

SPOT 4 영상의 기하보정을 위한 시선 벡터 조정 모델

Line-of-Sight (LOS) Vector Adjustment Model for Restitution of SPOT 4 Imagery

정형섭¹⁾
Jung, Hyung-Sup

Abstract

In this paper, a new approach has been studied correcting the geometric distortion of SPOT 4 imagery. Two new equations were induced by the relationship between satellite and the Earth in the space. line-of-sight (LOS) vector adjustment model for SPOT 4 imagery was implemented in this study. This model is to adjust LOS vector under the assumption that the orbital information of satellite provided by receiving station is uncertain and this uncertainty makes a constant error over the image. This model is verified using SPOT 4 satellite image with high look angle and thirty five ground points, which include 10 GCPs(Ground Control Points) and 25 check points, measured by the GPS. In total thirty five points, the geometry of satellite image calculated by given satellite information(such as satellite position, velocity, attitude and look angles, etc) from SPOT 4 satellite image was distorted with a constant error. Through out the study, it was confirmed that the LOS vector adjustment model was able to be applied to SPOT4 satellite image. Using this model, RMSEs (Root Mean Square Errors) of twenty five check points taken by increasing the number of GCPs from two to ten were less than one pixel. As a result, LOS vector adjustment model could efficiently correct the geometry of SPOT4 images with only two GCPs. This method also is expected to get good results for the different satellite images that are similar to the geometry of SPOT images.

Keywords : LOS vector adjustment model, SPOT 4, GCP, Geometric correction

초 록

SPOT 4 위성영상의 기하 왜곡을 보정하기 위하여 새로운 접근방법을 연구하였다. 우주공간에서 위성과 지구의 관계를 정립함으로써 새로운 조건 방정식을 유도하였다. 초기 위성에 대한 정보가 어떤 일정한 변화에 의해 왜곡이 있다고 가정하고, LOS(Line-Of-Sight) 벡터를 변화시켜 위성영상의 기하를 보정하는 LOS 벡터 조정 모델을 연구하였다. 본 모델을 증명하기 위하여 관측각이 큰 SPOT 4 위성영상을 대상으로 실험하였다. 또한, 정확한 실험을 위하여 GPS로부터 측량한 10개의 지상기준점(GCPs)과 25개의 검사점(check points)을 사용하였다. SPOT 4 위성영상에 주어진 초기 위성정보(위성 위치, 속도, 자세, 관측각 등)를 그대로 이용하여 계산한 위성영상 기하는 총 35개의 지상기준점과 검사점에 대하여 거의 일정한 변화량을 지녔으며, 이를 통해 SPOT 4 위성영상에 시선벡터조정모델을 적용할 수 있음을 확인하였다. 시선벡터조정모델을 적용하여 영상에 고르게 분포하는 지상기준점을 2점에서 10점까지 변화시키면서 검사점의 오차를 계산하였고, 25개 검사점 오차는 모두 1픽셀 미만이었다. 새로운 접근 방법인 이 모델은 2점 이상의 지상기준점을 이용하여 SPOT 4 영상 기하를 효과적으로 보정하였으며, 또한 SPOT 영상과 촬영방식이 동일한 고해상 위성영상에 대해서도 좋은 결과를 얻을 것으로 기대한다.

핵심어 : 시선벡터조정모델, SPOT 4, 지상기준점, 기하보정

1) 정희원 · 서울시립대학교 도시과학대학 공간정보공학과 조교수(E-mail:hsjung@uos.ac.kr)

1. 서 론

위성영상의 위치 정확도 향상을 위하여 다양한 기하학적 보정방법이 제안되어 왔다. Gagan 등(1988)은 항공사진측량에서 사용되는 공선조건식을 확장하여 위성의 위치와 자세를 시간의 다항식으로 접근하는 방법을 제안하였고, Orun 등(1994)는 공선조건식 확장이 지니는 위성의 위치와 자세간의 상관관계를 극복하기 위하여 개선된 모델을 제안하였다. Rajiv 등(1997)는 위성카메라가 등속 직선운동을 한다고 가정하여 투시변환을 이용한 DLT(Direct Linear Transform)를 실험하였다. 또한, 항공사진과 다르게 위성은 위성궤도를 이루고 있고, 이들 궤도가 케플러궤도를 이룬다는 가정하에 궤도요소를 이용하여 위성영상 기하를 보정하는 연구결과도 있다 (Valadan 등, 1998 ; RadHdevi 등, 1998). 국내에서도 다수의 연구자들이 위성영상에 대한 기하보정을 연구하였다(신동석 등, 1997 ; Jung 등, 2004; Lee 등, 2003; 최선용 등, 2003).

일반적으로 제안되어진 기하보정 방법들은 위성의 위치정보와 자세정보를 보정하는 방법이다. 그러나 이와 같은 보정기법은 현재 위성궤도가 매우 정밀해져가고 있기 때문에 효과적인 기하보정을 수행하지 못한다. 특히 위성의 궤도와 자세가 서로 상관관계를 지니고 있기 때문에 정확한 영상촬영위치를 구할 수 없으며, 단지 주어진 지상기준점에 최적화된 국지궤도만을 계산할 수 있다(Orun 등, 1994). 그러므로 위성궤도 정밀도가 높아져가고 있는 지금의 위성시스템에서는 위치정보와 자세정보를 보정하기보다 다른 파라미터를 보정하는 것이 더욱 효과적인 결과를 얻을 수 있다. Jung 등(2007)은 SPOT 5 입체영상의 3차원 위치결정을 위하여 위성의 위치와 자세를 개선하는 방식이 아닌 관측각에 의해서 결정되는 시선벡터(line-of-sight vector)를 보정하는 시선벡터조정모델을 제안한 바 있다. 그러나 시선벡터조정모델은 SPOT 5 입체영상에 적용되었을 뿐 SPOT 4영상의 기하보정에는 적용되지 않았다. SPOT 4 위성은 SPOT 5 위성에 비하여 위성의 궤도정보가 10배 이상 부정확하고, 공간해상도는 10m로 SPOT 5의 2.5m에 비해 현저히 낮다. 시선벡터조정모델이 지니는 추정된 위성궤적이 실제 위성궤적과 유사하다는 가정은 낮은 공간해상도를 지니는 SPOT 4 위성영상 신(scene)에 적용될 때 시간에 따른 위성위치오차의 변화가 무시될 수 있는 가능성을 제시한다.

그러므로, 이 연구에서는 위성궤도 정보가 정밀하지 않은 저해상의 SPOT 4영상에 대하여 단순화된 시선벡터 조정모델을 수립하고, 이 모델의 정밀도를 검증하고자 한다. 이를 위하여 SPOT 4 위성영상을 위한 조건 방정식을 유도하였다. 유도된 조건방정식은 SPOT 4 영상의 기하를 보정하기 위하여 시선벡터를 변화시키는 네 개의 외부표정요소를 지닌다. SPOT 4 영상을 위한 시선벡터 조정모델은 최소 두 점의 기준점을 필요로 하며, 일반적으로 최소 6개에서 9개의 기준점을 요구하는 기타 모델에 비하면 매우 적은 지상기준점을 요구한다. 또한, 본 모델은 반복 계산하여 원하는 값을 얻어내는 방식과는 달리 단순히 정규방정식(normal equation)을 이용하여 쉽게 결과를 얻을 수 있는 장점을 지닌다.

2. 수학적 모델

지구를 중심으로 공전하는 위성에 의해 촬영된 위성영상은 우주공간에서 위성 정보인 위치, 자세, 관측각을 함께 얻을 수 있으며, 이들 정보로부터 위성영상의 위치를 추정할 수 있다. 하지만, 일반적인 광학 위성에 대하여 위성정보만으로는 영상의 정확한 위치를 추정할 수 없기 때문에 지상기준점(GCP)을 이용하여 보정을 수행한다. 이 연구에서는 초기 위성정보를 그대로 이용하기 위하여 위성기하로부터 조건 방정식을 유도하였다. 또한 초기 위성 위치 정보가 정확하지 않다고 하더라도 위성 궤적의 모양이 원 위성 궤적의 모양과 비슷하다는 가정하에 최소 2점의 지상기준점으로 시선벡터를 조정하여 SPOT4 위성기하를 보정하는 시선벡터조정모델을 수립하였다.

2.1 좌표계 변환

일반적으로 위성은 지심관성좌표계에서 잘 정의된 회전타원체를 따라 움직인다. 위성 위치 벡터(\vec{s})와 촬영된 영상에서 볼 수 있는 지상점 벡터(\vec{p})까지의 거리는 위성에서의 관측각에 의해 결정되는 시선벡터(\vec{u})에 의해서 표현할 수 있으며, 이들 간의 관계는 아래와 같다(Jung 등, 2007).

$$\vec{p} - \vec{s} = \mu \cdot \vec{u} \quad (1)$$

위성위치 벡터 s 와 지상점 벡터 \vec{p} 는 지심관성좌표계

또는 지심좌표계로 표현되지만, 시선벡터 \vec{u} 는 위성의 자체에서 얻어지기 때문에 위성자세 좌표계로 표현된다. 식 (1)을 동일한 좌표계로 표현하기 위해서는 위성자세좌표계를 국지궤도 좌표계로 변환하는 좌표변환행렬(A)과 국지궤도좌표계를 지심좌표계로 변환하는 좌표변환행렬(M)을 정의해야 한다.

2.1.1 위성자세 좌표계에서 국지궤도 좌표계로의 좌표변환

위성영상은 위성의 자세(attitude)를 표현하는 요각, 피치(pitch)각, 롤각에 따라 회전한다. 위성자세 좌표계에서 국지궤도 좌표계로 좌표변환은 위성의 자세각에 의하여 다음과 같이 표현할 수 있다 (Orun 등, 1994).

$$A = \begin{bmatrix} \cos \kappa & -\sin \kappa & 0 \\ \sin \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & \sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & -\sin \omega \\ 0 & \sin \omega & \cos \omega \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서, ω 는 롤각이고, φ 는 피치각이며, κ 는 요각이다.

2.1.2 지구를 구이고 지구 중력이 질량중심을 향한다고 가정하면, 위성궤도는 근사적으로 케플러 궤도를 따른다고 할 수 있다(Kratky, 1989). 그러므로, 위성의 위치 및 속도는 케플러의 궤도요소로 변환가능하다. 케플러 궤도요소를 이용한 국지궤도 좌표계에서 지심좌표계의 변환행렬은 다음과 같이 정의된다 (Slama 등, 1980).

$$M = \begin{bmatrix} \cos \Omega & -\sin \Omega & 0 \\ \sin \Omega & \cos \Omega & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos I & -\sin I \\ 0 & \sin I & \cos I \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos W & -\sin W & 0 \\ \sin W & \cos W & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서, Ω 는 승교점 경도(longitude of the ascending node)이고, I 는 궤도경사각(inclination of the orbit plane)이며, W 는 위성 위도인수(latitude argument of the satellite)를 나타낸다.

2.2 시선벡터조정모델

우리가 알고 있는 초기 위성의 위치와 속도가 실제의 위치와 상당히 다르다고 하더라도, 위성의 궤적이 실제 궤적과 비슷하다고 가정하면, 초기 위성의 위치와 속도에 의해서 얻어진 영상 위치는 실제로 있어야 할 영상의 위치와 비교하였을 때 어떠한 일정한 위치오차를 지닐 것이다(Jung 등, 2004). 그러므로 이들 일정한 위치오차

는 시선벡터의 변화를 통하여 보정하는 것이 가능하다. 이러한 시선벡터의 변화는 기존의 공선조건식을 통하여 보정할 때 관측각은 위성의 자세각에 더하여 보정되기 때문에 쉽게 보정하기 어렵다. 우리는 위성기하를 통하여 관측각으로 표현되는 새로운 조건식을 수립할 수 있다.

식 (2)에 표현된 변환행렬 A와 식 (3)에 나타난 M변환행렬을 이용하여 식 (1)을 국지궤도좌표계로 표현하면,

$$M^{-1} \cdot \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \rho \end{bmatrix} = \mu A \cdot \begin{bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서, p_x , p_y 및 p_z 는 벡터 \vec{p} 의 요소이며, u_x , u_y 및 u_z 는 벡터 \vec{u} 의 요소이다. 여기서, 회전행렬 A와 M 및 ρ 는 시간 t 의 함수이므로, 푸쉬부름 센서의 경우 영상 라인 i 의 함수가 된다. 앞서 기술한 바와 같이 추정된 위성궤적이 실제 위성궤적과 유사하다면, 낮은 공간 해상도를 지나는 SPOT 4 위성영상 신의 경우, 시간에 따른 위성위치오차의 변화가 크지 않기 때문에 무시될 수 있을 것이다.

식 (4)의 우변에서 좌표변환행렬 A를 제거하고, $M^{-1} = M^T$ 와 $A^T = A^T$ 인 성질을 이용하면, 식 (4)는 아래와 같이 표현가능하다.

$$(M \cdot A)^T \cdot \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix} - A^T \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \rho \end{bmatrix} = \mu \begin{bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{bmatrix} \quad (5)$$

수식의 단순화하여 표현하면, 식 (5)는 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} a_{11} & a_{21} & a_{31} \\ a_{12} & a_{22} & a_{32} \\ a_{13} & a_{23} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \rho \end{bmatrix} = \mu \begin{bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{bmatrix} \quad (6)$$

여기서, a_{11} , a_{12} , ..., a_{13} 은 회전행렬 A의 요소이고, r_{11} , r_{12} , ..., r_{33} 은 행렬 $R=(M \cdot A)^T$ 의 요소이다.

또한, 시선벡터 \vec{u} 의 각 요소는 푸쉬부름 센서를 지닌 SPOT 위성 영상에 대하여 아래와 같이 정의할 수 있다 (Riazanoff, 2002).

$$u_x = \tan \left[\psi_x - \frac{m-j}{m-1} (\psi_x - \psi_x) \right] \quad (7)$$

$$u_y = \tan \left[\psi_y - \frac{m-j}{m-1} (\psi_y - \psi_y) \right] \quad (8)$$

$$u_z = -1 \tag{9}$$

여기서, ψ_{x_1} , ψ_{x_2} , ψ_{y_1} 및 ψ_{y_2} 는 위성자세좌표계에서 x와 y 방향으로의 첫 번째와 마지막 번째 CCD에 대한 관측각(look angle)이고, ω 은 영상좌표계에서 픽셀 수와 영상 크기의 픽셀크기를 나타낸다.

식 (7)과 식 (8)의 ω 를 바꾸어 표현하면,

$$u_x = \tan\left(\frac{m \cdot \psi_{x_1} - \psi_{x_2}}{m-1}\right) + j \cdot \left(\frac{\psi_{x_2} - \psi_{x_1}}{m-1}\right) = \tan(a_0 + j \cdot b_0) \tag{10}$$

$$u_y = \tan\left(\frac{m \cdot \psi_{y_1} - \psi_{y_2}}{m-1}\right) + j \cdot \left(\frac{\psi_{y_2} - \psi_{y_1}}{m-1}\right) = \tan(a_1 + j \cdot b_1) \tag{11}$$

여기서, a_0 , a_1 , b_0 및 b_1 은 임의의 변수이며, 한 영상 스트립에 대하여 동일한 값을 지닌다.

식 (9), (10) 및 (11)을 이용하여 식 (6)을 다시 정리하면 아래와 같다.

$$\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} a_{11} & a_{21} & a_{31} \\ a_{12} & a_{22} & a_{32} \\ a_{13} & a_{23} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \rho \end{bmatrix} = \mu \begin{bmatrix} \tan(a_0 + j \cdot b_0) \\ \tan(a_1 + j \cdot b_1) \\ -1 \end{bmatrix} \tag{12}$$

식 (12)에서 μ 를 소거하면, 아래와 같은 방정식이 성립한다.

$$F_1 = \tan^{-1} \left[\frac{r_{11}p_x + r_{12}p_y + r_{13}p_z - a_{31}\rho}{r_{31}p_x + r_{32}p_y + r_{33}p_z - a_{33}\rho} \right] + a_0 + j \cdot b_0 = -\psi_{x_2} + a_0 + j \cdot b_0 = 0 \tag{13}$$

$$F_2 = \tan^{-1} \left[\frac{r_{21}p_x + r_{22}p_y + r_{23}p_z - a_{32}\rho}{r_{31}p_x + r_{32}p_y + r_{33}p_z - a_{33}\rho} \right] + a_1 + j \cdot b_1 = -\psi_{y_2} + a_1 + j \cdot b_1 = 0 \tag{14}$$

식 (13)과 식 (14)는 식 (1)로부터 유도한 것으로 관측각으로 정의된다. 두 방정식은 위성의 위치, 속도 및 자세정보와 지상점에 의해서 정의되는 기하관측각 ψ_{x_2} 와 ψ_{y_2} 와 이를 보정하기 위하여 이용되는 단순히 j 에 비례하는 임의의 네 변수 (a_0 , a_1 , b_0 및 b_1)에 의해서 표현되는 관측각으로 정의된다. SPOT 4영상을 위한 시선벡터 조정모델은 식 (13)과 (14)로 표현되는 조건방정식을 이용하여 시선벡터로 표현되는 외부보정파라미터를 보정하는 것이다. 이와 같은 모델이 적용되기 위해서는 기하관측각(ψ_{x_2} 와 ψ_{y_2})이 j 에 비례하여야 하며, 이를 만족하기 위해서는 초기 위성 위치 정보가 정확하지 않다고 하더라도 위성 궤적의 모양이 실제 위성 궤적의 모양과 유사해야만 한다.

시선벡터조정모델은 n개의 지상기준점이 주어진 경우, 아래와 같은 정규방정식(normal equation)을 이용하여 외부보정요소를 구할 수 있다.

$$x = (B^T W B)^{-1} \cdot (B^T W y) \tag{15}$$

여기서, W 는 가중치 행렬 x , y 및 B 는 아래와 같이 정의한다.

$$x = \begin{bmatrix} a_0 \\ b_0 \\ a_1 \\ b_1 \end{bmatrix}, \quad y = \begin{bmatrix} F_{1_1} \\ F_{1_2} \\ F_{2_1} \\ F_{2_2} \\ \dots \\ F_{n_1} \\ F_{n_2} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 1 & j_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & j_1 \\ 1 & j_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & j_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & j_n & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & j_n \end{bmatrix} \tag{16}$$

여기서, F_{1_n} 과 F_{2_n} 는 n번째 지상기준점에 대한 F_1 과 F_2 의 값이며, j_n 은 n번째 지상기준점에 대한 영상의 가로 방향 픽셀수를 의미한다.

3. 실험과 결과 분석

우리는 SPOT 4 위성영상의 기하보정을 위한 시선벡터 조정모델을 검증하기 위하여 상대적으로 높은 관측각(약 20도)을 지니고, 도심과 산악지형을 동시에 관찰할 수 있는 대전지역에서 촬영된 영상을 이용하였다. 표 1은 실험에 사용된 SPOT 4 영상의 X와 Y방향의 첫 번째와 마지막 픽셀의 관측각과 라인당 촬영시간을 나타낸다. GPS 측량을 통하여 관측한 35개 지상점이 SPOT 4 영상의 기하보정 정확도 평가를 위하여 이용되었다. 이

표 1. 연구에 이용된 SPOT 4영상 파라미터

파라미터	값	
관측 (deg.)	ψ_{x_1}	0.61
	ψ_{x_2}	0.62
	ψ_{y_1}	17.93
	ψ_{y_2}	22.05
각라인당 촬영시간 (sec.)	0.001504	

표 2. 지상점 높이의 통계 특성

최소값(m)	최대값(m)	평균(m)	표준편차(m)
1.9	357.7	79.1	81.6

들 지상점에 대한 높이의 통계치는 표 2에 표현하였다. 먼저, 시선벡터조정모델이 적용가능한 지를 확인하기 위하여 초기 위성 정보로부터 얻어진 영상 위치에 대한 오차가 일정한 방향과 크기를 지니고 있는지를 확인하였다.

그림 1은 영상헤더에 주어진 위성의 위치, 속도, 자세, 관측각을 이용하여 35개의 지상점에 대한 영상점을 계산하고, 계산된 영상점과 실제 영상점에 대한 오차벡터를 도시한 것이다. 모든 오차벡터는 영상의 우상단 방향

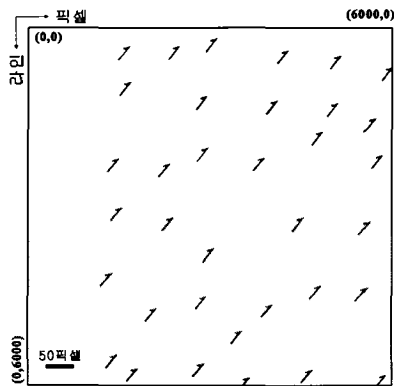


그림 1. 35개의 지상점으로부터 계산된 SPOT 영상의 오차벡터

을 향하였고, 오차벡터의 크기는 거의 일정하였다.

표 3은 오차벡터에 대한 평균과 표준편차를 나타낸 것이다. 영상 라인과 픽셀 방향으로의 오차 평균은 각각 -41.63(약 416.3m)과 33.23(약 332.3m) 픽셀로 매우 높았지만, 오차의 표준편차는 0.59와 0.80픽셀로 낮은 값을 지녔다. 그림 2는 35개의 지상점에 대하여 영상픽셀방향으로 기하관측각(ψ_s 와 ψ_s)의 값을 도시하고, 1차 다항식에 피팅(fitting)한 결과를 나타낸다. 지상점은 영상의 픽셀방향에 대해 결정계수(R^2)가 각각 0.988과 0.999를 지니고 있었고, RMSE가 각각 0.32와 0.36 mdeg.를 지녔다.

표 3. 오차벡터의 평균과 분산

평균 (pixel)		표준편차 (pixel)	
라인 수	픽셀 수	라인 수	픽셀 수
-41.63	33.23	0.59	0.80

이와 같은 결과는 기하관측각 ψ_s 와 ψ_s 이 단순히 영상 픽셀수(j)에 선형으로 비례함을 보이며, 네 변수 (a_0, a_1, b_0 및 b_1)로 이루어진 외부표정요소를 이용하여 보정이

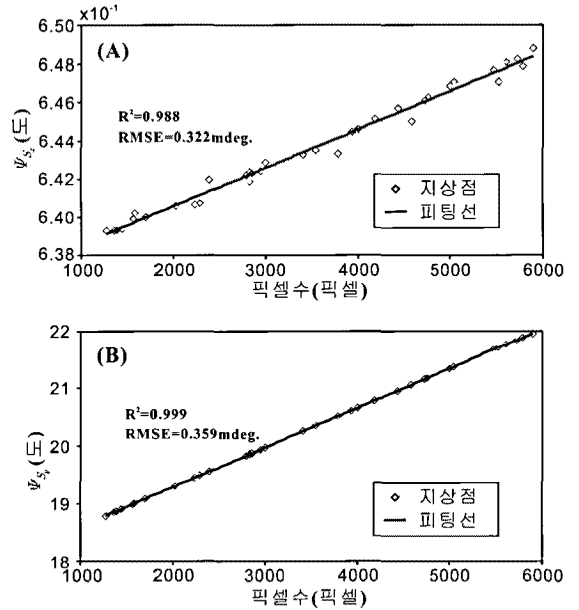


그림 2. 영상픽셀과 기하관측각 (A) ψ_s 과 (B) ψ_s 의 관계

능하다는 것을 의미한다. 즉, 오차벡터를 영상픽셀방향으로 선형으로 보정하는 시선벡터조정모델을 통하여 SPOT 4영상의 기하보정을 수행할 수 있다는 것을 나타낸다.

시선벡터조정모델의 성능을 시험하기 위해 35개의 지상점을 10개의 지상기준점과 25개의 검사점으로 나누어 실험하였다. 그림 3은 10개의 지상기준점과 25개의 검사점의 분포를 나타내며, 지상기준점과 검사점은 영상 전체에 골고루 분포하도록 배치하였다.

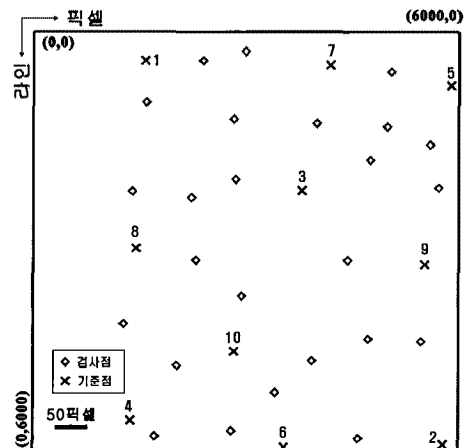


그림 3. 10개의 지상기준점과 25개의 검사점의 분포

지상기준점의 수와 정확도의 상관관계를 알기 위하여 지상기준점의 수를 2점부터 10점까지 그림 5에서 표현한 지상기준점에 부여한 번호에 따라 하나씩 늘려가면서 실험하였다. 식 (15)과 식 (16)에 의해 표현된 방정식은 영상픽셀방향으로 비례하기 때문에 1) 영상픽셀방향으로 동일한 값을 지니는 지상기준점에 의해서는 정확하게 보정할 수 없는 점과 2) 영상에서 최대한 지상기준점을 넓게 사용해야 한다는 점을 고려하여 처음 두 지상기준점은 영상의 좌상단과 우하단의 점을 사용하였고, 세 점 이상의 지상기준점에 대해서도 이를 고려하여 신중히 선택하였다.

시선벡터조정모델은 지상기준점을 이용하여 새로운 시선벡터를 구하는 것으로 최소한 두 점의 지상기준점이 필요하다. 그림 3의 지상기준점을 이용하여 본 모델에 대한 지상기준점 수와 정확도에 대한 상관관계를 알기 위하여 지상기준점 수에 따라 영상 라인과 픽셀방향으로의 RMSE(root mean square error)를 표 4에 나타내었다. 지상기준점 수가 2점인 경우의 RMSE는 영상 라인과 픽셀 방향으로 각각 0.51픽셀과 0.85픽셀인 반면, 3점인 경우 영상 라인과 픽셀방향으로 각각 0.43픽셀과 0.70픽셀로 2점에 비하여 정확도가 증가하였지만, 3점 이상의 지상기준점을 사용한 경우에는 RMSE가 크게 좋아지지 않는 결과를 보였다. 반면, 지상기준점의 수가 늘수록 초기에 상대적으로 낮았던 영상라인방향 오차는 높아지고, 상대적으로 높았던 영상픽셀방향 오차는 낮아져 서로 비슷한 오차값으로 수렴하는 경향을 보였다.

이는 일반적인 번들조정법에서 지상기준점의 수가 증가함에 따라 오차가 지속적으로 줄어드는 현상(김갑래 등, 2003)과는 차이를 보인다. 이 결과는 시선벡터조정모델이 지상기준점의 수보다는 지상기준점과 그에 해당하는 영상점의 정확도가 더 중요하다는 것을 의미한다. 비록 지상기준점의 수에 따라 수평오차의 정확도는 크게 좋아지지 않지만, 지상기준점 수에 따라 영상 라인과 픽셀방향 오차가 서로 비슷한 값을 지니는 것은 지상기준점 자체가 지니고 있는 오차를 상호 보정하기 때문이다.

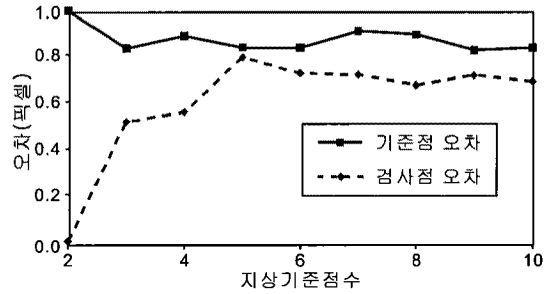


그림 4. 지상기준점 수에 따른 지상기준점과 검사점의 오차

그림 4는 지상기준점에 의한 수평오차와 검사점에 의한 RMSE를 지상기준점 수에 따라 도시한 것이다. 2점의 지상기준점이 사용되었을 때 검사점의 RMSE는 0.99였으며, 5점의 지상기준점이 사용되었을 때 검사점과 지상기준점의 RMSE는 각각 0.83과 0.79였다. 지상기준점 자체가 지니는 오차를 서로 보정하기 위하여 지상기준점에 의한 수평오차는 지상기준점이 5점을 지닐 때까지 증가하다가 그 이후에는 약간 감소하였다. 지상기준점이 5점 일 때의 이는 SPOT 4 영상 기하를 안정적으로 보정하기 위해서는 5점 이상이 필요하다는 것을 나타낸다. 표 4와 그림 4에서 표현된 모든 오차는 1픽셀 이하의 값을 지녔고, 이는 시선벡터조정모델이 비교적 정확도가 높고 영상에 고루 분포하는 지상기준점을 이용하여 SPOT 4 영상기하를 효과적으로 보정할 수 있다는 것을 의미한다.

4. 결 론

이 연구에서는 SPOT4 위성영상을 기하학적으로 보정하기 위하여 조건 방정식을 유도하였고, 관측각에 의해 정의되는 시선벡터를 조정하여 위성영상의 기하를 보정하는 SPOT 4영상을 위한 시선벡터 조정모델을 수립하였다. 시선벡터조정모델의 성능을 검증하기 위하여 관측각이 약 20도인 SPOT 4 위성영상에 적용하여 실험하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

첫째, 35개의 지상점을 이용하여 유도된 방정식에 적

표 4. 지상기준점 수에 따라 영상 라인과 픽셀방향으로의 RMSE(root mean square error)

기준점 개수	2	3	4	5	6	7	8	9	10
픽셀방향오차(픽셀)	0.8	50.70	0.78	0.68	0.68	0.72	0.70	0.64	0.64
라인방향오차(픽셀)	0.51	0.43	0.41	0.48	0.48	0.53	0.54	0.50	0.53
총 오차(픽셀)	0.99	0.83	0.88	0.83	0.83	0.90	0.88	0.82	0.83

용한 결과 오차벡터의 평균은 영상 라인과 픽셀 방향에 대해 각각 41.63과 33.23픽셀로 큰 값을 나타냈지만, 오차벡터의 표준편차는 0.593과 0.796픽셀로 작은 값을 나타내었고, 기하관측각 ψ_s 와 ψ_r 를 선형으로 피팅한 결과의 결정계수가 각각 0.988 과 0.999이었다. 이는 시선벡터조정모델이 SPOT 4 위성영상에 적용할 수 있다는 것을 증명하는 것이다.

둘째, 2개에서 10개의 지상기준점과 25개의 검사점을 이용하여 LOS 벡터 조정 모델을 통한 영상의 기하 보정을 수행하였다. 그 결과는 지상기준점 수가 2점인 경우의 RMSE는 영상 라인과 픽셀 방향으로 각각 0.51픽셀과 0.85픽셀인 반면, 3점인 경우 영상 라인과 픽셀방향으로 각각 0.43픽셀과 0.70픽셀이었다. 3점의 지상기준점을 이용한 경우는 2점을 이용한 경우에 비하여 정확도가 증가하였지만, 3점 이상의 지상기준점을 사용한 경우에는 RMSE가 크게 좋아지지 않는 결과를 보이지 않았다. 또한 이 결과는 SPOT 4영상에 대하여 시선벡터조정모델이 2개 이상의 지상기준점을 이용하였을 때 1픽셀 미만의 정밀도를 지닌다는 것을 의미한다.

셋째, 지상점의 수와 오차를 분석하였을 때 시선벡터 조정모델은 푸쉬브룸 위성영상인 SPOT 4에 대하여 비교적 정확도가 높고, 영상에 고루 분포하는 2점 이상의 지상기준점으로 영상 기하를 효과적으로 보정할 수 있었으며, 특히 지상기준점이 5점 이상이 사용되었을 때 SPOT 4 영상의 기하보정을 안정적으로 수행할 수 있다.

마지막으로 이 방법은 위성의 궤도가 정확한 Quickbird, Kompsat-2 등의 고해상 위성 영상에도 적용가능할 것으로 판단한다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단 기초연구사업(과제번호:2009-0067697)지원으로 수행되었음.

참고 문헌

김감래, 안병구, 김명배 (2003), SPOT 영상을 사용한 3차원 모델링시 지상기준점수에 따른 정확도 평가, 한국측량학회지, 한국측량학회, 제 21권, 제 1호, pp. 61-69.
 신동석, 이영란 (1997), 선형 CCD카메라 영상의 기하학

적 모델 수립 및 좌표변환, 대한원격탐사학회지, 대한원격탐사학회, 제 13권, 제 1호 pp. 95-98.
 최선용, 신대식, 이용웅 (2003), SPOT-5(HRG) 입체위성영상의 3차원 모델링 기법 연구, 한국측량학회지, 한국측량학회, 제 21권, 제 3호, pp. 255-260.
 Gagan, D. J. and Dowman I. J. (1988), Accuracy and completeness of topographic mapping from SPOT imagery, *Photogrammetric Record*, Vol. 54, No. 10, pp. 1431-1437.
 Jung, H. S., Kim, S. W. and Won, J. S. (2004), The simple method of geometric reconstruction for SPOT images, *Proceedings of International Symposium on Remote Sensing 2004*, pp. 205-207.
 Jung, H. S., Kim, S. W., Won, J. S. and Lee, D. C. (2007), Line-of-sight (LOS) vector adjustment model for geopositioning of SPOT 5 stereo images, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 73, pp. 1267-1296.
 Kratky, V. (1989), Rigorous photogrammetric processing of SPOT images at CCM Canada, *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, Vol. 44, pp. 53-71.
 Lee, Y. R., Habib, A. and Kim, K. O. (2003), A study on aerial triangulation from multi-sensor imagery, *Korean Journal of Remote Sensing*, Vol. 19, No. 3 pp. 255-261.
 Orun, A. B. and K. Natarajan (1994), A modified bundle adjustment software for SPOT imagery and photography: Tradeoff, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 60, No. 12, pp. 1431-1437.
 Radhadevi, P. V., Ramachandran, R. and Murali Mohan, A. S. R. K. V. (1998), Restitution of IRS-1C PAN data using an orbit attitude model and minimum control, *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, Vol. 53, pp. 262-271.
 Rajiv, G. and Richard, I. H. (1997), Linear pushbroom camera, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 19, No. 9, pp. 963-975.
 Slama, C. C., Theurer, C. and Henriksen, S. W. (1980), *Manual of Photogrammetry*, American Society of Photogrammetry.
 Riazanoff, S. (2002), *SPOT satellite geometry handbook*, Spot Image, CNES and IGN.
 Valadan Zoej, M. J. and Petrie, G. (1998), Mathematical modeling and accuracy testing of SPOT level 1B stereopairs, *Photogrammetric Record*, Vol. 16, No. 91, pp. 67-82.

Westin, T. (1990), Precision rectification of SPOT imagery,
Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol.
56, No. 2, pp. 247-253.

(접수일 2010. 03. 09, 심사일 2010. 04. 16, 심사완료일 2010. 04. 20)