

간략모형식의 에피폴라 기하 생성 및 분석

Epipolar Geometry of Alternative Sensor Models for High-Resolution Satellite Imagery

정원조¹⁾ · 김의명²⁾ · 유복모³⁾ · 유환희⁴⁾

Jung, Won Jo · Kim, Eui Myoung · Yeu, Bock Mo · Yoo, Hwan Hee

¹⁾ 정희원 · (재)석곡관측과학기술연구원 연구원 · 공학석사 · E-mail : nonedge@hanafos.com

²⁾ 정희원 · University of Calgary, Dept. of Geomatics Eng., Post-doc · E-mail : emkim@ucalgary.ca

³⁾ 정희원 · (재)석곡관측과학기술연구원 원장 · 공학박사 · E-mail : yeubm@sog.or.kr

⁴⁾ 정희원 · 경상대학교 건설공학부 도시공학과 교수 · 공학박사 · E-mail : hhyoo@nongae.gsnu.ac.kr

Abstract

High-resolution satellite imagery are used in various application field such as generation of DEM, orthophoto, and three dimensional city model. To define the relation between image and object space, sensor modelling and generation of the epipolar image is essential processes. As the header information or physical sensor model becomes unavailable for the end users due to the national security or commercial purpose, generation of epipolar images without these information becomes one of important processes. In this study, epipolar geometry is generated and analysed by applying two generalized sensor models; parallel and parallel-perspective model. Epipolar equation of the parallel model has linear property which is relatively simple; Epipolar geometry of the parallel-perspective model is non-linear. This linear property enable us to generate epipolar image efficiently.

1. 서론

항공사진과 달리 위성영상은 촬영대상 면적이 넓고 비 접근지역에 대한 정보를 수집할 수 있는 장점이 있는 반면 위성의 기하특성이 복잡하고 해상도가 항공사진에 미치지 못하였다. 그러나 IKONOS, QuickBird, OrbView, SPOT-5와 같은 고해상도 위성의 등장에 힘입어 사진측량 및 원격탐사 분야에서는 다양한 정보를 제공받게 됨으로써 새로운 전기를 맞게 되었다(Giulio 외 1인, 2003; Jacobsen, 2003; Jacobsen 외 1인, 2004; Volpe, 2003).

특히 1m 급의 영상정보를 상업적으로 최초로 제공한 Space Imaging 사의 경우는 위성의 궤도정보와 센서모형화에 대한 내용을 비 공개함으로써 다항식비례모형(RFM : Rational Function Model)에 대한 다양한 연구를 수행하게 하였다(OGC, 1999). IKONOS 영상을 제공하고 있는 SpaceImaging사와 달리, QuickBird 영상을 제공하고 있는 DigitalGlobe사의 경우는 엄밀 센서모형을 적용할 수 있는 위성의 궤도정보를 제공하고 있다. 그러나 엄밀 센서모형을 이용하여 에피폴라 영상을 생성하는 것은 매우 복잡한 처리과정을 필요로 한다.

간략모형식은 위성이 대상물을 촬영하는 시간이 수 초 이내이고 궤도가 안정되어 등속도 직선운동을 하며 촬영 고도가 높다는 특성을 이용하고 있다. 간략모형식의 대표적인 예로는 그림 1과 같이 위성의 진행방향에 대해 평행투영(parallel projection) 특성을 가지고 이에 직각방향인 각각의 스캔라인의 경우는 중심투영 특성을 갖는 Gupta와 Hartley 모형(이후 평행-중심투영모형)과 그림 2와 같이 위성의 진행방향과 각각의 스캔라인 모두 평행투영 특성을 가지고 있는 2차원 부등각사상변환(two-dimensional affine transformation, 이후 평행투영모형)이 있다(Gupta 외 1인, 1997; Okamoto 외 3인, 1996; Okamoto 외 4인, 1998).

고해상도 위성영상을 취득할 수 있는 센서를 탑재한 위성을 운용하려는 움직임은 국내를 비롯하여 세계적인 추세이며, 향후에도 국가적 특수성이나 여러 가지 상업적 목적 등으로 인해 IKONOS 영상의 경우와 같이 위성의 궤도정보를 제공하지 않는 위성이 등장할 수도 있다. 따라서, 위성의 궤도정보 없이 고해상도 위성영상에 대한 에피폴라

라 기하모형을 생성하는 것은 중요한 과정중의 하나이다.

입체영상(stereo pair)을 이용하여 에피폴라 기하모형이 생성되면 영상정합과정을 통해 공액점을 구한 후 공간전방교선법(space intersection)을 통해서 지상의 3차원 좌표를 결정할 수 있으며 수치고도모형의 생성, 정사영상의 제작 등과 같이 도면화를 위한 다양한 자료를 생성할 수 있다.

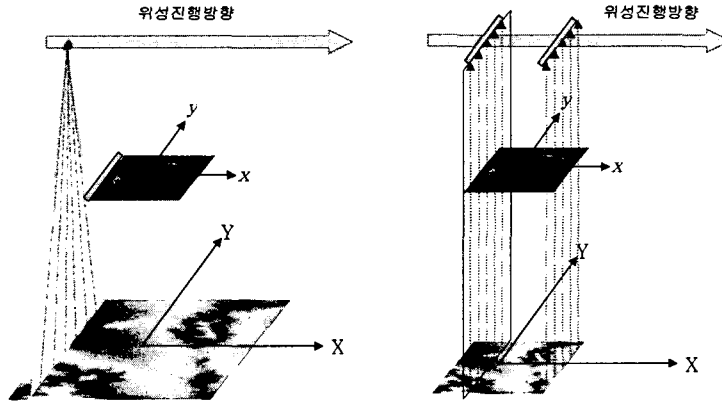


그림 1. 평행-중심투영 모형

그림 2. 평행투영 모형

고해상도 위성영상은 수치고도모형생성, 정사영상 생성, 도시공간의 3차원 모형화 등 다양한 목적에 사용할 수 있으나 이를 위해서 지상과 영상의 관계를 설정해 주는 센서모형화와 에피폴라 영상의 생성이 필수적이다. 센서모형화에 대한 방법은 최근에 발사되어 운용되고 있는 IKONOS, QuickBird, OrbView 등의 고해상도 위성의 경우 시야각(field of view)이 좁고 촬영고도가 높기 때문에 평행-중심투영 모형과 평행투영모형의 적용을 위한 물리적인 요건이 잘 갖춰져 있다.

따라서, 본 연구에서는 고해상도 위성영상으로부터 평행투영모형을 이용한 에피폴라 기하모형을 유도하고 Gupta와 Hartley에 의해 제안된 평행-중심투영모형과의 관계를 분석하고자 하였다.

2. 고해상도 위성의 촬영기하

대부분의 고해상도 위성영상은 1차원 선형 CCD 배열을 가지고 있으며 위성이 진행함에 따라 1차원 선형 CCD 배열에서 취득된 영상정보가 2차원적인 특성을 갖게 된다. 선형 푸시브룸(pushbroom) 센서의 경우 엄밀센서모형화 방법에서는 영상이 취득되는 시점에 센서의 위치와 자세가 변하는 공선조건식을 사용하였으며 이로 인해 센서의 위치와 자세를 시간의 다항식으로 모형화하고 복잡한 처리과정을 거치게 되었다.

프레임 사진기와 달리 고해상도 위성영상의 기하 특성을 살펴보면 위성영상의 영상소는 정사투영(orthogonal) 또는 평행투영(parallel projection)에 의해 생성된다. 그 이유는 고해상도 위성영상은 위성의 궤도에 비해 촬영되는 지상의 대상영역은 아주 작으며, 영상을 촬영하는 시간은 수 초내외로 아주 짧은 시간에 촬영을 하므로 이 때 위성은 거의 선형운동을 한다고 가정할 수 있다. 이러한 위성영상의 기하 특성으로 인해서 평행투영모형에 의한 위성의 모형화가 이루어지고 있다. 최근의 연구에서는 지상과 영상(scene)과의 관계를 평행투영모형을 통해 설정하고 에피폴라 영상 및 수치고도모형을 생성하는 연구가 활발히 진행되고 있다(Ono, 1999).

Gupta와 Hartley가 제안한 모형은 식 (1)과 같으며 센서는 지상에 대하여 등속도로 직선운동을 하고 영상을 취득하는 동안의 표정요소는 불변하기 때문에 관측면의 자세는 고정되어 있다고 가정하였다.

$$\begin{aligned} x &= A_1X + A_2Y + A_3Z + A_4 \\ y &= \frac{A_5X + A_6Y + A_7Z + A_8}{A_9X + A_{10}Y + A_{11}Z + A_{12}} \end{aligned} \quad (1)$$

Okamoto는 식 (1)의 y 는 중심투영에 의한 프레임좌표(또는 사진좌표)라 할 때 경사촬영각(w)과 초점거리(f)를 이용하여 평행투영으로 변환할 수 있으며 식 (2)와 같이 나타내었다.

$$\begin{aligned} x &= A_1X + A_2Y + A_3Z + A_4 \\ y &= A_5X + A_6Y + A_7Z + A_8 \end{aligned} \quad (2)$$

2.1 평행투영의 수학적 모형

위성영상의 기하특성을 이용하여 평행변환의 수학적 모형을 유도하고, 이로부터 최근 연구되고 있는 평행투영모형식과의 관계를 설정하였다. 그림 2에서 점 $O(0, 0, 0)$ 는 X, Y, Z 축을 가진 지상좌표계의 원점을 나타내고 지상의 한 점 $P=(X, Y, Z)^T$ 는 영상좌표계에서 $p=(u, v, 0)^T$ 로 투영된다. 여기서, 지상좌표계에 대한 단위투영벡터 (unit projection vector)는 $(I, J, K)^T$ 이라 하고 벡터 V_1, V_2, V_3 의 관계를 이용하여 지상좌표계와 사진좌표계 $(x, y, z)^T$ 간의 관계를 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다. 평행투영된 영상좌표계를 사진좌표계로 변환하기 위해서는 u, v, w 축을 각각 $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ 만큼 이동시켜야 한다. 그러나 평행투영의 특성상 Δz 값이 변하여도 동일한 영상을 얻기 때문에 $\Delta x, \Delta y$ 만 고려하고 지상과 영상과의 축척관계는 s 로 나타내서 지상과 사진과의 관계를 평행변환을 이용하여 나타낼 수 있다(Morgan, 2004).

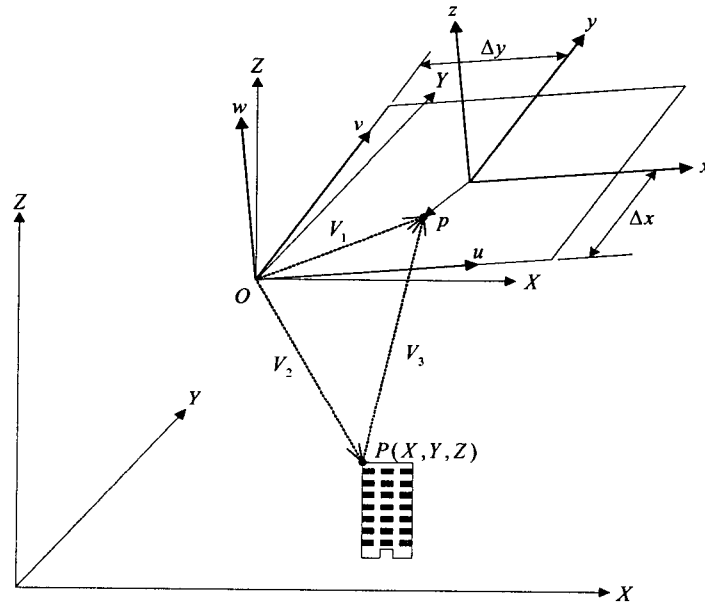


그림 2. 지상과 영상의 평행변환

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ 0 \end{pmatrix} = s\lambda M \begin{pmatrix} I \\ J \\ K \end{pmatrix} + sM \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

여기서, s, λ : 축척계수, M : 회전행렬을 나타낸다.

평행투영은 $(I, J, \omega, \phi, \alpha, \Delta x, \Delta y, s)$ 의 8개의 매개변수로 나타낼 수 있으며 평행투영모형식과의 관계는 식 (4)와 같다.

$$\begin{aligned} x &= A_1X + A_2Y + A_3Z + A_4 \\ y &= A_5X + A_6Y + A_7Z + A_8 \end{aligned} \quad (4)$$

2.2 중심투영과 평행투영과의 관계

본 절에서는 Okamoto가 제안하고 이 후 Gupta에 의해 활용되었던 푸시브룸센서 모형인 평행-중심투영모형과 평행투영모형과의 관계를 해석하고자 한다.

고해상도 위성영상의 경우 위성의 진행방향(along track)은 평행투영이며 이때 진행방향과 직각방향(across track)에 있는 CCD 소자들에 기록되는 영상은 중심투영의 기하를 가지고 있다.

식 (4)의 평행투영모형식은 영상과 지상좌표와의 관계가 평행투영에 의해 설정되어 있는 관계식을 나타내고 있으며 y 좌표에 대한 중심투영과 평행투영과의 관계식을 나타내는 식 (5)를 통해 재해석될 수 있다(김의명 외 1인, 2004).

$$y_{\text{평행투영}} = \frac{y_{\text{중심투영}}}{1 - \frac{y_{\text{중심투영}} \cdot \tan \omega}{f}} \quad (5)$$

여기서, ω 는 경사촬영각(roll angle)을 나타낸다.

식 (4)를 식 (5)의 y 항에 대입하고 정리하면 식 (6)과 같으며 Gupta에 의해 제안된 평행-중심 투영모형은 초점 거리(f)와 경사촬영각(ω)을 통해 평행투영으로 변환할 수 있음을 알 수 있다.

$$y_{\text{중심투영}} = \frac{A_5 X + A_6 Y + A_7 Z + A_8}{A_9 X + A_{10} Y + A_{11} Z + A_{12}} \quad (6)$$

3. 에피폴라 기하모형

3.1 평행투영모형의 기하모형

평행투영모형에서 좌우영상의 사진좌표를 (x_1, y_1) 과 (x_2, y_2) 라고 하면 지상좌표와의 관계는 식 (7)과 같다.

$$\begin{aligned} x_1 &= A_1 X + A_2 Y + A_3 Z + A_4 \\ y_1 &= A_5 X + A_6 Y + A_7 Z + A_8 \end{aligned} \quad (7a)$$

$$\begin{aligned} x_2 &= B_1 X + B_2 Y + B_3 Z + B_4 \\ y_2 &= B_5 X + B_6 Y + B_7 Z + B_8 \end{aligned} \quad (7b)$$

식 (7a)에서 사진좌표를 X, Y 에 대해서 정리하고 이를 식 (7b)에 대입하여 정리하면 식 (8)과 같다.

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1 & C_2 \\ C_5 & C_6 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_3 \\ C_7 \end{bmatrix} Z + \begin{bmatrix} C_4 \\ C_8 \end{bmatrix} \quad (8)$$

식 (8)로부터 Z 항을 제거하고 정리하면 식 (9)과 같이 에피폴라 직선식을 구할 수 있으며 기울기가 90° 인 경우 특이성(singularity)이 발생하며 이를 없애기 위해 상수항인 D_4 로 나눈 식 (10)을 이용한다.

$$y_2 = D_1 x_2 + D_2 x_1 + D_3 y_1 + D_4 \quad (9)$$

$$E_1 x_1 + E_2 y_1 + E_3 x_2 + E_4 y_2 = 1 \quad (10)$$

3.2 평행-중심투영모형의 기하모형

평행-중심투영모형의 경우 좌우영상의 사진좌표를 (x_1, y_1) 과 (x_2, y_2) 라고 하면 지상좌표와의 관계는 식 (11)과 같다.

$$\begin{aligned} x_1 &= A_1 X + A_2 Y + A_3 Z + A_4 \\ y_1 &= \frac{A_5 X + A_6 Y + A_7 Z + A_8}{A_9 X + A_{10} Y + A_{11} Z + A_{12}} \end{aligned} \quad (11a)$$

$$\begin{aligned} x_2 &= B_1X + B_2Y + B_3Z + B_4 \\ y_2 &= \frac{B_5X + B_6Y + B_7Z + B_8}{B_9X + B_{10}Y + B_{11}Z + B_{12}} \end{aligned} \quad (11b)$$

식 (11a)에서 x_1, y_1 을 X, Y, Z 에 대하여 정리한 후 이를 식 (11b)에 대입하여 정리하면 에피폴라 기하모형은 식 (12)와 같다.

$$G_1x_2 + G_2x_2y_2 + G_3y_2 = 1 \quad (12)$$

4. 실험 및 결과분석

본 연구에 사용된 IKONOS 위성영상은 대전지역이며 평행투영모형 및 평행-중심투영모형으로부터 에피폴라 모형을 결정하기 위하여 지상기준점을 GPS관측을 통해 취득하였다. 관측된 지상기준점 수는 12점이며 센서모형화의 정확도평가는 12점의 검사점을 이용하였으며 각 방법에 대한 평면 및 높이의 평균제곱근오차를 계산하였다. 평행투영모형의 경우 평면 및 높이의 평균제곱근오차는 각각 $\pm 2.35599\text{m}$ 와 $\pm 2.10544\text{m}$ 로 나타났고 평행-중심투영모형의 경우는 $\pm 3.5067\text{m}$ 와 ± 4.33068 로 나타났다.

평행투영모형에서 에피폴라 기하모형은 식 (10)을 이용하여 결정할 수 있으며 결정된 에피폴라 기하모형은 직선식을 나타낸다. 그림 3은 1K×1K 크기의 IKONOS 부영상(sub-image)에 대해 임의의 3점을 선택하여 에피폴라 기하모형을 나타낸 것으로 평행투영모형은 임의의 3점간에 대한 에피폴라 기하모형이 직선식으로 서로 평행한 특성이 있음을 알 수 있다.

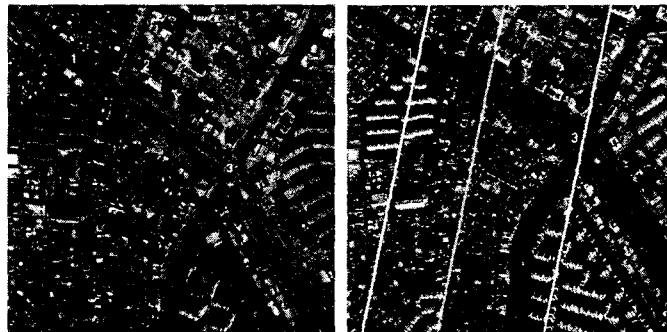


그림 3. 평행투영모형을 이용한 에피폴라 직선

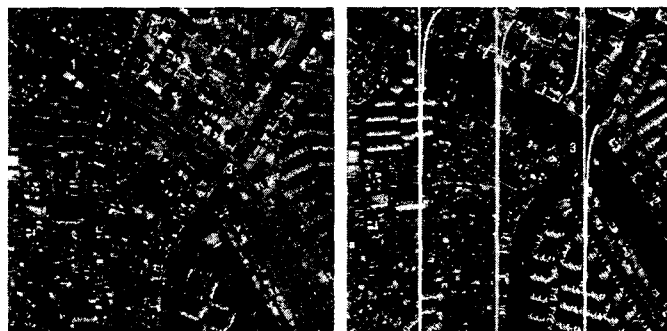


그림 4. 평행-중심투영모형을 이용한 에피폴라 곡선

그림 4는 평행-중심투영모형을 이용하여 임의의 3점에 대한 에피폴라 기하모형을 나타낸 것으로 평행투영모형과 비슷하게 마치 직선처럼 나타난다. 그러나 식 (12)에서 알 수 있듯이 평행-중심투영모형의 에피폴라 기하모형은 쌍곡선 형태이며, 소구역을 중심으로 에피폴라 기하모형을 나타내면 거의 직선에 가깝게 나타난다. 평행-중심투영모형에서는 에피폴라 기하모형이 직선식이 아니기 때문에 y -시차를 소거한 에피폴라 영상을 생성하기가 쉽지 않고 영

상정합의 측면에서 살펴보면 평행투영모형에 비해 효율성이 떨어지는 단점이 있다.

평행투영모형에서는 에피폴라 모형식이 직선형태로 나타날 뿐만 아니라 에피폴라 영상을 생성하기가 쉽고 2차원의 탐색영역(search window)을 1차원으로 감소시킴으로써 영상정합의 효율성과 함께 오정합의 문제점을 개선할 수 있다(Habib 외 3인, 2004).

5. 결론

고해상도 위성영상의 경우 국가적 특수성이나 여러 가지 상업적 목적 등으로 인하여 위성의 궤도정보와 센서모형을 제공하지 않을 수 있다. 따라서 위성의 궤도정보나 센서모형이 제공되지 않는 경우에도 위성영상에 대한 에피폴라 기하모형을 생성하는 것은 중요한 과정중의 하나이며 본 연구에서는 고해상도 위성영상의 간략모형화 방법중 대표적으로 많이 활용되고 있는 평행-중심 투영모형과 평행투영모형에 대해 살펴보았다.

첫째, 고해상도 위성영상으로부터 평행투영을 이용한 에피폴라 직선식을 유도하고 평행-중심투영모형과의 관계를 분석하였으며 경사촬영각과 초점거리를 이용하여 두 모형식은 동일한 수식으로 표현할 수 있다.

둘째, 평행투영모형은 평행-중심 투영모형에 비해 에피폴라 기하 모형이 직선식으로 간단하기 때문에 영상정합시 정합의 효율성이 높을 뿐만 아니라 y-시차를 소거한 에피폴라 영상을 경제적으로 생성할 수 있다.

참고문헌

1. 김의명, 정원조 (2004) 영상좌표 보정을 통한 SPOT 위성영상의 모형화 개선, *대한토목학회 논문집*, 제 24권 4D 호, 641-648.
2. Giulio T. F., Poli, D. (2003) Georeferencing of EROS-A1 high resolution images with rigorous and rational function model, Joint ISPRS/EARSel Workshop, High Resolution Mapping from Space, Hannover., Germany, Oct, 6-8.
3. Gupta, R. and Hartley, R. I. (1997) Linear Pushbroom Cameras, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 189, No. 9, pp.963-975.
4. Habib, A., E. M. Kim, M. Morgan and I. Couloigner, (2004) DEM Generation from High Resolution Satellite Imagery using Parallel Projection Model, XXth ISPRS Congress, Istanbul, Turkey.
5. Hattori, S., Ono, T., Fraser, C., and Hiroyuki Hasegawa, (2000) Orientation of High-Resolution Satellites Images Based on Affine Projection, *International Archives of ISPRS 2000 Congress*, Vol, 33, B3, 359-366.
6. Jacobsen, K. (2003) Analysis of SPOT HRS Stereo Data, Joint ISPRS/EARSel Workshop, High Resolution Mapping from Space, Hannover., Germany, Oct, 6-8.
7. Jacobsen K., and Passini R. (2004), Accuracy of digital orthophotography from high resolution space images, *URISA Annual Conference*, Charlotte, NC.
8. Morgan, M. (2004) Epipolar Resampling of Linear Array Scanner Scenes, *UCGE Reports Number 20193*, 60-66
9. OGC (OpenGIS Consortium) (1999) The OpenGIS Abstract Specification Topic 7: The Earth Imagery Case. <http://www.opengis.org/public/abstract/99-107.pdf>
10. Ono, T., (1999) Epipolar Resampling of High Resolution Satellite Imagery, *IAPRS International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing(Sensors and Mapping from Space)*
11. Okamoto, A., Fraser, C., Hattori, S., Hasegawa, H., and Tetsu, Ono, (1998) An Alternative Approach to the Triangulation of SPOT Imagery, *IAPRS International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 32, B4, 457-462.
12. Okamoto, A., Hattori, S., Hasegawa, H., and Tetsu, Ono, (1996) Orientation and Free Network Theory of Satellite CCD Line-Scanner Imagery, *IAPRS International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol, 31, B3, 604-610.
13. Volpe, F. (2003) Geometric Processing of QuickBird High Resolution Satellite Data, Joint ISPRS/EARSel Workshop, High Resolution Mapping from Space, Hannover., Germany, Oct, 6-8.