은 항공영상용으로 개발된 공선방정식을 아래와 같이 변형하여 이를 선형 푸시부름방식의 센서모델로 제시하였다(그림 1 참조).

$$x=0=-f \frac{r_{11}(X-X_s)+r_{21}(Y-Y_s)+r_{31}(Z-Z_s)}{r_{13}(X-X_s)+r_{23}(Y-Y_s)+r_{33}(Z-Z_s)}$$

$$y=0=-f \frac{r_{12}(X-X_s)+r_{22}(Y-Y_s)+r_{32}(Z-Z_s)}{r_{13}(X-X_s)+r_{23}(Y-Y_s)+r_{33}(Z-Z_s)}$$

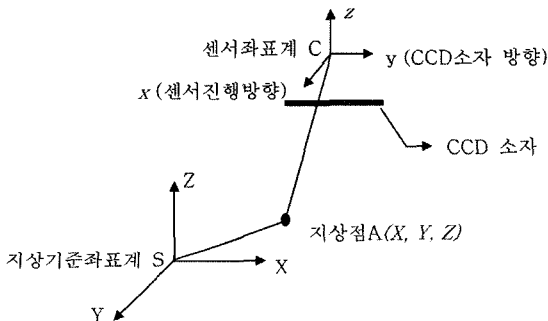


그림 1. 센서좌표계 및 지상기준좌표계

위의 수식에서 (x, y) 는 영상좌표³⁾, (X, Y, Z) 는 지상좌표를 의미하며 (X_s, Y_s, Z_s) 는 센서좌표계의 원점 또는 위성의 위치를 나타내는 외부표정요소, $r_{11} \sim r_{33}$ 은 센서좌표계를 지상기준좌표계에 일치하도록 하는 회전이동행렬의 계수이다. 이 회전이동행렬은 흔히 각 축을 기준으로 회전이동하는 회전이동각(또는 오일러각) ω, ϕ, κ 로 표현한다. 즉, 위의 모델의 경우 외부표정요소는 센서의 위치에 해당하는 (X_s, Y_s, Z_s) 및 오일러각에 해당하는 ω, ϕ, κ 로 표현된다. 따라서 이 논문에서는 위의 모델을 “위치-오일러각” 모델로 부르기로 한다. 만약 ω, ϕ, κ 를 각각 X, Y, Z축을 기준으로 회전이동한 회전이동각이며 회전순서를 Z축회전, Y축회전 및 X축회전의 순서로 한다면 회전이동행렬 R 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R = \begin{pmatrix} \cos \phi \cos \kappa & -\cos \phi \sin \kappa & \sin \phi \\ \sin \omega \sin \phi \cos \kappa + \cos \omega \sin \kappa & -\sin \omega \sin \phi \sin \kappa + \cos \omega \cos \kappa & -\sin \omega \cos \phi \\ -\cos \omega \sin \phi \cos \kappa + \sin \omega \sin \kappa & \cos \omega \sin \phi \sin \kappa + \sin \omega \cos \kappa & \cos \omega \cos \phi \end{pmatrix}$$

선형 푸시부름 센서는 센서의 위치와 자세가 시간 t 또는 영상좌표 x 에 따라서 변화하므로 Gagan and Dowman (1988)은 이를 다음과 같은 시간에 대한 2차식으로 모델링하였다.

$$X_s = X_0 + a_1 t + b_1 t^2$$

$$Y_s = Y_0 + a_2 t + b_2 t^2$$

$$Z_s = Z_0 + a_3 t + b_3 t^2$$

$$\kappa = \kappa_0 + a_4 t + b_4 t^2$$

$$\phi = \phi_0 + a_5 t + b_5 t^2$$

$$\omega = \omega_0 + a_6 t + b_6 t^2 \quad (1)$$

기준점을 이용하여 센서모델을 수립할 때는 위의 수식 중에서 미지수에 해당하는 파라미터를 최소제곱법 등의 추정방법을 사용하여 추정한다. 위의 수식에 나타나 있는 계수 중에서 어떤 것을 미지수로 정하는 지에 대한 정답은 아직 없는 듯 하다. 다만, 위의 식에 있는 총 18개의 계수를 모두 미지수로 사용하게 되면 계수들 간에 상관관계가 존재하여 해가 발산하게 된다고 보고된 바 있다(Orun and Natarajan, 1994). 이러한 이유로 Orun and Natarajan은 ω 와 ϕ 에 해당하는 계수는 모두 불변값으로 두고, 나머지 12개의 파라미터를 미지수로 두어 해를 구하는 모델을 제안하였다. 이밖에도 자세를 상수, 위치를 시간에 대한 다항식으로 두거나 위치를 상수, 자세를 시

3) 이때 센서의 진행방향은 x축방향이며 CCD소자의 방향은 y축방향이다.

간에 대한 다항식으로 하는 모델들이 제안된 바 있다 (Konecny et al., 1987). 이 논문에서는 여러가지 미지수의 조합을 선정하여 정확도를 분석해보기로 한다.

2.2 궤도-자세각 모델⁴⁾

앞절에서 설명한 모델은 주로 사진측량분야에서 개발되어 사용된 모델이며 위성영상의 모델링을 위하여 해석도화기 및 수치도화기의 센서모델로 구현되어 사용되어 왔다 (Gugan and Dowman, 1988; Konecny et al., 1987). 그러나 이 모델은 큰 제한요인이 있다. 그것은 위치-오일러각 모델에 사용한 회전이동각인 ω, ϕ, κ 가 실제 궤도상의 위성의 자세를 설명해주지 못하는 임의의 좌표축을 기준으로 한 회전각일 뿐이라는 것이다. 실제 위성자세제어의 기준이 되는 궤도좌표계는 위성의 위치벡터 및 속도벡터에 의해서 정의되는 시간에 따라 변하는 좌표계이며 위성의 자세값을 나타내는 Roll, Pitch, Yaw각은 이 궤도기준좌표계와 실제 위성기준좌표계 간의 회전이동각을 의미하기 때문이다(SPOT Image, 2002). 따라서 위치-오일러각 모델은 위성의 위치벡터, 속도벡터 및 각도 Roll, Pitch, Yaw로 표현되는 위성의 자세를 오일러각 ω, ϕ, κ 로 단순화시켰으며 따라서 엄밀한 의미의 물리적 모델로 볼 수 없다.

위성의 궤도좌표계와 자세각에 기반한 센서모델을 간단하게 행렬의 형태로 표시하면 수식 (2)와 같이 나타낼 수 있다⁵⁾. 상호비교를 위하여 수식 (3)에서 위치-오일러각 모델을 행렬의 형태로 표시하였다.

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ -f \end{pmatrix} = \lambda \mathbf{R}_{rpy}^T \mathbf{R}_{p,v}^T \begin{pmatrix} X - X_S \\ Y - Y_S \\ Z - Z_S \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ -f \end{pmatrix} = \lambda \mathbf{R}^T \begin{pmatrix} X - X_S \\ Y - Y_S \\ Z - Z_S \end{pmatrix} \quad (3)$$

수식 (2)에서 f 는 센서의 초점거리, λ 는 비례상수이고 \mathbf{R}_{rpy} 은 위성의 자세각인 Roll, Pitch, Yaw각에 의해서 정의되는 회전이동 행렬, $\mathbf{R}_{p,v}$ 는 위성의 위치벡터 \mathbf{P} 및 속도벡터 \mathbf{V} 에 의해서 정의되는 회전이동 행렬이다. 수식

- 4) 제시된 수식 (2)와 (3)에서 알 수 있듯이 이 논문에서 고려하는 위치-오일러각 모델과 궤도-자세각 모델은 모두 “공선조건”에 입각한 모델이다. 실제로 Radhadevi et al.(1998)은 “Orbit Attitude Model”이란 용어로 위성의 궤도좌표계 및 자세각에 기반한 모델을 칭한 바 있다.
5) 궤도-자세각 모델의 상세한 유도는 참고문헌(신동석, 이영란, 1997; Radhadevi et al., 1998; 김태정 등, 2000)을 참조한다.

(3)에서 \mathbf{R} 은 ω, ϕ, κ 에 의해서 결정되는 회전이동 행렬이다. 즉, 실제 위성의 자세는 위성의 위치벡터, 위성의 속도벡터 및 위성의 자세값에 의해서 결정되어지는 파라미터인데 비하여 공선방정식은 이렇게 9개의 파라미터로 의해서 결정되어지는 회전이동행렬을 단순히 3개의 파라미터 ω, ϕ, κ 로 단순화한 모델이다. 따라서 위성의 궤도좌표계 및 자세각에 기반한 이 모델을 궤도-자세각 모델로 칭하기로 한다.

수식 (2)에서 \mathbf{R}_{rpy} 와 $\mathbf{R}_{p,v}$ 의 정의는 위성별로 고유하게 정의된 위성의 궤도좌표계 및 자세각에 따라서 다르게 표시된다. 다목적실용위성 1호의 경우는 다음과 같이 회전이동행렬을 정의할 수 있다.

$$\mathbf{R}_{rpy} = \begin{pmatrix} \cos \psi \cos P & \cos \psi \sin P \sin R + \sin \psi \cos R & -\cos \psi \sin P \cos R + \sin \psi \sin R \\ -\sin \psi \cos P & -\sin \psi \sin P \sin R + \cos \psi \cos R & \sin \psi \sin P \cos R + \cos \psi \sin R \\ \sin P & -\cos P \sin R & \cos P \cos R \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{R}_{p,v} = \begin{pmatrix} \frac{V_X}{L_V} - \frac{Y_S V_Z + V_Y Z_S}{L_P L_V} - \frac{X_S}{L_P} \\ \frac{V_Y}{L_V} - \frac{Z_S V_X + V_Z X_S}{L_P L_V} - \frac{Y_S}{L_P} \\ \frac{V_Z}{L_V} - \frac{X_S V_Y + V_X Y_S}{L_P L_V} - \frac{Z_S}{L_P} \end{pmatrix}$$

위의 식에서 R, P, ψ 는 각각 위성의 Roll 각, Pitch 각 및 Yaw 각이며 (V_X, V_Y, V_Z)는 속도벡터 \mathbf{V} 를 나타낸다. L_P 및 L_V 는 각각 위성의 위치벡터 \mathbf{P} 및 속도벡터 \mathbf{V} 의 크기이다.

궤도-자세각 모델에서 위성의 위치벡터와 속도벡터는 시간 t 또는 영상좌표 x 에 대한 2차식으로 모델링할 수 있다. 일반적으로 위성의 자세는 시간에 따른 다항식으로 모델링하기에 매우 어려우며 이는 위성의 고유한 자세제어방식에 따라 신중하게 모델하여야 한다(SPOT Image, 2002). 이 논문에서는 편의상 위성의 자세도 시간 또는 영상좌표 x 에 대한 2차식으로 모델링할 수 있다고 가정하자. 위의 가정을 아래의 수식 (4)와 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} X_S &= X_0 + a_1 t + b_1 t^2 \\ Y_S &= Y_0 + a_2 t + b_2 t^2 \\ Z_S &= Z_0 + a_3 t + b_3 t^2 \\ V_X &= V_{X0} + a_4 t + b_4 t^2 \\ V_Y &= V_{Y0} + a_5 t + b_5 t^2 \\ V_Z &= V_{Z0} + a_6 t + b_6 t^2 \\ R &= R_0 + a_7 t + b_7 t^2 \\ P &= P_0 + a_8 t + b_8 t^2 \\ \psi &= \psi_0 + a_9 t + b_9 t^2 \end{aligned} \quad (4)$$

궤도-자세각 모델은 주로 위성체의 세부정보의 접근이 용이한 위성자세제어계 또는 위성지상국에서 주로 개발되어 사용된 모델이다. 위치-오일러각 모델의 경우와 마찬가지로 궤도-자세각 모델의 경우도 위의 다항식에서 어떤 계수를 미지수로 정하는 지에 따라서 여러 가지 모델이 있을 수 있다. Salamonowicz(1986)는 궤도에 해당하는 미지수는 시간에 대한 상수항만을, 자세에 해당하는 미지수는 시간에 대한 상수항과 1차항을 미지수로 모델하였다. Radhadevi et al.(1998)은 궤도와 자세의 상수항만을 미지수로 하는 모델을 사용한 바 있다. 이 논문에서는 여러가지 미지수의 조합으로 실험하여 궤도-자세각 센서모델의 성능을 분석하기로 한다.

3. 실험결과 및 토의

실험을 위해서 논산지역을 촬영한 2개의 다목적실용위성 1호 EOC 영상자료와 GPS 수신기를 이용하여 측정한 기준점을 사용하였다. 실험에 사용한 영상과 기준점 정보는 아래의 표 1과 같다. 영상은 2000년 봄에 약 3일의 시간간격을 두고 촬영한 논산지역의 스테레오 영상이다. 각 영상에서 모두 25개의 기준점을 추출하였고 Scene-1의 경우는 이중 13개의 점을 모델수립에 사용하였고 나머지 점을 성능검사를 위한 검사점으로 사용하였다. Scene-2의 경우는 14개의 점을 모델수립에, 나머지 점을 성능검사에 사용하였다. 그림 2는 실험에 사용한 Scene-1에 해당하는 EOC 영상과 사용한 기준점의 위치를 보여준다. 그림에서 1번부터 13번까지 하얀색으로 표시된 기준점은 모델링에 사용한 기준점이며 14번부터 25번까지 검정색으로 표시된 기준점은 성능검사에 사용한 기준점을 나타낸다. 실험대상인 여러 모델의 계수의 초기값을 구하기 위해서는 위성체의 위성의 위치벡터, 속도벡터 및 자세정보가 필요하다. 이 정보는 EOC 영상과 함께 제공된 메타

데이터로부터 추출하여 사용하였다.

위치-오일러각 모델의 경우 표 2와 같은 미지수의 조합을 가지는 모델들로 실험하였다. 표 2에서 사용한 기호는 수식 (1)에 나타난 계수를 의미한다. 아래의 여러 모델에서 PE-1은 위성의 위치에 해당하는 미지수는 시간에 대한 2차식으로, 그리고 위성의 오일러각에 해당하는 미지수는 시간에 대한 상수항만으로 모델한 것으로 Gagan and Dowman(1988)이 제안한 모델과 유사한 모델이다. PE-2는 위성의 위치에 해당하는 미지수는 시간에 대한 2차식으로 그리고 위성의 오일러각 중 κ 각만을 시간에 대한 미지수로 모델한 것으로 Orun and Natarajan(1994)이 제안한 모델이다. 이 모델은 이미 EOC 영상으로부터 DEM 생성을 위해서 사용된 바 있는 모델이다(임용조 등, 2002). PE-3는 위성의 위치정보에만 에러가 있고 위성의 오일러각에는 에러가 없다고 가정하고 위성의 위치에 대한 미지수만을 시간에 대한 2차식으로 모델한 것이다.

표 1. 실험에 사용한 위성영상 및 기준점

ID	Scene-1	Scene-2
Sensor	EOC	EOC
Spatial Resolution	6.6 m	6.6 m
Date of Acquisition	May 1, 2000	April 28, 2000
Tilt Angle	19° (westward)	12° (eastward)
No. of model points	13	14
No. of check points	12	11

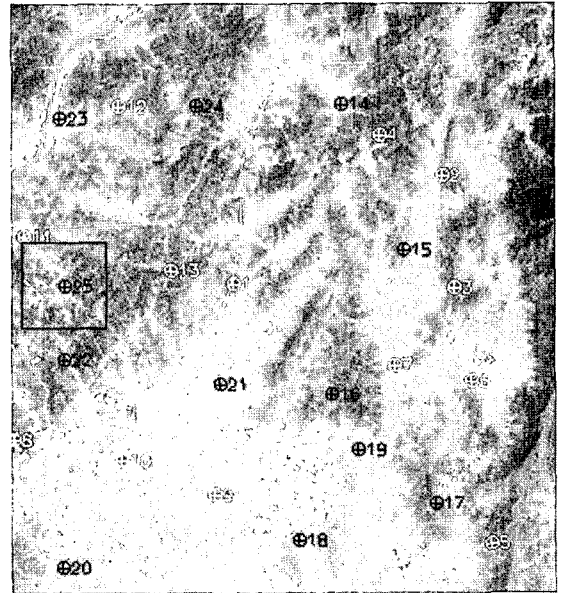


그림 2. 실험에 사용한 영상(Scene-1) 및 기준점의 배치

표 2. 실험에 사용한 위치-오일러각 모델

ID	Unknowns
PE-1	$X_0, a_1, b_1, Y_0, a_2, b_2, Z_0, a_3, b_3, \kappa_0, \phi_0, \omega_0$
PE-2	$X_0, a_1, b_1, Y_0, a_2, b_2, Z_0, a_3, b_3, \kappa_0, a_4, b_4$
PE-3	$X_0, a_1, b_1, Y_0, a_2, b_2, Z_0, a_3, b_3$
PE-4	$X_0, Y_0, Z_0, \kappa_0, \phi_0, \omega_0$

PE-4는 위성의 위치 및 오일러각에 존재하는 에러가 시간에 대해서 변화하지 않는 상수항만이라고 가정한 모델이다.

여기서 한가지 주의해야 할 점은 수식 (1)의 계수 중에서 표 2에 명시한 미지수에 포함되지 아니한 계수들은 모델식 상에서 상수로 처리하였다는 점이다. 즉, PE-1 ~ PE-4 모델 모두 위치와 오일러각은 시간에 대한 2차식으로 가정하여 수식 (1)에 명시된 계수들을 사용하였고 단지 각 모델별로 번들조정 시에 추정되는 계수들을 표 2와 같이 서로 상이하게 적용하였다.

궤도-자세각 모델의 경우는 표 3과 같은 미지수의 조합을 가지는 모델들로 실험하였다. 표 3에서 사용한 기호는 수식 (4)에 나타난 계수를 의미한다. 아래의 여러 모델에서 OA-1은 위성의 위치에 해당하는 미지수를 시간에 대한 2차식, 위성의 자세에 해당하는 미지수는 시간에 대한 상수항만을 모델한 것으로 위치-오일러각 모델의 PE-1에 대응되는 모델로 볼 수 있다. OA-2는 Orun and Natarajan(1994)이 제시한 모델인 PE-2에 대응되도록 산정한 모델이다. Orun and Natarajan은 상관관계를 제거하기 위하여 κ 각만을 미지수로 모델하였으므로 이 논문에서는 자세각 중에서 κ 각에 대응된다고 볼 수 있는 Yaw각만을 미지수로 모델하였다. OA-3는 위성의 자세각에는 에러가 존재하지 않으며 위성의 위치 에러를 시간에 대한 2차식으로 모델할 수 있다고 가정한 것으로 PE-3에 대응되는 모델로 볼 수 있다. OA-4는 Radhadevi et al. (1998)의 모델과 유사하게 위성의 위치 및 자세각에 존재하는 에러가 시간에 대해 변하지 않는 상수항만으로 가정한 모델로 PE-4에 대응되도록 설정한 모델이다.

궤도-자세각 모델의 경우도 위치-오일러각 모델과 마찬가지로 표 3에 명시되지 않은 수식 (4) 상의 나머지 계수들은 모두 상수로 처리하였다. 즉, OA-1 ~ OA-4 모델은 모두 위성의 위치, 속도 및 자세를 시간에 대한 2차식으로 모델하여 수식 (4)에 있는 모든 계수들을 모델식에 사용하였고 다만 각 모델별로 번들조정을 통해서 추정되는

계수들을 표 3의 미지수와 같이 상이하게 적용하였다.

위에서 제시한 위치-오일러각 모델 및 궤도-자세각 모델 모두에서 번들조정을 위해서는 각각 수식 (1)과 수식 (4)의 계수들의 초기값이 필요하다. 수식 (1)의 계수의 경우, 위성의 위치에 해당하는 계수들의 초기값은 영상과 함께 제공된 위성의 위치벡터를 내삽하여 영상의 시작라인, 중심라인 및 끝라인에 해당하는 위치벡터를 구한 뒤에 이를 시간에 대한 2차식으로 근사하도록 계산하였다. 수식 (1)의 오일러각에 해당하는 계수들의 초기값을 구하기 위해서는 먼저 위성영상의 위치벡터, 속도벡터 및 자세각을 이용하여 영상의 시작라인, 중심라인 및 끝라인에 해당하는 오일러각을 계산한 후 이를 시간에 대한 2차식으로 근사하였다. 특정라인에서의 오일러각은 해당라인의 위치벡터, 속도벡터 및 자세각을 이용하여 회전이동행렬인 \mathbf{R}_{mv} 와 $\mathbf{R}_{p,v}$ 를 구한 뒤 이들로부터 다시 \mathbf{R} 을 계산하여 결정하였다(수식 (2), (3) 참조). 궤도-자세각 모델인 수식 (4)의 계수의 경우는 제공된 위치벡터, 속도벡터 및 자세각을 내삽하여 영상의 시작라인, 중심라인 및 끝라인에 해당하는 수치를 계산한 후, 이들을 시간에 대한 2차식으로 근사하여 모델링에 필요한 계수의 초기값을 계산하였다.

번들조정 과정을 수행하게 되면 위에서 설명한 방식으로 계산된 계수들 중에서 미지수에 해당하는 계수들의 값이 변경되어 주어진 기준점에 부합되도록 조정된다. 아래의 표 4는 표 2, 3에 제시한 각 모델들을 Scene-1과 Scene-2 영상과 기준점점들을 이용하여 번들조정된 결과이다. 각 모델의 정확도는 번들조정 정확도와 추정된 외부표정요소의 정확도로 정리하였다. 번들조정 정확도는 다시 번들조정 과정에서 사용한 기준점(모델점)들의 정확도(Model Accuracy)와 번들조정 과정에 사용하지 않은 기준점(검사점)들의 정확도(Check Accuracy)로 구분하였다. 외부표정요소추정의 정확도는 번들조정 전에 위성영상에서 제공된 위치/속도/자세정보를 이용하여 내삽한 영상의 중심라인에서의 외부표정요소 초기값과 번들조정 후에 변경된 중심라인의 외부표정요소 값의 차이로 정의하였다. 물론 위성영상과 함께 제공되는 위치/속도벡터 및 자세정보에 오차가 포함되어 있으므로 이를 참값로 볼 수는 없다. 그러나 실측에 근거한 참값 데이터가 없고 제공되는 위치/속도벡터 및 자세정보의 에러의 범위가 알려져 있으므로(김정아, 전갑호, 2002) 번들조정 이후에 추정된 외부표정요소가 얼마나 초기값과 다른지를 측정함

표 3. 실험에 사용한 궤도-자세각 모델

ID	Unknowns
OA-1	$X_0, a_1, b_1, Y_0, a_2, b_2, Z_0, a_3, b_3, R_0, P_0, \Psi_0$
OA-2	$X_0, a_1, b_1, Y_0, a_2, b_2, Z_0, a_3, b_3, \Psi_0, a_9, b_9$
OA-3	$X_0, a_1, b_1, Y_0, a_2, b_2, Z_0, a_3, b_3$
OA-4	$X_0, Y_0, Z_0, R_0, P_0, \Psi_0$

표 4. 실험결과

Model ID	Scene-1 Results			Scene-2 Results		
	Model Accuracy (pixel)	Check Accuracy (pixel)	Position (km) & Angle (°) Offsets	Model Accuracy (pixel)	Check Accuracy (pixel)	Position (km) & Angle (°) Offsets
PE-1	0.490	0.910	305km, 2°	0.549	0.872	270km, 4°
PE-2	0.461	0.795	290km, 0.1°	0.634	0.864	280km, 0.1°
PE-3	1.038	1.165	290km	0.643	0.963	280km
PE-4	NA	NA	NA	NA	NA	NA
OA-1	0.490	0.925	57.1km, 3.8°	0.431	0.757	31.8km, 1.7°
OA-2	0.517	0.681	2.4km, 0.15°	0.481	0.777	1.5km, 0.0°
OA-3	1.024	1.107	2.5km	0.492	0.828	1.5km
OA-4	0.671	0.818	15km, 0.5°	0.656	0.820	22km, 1.5°

으로써 외부표정요소추정의 정확도를 간접적으로 분석할 수 있을 것이다.

먼저 PE-1 모델에 대한 실험결과를 살펴보면 이 모델은 비교적 정확한 번들조정 정확도를 가지고 있으나 추정된 위성의 위치 및 오일러각은 사용한 초기값과 매우 다르며 이 값들이 알려진 다목적실용위성 1호의 위치벡터의 정확도(수십 km 이내) 및 자세정보 정확도를 훨씬 벗어나는 것을 확인할 수 있다⁶⁾. 이렇게 PE-1 모델이 높은 번들조정 정확도를 보이는 데에 반하여 매우 왜곡된 외부표정요소를 산출하는 이유로 Orun and Natarajan(1994)은 위치-오일러각 모델에서 위성의 위치 (X, Y)와 위성의 오일러각 (ω , ϕ) 간에 상관관계가 있기 때문이라고 분석한 바 있다. 그러나 이러한 상관관계를 극복하기 위하여 Orun and Natarajan(1994)이 제시한 모델인 PE-2의 경우에도 번들조정 정확도는 높으나 외부표정요소는 매우 왜곡되어 추정되었다. 위성의 메타데이터로부터 계산한 오일러각을 참으로 보고 위성의 위치만을 시간에 대한 2차식으로 모델한 PE-3의 경우에도 추정된 외부표정요소에 심각한 왜곡이 있음을 알 수 있었다.

이렇게 위치-오일러각 모델에서 추정된 외부표정요소에 많은 에러가 존재하는 이유는 수식 (2)와 (3)의 비교에서 알 수 있듯이 오일러각을 시간에 대한 다항식으로 모델하는 것만으로는 위성의 위치벡터, 속도벡터 및 자세각에 대한 함수형태로 나타나게 되는 실제의 물리적인 특성을 제대로 나타낼 수 없기 때문으로 생각된다. PE-1 모델

은 서로 상관관계가 있는 계수들을 추정하게 됨으로써 왜곡이 발생하였고 PE-3 모델은 위치벡터, 속도벡터 및 자세각의 함수로 표현되는 오일러각을 미시수에서 완전히 제외함으로써 오히려 위치값이 크게 왜곡되는 결과로 나타났다. PE-2 모델도 PE-3 모델과 유사한 왜곡을 보이는 바, 당초 Orun and Natarajan(1994)이 의도한 데로 상관관계를 제거하지 못했음을 보여준다. PE-4 모델은 해를 추정하는 과정에서 실근을 구할 수 없는 경우가 발생하여 수렴에 실패한 경우이다. 이는 위치-오일러각 모델에서 위치에러 및 오일러각 에러를 상수로 가정한 모델은 너무 단순하였던 결과로 추정되나 정확한 수렴 실패의 원인에 대해서는 별도의 분석이 필요할 것으로 생각된다.

궤도-자세각 모델 실험결과를 살펴보면 몇가지 흥미로운 결과를 발견할 수 있다. 먼저 실험한 모든 모델에서 번들조정 정확도는 위치-오일러각 모델과 유사한 반면 추정된 외부표정요소와 초기값과의 차이는 상당히 작아졌음을 알 수 있다. 특히 OA-1 모델의 경우는 추정된 자세각이 초기값과 상당한 차이를 보임에도(3.8° 및 1.7°) 추정된 위성의 위치와 초기값의 차이는 PE-1 모델보다 훨씬 작은 값으로 나타났다. 이 사실로부터 위치-오일러각 모델은 실제 위성의 위치, 속도 및 자세각으로 표현되는 회전이동행렬을 3개의 오일러각으로만 모델하였으므로 번들조정과정에서 나타난 오일러각의 변화가 위성의 위치에도 큰 영향을 미치게 되었으나 궤도-자세각 모델의 경우는 자세각의 변화가 위성의 위치에 큰 영향을 미치지 않았음을 알 수 있다. 이는 두 모델의 이론적 비교를 통해서도 예상된 결과이다.

그러나 OA-1 모델에서 추정된 외부표정요소와 초기값

6) 다목적실용위성의 고도가 약 680km인데 비하여 번들조정 전후의 위치값 차이가 300km 이상이라면 이는 참값에서 상당히 차이가 있음을 알 수 있다.

과의 차이는 알려진 다목적실용위성 1호기의 위치오차 및 자세오차보다 여전히 큰 값이다(김정아, 전갑호, 2002). 그 이유는 Orun and Natarajan(1994)이 밝힌 것과 같이 위성의 위치와 자세각의 상관관계에 기인하는 것으로 생각된다. 즉, 위성의 Pitch각과 Along-Track 위치 그리고 위성의 Roll각과 Across-Track 위치에는 상관관계가 존재한다. OA-4 모델에서도 추정된 외부표정요소와 초기값의 차이가 크게 나타난 것이 위의 결론을 뒷받침한다. OA-2 모델의 경우는 roll각과 pitch각에 해당하는 계수들을 상수로 고려함으로써 이러한 상관관계를 제거하였고 그 결과, 추정된 외부표정요소들은 모두 알려진 다목적실용위성 1호기의 위치오차 및 자세오차에 근접한 값을 알 수 있다. 모든 자세각에 해당하는 계수를 상수로 모델한 OA-3 모델의 경우에서도 비슷한 현상이 관측되었다. 즉, Orun and Natarajan(1994)이 제시한 방법인 상관관계가 있는 위치와 자세 중에서 하나를 상수로 놓고 해를 구하는 방법은 위치-오일러각 모델이 아닌 궤도-자세각 모델에 적용해야 의도하는 목적대로 상관관계가 제거된다고 볼 수 있다.

위에서 제시한 실험결과들과 고찰을 통해서 변들조정 정확도는 위치-오일러각 모델과 궤도-자세각 모델에서 모두 우수한 성능을 보였으나 외부표정요소 추정의 정확도의 경우는 궤도-자세각 모델이 위치-오일러각 모델보다 더 나은 결과를 나타낸 것을 알 수 있었다. 특히, 위성의 위치 및 자세각 간의 상관관계를 제거한 모델에서는 추정된 외부표정요소가 알려진 다목적실용위성 1호기의 오차 범위에 수렴하는 것으로 나타났으나 정확한 외부표정요소 추출의 정확도는 추후에 더 상세하게 연구되어야 할 것이다.

4. 결 론

이 논문의 의의는 크게 두가지로 요약할 수 있을 것이다. 첫번째 의의는 위치-오일러각 모델과 궤도-자세각 모델의 분석을 통해서 밝혀진 사실들에 있다. 본문에서 제시한 일련의 실험결과를 통해서 위치-오일러각 모델은 높은 변들조정 정확도를 보이는 반면 이 모델을 통해서 추정되는 외부표정요소들은 상당한 에러가 포함되어 있음을 실험적으로 밝힐 수 있었다. 이는 위치-오일러각 모델에서 사용하는 오일러각이 물리적인 파라미터가 아니기 때문에 발생하는 현상으로 이론적인 분석으로도 예측할

수 있는 결과이다. 실험결과, 센서모델 수립의 목적이 변들조정정확도 뿐만 아니라 외부표정요소 추출의 정확도에 있다면 위치-오일러각 모델 대신에 궤도-자세각 모델을 사용해야 할 것으로 나타났다. 그러나 여러 궤도-자세각 모델의 계수 중에서 어떠한 계수를 미지수로 사용해야 하는지, 궤도-자세각 모델로 추정되는 외부표정요소 얼마나 참값에 가까운지에 대한 연구는 추후에 수행되어야 할 것이다.

이 논문의 두번째 의의는 센서모델의 정확도 분석 시에 그동안 다소 등한시되어왔던 외부표정요소추출의 정확도가 센서모델 수립의 목적에 따라서 중요할 수도 있으며 또한 이 정확도는 반드시 변들조정 정확도와 분리하여 고찰하여야 한다는 사실을 실험적으로 밝힌 것에 있다. 특히 선형 푸시브룸 방식의 영상의 경우, 센서모델 수립의 목적이 정확한 위성의 궤도 및 자세의 복원이라면 반드시 외부표정요소추출의 정확도를 센서모델의 성능비교에 포함시켜야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국과학기술원 영상 정보특화연구센터를 통한 국방과학연구소의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

김정아, 전갑호 (2002), Komsat-1 EOC 영상의 기하정확도 분석, 항공우주기술, 제1권, 제2호, pp. 141-148.
 김태정, 김승범, 신동석 (2000), 대표적 위성영상 카메라 모델링 알고리즘들의 비교연구, 대한원격탐사학회지, 제16권, 제1호, pp. 73-86.
 신동석, 이영란 (1997), "선형 CCD카메라 영상의 기하학적 모델 수립", 대한원격탐사학회지, 13(2):85-98.
 임용초, 김태정, 김준식 (2002), "KOMPSAT-1 EOC 입체영상을 이용한 DEM 생성과 정확도 검증", 대한원격탐사학회지, 18(2):81-90.
 ASPRS (2004), Manual of Photogrammetry (5th Edition), J.C. McGlone (Editor).
 Gagan, D. J. and Dowman, I. J. (1988), Accuracy and Completeness of Topographic Mapping from SPOT Imagery, *Photogrammetric Record*, 12(72):787-796.
 Gupta, R., and Hartley, R. (1997), Linear Pushbroom Cameras, *IEEE Trans. PAMI*, 19(9):963-975.
 Kim, T., Lee T.-Y., and Choi, H.-J. (2004) Landmark Extraction, Matching and Processing for Automated Image Navigation of Geostationary Weather Satellites, *Proc. of SPIE*, Vol. 5657, pp. 30-37.

- Konecny, G., Lohmann, P., Engel, H., and Kruck, E. (1987), Evaluation of SPOT Imagery on Analytical Photogrammetric Instruments, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 53(9):1223-1230.
- McGlone, C. (1996), Sensor Modeling in Image Registration, In *Digital Photogrammetry-An Addendum to the Manual of Photogrammetry*, edited by Greve, C., ASPRS, pp. 115-123.
- Orun, A.B. and Natarajan, K. (1994), A Modified Bundle Adjustment Software for SPOT Imagery and Photography: Tradeoff, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 60(12):1431-143.
- Radhadevi, P.V., Ramachandran, R., and Mohan, M. (1998), Restitution of IRS-1C PAN data using an orbit attitude model and minimum control, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 53(1998):262-271.
- SPOT Image (2002), *SPOT Satellite Geometry Handbook*, S-NT-73-12-SI.
- Tao, C.V. (2001), A Comprehensive Study of the Rational Function Model for Photogrammetric Processing, *PE & RS*, 67(12):1347-1357.
- Wolff, T. (1985), An Image Geometry Model for METEOSAT, *Int. J. Remote Sensing*, 6(10):1599-1606.

(접수일 2005. 5. 10, 심사일 2005. 5. 16, 심사완료일 2005. 6. 14)