

연구논문

평행투영 기반의 고해상도 위성영상 에피폴라 재배열 Epipolar Resampling for High Resolution Satellite Imagery Based on Parallel Projection

노명종* · 조우석** · 장휘정*** · 정지연****

Noh, Myoung Jong · Cho, Woo Sug · Chang, Hwi Jeong · Jeong, Ji Yeon

要 旨

선형 CCD 센서에 의해 획득되는 위성영상의 기하는 프레임 카메라 영상의 기하와는 차이점을 가지고 있다. 이는 각 스캔 선마다 영상의 외부표정요소가 다르기 때문에 발생한다. 따라서 기존의 프레임 영상에 사용되었던 에피폴라 기하와는 다른 기하가 필요하게 된다. 이와 같은 관점에서, 본 연구에서는 대표적인 선형 CCD 센서를 사용하여 촬영된 IKONOS 위성영상을 이용하여 에피폴라 영상을 제작하기 위한 영상 재배열 방법에 대한 연구를 수행하였으며, 영상의 투영조건을 중심투영이 아닌 평행투영으로 간주하여 구성된 2D 부등각 센서모델을 적용하였다. 이 센서모델에 의해 구성된 에피폴라 선식으로부터 유도된 정규 매개변수와 부등각 변환을 적용하여 에피폴라 재배열 영상을 제작하였다. 결과로써, 2D 부등각 센서모델의 정확도가 검증되었으며, 제작된 에피폴라 영상을 사용하여 추출된 3차원 위치정확도는 IKONOS의 RFM 위치정확도와 유사하게 도출되었다.

핵심용어 : 선형 CCD 스캐너, 에피폴라 기하, 에피폴라 재배열, 평행투영

Abstract

The geometry of satellite image captured by linear CCD sensor is different from that of frame camera image. The fact that the exterior orientation parameters for satellite image with linear CCD sensor varies from scan line by scan line, causes the difference of image geometry between frame and linear CCD sensor. Therefore, we need the epipolar geometry for linear CCD image which differs from that of frame camera image. In this paper, we proposed a method of resampling linear CCD satellite image in epipolar geometry under the assumption that image is not formed in perspective projection but in parallel projection, and the sensor model is a 2D affine sensor model based on parallel projection. For the experiment, IKONOS stereo images, which are high resolution linear CCD images, were used and tested. As results, the spatial accuracy of 2D affine sensor model is investigated and the accuracy of epipolar resampled image with RFM was presented.

Keywords : Linear CCD scanner, Epipolar geometry, Epipolar resampling, Parallel projection

1. 서 론

과학이 발전함에 따라 인공위성과 관련한 기술도 비약적인 발전을 이루게 되었다. 이를 토대로 최초의 민간 상업 인공위성인 SPOT(Systeme Pour l' Observation de la Terre)이 프랑스에서 개발 발사되어 현재까지 많은 위성영상을 획득하고 있다.

우리나라는 국내 최초의 과학위성인 우리별 1호를 1992년 개발하여 발사함으로써 우주시대의 개막을 알렸다. 이후 우주개발중장기계획에 의해 통신위성 무궁화 1,2,3호 위성을 발사하였으며 지형정보 획득을 위한 KOMPSAT-1 (Korea Multi-Purpose Satellite-1) 위성과 KOMPSAT-2 위성이 각각 1999년과 2006년에 발사되었다.

위성영상을 통해서 지형의 공간적인 정보를 획득하기

2007년 11월 2일 접수, 2007년 12월 3일 채택

* 교신저자·인하대학교 지리정보공학과 박사과정 (nmj@inha.ac.kr)

** 정회원·인하대학교 토목공학과 교수 (wcho@inha.ac.kr)

*** 인하대학교 지리정보공학과 박사후과정 (hjchang@inha.ac.kr)

**** 인하대학교 지리정보공학과 석사과정 (jyjeong@inhainha.net)

위해서는 필수적으로 영상과 지상간의 기하학적 관계를 정립할 수 있는 정확한 센서모델이 수립되어야 한다. 일반적으로 이러한 센서모델은 크게 물리적 모델(physical model), 축약 모델(abstract model), 일반화 모델(generalized model)로 구분될 수 있다(McGlone, 1996). McGlone은 물리적 모델을 사진측량학적 모델(photogrammetric model), 엄밀 모델(rigorous model)등으로 구분하였으며, 축약 모델은 투영 모델(perspective projection model), 직접선형 변환 모델(Direct Linear Transformation model)등으로 구분하였다. 또한 일반화 모델은 rubber-sheeting과 유리함수모델(rational function model)등으로 구분하였다. 위성 영상에 대해 물리적 센서모델을 수립할 경우 각 위성 센서의 특징 및 설계 방식에 따라 센서모델이 다르게 수립되어야 하며, 위성에서 제공하는 궤도 데이터(ephemeris data)를 사용하여야 한다. 따라서 사용되어지는 위성센서에 따라 각기 다른 센서모델이 수립되어야 하는 어려움을 가지고 있으며, 궤도 데이터의 부재 시 센서모델의 수립이 어렵다는 단점을 가지고 있다. 이러한 물리적 센서모델에 대한 단점을 보완하기 위하여 축약 모델이 사용되어지게 된다. 축약 모델은 위성영상의 선형 CCD 센서에 대한 외부표정요소를 시간에 대한 함수로 나타내어 수립되어지는 모델로써, 이러한 센서 모델에 관한 연구는 SPOT 위성영상을 이용하여 Orun(1994)과 Gupta(1997)등이 수행하였다. Orun은 위성영상의 선형 CCD 센서에 대한 외부표정요소 중, 위치요소를 시간에 대한 2차식으로, 자세요소 중 $k(z$ -축에 대한 자세요소)를 시간에 대한 2차식으로 가정한 축약 모델을 제안하였다. 또한 Gupta는 센서모델에서 3개의 위치요소, 3개의 속도벡터 및 3개의 자세요소로 가정한 센서모델을 제안하였다. Konency(1987)는 위성이 직선으로 운동한다고 가정하여 외부표정요소 중 위치요소를 시간에 대한 1차함수로 나타내고 회전요소를 시간에 대한 다항식으로 가정한 센서모델을 제안하였다. 이러한 축약 센서모델은 위성 센서의 종류에 무관하게 사용될 수 있는 장점을 가지고 있지만, 물리적 센서모델에 비하여 그 정확도가 떨어진다는 단점을 가지고 있다.

항공사진과 같은 프레임 카메라 영상과는 다르게 선형 CCD 센서에 의하여 획득되어지는 인공위성 영상은 각 스캔 라인마다 서로 다른 외부표정요소를 가지고 있으며, 따라서 에피폴라 기하가 프레임 영상의 에피폴라 기하와는 다르게 된다. 이와 같은 기하학적 차이에 의해 위성영상 센서모델로부터 에피폴라 기하를 결정하기 위한 연구가 수행되었다. Ono(1999)는 위성영상을 부등각 영상(affine image)으로 간주한 2D 부등각 센서모델을 수립하여 에피폴라 재배열 영상을 제작하는 방법을 제안하였다.

이 논문에서는 에피폴라 영상을 제작하기 위하여 좌우 두 영상의 회전각도만을 고려하였기 때문에 좌우 스테레오 영상에 존재하는 중시차를 정확하게 분석하기에는 어려운 단점이 있다. 김태정(2000)은 SPOT 위성영상을 사용하여 Orun & Natarajan 모델을 기반으로 에피폴라 기하학에 대한 연구를 수행하였으며, 에피폴라 선이 직선이 아닌 곡선의 형태로 유도된다는 사실을 입증하였다. 또한 Morgan(2004)은 IKONOS 위성영상에 대해 평행투영(parallel projection)을 기반으로 한 에피폴라 기하학에 대한 연구를 수행하였으며, 근사 에피폴라 직선 식을 유도하였다. 이 논문에서는 에피폴라 영상을 제작하기 위하여 위성영상에 대한 표정요소를 추출한 후, 이를 이용하여 평행투영으로 간주하여 발생할 수 있는 오차를 축척 수정(scale modification) 과정을 통하여 제거하였다. 이 방법은 영상이 가지고 있는 표정요소가 정확하게 추출되어져야 하며, 연산 과정이 복잡하다는 단점이 있다. 오재홍(2006)도 이러한 평행투영 모델을 기반으로 하여 IKONOS의 RPC(Rational Polynomial Coefficients) 데이터를 이용한 에피폴라 영상 재배열 방법에 대한 연구를 수행하였다. 이 방법에서는 제공된 RPC를 지상기준점을 이용하여 갱신하고 이를 이용하여 가상의 지상기준점을 추출한 후, 평행투영 모델을 수립하여 에피폴라 영상을 제작하였다. 그러나 IKONOS의 갱신된 RPC의 정확도에 따라 모델의 정확도가 영향을 받는 문제점이 있다. 따라서 이러한 RPC 데이터 없이 영상의 공액점만을 이용한 연구를 통하여 비교, 검증하는 것이 필요하다고 사료된다.

선행된 연구에서 살펴 볼 수 있듯이, 에피폴라 기하를 결정하기 위해서는 센서모델이 정의되어야 하며, 이를 위해 본 연구에서는 기존의 방식과 같이 위성영상의 투영을 중심투영이 아닌 평행투영으로 간주하고 이를 만족하는 위성의 궤도 운동을 등속직선운동으로 가정하여 센서모델을 수립하여 사용하고자 한다. 이러한 평행투영이 가능한 이유는 위성의 촬영고도가 매우 높으며(예, IKONOS 681km), 좁은 AFOV(Apparent Field of View, 약 0.93°)를 가지고 있기 때문이다.(Morgan, 2004)

따라서 본 연구에서는 선형 CCD 센서가 탑재된 위성 영상에 대해 일반적으로 적용할 수 있는 에피폴라 기하를 평행투영 기반으로 수립하여, Ono(1999)가 제안한 부등각 변환(affine transformation) 방법과 Morgan(2004)이 제안한 에피폴라 영상 재배열 방법을 병행하여, 영상의 공액점만을 이용한 에피폴라 영상 재배열 방법을 제시하고자 한다. 또한 제작된 에피폴라 영상의 실제 적용가능성을 검토하기 위하여 2D 부등각 센서모델과 RFM과의 비교·분석을 수행하였다.

2. 평행투영

선형 CCD 센서에 의해 획득되는 위성영상은 다음과 같은 위성의 특징으로 인해 중심투영 영상을 평행투영 영상으로 간주 할 수 있다.(Morgan, 2004)

- 선형 CCD 센서는 매우 높은 촬영고도와 작은 AFOV를 가지고 있으므로, 중심투영을 평행투영에 가깝게 만들 수 있다.(촬영 고도 : IKONOS 681km, AFOV : 0.93°)(그림 1)
- 위성영상은 짧은 시간동안 촬영되어지므로, 한 영상을 촬영하는 동안 센서는 같은 자세를 유지하고 있다고 가정할 수 있다(IKONOS : 약 1초). 따라서 매 스캔 라인에서 투영중심과 스캔 라인을 포함하는 평면은 각 스캔 라인마다 서로 평행하다고 할 수 있다.(그림 2)

그림 3은 매우 작은 AFOV를 가지고 직선으로 움직이는 센서에 의해 획득된 영상과 지상간의 관계를 나타낸다. 그림에서 볼 수 있듯이, 지상에서 평행한 선들은 영상에서도 평행한 선들로 나타나고 있으며, 점 A, B, C 사이의 거리 비율은 영상에서도 같은 비율로 나타남을 알 수 있다. 반면에 그림 4는 직선으로 움직이지 않는 센서에 의해 획득된 영상을 나타내며, 이 경우 지상에서의 직선은 영상에서 직선으로 나타나게 되지 않음을 알 수 있다.

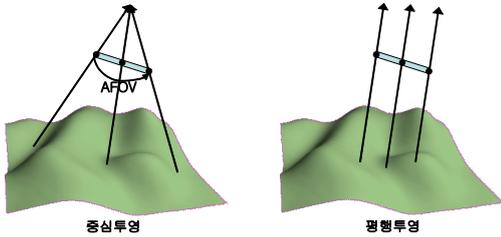


그림 1. 중심투영과 평행투영(Morgan, 2004)

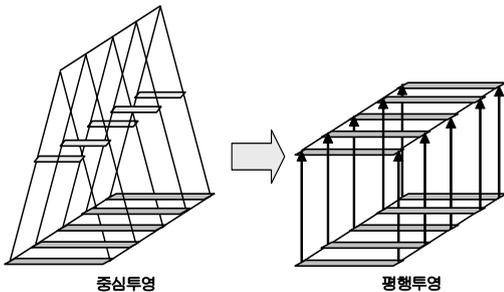


그림 2. 각 스캔 라인에서의 스캔 라인과 투영 중심이 이루는 평면(Morgan, 2004)

즉, 지상에서의 직선 AB와 BC는 영상에서 곡선 ab와 bc로 나타나게 된다.

선형 CCD 스캐너에 의하여 획득된 영상을 중심투영 영상인 아닌 평행투영 영상으로 가정한다면, 가정에 부합하기 위하여 위성의 궤도에 대한 모델을 등속직선 궤도 모델로 적용할 수 있다. 따라서 식 (1)과 같이 위성영상의 외부표정요소를 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} X_{0i} &= X_0 + \Delta X \cdot i \\ Y_{0i} &= Y_0 + \Delta Y \cdot i \\ Z_{0i} &= Z_0 + \Delta Z \cdot i \\ \omega_i &= \omega \\ \phi_i &= \phi \\ \kappa_i &= \kappa \end{aligned} \tag{1}$$

여기서, i 는 각 스캔 라인을 나타내며, Δ 는 변화량을 나타낸다.

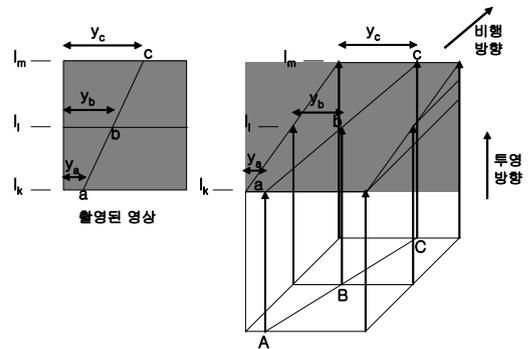


그림 3. 직선으로 움직이는 스캐너에 대한 지상과 영상의 거리 비교(Morgan, 2004)

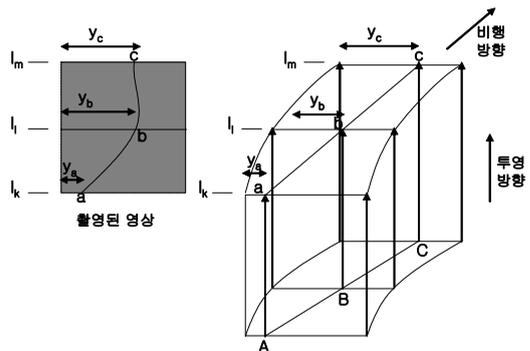


그림 4. 직선으로 움직이지 않는 스캐너에 대한 지상과 영상의 거리 비교(Morgan, 2004)

3. 에피폴라 기하

3.1 선형 CCD 센서 영상에 대한 공선조건식

일반적인 항공사진이나 2D 프레임 디지털 카메라 영상은 중심투영에 의한 영상이다. 이러한 영상들의 표정요소들은 다음과 같은 공선조건식을 만족한다.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix} = \lambda(R_w R_\phi R_\kappa)^T \begin{bmatrix} X - X_o \\ Y - Y_o \\ Z - Z_o \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서 f 는 초점거리를 나타낸다.

선형 CCD 센서 위성영상은 위성의 진행 방향에 따라 각각의 스캔 라인마다 투영중심과 회전요소를 가지고 있는 영상이다. 식 (2)를 위성의 진행 방향에 대한 식으로 표현하면 다음과 같이 변형된 식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} i \\ y_i \\ -f \end{bmatrix} = \lambda(R_{\omega_i} R_{\phi_i} R_{\kappa_i})^T \begin{bmatrix} X - X_{oi} \\ Y - Y_{oi} \\ Z - Z_{oi} \end{bmatrix} \quad (3)$$

위의 식에서 i 는 위성의 진행방향으로 영상을 획득할 때 해당 영상의 i 번째 스캔 라인을 의미한다. 즉 일반적인 공선조건식의 x 가 i 에 해당한다. 또한 $\lambda, R_{\omega_i}, R_{\phi_i}, R_{\kappa_i}$ 는 각각 축척요소, 회전요소를 나타낸다.

3.2 2D 부등각 센서모델

식 (3)을 i 와 y 에 대해 정리하여 나타내면 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} i &= r_{11}(X - X_{oi}) + r_{12}(Y - Y_{oi}) + r_{13}(Z - Z_{oi}) \\ y &= r_{21}(X - X_{oi}) + r_{22}(Y - Y_{oi}) + r_{23}(Z - Z_{oi}) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 $r_{ij}(i=1,2;j=1,2,3)$ 는 $\lambda(R_{\omega_i} R_{\phi_i} R_{\kappa_i})^T$ 로 구성된 행렬요소를 나타낸다.

따라서 i 번째 스캔 라인은 식 (4)의 첫 번째 식에 식 (1)의 등속직선 궤도 모델을 적용하여 나타내면 다음과 같이 표현되어진다.

$$i = \frac{r_{11}(X - X_o) + r_{12}(Y - Y_o) + r_{13}(Z - Z_o)}{r_{11}\Delta X + r_{12}\Delta Y + r_{13}\Delta Z} \quad (5)$$

여기서 스캔 라인을 나타내는 i 를 영상좌표로 변환하여 표현할 수 있으므로 식 (5)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$x = A_1 X + A_2 Y + A_3 Z + A_4 \quad (6)$$

식 (4)의 두 번째 식도 같은 방법으로 치환하여 나타낼 수 있으며, 최종적으로 식 (4)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} x &= A_1 X + A_2 Y + A_3 Z + A_4 \\ y &= A_5 X + A_6 Y + A_7 Z + A_8 \end{aligned} \quad (7)$$

식 (7)을 영상과 지상간의 관계를 나타내는 2D 부등각 센서모델이라 한다(Ono, 1999).

3.3 에피폴라 선 방정식

에피폴라 기하를 결정하기 위해서는 에피폴라 선이 결정되어야 한다. 이는 두 영상에 존재하는 공액점의 영상 좌표와 이에 대응되는 지상좌표를 사용하여 2D 부등각 센서모델에 적용함으로써 유도될 수 있다.

$$\begin{aligned} x_i &= A_{1i} X + A_{2i} Y + A_{3i} Z + A_{4i} \\ y_i &= A_{5i} X + A_{6i} Y + A_{7i} Z + A_{8i} \\ x_r &= A_{1r} X + A_{2r} Y + A_{3r} Z + A_{4r} \\ y_r &= A_{5r} X + A_{6r} Y + A_{7r} Z + A_{8r} \end{aligned} \quad (8)$$

여기서, (x_i, y_i) 는 왼쪽 영상좌표, (x_r, y_r) 는 왼쪽 영상좌표에 대응하는 오른쪽 영상좌표를 나타내며, X, Y, Z 는 공액점의 지상좌표를 나타낸다.

위의 식에서 지상좌표의 X, Y 를 소거하면 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} x_r &= B_1 x_i + B_2 y_i + B_3 Z + B_4 \\ y_r &= B_5 x_i + B_6 y_i + B_7 Z + B_8 \end{aligned} \quad (9)$$

위의 식은 지상좌표의 높이 값과 왼쪽 영상의 영상좌표를 이용하여 이에 대응되는 오른쪽 영상에서의 공액점의 위치가 어디에 존재하는가를 나타내고 있다. 식 (9)의 두 식을 이용하여 지상좌표의 높이 값인 Z 를 소거한 후 정리하면, 다음과 같은 선형의 에피폴라 선을 결정할 수 있다(Ono, 1999 ; Morgan, 2004).

$$y_r = C_1 x_r + C_2 y_i + C_3 x_i + C_4 \quad (10)$$

위의 식은 왼쪽 영상의 영상좌표에 대해 오른쪽 영상에 존재하는 에피폴라 선을 의미한다. 동일한 방법으로 오른쪽 영상좌표에 대해 왼쪽 영상에 존재하는 에피폴라 선을 결정할 수 있다.

3.4 에피폴라 재배열

에피폴라 재배열을 하기 위해서는 좌우 두 영상에 존재하는 에피폴라 선의 방향을 결정하여야 한다. 식 (10)과

같이 2D 부등각 센서모델을 적용하여 도출된 에피폴라 선 방정식은 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$G_1x_l + G_2y_l + G_3x_r + G_4y_r = 1 \quad (11)$$

여기서, G_1, G_2, G_3, G_4 는 에피폴라 선 방정식 정규 매개 변수라고 하며, 이 정규 매개변수들은 좌우 영상에서 4개 이상의 공액점을 이용하면 최소제곱법을 적용하여 결정할 수 있게 된다.

에피폴라 영상 재배열을 수행하기 위하여 두 영상사이의 회전각(θ_l, θ_r), 축척계수(S) 그리고 종시차를 제거하기 위한 평행이동 계수(Δy)를 좌우 두 영상에 적용하여 나타내면 식 (12)와 같이 나타낼 수 있다.(Morgan, 2004)

$$\begin{bmatrix} x_{nl} \\ y_{nl} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_l & \sin\theta_l \\ -\sin\theta_l & \cos\theta_l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_l \\ y_l \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} x_{nr} \\ y_{nr} \end{bmatrix} = S \begin{bmatrix} \cos\theta_r & \sin\theta_r \\ -\sin\theta_r & \cos\theta_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_r \\ y_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta y \end{bmatrix}$$

여기서, x_l, y_l, x_r, y_r 은 좌우 영상에 존재하는 공액점의 영상좌표를 나타내며, $x_{nl}, y_{nl}, x_{nr}, y_{nr}$ 은 좌우 에피폴라 영상의 영상좌표를 나타낸다.

위 식에서 에피폴라 기하를 만족하기 위해서는 에피폴라 영상에 존재하는 공액점의 y 좌표가 동일하여야 한다. 즉 $y_{nl} = y_{nr}$ 이어야 하므로, 이 조건을 이용하여 식 (11)과 (12)에 존재하는 매개변수들 사이의 관계를 결정하면 다음과 같다.

$$\theta_l = \arctan\left(-\frac{G_1}{G_2}\right)$$

$$\theta_r = \arctan\left(-\frac{G_3}{G_4}\right) \quad (13)$$

$$\Delta y = -\frac{\sin\theta_l}{G_1} = \frac{\cos\theta_l}{G_2}$$

$$S = \frac{G_3\Delta y}{\sin(\theta_r)} = -\frac{G_4\Delta y}{\cos(\theta_r)}$$

위의 식에 의해 제작된 두 에피폴라 영상의 y 좌표는 동일하게 된다.

2D 부등각 센서모델에 의해 제작된 영상은 평행투영의 가정에 의해 투영중심을 가진 중심투영 영상이 아닌 초점거리를 무한대 위치에 놓은 평행투영 영상으로 볼 수 있다. 다시 말해서, 2D 부등각 변환 영상에서의 모든 점의 투영방향은 서로 동일하다는 것을 의미한다. 따라서 두 영상에 존재하는 부등각(affinity)를 고려하고, 같은 높이의 지역에 대해서 같은 횡시차(x-parallax)가 존재하도록

록 하기 위하여 두 에피폴라 영상사이의 식 (14)와 같은 부등각 변환을 적용하여 최종적인 에피폴라 영상을 제작한다.

$$\begin{aligned} x &= K_1x' + K_2y' + K_3 \\ y &= K_4x' + K_5y' + K_6 \end{aligned} \quad (14)$$

식 (14)에서 $K_1, K_2, K_3, K_4, K_5, K_6$ 는 부등각 변환 계수이며, 이는 좌우 영상에서 3개 이상의 공액점을 사용함으로써 최소제곱법을 적용하여 결정할 수 있다.

상기 과정을 통하여 원 영상과 에피폴라 재배열 영상의 기하 관계를 정립한 후, 공2차 보간법을 이용하여 최종적인 에피폴라 재배열 영상을 제작한다.

4. 실험결과

4.1 실험데이터

본 연구에서는 선형 CCD 센서 위성영상에 대한 2D 부등각 센서모델에 대한 위치정확도와 제작된 에피폴라 영상의 종시차 및 위치정확도 분석을 위하여 대전 지역 일원의 IKONOS-2 입체 영상을 사용하여 실험을 수행하였다.

IKONOS-2 입체영상은 2001년 11월 16일에 대전지역을 촬영한 영상이다. 이 입체영상은 동일 촬영 경로에서 촬영각(ω)을 다르게 하여 획득된 영상으로, 센서가 위성 진행방향의 앞쪽을 향하여 촬영한 Forward 영상과 위성 진행방향의 뒤쪽을 향하여 촬영한 Backward 영상으로 구성되어 있다. 표 1은 사용된 IKONOS-2 영상의 제원을 나타낸다. 그림 5는 본 실험에서 사용한 영상으로, 원 영상을 9000×9000 으로 추출한 Forward 영상과 Backward 영상을 나타내며, 실험에 사용된 9개의 지상기준점과 5개의 검사점 분포를 나타내고 있다.

4.2 2D 부등각 센서모델의 위치정확도

좌우 영상의 2D 부등각 센서모델은 식 (15)와 같으며, 미지 계수가 16개 이므로, 적어도 4점 이상의 지상기준점과 그에 해당하는 영상좌표를 이용하여 각 계수들은 구할 수 있다. 본 연구에서는 2D 부등각 센서모델의 16개 미지계수들을 결정하기 위해서 9개의 지상기준점(UTM-wgs84 좌표계)과 그에 해당하는 영상 좌표를 사용하였다.

$$\begin{aligned} x_l &= A_1X + A_2Y + A_3Z + A_4 \\ y_l &= A_5X + A_6Y + A_7Z + A_8 \\ x_r &= B_1X + B_2Y + B_3Z + B_4 \\ y_r &= B_5X + B_6Y + B_7Z + B_8 \end{aligned} \quad (15)$$

표 1. 실험에 사용된 IKONOS-2 영상 제원

구분	Forward 영상	Backward 영상
센서	IKONOS-2	IKONOS-2
촬영 일자	2001. 11. 19. 02:18 GMT	2001. 11. 19. 02:19 GMT
Processing Level	Radiometrically corrected	Radiometrically corrected
촬영 고도	681km	681km
초점 거리	10m	10m
방사해상도	11bits	11bits
공간해상도	1m	1m
영상 크기	13816×13824	13816×14336

여기서, x_l, y_l 은 왼쪽 영상의 영상좌표, x_r, y_r 은 오른쪽 영상의 영상좌표이며, $A_{1...s}$ 은 왼쪽 영상의 2D 부등각 센서모델의 계수, $B_{1...s}$ 은 오른쪽 영상의 2D 부등각 센서모델의 계수이다.

좌우 영상에서 구성된 2D 부등각 센서모델의 위치정확도를 5점의 검사점을 사용하여 평가하였으며, 그 결과는 표 2와 같다.

본 실험에서 사용된 IKONOS-2 영상에 대한 2D 부등각 센서모델의 위치정확도는 East 방향에 대하여 약 $\pm 2.50m$, North 방향에 대하여 약 $\pm 1.37m$, 높이에 대하여 약 $\pm 2.04m$ 정도로 나타났다. 이는 IKONOS-2 영상과 함께 제공되는 RPC를 사용한 검사점의 정확도($\pm 9.40m, \pm 2.60m, \pm 6.16m$) 보다 우수한 것으로 나타났다.

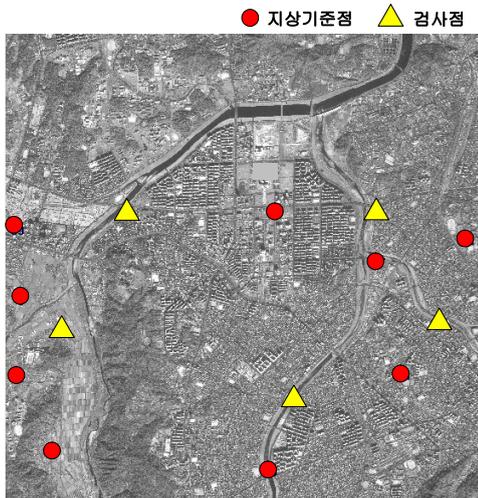
4.3 에피플라 재배열 영상의 종시차 분석

그림 6과 7에 나타난 에피플라 영상은 모두 40개의 공액점을 이용하여 제작된 것이며, 공액점(지상기준점 포함)의 개수에 따라 에피플라 영상에 존재하는 종시차의 변화를 분석하였다. 종시차는 좌우 영상의 공액점에 대한 y좌표에 대한 차이를 이용하여 구하였으며, 각각에 대한 평균제곱근오차(Root Mean Square Error, RMSE)를 비교하였다.

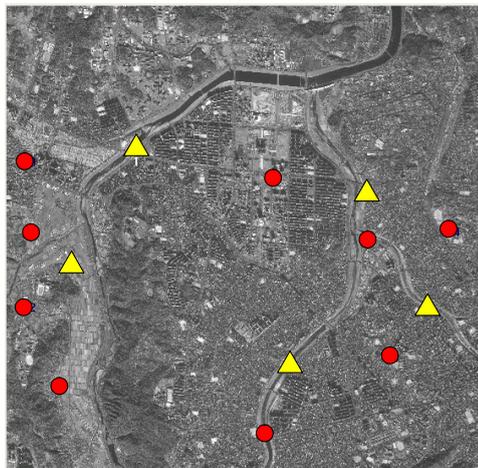
그림 8과 같이 공액점의 개수가 증가함에 따라 종시차

표 2. 검사점을 이용한 2D 부등각 센서모델의 위치정확도 (v_E, v_N, v_H : East, North, Height에 대한 잔차)

검사 점	$v_E(m)$	$v_N(m)$	$v_H(m)$
1	1.6020	-1.4075	-1.4076
3	-0.2770	0.0642	-2.4740
40	-0.2109	-0.9621	2.1808
44	-4.5911	-1.4265	1.8869
46	1.0712	-1.6004	-0.4013
RMSE	± 2.4957	± 1.3699	± 2.0359



(a) Backward 영상



(a) Forward 영상

그림 5. IKONOS-2 위성영상(9,000×9,000)

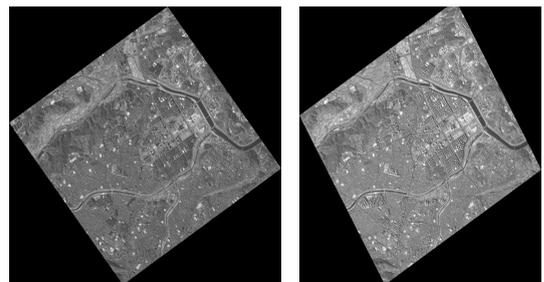


그림 6. 에피플라 좌우영상

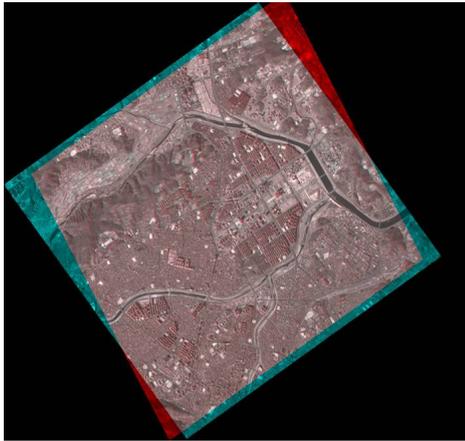


그림 7. 여색입체영상

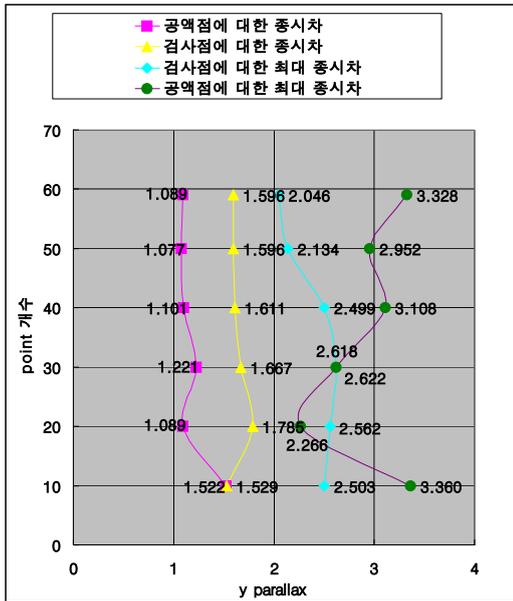


그림 8. 공역점 개수에 따른 종시차 변화

가 줄어드는 것을 볼 수 있다. 그러나 공역점의 개수가 40개 이상부터는 종시차에 거의 변화가 없는 것을 보였다. 이는 2D 부등각 센서모델의 한계로 판단되며, 이 값은 대략 1 픽셀 정도이다. 이와 같은 결과는 Morgan (2004)과 오재홍(2006)에 의한 종시차 분석 결과와 유사하다는 것을 보여준다. 또한 에피폴라 영상의 제작 시, 적절한 공역점의 개수가 약 40개 정도인 것으로 추정해 볼 수 있다.

4.4 RFM과 2D 부등각 센서모델의 위치정확도 비교

본 연구에서 사용된 IKONOS-2 영상과 함께 제공된

표 3. 향상된 RPC를 이용한 RFM과 2D 부등각 센서모델의 위치정확도 비교(5개 검사점)

방법	RMSE E[m]	RMSE N[m]	RMSE H[m]
향상된 RPC를 이용한 RFM	±1.9702	±0.5920	±0.9247
2D 부등각 센서모델	±2.4955	±1.3610	±2.0360

표 4. 향상된 RPC를 이용한 RFM과 에피폴라 영상에 대한 2D 부등각 센서모델의 위치정확도 비교

향상된 RPC를 이용한 RFM		
RMSE E[m]	RMSE N[m]	RMSE H[m]
±1.8301	±0.6742	±0.9247
에피폴라 영상에 대한 2D 부등각 센서모델		
±2.5247	±1.4095	±1.8466

RPC의 위치정확도는 약 ±10m 정도로 정확한 좌표정보를 추출하기에는 부적합하므로, 김주현(2004)이 제안한 방법에 의하여 RPC의 정확도를 향상하여 정확도 분석에 사용하였다. 이때 사용된 지상기준점은 2D 부등각 센서모델을 구성하기 위하여 사용된 지상기준점(9점)과 동일하게 사용하였다. 향상된 RPC를 이용한 검사점의 좌표는 나재홍(2003)이 제안한 방법으로 결정하여 RFM의 위치정확도를 계산하였으며, 2D 부등각 센서모델의 위치정확도와 비교하여 표 3에 나타내었다.

동일한 지상기준점을 사용하여 구성된 두 모델간의 위치정확도는 향상된 RPC를 이용한 RFM이 East 방향에 대해서 약 1.97m, North 방향에 대해서 약 0.59m, 높이에 대해 약 0.92m로 나타났으며, 2D 부등각 센서모델의 위치정확도는 East 방향에 대하여 약 2.50m, North 방향에 대하여 약 1.36m, 높이에 대해 약 2.04m로 나타났다. 전체적으로 RFM의 위치정확도가 2D 부등각 센서모델에 비하여 2배 정도 우수하게 나타났다.

제작된 에피폴라 영상에 대한 위치정확도를 두 가지 모델, 즉 2D 부등각 센서모델과 RFM을 이용하여 비교·검증하였다. 먼저 제작된 에피폴라 영상을 Zeiss사의 ImageStation의 입체시모듈을 이용하여 지상검사점에 대한 에피폴라 영상좌표를 획득하였다. 이와 같이 얻어진 영상좌표를 각각 2D 부등각 센서모델과 RFM에 적용하여 3차원 좌표를 계산하고 이를 비교하여 표 4에 나타내었다.

표 4에 나타난 바와 같이 에피폴라 영상좌표를 2D 부등각 센서모델에 적용한 위치정확도는 2D 부등각 센서모델의 한계로 인하여 표 3과 비슷하지만, 2D 부등각 센서모델에 기반하여 제작된 에피폴라 영상의 공역좌표를

RFM에 적용한 결과는 원 영상의 영상좌표를 이용하여 결정된 3차원 좌표의 정확도와 유사하게 나타났다.

따라서 등속직선궤도 및 2D 부등각 센서모델에 기반하여 제작한 에피폴라 재배열 영상과 RFM을 함께 사용하면 우수한 위치정확도를 얻을 수 있다는 결과를 얻었다.

6. 결 론

본 연구에서는 선형 CCD 센서에 의해 획득되는 IKONOS-2 위성영상을 중심투영이 아닌 평행투영으로 가정한 기하를 이용하여 에피폴라 영상을 제작하는 방법을 제시하였다. 사용된 2D 부등각 센서모델에 대한 위치정확도와 제작된 에피폴라 영상에 대한 위치정확도는 검사점을 사용하여 분석되었으며, 에피폴라 영상 제작 시 사용되는 공액점의 개수에 따른 중시차의 변화를 분석하였다. 또한 RFM 모델과 제작된 에피폴라 영상과의 연관성에 대한 검토가 이루어졌다. 본 연구의 수행 결과를 정리하면 다음과 같다.

첫째, 평행투영 기하를 이용하여 결정된 2D 부등각 센서모델의 위치정확도는 East 방향에서 약 2.5m, North 방향에서 약 1.4m, 높이에 대해서 약 2m 정도로 나타났다.

둘째, 에피폴라 영상을 제작하기 위하여 사용되는 공액점의 개수는 약 40개 정도가 적정하며, 이때의 중시차는 약 1픽셀 정도이다. 40개가 넘는 공액점을 이용하여 에피폴라 영상을 제작하더라도 1픽셀 정도의 중시차는 제거되어지지 않으며, 이는 평행투영을 가정으로 한 2D 부등각 센서모델의 한계라고 볼 수 있다.

셋째, 향상된 RPC를 이용한 RFM의 위치정확도와 2D 부등각 센서모델의 정확도를 비교한 결과, 향상된 RPC를 이용한 RFM이 East 방향에 대해서 약 0.5m, North 방향에 대해서 약 0.7m, 높이에 대해 약 1m 정도의 더 정확한 결과를 확인 할 수 있었으며, 이는 약 2배 정도 우수한 결과이다.

넷째, 등속직선궤도 및 2D 부등각 센서모델에 기반하여 제작된 에피폴라 영상과 RFM을 함께 사용하면 우수한 위치정확도를 얻을 수 있다고 판단된다. 이는 RFM을 이용한 에피폴라 영상 제작이 어려운 경우 본 연구에서 제안한 방법으로 제작된 에피폴라 영상을 사용하여 RFM의 정확도로 3차원 좌표를 추출할 수 있다는 것을 의미한다. 따라서 IKONOS-2 위성영상의 에피폴라 영상은 각 센서 라인마다 외부표정요소가 다름으로 인해 제작에 어려움이 있으므로, 본 연구에서 제시한 방법으로 에피폴라 영상을 제작하여 RFM을 사용한 3차원 좌표 추

출이 효과적이라고 할 수 있다.

본 연구는 실험에 사용한 영상이 대전 일대의 IKONOS-2 영상에만 국한 되어져 있으므로, 이러한 결과가 절대적인 값이라고 보기는 어렵다. 따라서 보다 많은 데이터를 이용하여 2D 부등각 센서모델의 위치정확도 및 제작된 에피폴라 영상의 위치정확도를 검증할 필요가 있다.

감사의 글

이 논문은 인하대학교의 지원에 의하여 연구되었으며, 지원에 감사드립니다. 또한 실험데이터를 제공하여 주신 한국전자통신연구소(ETRI)에도 감사드립니다.

참고문헌

1. 오재홍, 신성웅, 김경옥, 2006, "Direct Epipolar Image Generation From IKONOS Stereo Imagery Based On RPC and Parallel Projection Model", *대한원격탐사학회*, 제 22권, 제 5호, pp. 451-456
2. 김주현, 2004, "지상기준점과 3D Cube를 이용한 RFM RPC 보정에 관한 연구", *석사학위논문*, 인하대학교, pp. 5~29.
3. 나재홍, 2003, "IKONOS RPC를 이용한 지상좌표 결정", *대한토목학회논문집*, 제 23권, 제 1D호, pp. 123-129.
4. Mcglone C., 1996, "Sensor Modeling in Image Registration, Digital Photogrammetry : An Addendum to the Manual of Photogrammetry", *ASPRS*, pp. 115-123
5. Orun A.B., Natarajan K., 1994, "A Modified Bundle Adjustment Software for SPOT Imagery and Photograpy: Tradeoff", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 60(12) pp. 1431-1437
6. Gupta R., Hartley R. I., 1997, "Linear Pushbroom Camera", *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, Vol. 19, No. 9, pp. 963-975
7. Kim T., 2000, "A Study on the Epipolarity of Linear Pushbroom Images", *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 66(8), pp. 961-966
8. Morgan, M., 2004, "Epipolar Resampling of Linear Array Scanner Scenes", PhD Dissertation, Department of Geomatics Engineering, University of Calgary, Canada
9. Morgan M., Kim K., Jeong S., and Habib A., 2004, "Indirect Epipolar Resampling of Scenes Using Parallel Projection Modeling of Linear Array Scanners", *ISPRS*, Istanbul, CD-ROM
10. Ono T., Honmachi Y., and Ku S., 1999, "Epipolar resampling of high resolution satellite Imagery", *Joint Workshop of ISPRS WG I/1, I/3 and IV/4 Sensors and Mapping from Space*.