

SPOT 위성영상에서의 위치-회전각 모델과 궤도-자세각 모델의 비교

Comparison of Position-Rotation Models and Orbit-Attitude Models with SPOT images

김태정¹⁾

Kim, Taejung

Abstract

This paper investigates the performance of sensor models based on satellite position and rotation angles and sensor models based on satellite orbit and attitude angles. We analyze the performance with respect to the accuracy of bundle adjustment and the accuracy of exterior orientation estimation. In particular, as one way to analyze the latter, we establish sensor models with respect to one image and apply the models to other scenes that have been acquired from the same orbit. Experiment results indicated that for the sole purpose of bundle adjustment accuracy one could use both position-rotation models and orbit-attitude models. The accuracy of estimating exterior orientation parameters appeared similar for both models when analysis was performed based on single scene. However, when multiple scenes within the same orbital segment were used for analysis, the orbit-attitude model with attitude biases as unknowns showed the most accurate results.

Keywords : Sensor model, Bundle adjustment, Orbit Model

초 록

이 논문에서는 SPOT 위성영상을 이용하여 위성의 위치와 회전각에 기반한 센서모델과 위성의 궤도와 자세각에 기반한 센서모델의 성능을 분석한다. 센서모델의 성능은 기존의 논문에서 사용한 번들조정 정확도에 추가하여 외부표정요소 추정의 정확도를 함께 분석한다. 특히 이 논문에서는 외부표정요소의 정확도를 분석하는 방법의 하나로, 한 영상을 기준으로 수립된 센서모델을 동일 궤도에서 촬영한 인접영상에 적용하여 그 정확도를 분석한다. 분석 결과 센서모델 수립의 목적이 번들조정 정확도에만 있다면 위성의 위치 및 자세의 2차항을 미지수로 모델하는 위치-회전각 모델과 궤도-자세각 모델을 모두 사용할 수 있음을 알 수 있었다. 또한 SPOT 위성영상과 같이 거울회전방식을 사용하는 위성영상에 있어서 단일영상에 대해서는 위치-회전각 모델과 궤도-자세각 모델의 외부표정요소 추정의 성능이 유사하게 나타났으나 인접 영상에 센서모델을 적용해본 결과 위성의 위치 및 자세의 상수항을 미지수로 사용하는 궤도-자세각 모델이 가장 정확한 것으로 나타났다.

핵심어 : 센서모델, 번들조정, 궤도기반모델

1. 서 론

인공위성을 통하여 우주공간에서 지표면의 정확한 위치정보 및 속성정보를 취득하는 방식이 현재 여러 선진국에서 보편화되고 있고 또한 많은 나라에서 이와 관련된 기술들을 개발 중에 있다. 특히 1999년에 IKONOS 위성

이 발사된 이래 여러 나라에서 고해상도 영상을 취득할 수 있는 위성시스템의 개발을 추진하고 있다. 우리나라도 1999년에 다목적실용위성 1호를 발사하였고 가까운 미래에 1m 해상도의 고해상도 위성영상을 취득할 수 있는 다목적실용위성 2호를 발사하게 될 예정이다.

인공위성영상을 이용하기 위한 여러 과정 중에서 가장

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

필수적인 과정의 하나로 영상의 각 픽셀과 지상좌표를 연계시키는 정확한 센서모델을 수립하는 과정이 있다. 이 과정은 위성영상에서 얻을 수 있는 위치정확도를 좌우하는 중요한 과정으로 위성영상으로부터 센서모델을 수립하기 위한 연구가 여러 측면에서 연구되어 왔다. 이제까지 제시된 대표적인 위성영상 센서모델들은 크게 물리적 모델과 일반적 모델로 나눌 수 있다(McGlone, 1996; 김태정 등, 2000). 물리적 모델에는 항공영상의 공선방정식을 위성영상에 맞도록 변형한 모델¹⁾(Gugan and Dowman, 1988), 위성의 궤도 및 자세각도를 이용한 모델²⁾ 등이 있다(Radhadevi et al., 1998; 김태정, 2005). 일반적 모델에는 중심투영방식으로 촬영된 영상의 직접선형변환 모델을 위성영상에 맞게 변형한 모델(Gupta and Hartley, 1997)과 유리함수식을 사용하는 유리함수모델(Dial and Grodecki, 2002) 등이 있다.

그러나, 대부분의 기존 연구들에서는 센서모델이 주어진 기준점을 얼마나 잘 만족하도록 파라미터를 조정할 수 있는지의 여부(변들조정 정확도), 또는 센서모델 수립 후의 기준점의 지상좌표가 얼마나 측정치와 일치하는지의 여부(지상위치 정확도)만을 척도로 삼아왔다. 이는 기존의 센서모델 수립방식이 단위 위성영상으로부터 기준점을 측정하여 해당 영상에 대한 센서모델을 수립하였기 때문이다. 그러나 이러한 방식은 매 위성영상마다 정밀하게 측정된 기준점이 필요하게 되므로 시간과 비용이 증가하게 된다. 더욱이, 이러한 방식은 정밀한 기준점을 측정할 수 없는 지역을 촬영한 위성영상의 활용도를 현저히 떨어뜨린다.

최근의 연구에서는 기존의 센서모델 분석방식과 달리, 센서모델의 수립을 통해서 추정되는 외부표정요소, 즉 위성의 위치 및 자세값이 얼마나 정확하게 추정되는지를 다목적실용위성 1호기 전자광학카메라(Electro-Optical Camera, EOC) 영상을 이용하여 분석한 바 있다(김태정, 2005). 그 결과 동일한 변들조정 정확도를 보이는 위치-회전각 모델과 궤도-자세각 모델에 있어서 외부표정요소의 정확도는 크게 달랐음을 알 수 있었다. 그리고 궤도-자세각 모델이 더 정확한 외부표정요소를 추정할 수 있는 모델임을 알 수 있었다. 그러나 이 연구에서는 연구대상을 EOC 영상으로 한정하였으므로 다른 위성영상에 성급히 일반화시킬 수 없었다.

이 논문에서는 선행연구에 이어서 SPOT 위성영상을 이용하여 위치-회전각 모델과 궤도-자세각 모델의 성능을 분석하고자 한다. 이 논문에서도 센서모델의 성능을 변들조정 정확도와 함께 외부표정요소 추출의 정확도를 이용하여 분석하려고 한다. 특히, 이 논문에서는 외부표정요소 추출의 정확도를 분석하는 방법의 하나로, 한 영상을 기준으로 수립된 센서모델을 동일 궤도에서 촬영한 인접영상에 적용하여 그 정확도를 분석하기로 한다. 만약 센서모델을 통해서 추출된 외부표정요소가 정확하다면 인접한 다른 영상에서도 센서모델이 정확하게 동작할 것이기 때문이다. 만약 그러하다면, 하나의 영상에서 추출된 기준점을 이용하여 동일 궤도상에서 촬영한 여러 영상의 처리가 가능할 것이다. 또한 이러한 방식은 위성영상을 이용한 지형정보 취득 비용을 절감하고 기준점을 취득할 수 없는 지역에서의 위성영상 활용을 가능하게 할 것이다.

다음 장에서는 먼저 실험에 사용하게 될 두 물리적 센서모델을 간략하게 비교설명하고 선행연구에서 밝혀진 EOC 영상에서의 실험결과를 요약한다. 그리고 SPOT 위성영상을 이용한 새로운 분석이 필요한 이유를 언급하기로 한다.

2. 기본이론

2.1 위치-회전각 모델과 궤도-자세각 모델

푸시부름 방식으로 촬영한 위성영상의 촬영기하학을 설명하기 위하여 여러가지 모델이 개발되었다. 이중 가장 대표적인 모델로 항공영상의 센서모델로 사용한 공선방정식(ASPRS, 2004)을 변형한 모델이 있다. Gugan and Dowman(1988)은 항공영상용으로 개발된 공선방정식을 아래와 같이 변형하여 이를 푸시부름방식 위성영상의 센서모델로 제시하였다.

$$x = 0 = -f \frac{r_{11}(X - X_S) + r_{21}(Y - Y_S) + r_{31}(Z - Z_S)}{r_{13}(X - X_S) + r_{23}(Y - Y_S) + r_{33}(Z - Z_S)}$$

$$y = -f \frac{r_{12}(X - X_S) + r_{22}(Y - Y_S) + r_{32}(Z - Z_S)}{r_{13}(X - X_S) + r_{23}(Y - Y_S) + r_{33}(Z - Z_S)}$$

위의 수식에서 (x, y) 는 영상좌표³⁾, (X, Y, Z) 는 지상좌표를 의미하며 (X_S, Y_S, Z_S) 는 위성의 위치를 나타내는 외부표정요소, $r_{11} \sim r_{33}$ 은 영상좌표계를 지상기준좌표

1) 이 논문에서는 위치-회전각 모델로 칭함.
2) 이 논문에서는 궤도-자세각 모델로 칭함.

3) 이때 영상의 진행방향은 x 축방향이며 CCD소자의 방향은 y 축방향이다.

계에 일치하도록 하는 회전이동행렬의 계수이다. 이 회전 이동행렬은 흔히 x, y, z 축을 기준으로 회전이동하는 회전각(또는 오일러각) ω, ϕ, κ 로 표현한다. 즉, 위의 모델의 경우 외부표정요소는 센서의 위치에 해당하는 (X_s, Y_s, Z_s) 및 회전각에 해당하는 ω, ϕ, κ 로 표현된다. 위의 수식을 행렬의 형태로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ -f \end{pmatrix} = \lambda \mathbf{R}^T \begin{pmatrix} X - X_s \\ Y - Y_s \\ Z - Z_s \end{pmatrix} \quad (1)$$

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

$$\begin{aligned} X_s &= X_0 + a_1 t + b_1 t^2 \\ Y_s &= Y_0 + a_2 t + b_2 t^2 \\ Z_s &= Z_0 + a_3 t + b_3 t^2 \\ \kappa_s &= \kappa_0 + a_4 t + b_4 t^2 \\ \phi &= \phi_0 + a_5 t + b_5 t^2 \\ \omega &= \omega_0 + a_6 t + b_6 t^2 \end{aligned} \quad (2)$$

위의 설명한 모델은 주로 사진측량분야에서 사용된 모델이며 해석도화기 및 수치도화기의 위성영상 센서모델로 구현되어 사용되어 왔다(Gagan and Dowman, 1988; Konecny et al., 1987).

그러나 위 모델은 큰 제한요인이 있다. 그것은 위치-회전각 모델에 사용한 ω, ϕ, κ 가 실제 궤도상의 위성의 자세를 설명해주지 못하는 임의의 좌표축을 기준으로한 회전각일 뿐이라는 것이다. 실제 위성자세제어의 기준이 되는 궤도좌표계는 위성의 위치벡터 및 속도벡터에 의해서 정의되는 시간에 따라 변하는 좌표계이며 위성의 자세각(Roll, Pitch, Yaw)은 이 궤도기준좌표계와 실제 위성기준좌표계 간의 회전이동각을 의미하기 때문이다(SPOT Image, 2002). 따라서 위치-회전각 모델은 위성의 위치벡터, 속도벡터 및 각도 Roll, Pitch, Yaw로 표현되는 위성의 자세를 ω, ϕ, κ 로 단순화시켰으며 따라서 엄밀한 의미의 물리적 모델로 볼 수 없다(김태정, 2005). 위성의 궤도좌표계와 자세각에 기반한 센서모델을 간단하게 행렬의

형태로 표시하면 수식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ -f \end{pmatrix} = \lambda \mathbf{R}_{py}^T \mathbf{R}_{p,v}^T \begin{pmatrix} X - X_s \\ Y - Y_s \\ Z - Z_s \end{pmatrix} \quad (3)$$

수식 (3)에서 f 는 센서의 초점거리, λ 는 축척계수이고 \mathbf{R}_{py} 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. 위의 식은 영상좌표계와 지상기준좌표계와의 관계를 위성의 위치벡터, 속도벡터 및 위성의 자세각의 9개의 파라미터로 의해서 결정되게 된다.

수식 (3)에서 \mathbf{R}_{py} 는 자세각의 회전순서와 회전축의 정의에 따라 위성별로 다르게 나타난다. SPOT위성의 경우는 Yaw각, Roll각, Pitch각 순서로 회전이동하는 3-2-1 시스템이다(SPOT Image 2002). 또한 $\mathbf{R}_{p,v}$ 는 위성별로 고유하게 정의된 위성의 궤도좌표계의 정의에 따라 다르게 표시된다. SPOT 위성의 궤도좌표계는 위성의 위치벡터 방향을 Z 축, Z 축과 속도벡터의 수직성분을 X 축, 나머지 한축을 Y 축으로 정의하고 있다(SPOT Image, 2002).

$$\mathbf{R}_{py} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos P & \sin P \\ 0 & -\sin P & \cos P \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos R & 0 & -\sin R \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin R & 0 & \cos R \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \Psi & -\sin \Psi & 0 \\ \sin \Psi & \cos \Psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{R}_{p,v} = \begin{pmatrix} X_x & Y_x & Z_x \\ X_y & Y_y & Z_y \\ X_z & Y_z & Z_z \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} Z_x \\ Z_y \\ Z_z \end{pmatrix} = \mathbf{Z} = \frac{\mathbf{P}}{\|\mathbf{P}\|}, \quad \begin{pmatrix} X_x \\ X_y \\ X_z \end{pmatrix} = \mathbf{X} = \frac{\mathbf{V} \times \mathbf{Z}}{\|\mathbf{V} \times \mathbf{Z}\|}, \quad \begin{pmatrix} Y_x \\ Y_y \\ Y_z \end{pmatrix} = \mathbf{Y} = \frac{\mathbf{Z} \times \mathbf{X}}{\|\mathbf{Z} \times \mathbf{X}\|}$$

위의 식에서 $\mathbf{R}, \mathbf{P}, \Psi$ 는 각각 위성의 Roll각, Pitch각 및 Yaw각이며 (V_x, V_y, V_z) 는 속도벡터 \mathbf{V} 를 나타낸다.

궤도-자세각 모델에서 위성의 위치벡터와 속도벡터는 아래의 수식과 같이 시간 t 또는 영상좌표 x 에 대한 2차식으로 모델링할 수 있다. 위성의 자세는 위성의 고유한 자세제어방식에 따라 모델하여야 하며 여기서는 구간선형(Piecewise-linear)으로 모델한다(SPOT Image, 2002).

$$\begin{aligned} X_s &= X_0 + a_1 t + b_1 t^2 \\ Y_s &= Y_0 + a_2 t + b_2 t^2 \\ Z_s &= Z_0 + a_3 t + b_3 t^2 \end{aligned}$$

4) 따라서 이 논문에서는 이 모델을 “위치-회전각”모델로 부르고 한다.

5) 따라서 이 논문에서는 이 모델을 “궤도-자세각”모델로 부르고 한다.

$$\begin{aligned}
 V_x &= V_{x0} + a_4 t + b_4 t^2 \\
 V_y &= V_{y0} + a_5 t + b_5 t^2 \\
 V_z &= V_{z0} + a_6 t + b_6 t^2
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

2.2 EOC 영상 실험결과 및 새로운 실험의 필요성

선행연구에서 EOC영상을 이용하여 위치-회전각 모델과 궤도-자세각 모델의 성능을 비교하였다. 성능 비교는 각 모델의 변들조정 정확도와 외부표정요소 추출의 정확도로 분리하여 고찰하였다. 그 결과, 위치-회전각 모델은 높은 변들조정 정확도를 보이는 반면 이 모델을 통해서 추정되는 외부표정요소들은 상당한 에러가 포함되어 있음을 실험적으로 밝힐 수 있었다. 이는 위치-회전각 모델에서 사용하는 회전각이 실제 위성의 위치, 속도 및 자세각으로 표현되는 물리적 특성을 단순화하였기 때문에 발생하는 현상으로 설명할 수 있었다. 이 반면 궤도-자세각 모델의 경우는 위치-회전각 모델과 유사한 변들조정 정확도를 보이면서도 높은 외부표정요소 추출의 정확도를 보였다. 실험결과, 센서모델 수립의 목적이 변들조정정확도 뿐만 아니라 외부표정요소 추출의 정확도에도 있다면 위치-회전각 모델 대신에 궤도-자세각 모델을 사용해야 할 것으로 나타났다.

그러나 선행연구결과에서는 여러 궤도-자세각 모델의 계수 중에서 어떠한 계수를 최적의 미지수로 사용해야 하는지의 여부와 궤도-자세각 모델로 추정되는 외부표정요소가 얼마나 참값에 가까운지에 대한 척도를 제시하지 못하였다. 또한 선행연구결과는 SPOT영상을 이용하여 수행한 여러 기존 연구들(Gugan and Dowman, 1988; Orun and Natarajan, 1994)의 결과와 상반된 결론에 도달하였는데 이에 대한 분석이 다소 부족하였다.

따라서 이 논문에서는 SPOT 위성영상을 이용하여 위치-회전각 모델과 궤도-자세각 모델을 비교한다. 그리고 두 모델에 의해서 추정되는 외부표정요소가 얼마나 참값에 가까운지를 판별하기 위한 분석방식으로 한 영상에서 수립한 센서모델을 동일 궤도상에서 촬영한 인접 영상에 적용하기로 한다. 다음 절에서 SPOT영상을 이용한 실험결과를 기술한다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 실험자료 및 실험과정

실험을 위해서 대전 및 전주지역을 촬영한 두개의 SPOT

영상 스트립을 사용하였다. 각각의 스트립은 두장의 영상으로 구성되며 두 스트립은 서로 스테레오 영상을 구성한다. 표 1에 실험에 사용한 영상의 특성을 간략히 정리하였다. 실험을 위하여 총 52개의 지상기준점을 GPS 측량에 의하여 취득하여 사용하였다. 대전지역 영상에 해당하는 기준점은 27개이며 이중, 14개는 센서모델 수립에 사용하였고 나머지 13개는 센서모델의 정확도를 분석하는 용도로만 사용하였다. 전주지역에 해당하는 기준점들은 수립된 대전지역 센서모델을 전주지역에 적용하였을 때의 정확도를 분석하기 위한 목적으로 사용하였다.

위치-회전각 모델과 궤도-자세각 모델의 비교를 위해서 먼저 두 모델을 구성하는 파라미터 중에서 미지수에 해당하는 파라미터를 다양한 방식으로 정의하였다. 이 과정은 동일한 모델식으로 표현되더라도 추정하는 파라미터의 선정에 따라서 모델의 특성이 매우 바뀌는 특성에 기인한다. 실제 많은 기존연구에서 다양한 종류의 미지수가 제안되었다(Gugan and Dowman, 1988; Orun and Natarajan, 1994; Radhadevi et al., 1998). 표 2에 실험에 사용한 각 모델에서의 미지수 조합을 나타낸다. 표 2에서 사용한 기호는 수식 (2)와 (4)에 나타난 계수를 의미한다.

결정된 미지수는 위치-회전각 모델과 궤도-자세각 모델에서 서로 대응되는 의미를 가지는 미지수의 조합을 가지도록 선정하였다. 즉 PR-1 모델의 경우는 미지수로 위성의 위치, 위치 변화를 및 위치 가속도항과 회전각을 미지수로 정의하였으므로 PR-1에 대응되는 OA-1 모델은 미지수로 위성의 위치, 위치 변화를 및 위치 가속도 항과 자세각을 미지수로 정의하였다. PR-1에서 선택한 미지수 조합은 Gugan and Dowman(1988)이 제안한 모델과 유사한 모델이다.

PR-2은 PR-1의 미지수 중에서 자세각 대신 κ 각, κ 각 변화율 및 κ 각 가속도항을 미지수로 모델한 것으로 Orun and Natarajan(1994)이 제안한 모델이다. OA-2는 이 모델에 대응하여 κ 각 대신 Yaw각, Yaw각 변화율 및 Yaw

표 1. 실험에 사용한 SPOT 영상 스트립의 특징

ID	Strip-1	Strip-2
Satellite	SPOT3	SPOT3
Date of Acquisition	4 April 1995	28 Jan 1995
Tilt Angle	+19.8°	-23.4°
No of GCPs (Daejeon)	27	27
No of GCPs (Jeonju)	25	25

표 2. 실험에 사용한 위치-회전각 모델 및 궤도-자세각 모델에서의 미지수 종류

위치-회전각모델	미지수	궤도-자세각모델	미지수
PR-1	$X_0, a_1, b_1, Y_0, a_2, b_2, Z_0, a_3, b_3, \kappa_0, \phi_0, \omega_0$	OA-1	$X_0, a_1, b_1, Y_0, a_2, b_2, Z_0, a_3, b_3, R_0, P_0, \Psi_0$
PR-2	$X_0, a_1, b_1, Y_0, a_2, b_2, Z_0, a_3, b_3, \kappa_0, a_4, b_4$	OA-2	$X_0, a_1, b_1, Y_0, a_2, b_2, Z_0, a_3, b_3, \Psi_0, a_0, b_0$
PR-3	$X_0, a_1, b_1, Y_0, a_2, b_2, Z_0, a_3, b_3$	OA-3	$X_0, a_1, b_1, Y_0, a_2, b_2, Z_0, a_3, b_3$
PR-4	$\kappa_0, a_4, b_4, \phi_0, a_5, \omega_0, a_6, b_6$	OA-4	$R_0, \dot{R}, \ddot{R}, P_0, \dot{P}, \ddot{P}, \Psi_0, \dot{\Psi}, \ddot{\Psi}$
PR-5	$X_0, Y_0, Z_0, \kappa_0, \phi_0, \omega_0$	OA-5	$X_0, Y_0, Z_0, R_0, P_0, \Psi_0$
PR-6	X_0, Y_0, Z_0	OA-6	X_0, Y_0, Z_0
PR-7	$\kappa_0, \phi_0, \omega_0$	OA-7	R_0, P_0, Ψ_0

각 가속도항을 미지수를 결정한 모델이다. PR-3와 OA-3는 위성의 위치정보에만 에러가 있고 위성의 자세각에는 에러가 없다고 가정하고 위성의 위치, 위치 변화율 및 위치 가속도항을 미지수로 모델한 것이다. PR-4와 OA-4는 위치 정보에는 에러가 없고 자세정보에만 에러가 있다고 가정한 모델로 회전각 또는 자세각, 이의 변화율 및 가속도항을 미지수로 결정하였다.

PR-5는 위성의 위치 및 회전각에 존재하는 에러가 시간에 대해서 변화하지 않는 상수항 만이라고 가정한 모델이다. OA-5는 Radhadevi et al.(1998)의 모델과 유사하게 위성의 위치 및 자세각에 존재하는 에러가 시간에 대해 변하지 않는 상수항만으로 가정한 모델이다. PR-6과 OA-6은 위성 위치의 상수항만 미지수라고 가정한 모델이며, PR-7 및 OA-7은 각도의 상수항만 미지수로 가정한 모델이다. 실험을 위해서는 먼저 위치-회전각 모델과 궤도-자세각 모델을 구성하는 계수들의 초기값을 영상과 함께 제공되는 위성체 위치, 속도 및 자세각 등과 같은 메타데이터로부터 계산한다. 각 모델을 구성하는 계수들 중에서 미지수가 아닌 계수들은 계산된 초기값을 그대로 사용하게 되며, 미지수에 해당되는 계수들은 기준점을 이용하여 번들조정과정을 거쳐 새로운 값으로 추정하게 된다.

3.2 단일 영상 내에서의 실험결과

위에서 제시한 다양한 미지수의 조합을 가지는 모델들을 대상으로 대전지역에서 취득된 14개의 기준점을 이용하여 센서모델을 수립하고, 대전지역의 나머지 13개 기준점을 이용하여 모델의 정확도를 검사하는 실험을 실시하였다. 표 3과 4에서 위치-회전각 모델과 궤도-자세각 모델의 성능을 비교하고 있다. 표에서 “모델점 에러”는 센서모델의 수립에 사용한 14개 기준점에 대한 센서모델의 에러이며 “검사점 에러”는 센서모델의 수립에 사용하지

않은 13개 기준점에 대한 센서모델의 에러이다. 모델점 에러와 검사점 에러는 수립된 센서모델에 기준점의 지상 좌표를 적용하여 계산된 영상좌표와 원래의 기준점의 영상좌표의 차이를 계산하여 산출하였다. 센서모델에 표에서 “위치/자세에러”는 번들조정 전에 위성영상에서 제공된 메타데이터를 통해 얻을 수 있는 영상 중심라인에서의 위성의 위치/자세각도와 번들조정 후에 추정된 위치의 위치/자세각도의 차이값에 해당된다. 위성영상과 함께 제공된 메타데이터에 기록되어 있는 위성의 위치 및 자세각의 오차범위가 일반적으로 알려져 있으므로(SPOT Image, 2002) 이 차이값을 추정된 외부표정요소의 정확도를 간접적으로 나타낼 수 있는 척도로 사용하였다.

표 3과 4를 살펴보면, 대부분의 경우에 위치-회전각 모델과 궤도-자세각 모델은 거의 유사한 성능을 나타내고 있다. 상대적으로 단순한 모델인 PR-5~PR-7과 이에 대응되는 OA-5~OA-7 모델을 제외한다면 위치-회전각 모델과 궤도-자세각 모델은 거의 동일한 모델점 에러와 검사점 에러를 나타냈으며 특히, 번들조정으로 추정되는 위치/자세에러의 크기도 거의 유사하였다.

이러한 결과는 선행연구에서 EOC 영상을 이용하여 밝힌 두 모델의 차이점과는 매우 상반된 결과이다. 참고로 EOC 영상을 이용한 실험결과 중의 일부를 표 5에 밝힌다(김태정, 2005). EOC 영상을 이용한 실험에서는 두 모델이 유사한 모델점 에러 및 검사점 에러를 보였으나 위치/자세각의 추정에 있어서는 현저한 차이를 보였었다.

이렇게 SPOT 영상과 EOC 영상을 이용한 실험에서 두 모델의 성능이 크게 차이를 보이는 원인은 두 위성영상의 자세제어 방식과 센서모델 수립 시의 내부표정방식에 밀접한 연관이 있고 생각된다. SPOT 위성영상은 위성체가 지구중심을 바라보도록 제어하면서 카메라 앞에 장착된 거울을 이용하여 원하는 방향으로 촬영을 할 수 있는 거

표 3. 위치-회전각 모델의 성능비교

Model ID	Strip-1 상의 대진영상			Strip-2 상의 대진영상		
	모델점에러 (rms, pixels)	검사점에러 (rms, pixels)	위치/자세에러	모델점에러 (rms, pixels)	검사점에러 (rms, pixels)	위치/자세에러
PR-1	0.788	1.173	10km, 0.67°	1.137	1.810	84.3km, 5.78°
PR-2	0.780	1.142	1.5km, 0.07°	1.185	1.749	1.1km, 0.08°
PR-3	1.607	2.371	0.7km	1.925	2.396	1.4km
PR-4	1.247	1.738	0.06°	1.335	1.687	0.08°
PR-5	2.392	2.775	13.8km, 0.99°	17.331	16.414	42.4km, 2.60°
PR-6	3.303	3.485	0.6km	17.613	16.219	1.4km
PR-7	2.921	3.315	0.06°	17.624	16.210	0.07°

표 4. 궤도-자세각 모델의 성능비교

Model ID	Strip-1 상의 대진영상			Strip-2 상의 대진영상		
	모델점에러 (rms, pixels)	검사점에러 (rms, pixels)	위치/자세에러	모델점에러 (rms, pixels)	검사점에러 (rms, pixels)	위치/자세에러
OA-1	0.785	1.189	4.9km, 0.30°	1.117	1.790	87.2km, 5.39°
OA-2	0.775	1.354	0.80km, 0.04°	1.161	1.738	1.6km, 0.05°
OA-3	1.604	2.388	0.76km	1.965	2.462	1.5km
OA-4	1.246	1.744	0.06°	1.329	1.687	0.09°
OA-5	0.926	1.239	1.4km, 0.06°	1.449	1.728	4.1km, 0.22°
OA-6	1.771	2.252	0.76km	2.234	2.415	1.4km
OA-7	1.377	1.486	0.06°	1.715	1.762	0.08°

표 5. EOC 영상을 이용한 위치-회전각 모델과 궤도-자세각 모델의 성능비교

Model ID	EOC 논산영상 (좌측) 실험결과			EOC 논산영상 (우측) 실험결과		
	모델점에러 (rms, pixels)	검사점에러 (rms, pixels)	위치/자세에러	모델점에러 (rms, pixels)	검사점에러 (rms, pixels)	위치/자세에러
PR-1	0.490	0.910	305km, 2°	0.549	0.872	270km, 4°
PR-2	0.461	0.795	290km, 0.1°	0.634	0.864	280km, 0.1°
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°

울회전(Mirror-Tilt)방식을 채택하고 있다(SPOT Image, 2002). 따라서 표 1에서 밝힌 바와 같이 비록 영상 자체는 경사각을 가지고 촬영을 하여도 이때의 위성의 자세각 Roll, Pitch, Yaw는 거의 0에 가까운 값이 된다. SPOT 영상의 경우, 거울의 회전각에 따른 시선의 변이는 내부표정과정에서 반영하여 영상좌표 (x, y)에 적용하게 된다 (SPOT Image, 2002). 표 6은 실험에 사용된 SPOT-3 대진영상의 시작라인, 중심라인 및 끝 라인에서의 위성의 자세각을 나타내고 있다. 표에 나타났듯이 자세각은 거의 0에 가까운 값을 확인할 수 있다. 반면 EOC 영상의 경

우는 원하는 지역을 촬영하기 위해서 위성체 자체를 회전시키는 몸통회전(Body-Tilt)방식을 사용하고 있다. 표 5에 사용한 좌우 논산영상의 경우 Roll 각도가 각각 19° 및 -12°에 해당된다. EOC영상의 경우, 몸통회전각에 따른 시선의 변이는 내부표정과정에서 반영되지 않고 자세각을 이용하여 직접 회전이동행렬에 적용하게 된다.

이러한 두 영상에서의 자세각도 차이는 센서모델에 상당한 영향을 미치게 된다. SPOT 위성영상의 경우 자세각이 0에 가까우므로 수식 (3)에서 자세각에 따른 회전이동행렬 R_{rpy} 가 거의 단위행렬(Identity Matrix)에 가깝게 된

표 6. SPOT 대전영상에서의 자세각

	Strip-1 상의 대전영상			Strip-2 상의 대전영상		
	Roll각	Pitch각	Yaw각	Roll각	Pitch각	Yaw각
시작라인	-1.00E-8°	-2.27E-7°	0.00E-7°	1.23E-7°	-6.96E-7°	-1.23E-7°
중심라인	1.16E-5°	-1.22E-4°	-1.01E-6°	2.46E-5°	6.28E-4°	5.20E-5°
끝라인	7.31E-5°	-1.42E-5°	-2.62E-5°	-1.46E-4°	2.05E-5°	1.51E-4°

다. 따라서 수식 (3)으로 표현되는 궤도-자세각 모델과 수식 (1)로 표현되는 위치-회전각 모델은 거의 동일한 모델이 된다. 반면 EOC영상의 경우는 자세각이 0이 아닌 큰 각도를 가지므로 R_{xy} 행렬이 상당히 중요하게 된다. 이 경우에는 수식 (1)로 표현되는 위치-회전각 모델은 실제 위성의 자세각 및 궤도로 표현되는 특성을 설명할 수가 없게 되어 결과적으로 위치 및 자세각 추정에 큰 왜곡이 발생하게 된다. 이러한 분석은 표 3과 4에서 나타났듯이 SPOT영상의 경우 두 모델의 성능이 거의 동일했던 결과와 표 5에나 나타났듯이 EOC영상의 경우 두 모델의 성능이 현저하게 차이가 났던 결과를 잘 뒷받침해준다. 아울러 이러한 분석은 기존의 SPOT 위성영상을 이용한 연구들에서 위치-회전각 모델을 성공적으로 사용했던 결과들도 잘 뒷받침해준다(Gugan and Dowman, 1998; Orun and Natarajan, 1994).

위성의 위치 및 각도의 상수항 만을 미지수로 하는 PR-5와 OA-5, 위성의 위치의 상수항 만을 미지수로 하는 PR-6와 OA-6, 위성의 자세각의 상수항 만을 미지수로 하는 PR-7과 OA-7의 경우 두 모델에서 추정된 위치/자세각의 정확도는 유사하였다. 그러나 궤도-자세각 모델에서는 OA-5~OA-7의 모델점 에러 및 검사점 에러가 다른 모델의 에러와 유사하게 나타났으나 위치-회전각 모델에서는 PR-5~PR-7의 모델점 에러 및 검사점 에러가 다른 모델의 에러보다 현저하게 나빠졌다. 이러한 현상의 원인으로서는 실제 구간선형 특성을 보이는 SPOT 위성영상의 자세각을 위치-회전각 모델에서는 시간에 대한 2차식을 사용하게 되어 발생한 결과로 추정된다. PR-5~PR-7에서와 같이 시간에 대한 상수항 만을 미지수로 추정하게 되면 추정된 자세각이 실제 자세각과 차이를 보이게 되는 반면 PR-1~PR-4에서와 같이 시간에 대한 2차항을 미지수로 추정하게 되면 그 차이가 감소되도록 미지수 항이 조절되기 때문이다. 이는 특히 PR-1과 PR-2, 그리고 OA-1과 OA-2 모델과 같이 가장 많은 개수의 미지수를 가지는 모델에서 가장 높은 정확도를 보이는 것을 통해서도 확인할

수 있다. 이러한 분석은 기존의 연구들에서 SPOT 위성영상의 위치-회전각 모델로 시간에 대한 2차항이 포함된 미지수를 가지는 모델을 제안했던 사실을 잘 뒷받침한다(Gugan and Dowman, 1988; Orun and Natarajan, 1994).

SPOT 대전영상을 이용한 실험결과는 다음과 같이 분석되었다.

- SPOT 위성영상과 같이 거울회전방식으로 촬영한 하나의 영상을 모델링하는 경우는 위치-회전각 모델과 궤도-자세각 모델이 번들조정 정확도 및 외부표정요소 추정의 정확도에서 거의 유사한 성능을 보였다. 이 경우, 높은 번들조정 정확도를 위해서는 위치에 대한 2차항 및 각도 또는 위치에 대한 2차항 및 Yaw 각에 대한 2차항을 미지수로 하는 모델을 사용해야 한다.
- EOC 위성영상과 같이 몸통회전방식으로 촬영한 하나의 영상을 모델링하는 경우, 위치-회전각 모델과 궤도-자세각 모델의 번들조정 정확도는 유사하나 외부표정요소 추정의 정확도는 궤도-자세각 모델이 훨씬 좋은 성능을 보였다. 번들조정 정확도 만을 위해서는 두 모델을 모두 사용할 수 있으나 외부표정요소 추정이 센서모델의 목적이려면 궤도-자세각 모델을 사용해야 한다.

다음 절에서 외부표정요소 추정의 정확도에 대해서 보다 더 상세히 기술한다.

3.3 인접 영상에 센서모델 적용결과

앞절에서 SPOT 위성영상의 경우는 거울회전방식으로 촬영되기 때문에 위치-회전각 모델과 궤도-자세각 모델에서 유사한 외부표정요소 추정의 정확도를 보이는 것으로 나타났다. 이때 정확도 분석에 사용한 척도는 위성영상의 메타데이터에서 제공되는 위성의 위치/자세각과 번들조정후에 추정된 위치/자세각의 차이값이다. 그러나 앞서 언급한 바와 같이 이 수치는 절대적인 정확도를 제공해주지는 못한다. 그러나 영상 촬영당시의 위성의 위치와 자

표 7. 인접영상에서의 센서모델 정확도

Model ID	Strip-1 상에서의 정확도		Strip-2 상에서의 정확도	
	위치-회전각모델 에러 (rms, pixels)	궤도-자세각모델 에러 (rms, pixels)	위치-회전각모델 에러 (rms, pixels)	궤도-자세각모델 에러 (rms, pixels)
PR-1/OA-1	7.653	8.186	9.940	8.285
PR-2/OA-2	9.817	9.855	13.688	12.381
PR-3/OA-3	11.920	12.329	15.467	14.580
PR-4/OA-4	11.630	11.440	10.282	8.885
PR-5/OA-5	42.131	1.782	221.279	3.874
PR-6/OA-6	41.557	2.429	227.636	4.648
PR-7/OA-7	40.970	1.906	227.990	1.551

세각의 참값을 알기 어렵기 때문에 절대적인 정확도를 분석하기는 쉽지 않은 일이다. 이 논문에서는 추정된 외부표정요소의 정확도를 검증하는 방안으로 한 영상에서 수립된 센서모델을 인접한 다른 영상에 적용해보기로 한다. 만약 추정된 외부표정요소가 정확하다면 인접한 다른 영상에서도 센서모델의 정확도가 높을 것이기 때문이다.

앞절에서 설명한 대로 대전영상에 대해서 수립한 여러 센서모델을 인접한 영상인 전주영상에 적용하였다. 즉, 대전영상의 14개의 모델점을 이용하여 센서모델을 수립한 후, 이를 전주영상의 기준점에 적용하여 센서모델의 정확도를 분석하였다. 표 7에 각 모델별 전주영상에서의 정확도를 정리하였다.

대전영상의 기준점으로 수립한 센서모델을 인접한 전주영상에 적용한 결과는 앞절에서 설명한 단일 영상에서의 결과와는 다르게 나타났다. 위치 또는 자세의 2차항을 미지수로 사용한 PR-1~PR-4 및 OA-1~OA-4 모델의 경우는 서로 간의 정확도는 유사하게 나타나나 대전영상에서의 정확도에 비해서는 상당히 정확도가 떨어진 것으로 나타났다. 즉 위치-회전각 모델과 궤도-자세각 모델 모두에서 외부표정요소 추정의 정확도는 그다지 높지 않은 것을 알 수 있다.

위치 또는 자세의 상수항만을 미지수로 사용하는 상대적으로 단순한 모델(PR-5~PR-7 및 OA-5~PA-7)에 있어서는 앞서 비교한 모델들과는 매우 다른 결과를 나타냈다. 이 경우, 위치-회전각 모델의 정확도는 매우 떨어지는데 반해서 궤도-자세각 모델의 정확도는 상대적으로 매우 정확하게 나타났다. 특히 OA-7모델의 경우는 전주시역에 대한 센서모델의 정확도가 대전지역의 검사점 에러와 거의 유사하게 나타났다. 즉, 위치 또는 자세의 상수항만을 미지수로 사용하는 경우에는 궤도-자세각 모델이 훨

씬 더 우수한 성능을 보였으며 자세의 상수항만을 미지수로 사용하는 궤도-자세각 모델에서 추정된 외부표정요소가 가장 높은 정확도를 보였음을 알 수 있다.

SPOT 대전영상에서 수립한 여러 센서모델들을 인접 영상인 전주영상에 적용한 결과 다음과 같이 분석되었다.

- 위치 또는 자세의 2차항을 미지수로 사용하는 상대적으로 복잡한 모델의 경우는 위치-회전각 모델 및 궤도-자세각 모델이 모두 유사한 성능을 보였으나 이러한 모델에서 추정된 외부표정요소의 정확도는 높지 않았다. 즉, 위치 또는 자세의 2차항을 추정하는 경우에는 미지수가 참값으로 추정되기 보다는 주어진 기준점을 만족하기 위한 방향으로 추정되어 실제 참값에서 왜곡되었다고 판단할 수 있었다.
- 위치 또는 자세의 상수항만을 미지수로 사용하는 상대적으로 단순한 모델의 경우는 위치-회전각 모델은 정확도가 매우 떨어지는 반면, 궤도-회전각 모델은 상당히 정확한 결과를 나타내었다. 특히 자세의 상수항만을 미지수로 모델한 궤도-회전각 모델에서 추정하는 외부표정요소의 정확도가 가장 높은 것으로 판단할 수 있었다.

4. 결 론

이제까지 이 논문에서 SPOT 위성영상을 이용하여 위성의 위치 및 회전각에 기반한 센서모델과 위성의 궤도 및 자세각에 기반한 센서모델의 성능을 여러 측면에서 비교하였으며 또한 실험결과를 EOC 영상을 이용한 결과와 비교하였다. 그 결과 센서모델 수립의 목적이 번들조정 정확도에만 있다면 위성의 위치 및 자세의 2차항을 미지수로 모델하는 위치-회전각 모델과 궤도-자세각 모델을

모두 사용할 수 있음을 알 수 있었다. 또한 SPOT 위성영상과 같이 거울회전방식을 사용하는 위성영상에 있어서 단일영상에 대해서는 위치-회전각 모델과 궤도-자세각 모델의 외부표정요소 추정의 성능이 유사하게 나타났으나 인접 영상에 센서모델을 적용해본 결과 위성의 위치 및 자세의 상수항을 미지수로 사용하는 궤도-자세각 모델이 가장 정확한 것으로 나타났다.

감사의 글

이 논문은 2004년도 인하대학교의 지원에 의하여 연구되었음(INHA-31415).

참고문헌

- 김태정, 김승범, 신동석 (2000), 대표적 위성영상 카메라 모델링 알고리즘들의 비교연구, 대한원격탐사학회지, 제16권, 제1호, pp. 73-86
- 김태정 (2005), 선형 푸시브룸 센서모델의 변들조정 정확도 및 외부표정요소추정 정확도 분석, 한국측량학회지, 제23권, 제2호, pp. 137-145
- ASPRS, 2004, *Manual of Photogrammetry (5th Edition)*, J.C. McGlone (Editor)
- Dial, G. and Grodecki, J. (2002), Block Adjustment with Rational Polynomial Camera Models, *Proc. of ACSM-ASPRS 2002 Annual Conference*
- Gugan, 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
- 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 K. Natarajan (1994), A modified bundle adjustment software for SPOT imagery and photography: Tradeoff, *PE&RS*, 60(12):1431-1437.
- 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.

(접수일 2006. 1. 15, 심사일 2006. 2. 2, 심사완료일 2006. 2. 25)