

GOES-9 영상의 정밀기하보정을 위한 여러 센서모델 분석

허동석[†] · 김태정

인하대학교 지리정보공학과

Investigation of Sensor Models for Precise Geolocation of GOES-9 Images

Dongseok Hur[†] and Taejung Kim

Department of Geoinformatic Engineering, Inha University

Abstract : A numerical formula that presents relationship between a point of a satellite image and its ground position is called a sensor model. For precise geolocation of satellite images, we need an error-free sensor model. However, the sensor model based on GOES ephemeris data has some error, in particular after Image Motion Compensation (IMC) mechanism has been turned off. To solve this problem, we investigated three sensor models: collinearity model, direct linear transform (DLT) model and orbit-based model. We applied matching between GOES images and global coastline database and used successful results as control points. With control points we improved the initial image geolocation accuracy using the three models. We compared results from three sensor models. As a result, we showed that the orbit-based model is a suitable sensor model for precise geolocation of GOES-9 images.

Key Words : GOES-9, Sensor Model, Collinearity Equation, DLT, Orbit-Attitude Model.

요약 : 위성영상의 한 점과 그에 대응하는 지상점의 관계를 수학적으로 나타낸 것을 센서모델이라고 한다. 위성영상의 정밀기하보정을 위해서는 오차가 없는 센서모델이 필요하다. 그러나 IMC가 꺼진 상태에서 제공된 GOES-9 궤도 데이터에 기반한 센서모델은 오차가 존재한다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 공선 방정식 기반 모델, DLT 기반 모델, 궤도-자세 기반 모델의 세 가지 센서모델에 대하여 실험을 진행하였다. 실험에서는 위성영상과 해안선 데이터베이스를 정합시켜 성공한 결과를 기준점으로 사용하였다. 이렇게 선택된 기준점으로 세 가지 센서모델을 이용하여 GOES-9 영상에 적용시켜 초기 기하보정 정확도를 향상시키고 세 모델간의 정확도를 비교하였다. 최종적으로 궤도-자세 기반 모델이 GOES-9 영상의 정밀기하보정에 가장 적합한 센서 모델임을 증명하였다.

1. 개요

우리나라는 오는 2008년에 정지궤도 위성인 통신해

양기상위성을 발사할 예정이다. 통신해양기상위성을 통해 얻어지는 관측정보들은 대기, 해양 등의 연구에 활용 될 것이다. 이 관측정보의 정확한 분석을 위해서는 영상

으로부터 얻어지는 지상좌표의 위치정확도가 중요하다. 위성영상의 특정한 점에 대응하는 지상좌표의 위치를 찾는 과정을 정밀기하보정이라 부르고, 위성영상의 한 점과 그에 대응하는 지상점의 수학적 관계를 센서모델이라 부른다. 정밀기하보정과 센서모델의 정확도는 위성에서 제공되는 궤도/자세정보의 정확도와 관련이 있다.

정밀기하보정의 정확도 향상을 위해서 GOES, MTSAR-1R 등과 같은 정지궤도 위성은 '영상항법 (Image Navigation)' 이라는 과정을 포함하고 있다. 영상항법은 영상으로부터 항법에 필요한 값, 즉, 위치와 자세 값들을 결정하는 과정이다(Kamel, 1996). 정지궤도 위성인 통신해양기상위성에도 GOES나 MTSAR-1R과 마찬가지로 영상항법 과정을 포함하게 될 것이다. 하지만, GOES의 경우 Image Motion Compensation (IMC)가 작동하지 않는 상태에서 보내진 위성의 궤도/자세 정보와 ELUG문서(NOAA/NESDIS, 1998)에서 제안한 센서모델을 통하여 GOES영상의 정밀기하보정을 수행하면 오차가 크게 발생함을 알 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 중심투영 영상용 공선방정식 기반 모델, DLT 기반 모델, 궤도-자세 기반 모델 등의 세가지 센서모델을 이용한 실험을 진행하였다.

GOES는 적도 상공 35,790km를 도는 정지궤도 위성으로서 영상을 Whiskbroom 방식으로 취득한다. 본 연구에서는 이러한 방식으로 얻어진 GOES 영상을 이용한다. 하지만, 실험에 사용된 세가지 센서모델은 GOES 영상의 촬영방식인 Whiskbroom 방식이 아닌 중심투영 영상을 위한 센서모델이다. 본 연구의 목적은 중심투영 영상용으로 개발된 여러 센서모델이 Whiskbroom 방식의 영상에 적용이 가능한 지를 판별하고, 만약 가능하다면 여러 센서모델 중 가장 높은 성능을 보이는 모델을 제시하는 데에 있다. 첫 번째 목적을 위해서는 GOES영상에서 취득한 가상기준점을 이용하여 각 센서모델이 GOES 영상에도 적용이 가능하다는 것을 증명해야 한다. 두 번째 목적을 위해서는 실제 GOES 영상과 해안선 데이터와의 정합을 통해 얻어진 정합기준점을 이용하여 각 센서모델의 정확도를 분석할 것이다.

이 논문의 2절에서는 다루어지는 센서모델들에 대한 이론적인 배경에 대하여 설명을 하게 될 것이고, 3절에서는 실험자료와 실험방법 그리고 실험 결과에 대하여

기술하게 될 것이다. 마지막으로 4절에서는 실험 결과를 바탕으로 최종 결론을 내리게 될 것이다.

2. 센서모델

1) ELUG문서에서 제안한 센서 모델

ELUG문서(NOAA/NESDIS, 1998)는 GOES 위성의 데이터에 관련된 내용과 GOES 영상좌표와 지상좌표 간의 변환에 관련된 수학적 내용에 대하여 기술하고 있다. 가상기준점 생성을 위해서는 영상좌표를 지상좌표로 변환을 해야 하는데, 이를 '정변환(Forward Mapping)' 이라고 한다. 이러한 정변환은 아래 같은 과정을 거치게 된다.

- (1) 영상좌표를 기기좌표(Instrument Coordinates)로 변환
- (2) 기기좌표를 궤도좌표(Orbit Coordinates)로 변환
- (3) 궤도좌표를 지구중심좌표(Earth Centered Earth Fixed)로 변환
- (4) 지구중심좌표를 지상좌표로 변환

각 단계별 구체적인 변환 식은 ELUG문서(NOAA/NESDIS, 1998)에서 찾을 수 있다.

GOES 영상은 Whiskbroom 방식으로 촬영 되므로, 상기 모델은 이론적으로 영상의 모든 픽셀에 대하여 각각 별도의 변환 계수를 가지고 있어야 한다. 실제로는 GOES 영상 밴드 별로 8개 또는 16개의 픽셀을 조합하여 스캔 하므로 스캔 라인 별로 별도의 변환 식을 적용한다. 이러한 방식의 센서모델은 지상기준점을 이용하여 초기센서모델의 오차를 제거하려는 목적에는 다소 맞지 않다. 이 모델로 오차보정을 하기 위해서는 스캔 라인 별로 기준점을 취득하거나 스캔 라인 간의 관계식을 별도로 수립하여 복잡한 형태의 비선형 방정식을 풀어야 하기 때문이다. 따라서 이 논문에서는 Whiskbroom 방식으로 촬영된 GOES 영상의 정밀기하보정을 위하여 GOES 영상을 중심투영영상으로 가정하고 중심투영영상용으로 개발된 여러 센서모델을 적용해 볼 것이다. 다음 절에 사용된 여러 중심투영영상용 센서 모델에 대하여 설명한다.

2) 공선방정식 기반 모델

공선방정식 기반 모델은 사진측량분야에서 전통적으로 쓰이던 식에 기반을 둔 모델이다. 사용된 식은 (1)과 같다(김태정 외 2인, 2000).

$$\begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{pmatrix} = \lambda R \begin{pmatrix} X - X_s \\ Y - Y_s \\ Z - Z_s \end{pmatrix} \quad (1)$$

여기서 (u_1, u_2, u_3)는 영상좌표를, (X, Y, Z)는 지상좌표를, (X_s, Y_s, Z_s)는 위성의 위치를 나타내고 R 은 회전 행렬이다. (1)에서 비례상수 λ 을 제거하여 (2), (3)과 같이 나타낼 수 있다(김태정 외 2인, 2000).

$$u_1 = u_3 \frac{R_{11}(X - X_s) + R_{21}(Y - Y_s) + R_{31}(Z - Z_s)}{R_{13}(X - X_s) + R_{23}(Y - Y_s) + R_{33}(Z - Z_s)} \quad (2)$$

$$u_2 = u_3 \frac{R_{12}(X - X_s) + R_{22}(Y - Y_s) + R_{32}(Z - Z_s)}{R_{13}(X - X_s) + R_{23}(Y - Y_s) + R_{33}(Z - Z_s)} \quad (3)$$

(2), (3)에서 나타난 회전 행렬 R 의 각 행렬 값은 아래와 같다.

$$R_{11} = \cos\phi \cos\kappa$$

$$R_{12} = \cos\phi \sin\kappa$$

$$R_{13} = -\sin\phi$$

$$R_{21} = -\cos\omega \sin\kappa + \sin\omega \sin\phi \cos\kappa$$

$$R_{22} = \cos\omega \cos\kappa + \sin\omega \sin\phi \sin\kappa$$

$$R_{23} = \sin\omega \cos\phi$$

$$R_{31} = \sin\omega \sin\kappa + \cos\omega \sin\phi \cos\kappa$$

$$R_{32} = -\sin\omega \cos\kappa + \cos\omega \sin\phi \sin\kappa$$

$$R_{33} = \cos\omega \cos\phi$$

회전 행렬 R 에서 ω, ϕ, κ 는 오일러 회전각으로 영상좌표계와 지상좌표계의 관계에 의해 정의된다. 공선방정식 기반 모델은 위치와 회전각을 이용하여 지상점과 영상점의 관계를 나타내기 때문에 ‘위치-회전각 모델’이라고도 한다(김태정, 2005). 일반적으로 $\omega, \phi, \kappa, X_s, Y_s, Z_s$ 등이 6개의 미지수가 되고 이를 외부표정요소(Exterior Orientation Parameters)라고 한다. 외부표정요소는 여러 개의 지상기준점과 최소제곱법(Least Square Method)을 이용하여 각각의 값을 계산하게 된다. 이때, 공선방정식은 비선형방정식으로서 선형화 과정을 필요로 하게 된다. 계산된 외부표정요소를 (1)에 넣어주면 지상좌표 (X, Y, Z)에 대응하는 영상좌표를 구할 수 있다.

3) Direct Linear Transform (DLT) 기반 모델

DLT 기반 모델은 컴퓨터 비전 분야에서 주로 사용되던 모델이다. 단순한 행렬식을 통하여 센서모델링이 가능하다. DLT 모델은 에러에 민감하지만 빠른 연산이 가능하다. 이번 실험에서는 중심투영 영상용 DLT 모델 식 (4)를 사용하였다(Gupta and Hartley, 1997).

$$\begin{pmatrix} wc \\ wr \\ w \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

여기서 (c, r)은 영상좌표, (X, Y, Z)는 지상좌표 그리고 w 는 비례 상수이다. DLT 모델도 공선방정식 기반 모델과 유사하게 선정된 지상기준점들을 이용하여 M 행렬의 계수를 구하게 되는데, 공선방정식 기반 모델과는 다르게 모델이 기본적으로 선형 방정식이기 때문에 최소제곱법을 사용할 필요는 없다. M 행렬 계수가 구해지면 지상좌표 (X, Y, Z)에서 영상좌표 (c, r)을 계산할 수 있다.

4) 궤도-자세 기반 모델

위성의 물리적인 파라미터에 기반한 또 다른 모델로는 궤도-자세 기반 모델이 있다. 공선방정식 기반 모델은 지상 좌표계와 영상 좌표계 사이의 관계를 3개의 회전각으로 단순화시킨 모델인 반면에 궤도-자세 기반 모델에서 위성은 자세각의 미분량에 따라 궤도 좌표가 결정된다. 따라서, 궤도상에서의 위성의 실제적인 영상 기하구조 설명을 위하여 위치, 속도 벡터와 자세각을 알아야 한다. 이러한 궤도-자세 기반 모델은 (5)와 같이 나타난다(Kim and Dowman, 2006).

$$\begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{pmatrix} = \lambda R_{rpy}^T R_P^T \bar{P}_i \bar{V} \begin{pmatrix} X - X_s \\ Y - Y_s \\ Z - Z_s \end{pmatrix} \quad (5)$$

여기서 (X_s, Y_s, Z_s)는 지상좌표, (u_1, u_2, u_3)는 영상좌표이다. (5)에서 R_{rpy} 회전 행렬은 위성의 자세각인 roll, pitch, yaw에 의하여 결정되고 R_P, \bar{V} 회전행렬은 위치와 속도 벡터에 의하여 결정되고 λ 는 비례 상수이다. (5)에서 비례 상수를 제거하면 공선방정식 기반 모델과 유사한 방법으로 풀이를 진행할 수 있게 된다. 단, 외부표정요소는 roll, pitch, yaw와 위치, 속도 벡터로 9개지만 속도 벡터를 상수로 취급하면 총 6개의 미지수

가 존재하는 방정식이 된다. 비례 상수를 제거하면 회전 행렬 S은 (6)과 같이 된다(김태정, 2005).

$$S = \begin{pmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} \\ s_{21} & s_{22} & s_{23} \\ s_{31} & s_{32} & s_{33} \end{pmatrix} = R_P \cdot \sqrt{R_{rpy}} = \begin{pmatrix} e_{11} & e_{12} & e_{13} \\ e_{21} & e_{22} & e_{23} \\ e_{31} & e_{32} & e_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{pmatrix} \quad (6)$$

궤도-자세 기반 모델에서는 각 행렬을 어떻게 정의하느냐에 따라서 회전행렬의 값이 달라지게 된다. 자세각에 대한 회전행렬을 정의할 때에는 각 자세각의 회전 순서가 중요한 요소이다. GOES의 경우에는 roll, pitch, yaw 순으로 회전한다(Ong and Kamel, 2000). 결과적으로 자세각 회전행렬 R_{rpy} 는 (7)과 같다(김태정, 2005).

$$\begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos y \cos p & \cos y \sin p \sin r + \sin y \cos r \\ -\sin y \cos p & -\sin y \sin p \sin r + \cos y \cos r \\ \sin p & -\cos p \sin r \\ -\cos y \sin p \cos r + \sin y \sin r \\ \sin y \sin p \cos r + \cos y \sin r \\ \cos p \cos r \end{pmatrix} \quad (7)$$

R_P , $\sqrt{R_{rpy}}$ 회전행렬은 위성의 위치벡터 및 속도벡터의 의해 정의되는 궤도기준좌표계와 실제 위성기준좌표계 간의 관계에 의해 정의된다. GOES 위성의 경우는 X축은 속도방향, Z축은 위치벡터의 반대방향으로 아래와 같이 정의된다(Ong and Kamel, 2000).

$$X = \vec{V}, Y = Z \times X, Z = -\frac{\vec{P}}{|\vec{P}|} \quad (8)$$

위 정의에 따른 R_P , $\sqrt{R_{rpy}}$ 회전 행렬은 (9)와 같다(김태정, 2005).

$$\begin{pmatrix} e_{11} & e_{12} & e_{13} \\ e_{21} & e_{22} & e_{23} \\ e_{31} & e_{32} & e_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{V_x}{L_v} & \frac{-Y_s V_z + V_y Z_s}{L_p L_v} & \frac{-X_s}{L_p} \\ \frac{V_y}{L_v} & \frac{-Z_s V_x + V_z X_s}{L_p L_v} & \frac{Y_s}{L_p} \\ \frac{V_z}{L_v} & \frac{-X_s V_y + V_x Y_s}{L_p L_v} & \frac{Z_s}{L_p} \end{pmatrix} \quad (9)$$

여기서 (X_s , Y_s , Z_s)는 위치벡터, (V_x , V_y , V_z)는 속도벡터를 나타내고 L_p , L_v 의 값은 아래와 같다.

$$L_p = \sqrt{X_s^2 + Y_s^2 + Z_s^2}, L_v = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}$$

궤도-자세 기반 모델도 공선방정식 기반 모델과 마찬가지로 선형화 과정을 거친 식과 지상기준점을 바탕으로 최소제곱법을 수행하여 외부표정요소를 구한다. 계산된 외부표정요소를 (5)에 대입하면 지상좌표에 대응하는 영상좌표를 계산할 수 있다.

3. 실험방법 및 결과

1) GOES-9 자료

표 1은 센서모델 실험에 사용된 영상들을 나타낸 것이다.

사용된 GOES 영상은 GOES Variable(GVAR) 원본 데이터 파일의 10 bit 영상을 8 bit로 변환하여 추출한 비트맵 영상으로 적외선 영역인 2번 채널의 영상만을 사용하였다. 추출된 비트맵 영상은 GOES의 스캔 특성상 가로로 약 1.7배 정도 늘어난 영상이기 때문에 리샘플링을 수행하여 지구가 원형으로 나타나는 정상 영상으로 만들어 주었다.

Table 1. 실험에 사용된 GOES-9 영상 정보.

ID	Scene 1	Scene 2	Scene 3
수신 일시	2004년 04월 21일 07시 25분 00초	2004년 10월 21일 02시 25분 00초	2004년 12월 21일 20시 25분 00초
Pixel	5209	5209	5209
Line	2698	2698	2696
Resolution	10 bit		

2) 기준점

실험에는 두 가지 종류의 지상기준점이 사용되었다. 하나는 2절에서 설명되었던 ELUG문서에서 제안한 센서모델과 GVAR 원본 데이터를 이용하여 만든 기준점으로 '가상기준점'으로 부르게 될 것이다. 가상기준점은 그림 1과 같은 과정을 거쳐서 얻게 된다.

리샘플링 처리된 비트맵 영상에서 임의의 점들의(c,

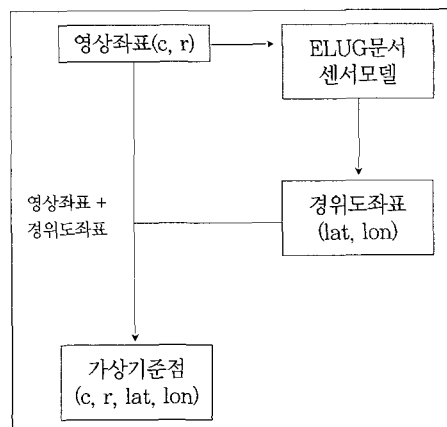


Fig. 1. 가상기준점 계산 과정.

r)값에서 ELUG문서에서 제안한 센서모델을 이용하여 경위도 좌표를 구한다. 구해진 경위도 좌표(lat, lon)과 그에 대응하는 영상좌표(c, r)이 하나의 가상기준점을 이루게 되고, 이런 가상기준점들이 모여 실험에 사용된 하나의 가상기준점 모음을 만들게 된다. 실험에서 가상기준점은 각 센서모델들이 ELUG문서에서 제안한 센서모델들을 대체할 수 있는지를 검증하는데 사용될 것이다. 즉, 이 검증을 통하여 Whiskbroom 방식의 GOES 영상의 센서모델링에 중심투영 방식의 센서모델이 사용 가능한가를 판단하게 된다.

다른 하나의 지상기준점은 '정합기준점'이다. 이는 GOES 영상과 해안선 데이터베이스를 정합시킨 결과 중에서 정합에 성공한 것을 지상기준점으로 이용하는 것이다(이태운 외, 2005). 정합기준점은 제안한 각 센서모델이 ELUG문서에서 제안한 센서모델이 가지고 있는 오차를 보정하여 제안한 각 센서모델이 정밀기하보정에 적합한지를 검증하는데 사용될 것이다.

그림 2는 정합기준점을 구하는 과정을 보여주고 있다. 우선, 해안선 데이터베이스에서 추출된 해안선 조각에 대응하는 장소를 GOES 영상에서 찾아내어 해안선 조각과 GOES 영상을 정합을 시킨다. 정합 결과가 성공적이라면 정합된 장소의 중앙점 영상좌표와 그에 대응하는 지상좌표가 지상기준점의 역할을 하게 된다.

이번 실험에서 각 영상에 대하여 가상기준점은 50점을, 정합기준점은 7~8점을 선택하여 사용하였다. 정합기준점의 경우 GOES 영상에서 임의로 추출된 조각은 35개였고, 그 중 해안선 데이터베이스와 정합에 성공한 7~8개의 조각에서 기준점을 생성했기 때문에 점의 수가 가상기준점에 비해 적다.

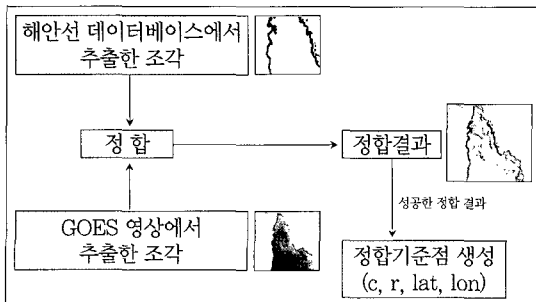


Fig. 2. 정합기준점 계산 과정.

3) 실험방법

각 센서모델에 대한 실험은 1) 가상기준점을 이용하여 오차를 계산한 뒤 센서모델이 GOES-9 영상에 적합한 센서모델인지 검증을 하고 2) 정합기준점을 이용하여 동일한 방법으로 오차를 계산하고, 각 센서모델을 이용하여 해안선 데이터베이스를 GOES-9 영상에 투영시켜 비교해 봄으로써 센서모델이 정밀기하보정에 적합한지 검증하는 방법으로 진행되었다.

가상기준점을 이용한 실험은 그림 3과 같이 진행된다.

그림 3에서 왼쪽은 모델수립 단계, 오른쪽은 모델검증 단계로 구분된다. 모델수립 단계에서는 가상기준점 중 일부를 센서모델에 적용시켜서 최소제곱법으로 외부표정요소(DLT 기반 모델의 경우 모델링 계수)를 계산한다. 계산된 외부표정요소는 센서모델에 적용시켜 모델을 수립한다. 수립된 센서모델에 모델수립에서 사용되지 않은 가상기준점들의 지상좌표를 넣어 계산한 영상좌표의 결과 값과 가상기준점의 영상좌표 값 간의 오차를 구한다. 이 오차는 결과적으로 중심투영 영상에서 사용되던 각 센서모델이 GOES 영상에 적용 가능한지를 알려주는 척도가 된다.

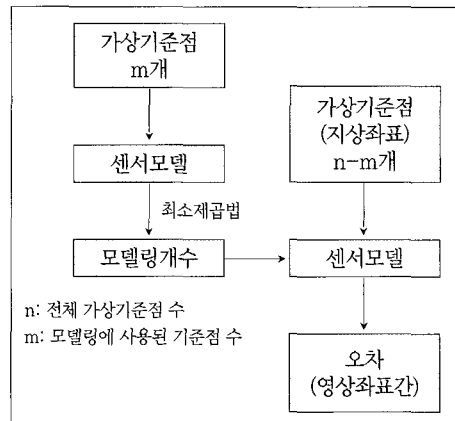


Fig. 3. 가상기준점 실험 과정.

정합기준점을 이용한 실험은 그림 4와 같이 진행되었다.

그림 4에서 왼쪽은 모델수립 단계이고 오른쪽은 모델검증 단계이다. 정합기준점 실험의 경우에도 모델수립 단계에서는 가상기준점을 이용했을 때와 마찬가지로 외부표정요소를 계산하고, 계산된 외부표정요소로 모델을 수립한 뒤 영상좌표 간의 오차를 구하는 방식으로 진행

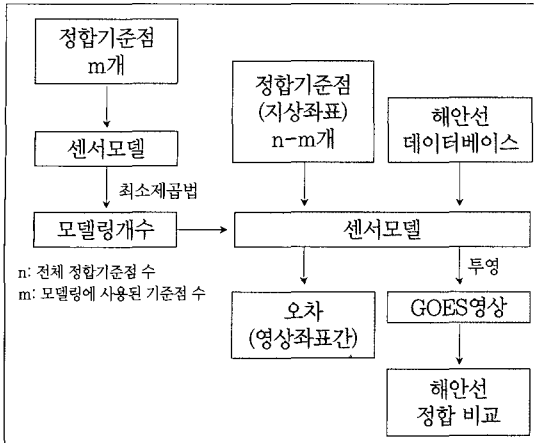


Fig. 4. 정합기준점 실험 과정.

된다. 그러나 정합기준점에서는 수립된 센서모델을 이용하여 해안선 데이터베이스를 GOES 영상에 투영시켜서 해안선의 정합여부를 판단하는 실험이 추가적으로 존재한다. 이는 영상좌표 간의 오차 값과 더불어 각 센서모델이 GOES의 정밀기하보정에 사용 가능한 가를 알려주는 데 사용되었다.

공선방정식 기반 모델과 궤도-자세 기반 모델의 경우 최소제곱법으로 외부표정요소를 추정하기 위해서는 초기값이 필요하다. 따라서 각 모델의 초기값으로 공칭값(Nominal Value)을 사용하였다. 공선방정식 기반 모델의 초기값은 아래와 같다.

$$\omega = 1.57 \text{ deg}, \varphi = -2.0 \text{ deg}, \kappa = 0.0 \text{ deg}$$

$$X_s = -38213561 \text{ m}, Y_s = 17819276 \text{ m}, Z_s = 0 \text{ m}$$

궤도-자세 기반 모델의 경우에는 roll, pitch, yaw는 GVAR 원본 데이터에서 제공하는 값을, 위치/속도 벡터는 공칭 값을 초기값으로 사용하여 외부표정요소를 추정하였다. 사용된 값은 아래와 같다.

$$\text{roll} = -0.000315 \text{ rad}, \text{pitch} = -0.000274 \text{ rad},$$

$$\text{yaw} = -0.00283 \text{ rad}$$

$$X_s = -38213561 \text{ m}, Y_s = 17819276 \text{ m},$$

$$Z_s = 0 \text{ m (위치 벡터)}$$

$$V_x = -1298.7556 \text{ m/s}, V_y = -2785.4521 \text{ m/s},$$

$$V_z = 0 \text{ m/s (속도 벡터)}$$

여기서 속도벡터는 위성의 정상 위도인 155 deg (2.705260 rad)일 때를 기준으로 계산되었다. 속도벡터의 기하는 그림 5와 같이 나타난다.

그림 5에서 속도벡터의 각 성분은 (10)과 같이 나타난다.

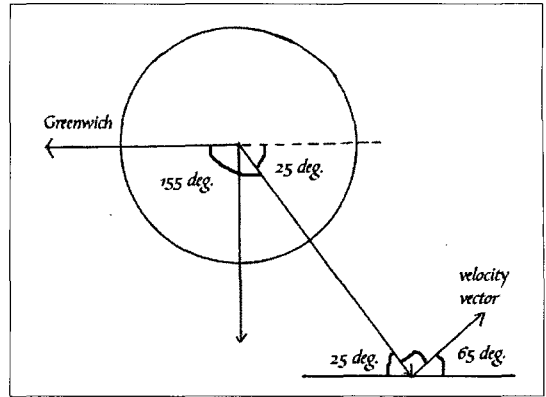


Fig. 5. 속도벡터의 기하.

$$V_x = -|V| \cdot \cos(155^\circ - 90^\circ)$$

$$V_y = -|V| \cdot \sin(155^\circ - 90^\circ) \quad (10)$$

$$V_z = 0$$

여기서 $|V|$ 는 속도 벡터의 크기로 (11)을 통해서 구할 수 있다(Wiesel, 1995).

$$|V| = \sqrt{\frac{\mu}{r}} \quad (11)$$

where, $\mu = GM = 3.986005 \times 10^{14} \text{ m}^3/\text{sec}^2, r \approx 42,200 \text{ km}$

(11)을 (10)에 대입하면 속도벡터의 각 성분을 계산할 수 있고, $V_x = -1298.7556 \text{ m/s}, V_y = -2785.4521 \text{ m/s}$ 의 값을 얻을 수 있다.

4) 실험결과 및 분석

표 2는 공선방정식 기반 모델과 가상기준점, 정합기준점을 이용하여 모델을 수립하여 얻은 외부표정요소이다.

외부표정요소 추정을 위한 초기값은 앞서 언급된 바와 같이 공칭 값을 사용하였다. 표 2와 3에서 나타난 바와 같이 추정된 외부표정요소는 초기값과 거의 유사함을 알 수 있다.

표 3은 궤도-자세 기반 모델을 각각 가상기준점과 정합기준점으로 모델을 수립하여 외부표정요소를 구한 결과이다. 위성의 위치 벡터를 보면 앞선 공선방정식 기반 모델과 거의 유사한 값들이 나온 것을 알 수 있고, 위성의 회전각인 roll, pitch, yaw의 경우 초기값에 근사한 값을 보여주고 있다.

표 4는 가상기준점을 이용하여 각 센서모델을 GOES-9 영상에 적용한 결과로 나타난 오차이다. 오차 값은 모델점 오차와 검사점 오차로 나누어 구했으며, 각

Table 2. 공선방정식 기반 모델을 이용하여 구한 외부표정요소.

외부표정요소	Scene 1		Scene 2		Scene 3	
	가상기준점	정합기준점	가상기준점	정합기준점	가상기준점	정합기준점
ω (deg.)	1.566962	1.566282	1.543679	1.53823	1.551237	1.548379
φ (deg.)	-2.001229	-1.995941	-2.012261	-2.01247	-2.013841	-2.014187
κ (deg.)	0.007504	0.006261	0.019149	0.021996	0.030301	0.031256
Xs (km)	-38302.856	-38466.906	-38100.429	-38168.769	-38074.141	-38172.541
Ys (km)	17600.869	17452.306	18011.417	18047.023	18089.131	18149.430
Zs (km)	62.16	59.432	475.058	546.155	350.772	384.234

Table 3. 궤도-자세 기반 모델을 이용하여 구한 외부표정요소.

외부표정요소	Scene 1		Scene 2		Scene 3	
	가상기준점	정합기준점	가상기준점	정합기준점	가상기준점	정합기준점
roll (rad.)	0.000098	0.000609	0.000294	0.000454	0.000137	0.000795
pitch (rad.)	0.005078	0.007295	-0.004364	-0.006336	-0.005682	-0.00699
yaw (rad.)	0.004056	0.00248	-0.005457	-0.007566	0.012509	0.011053
Xs (km)	-38289.565	-38417.028	-38109.643	-38200.056	-38088.669	-38212.545
Ys (km)	17626.275	17587.538	17989.071	18108.533	18056.160	18167.271
Zs (km)	60.102	126.501	476.893	396.661	351.676	450.477

Table 4. 가상기준점을 이용하여 계산된 오차.

(단위: pixels in RMSE)

모델점/검사점	공선방정식 기반		DLT 기반		궤도-자세 기반	
	모델점 오차	검사점 오차	모델점 오차	검사점 오차	모델점 오차	검사점 오차
Scene 1						
10점 / 40점	모델 수립 실패		0.106848	12.376317	1.095445	1.012423
20점 / 30점	1.000000	1.224745	1.101158	2.091118	1.140175	1.378405
30점 / 20점	1.154701	1.118034	1.303809	0.998657	1.329160	1.204159
40점 / 10점	1.214496	0.774597	1.213041	0.985293	1.341641	1.000000
50점 / 0점	1.140175	-	1.14864	-	1.264911	-
Scene 2						
10점 / 40점	1.140175	1.204159	0.304201	6.225402	1.140175	1.274755
20점 / 30점	1.118034	1.238278	1.380011	1.509144	1.095445	1.870829
30점 / 20점	1.224745	1.140175	1.309056	1.045741	1.140175	1.118034
40점 / 10점	1.151086	1.341641	1.206798	1.050862	1.129159	1.095445
50점 / 0점	1.191638	-	1.161306	-	1.16619	-
Scene 3						
10점 / 40점	1.048809	1.204159	0.512177	6.703375	1.095445	2.150581
20점 / 30점	1.140175	1.197219	1.526827	1.377291	1.224745	1.722401
30점 / 20점	1.211060	1.118034	1.426089	0.815802	1.183216	1.140175
40점 / 10점	1.172604	1.183216	1.297252	0.770367	1.172604	1.183216
50점 / 0점	1.174734	-	1.202853	-	1.183216	-

각은 평균제곱근오차(Root Mean Square Error; RMSE)로서 픽셀 단위이다.

실험은 모델점의 경우 10개부터 50개까지 10개 단위

로 늘려가고, 검사점의 경우에는 총 가상기준점의 수인 50개에서 모델점의 개수를 뺀 수만큼을 사용하여 실험이 진행되었다. 공선방정식 기반 모델과 가상기준점을

Table 5. 정합기준점을 이용하여 계산된 오차.

(단위: pixels in RMSE)

모델점/검사점	공선방정식 기반		DLT 기반		궤도-자세 기반	
	모델점 오차	검사점 오차	모델점 오차	검사점 오차	모델점 오차	검사점 오차
Scene 1						
6점 / 2점	1.527525	2.236068	0.268112	1.460684	1.527525	1.870829
7점 / 1점	1.603567	2.236068	0.319674	0.250817	1.558387	1.414214
8점 / 0점	1.541104	-	0.307459	-	1.541104	-
Scene 2						
6점 / 2점	1.000000	7.211103	0.135222	15.58643	1.080123	6.284903
7점 / 1점	2.070197	4.472136	0.323121	0.165077	1.603567	3.605551
8점 / 0점	2.031010	-	0.304882	-	1.732051	-
Scene 3						
6점 / 1점	2.345208	2.236068	0.329667	1.130082	1.914854	1.000000
7점 / 0점	2.329929	-	0.347135	-	1.927248	-

10점으로 설정한 실험만이 모델 수립에 실패하였고, 나머지 실험에서는 모델 수립이 성공하였다. 결과 값을 보면 실험에 사용한 세 가지 센서모델의 RMSE는 모두 약 1.2픽셀로 비슷하게 나왔다. 검사점의 수가 10점인 실험을 제외하고는 대부분의 검사점 오차도 모델점 오차와 유사하게 약 1.2픽셀 정도로 계산되었다. 실험 결과에 따라 세 가지 센서모델은 Whiskbroom 방식인 GOES-9 영상의 센서모델을 대신하여 사용할 수 있다고 결론지을 수 있었다.

표 5는 정합기준점을 이용하여 각 센서모델이 정밀기하보정에 적합한지 검증하기 위하여 계산한 RMSE로 픽셀 단위이다. 이전 실험과 마찬가지로 모델점 오차와 검사점 오차로 나누어 실험이 진행되었다. 정합기준점은 해안선 데이터베이스와 GOES 영상의 정합결과 중 성공한 점을 기준점으로 삼아서 가상기준점에 비하여 그 수가 적다.

정합기준점을 이용한 실험은 가상기준점을 이용한 실험과 동일하게 진행되었다. 이전 실험과 다르게 검사점 오차가 모델점 오차보다 크게 나왔다. 실험 결과 DLT 모델이 다른 모델에 비하여 월등히 좋은 결과를 보여주었다. 오직 오차만을 본다면 당연히 DLT 기반 모델이 GOES-9 영상의 정밀기하보정을 위한 최적의 센서모델이라 결론 내릴 수 있겠지만, 해안선 데이터베이스를 GOES-9 영상의 투영시키는 실험을 통하여 DLT 기반 모델의 문제점을 발견할 수 있었다.

그림 6은 ELUG문서에서 제안한 센서모델을 이용한 투영결과이다. 북반구(왼쪽 두 영상)에서는 투영이 성공

적으로 이루어진 것을 확인할 수 있다. 반대로 남반구(오른쪽 마지막 영상)에서는 오차가 크게 발생한 것을 확인할 수 있다.

그림 7은 공선방정식 기반 모델을 이용한 투영 결과이다. 북반구(왼쪽 두 영상)에서는 정확히 투영이 된 것을 확인할 수 있고, 남반구(오른쪽 마지막 영상)는 그림 6과 달리 오차가 크게 줄어든 것을 확인할 수 있다.

그림 8은 앞서 오차가 가장 적게 나온 DLT 기반 모델을 이용하여 해안선 데이터베이스를 GOES-9 영상에 투영한 결과이다. 남반구 영상인 오른쪽 마지막 영상을 보면 그림 6에 비하여 오차가 크게 줄어들었다. 하지만 북반구 왼쪽 두 영상을 보면 오차가 큰 것을 확인할 수 있다. 즉, 오차는 지구 원의 가장자리로 갈수록 심해지는 경향을 보여주었다. 이러한 결과는 DLT의 기본적인 특성인 모델수립에 사용된 기준점과 모델점중에 사용된 기준점이 가까울수록 오차가 적어지는 것을 보여주고 있음을 확인할 수 있었다.

그림 9는 궤도-자세 기반 모델을 이용하여 해안선 데이터베이스를 투영한 결과로서 공선방정식과 거의 유사한 결과를 보여준다.

최종적으로 실험결과는 공선방정식 기반 모델과 궤도-자세 기반 모델은 거의 유사한 결과를 보여주었고 DLT 기반 모델의 경우 오차는 적게 나왔으나 투영에서 중대한 문제점을 드러냈다. 또한 공선방정식 기반 모델과 궤도-자세 기반 모델의 경우 전반적인 실험에서 서로 유사한 성능을 보여주고 있으나 근소한 차이로 궤도-자세 기반 모델이 좋은 성능을 보여주었다. 따라서,



Fig. 6. ELUG문서에서 제안한 센서모델을 이용한 투영결과.

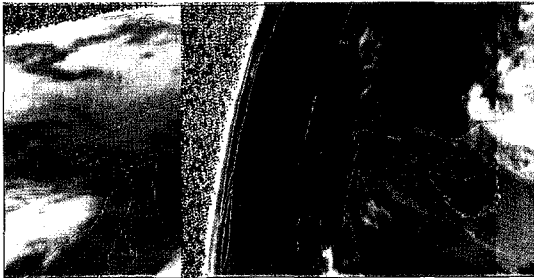


Fig. 7. 공선방정식 기반 모델을 이용한 투영 결과.

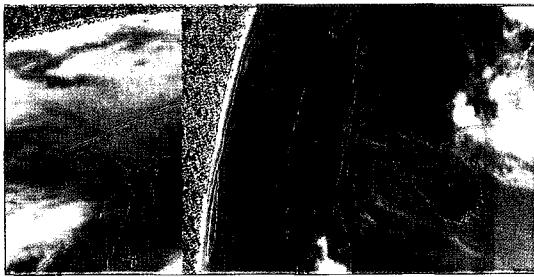


Fig. 8. DLT 기반 모델을 이용한 투영 결과.

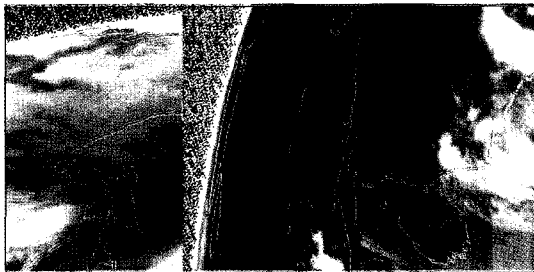


Fig. 9. 궤도-자세 기반 모델을 이용한 투영 결과.

GOES-9 영상의 정밀센서모델수립과 기하보정을 위해서 궤도-자세 기반 모델을 쓰는 것이 가장 적합하다는 결론을 내릴 수 있었다.

4. 결 론

ELUG문서에서 제안하는 센서모델의 오차를 보정하고 GOES-9 영상의 정밀기하보정을 위하여 중심투영 영상용 센서모델인 공선방정식 기반 모델, DLT 기반 모델, 궤도-자세 기반 모델을 대상으로 실험을 진행하였다. 지상기준점으로는 GOES-9 영상에서 선정한 '가상 기준점'과 해안선 데이터베이스와 GOES-9 영상의 성공적인 정합 결과를 통해서 만들어진 '정합기준점'을 사용하였다.

Whiskbroom 방식으로 촬영된 GOES-9 영상에 중심투영 영상용 센서모델들이 적용 가능한지를 판단하기 위하여 가상기준점을 이용하여 모델을 수립하고 검증하였다. 그 결과 세가지 센서모델 모두 GOES-9 영상에 적용 가능하다는 결론을 내릴 수 있었다. 정합기준점을 이용한 실험에서는 제안한 세가지 센서모델 중에서 어떤 센서모델이 GOES-9 영상의 정밀기하보정에 적당한지를 판단하였다. 정합기준점과 각 센서모델을 이용하여 모델을 수립한 뒤에 오차를 계산한 결과에서는 DLT 기반 모델이 월등한 성능을 보여주었다. 하지만, 이어지는 실험인 해안선 데이터베이스를 각 센서모델을 통하여 영상에 투영시키는 실험에서 DLT 기반 모델이 적합하지 않음을 발견하였다. 오차 계산 결과와 투영 결과를 종합적으로 볼 때, 결과적으로 궤도-자세 기반 모델이 GOES-9 영상의 정밀기하보정에 가장 유리한 센서모델이라고 결론지었다.

사 사

이 논문은 인하대학교의 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- 김태정, 김승범, 신동석, 2000. 대표적 위성영상 카메라 모델링 알고리즘들의 비교연구, 대한원격탐사학회지, 16(1): 73-86.
- 김태정, 2005. 선형 푸시브룸 센서모델의 번들조정 정확도 및 외부표정요소추정 정확도 분석, 한국측

- 량학회지, 23(2): 137-145.
- 이태운, 김태정, 최해진, 2005. 정지궤도 기상위성의 자동 전처리를 위한 랜드마크 추출 및 자동 오정합 판별에 대한 연구, 대한원격탐사학회 춘계학술대회 논문집, 8: 125-129.
- Gupta, R. and Hartley, R., 1997. Linear Pushbroom Cameras, *IEEE Trans. PAMI*, 19(9): 963-975.
- Kamel, A. A., 1996. GOES Image Navigation and Registration System, *Proc. of SPIE Conference on GOES-8 and Beyond*, Denver, USA, August, 2812: 766-776.
- NOAA/NESDIS, 1998. Earth Location User's Guide (ELUG), NOAA/SD3-1998-015R1UD0, <http://rsd.gsfc.nasa.gov/goes/text/goes.data.book.html>
- Ong, K. M. and Kamel A. A., 2000. Image Navigation Based On Landmark and Earth Edge Measurements, pp.2085-2106.
- Taejung Kim and Ian Dowman, 2006. Comparison of two physical sensor models for satellite images: position-rotation model and orbit-attitude model, *Photogrammetric Record*, 21(114): 110-123.
- Wiesel, William E., 1995. Spaceflight Dynamics 2nd Edition, *Irwin/McGraw-Hill*, p.74.