

## 위성 궤도 정보를 사용하지 않는 Gupta와 Hartley 센서모델의 에피폴라 기하모델

이해연 · 박원규

(주)썬트렉아이 영상시스템 사업부

### Epipolar Geometry for Gupta and Hartley Sensor Model without the Ephemeris Data

Hae-Yeoun Lee and Won-Kyu Park

Image System Department, SaTReC Initiative (SaTReCi)

**Abstract :** In this paper, an epipolar model without the ephemeris data is proposed. Also, various epipolar models such as the epipolar geometry of perspective sensor, the one proposed by Gupta and Hartley and the one based on the Orun and Natarajan's sensor model are reviewed and their accuracy are quantitatively analyzed using devised measure. Modeling data from ground control points, ground control points, ephemeris data and independent checking points are selected on SPOT over Taejon and Boryung area and KOMPSAT over Taejon and Nonsan area. Based on the results, the epipolar model of perspective sensor and the one by Gupta and Hartley have the average accuracy within 1 pixel but show high errors in several checking points. The proposed epipolarity model provides better results than that of perspective sensor and by Gupta and Hartley. Also, it shows the accuracy similar to the one based on Orun and Natarajan's sensor model.

**Key Words :** Epipolar Geometry, Pushbroom Imagery, Perspective Imagery.

**요약 :** 본 논문에서는 위성 궤도 정보를 사용하지 않는 새로운 에피폴라 기하모델을 제안하고, 선형 Pushbroom 영상의 에피폴라 기하모델을 위한 방법들과 정량적으로 비교 분석을 한다. 정량적 분석에 사용된 에피폴라 기하모델은 항공영상에 적용되는 중심투영(Perspective) 센서의 에피폴라 기하모델, Gupta와 Hartley의 에피폴라 기하모델, 궤도정보를 사용하는 Orun과 Natarajan 센서모델의 에피폴라 기하모델이다. 대전과 보령의 SPOT 영상과 대전과 논산의 KOMPSAT 영상에 대해 지상기준점, 지상기준점에서 생성한 모델링데이터, 위성 궤도정보 및 숙련된 운영자가 추출한 독립검사점을 사용하여 실험을 수행하였다. 실험 결과에 따르면 중심투영 센서의 에피폴라 기하모델과 Gupta와 Hartley의 에피폴라 기하모델은 평균적으로 1픽셀 이내의 정확도를 보였으나 일부 검사점에서 높은 오차를 보였다. 제안한 에피폴라 기하모델은 중심투영 센서나 Gupta와 Hartley의 에피폴라 기하모델보다 정확도가 높고, 궤도 정보를 사용하는 Orun과 Natarajan 센서 모델의 에피폴라 기하모델과 유사한 정확도를 보였다.

2002년 5월 15일 접수 ; 2002년 8월 2일 수리.

## 1. 서론

동일한 지역이나 대상을 촬영한 두 장 이상의 영상 사이에는 에피폴라 기하모텔(Epipolar geometry) 이라고 하는 기하학적 관계가 존재한다. 이와 같은 기하학적인 관계는 컴퓨터비전, 수치사진측량학이나 원격탐사 분야에서 3차원 정보의 추출 등과 같은 다양한 응용에서 사용되는 필수적인 기술로서, 모델링의 정확도에 따라 추출되는 3차원 정보의 정확도가 좌우된다.

동일한 대상을 촬영하는 경우에 센서, 영상과 대상물의 관계를 그림 1과 같이 가정하면 좌측 센서의 초점( $s_l$ )에서 영상 상의 한 점( $a$ )을 통과하는 직선( $l$ )을 형성할 수 있고, 해당 직선 상에 있는 점( $p_1 \sim p_n$ )들은 다른 영상 상에 점( $b_1 \sim b_n$ )으로 투영되게 된다. 이렇게 투영된 점들은 선형적 혹은 비선형적 형태를 갖게 되는데 이와 같은 기하학적인 관계를 에피폴라 기하모텔이라고 부른다.

항공영상과 같은 중심투영(Perspective) 센서의 경우 이와 같은 기하학적인 관계는 선형적으로 모델링 되고, 컴퓨터비전이나 수치사진측량학에서 수학적으로 잘 증명되었다. 그러나 위성영상과 같은 Pushbroom 센서의 경우 위성센서의 위치 및 자세가 시간에 따라 변하기 때문에 다양한 형태의 센서모델 수립이 가능하고, 이로 인하여 에피폴라 기하모텔의 경우 센서모델에 따라 복잡하게 모델링된다. 일반적으로 선형 Pushbroom 영상의 에피폴라 기하모텔은 중심투영 센서의 에피폴라 기하모텔과 다르나 두 모델의 차이에 대한 정량적인 분석은 이루어지지 않았다(Gupta and Hartley, 1997, Kim, T. 2000).

본 논문에서는 Gupta와 Hartley에 의해 제시된 간소화된 센서모델<sup>1)</sup>을 기반으로 하여 위성의 궤도정보를 사용하지 않는 새로운 에피폴라 기하모텔을 제안하였다. 또한 (1) 제안한 에피폴라 기하모텔을 선형 Pushbroom 영상의 에피폴라 기하모텔을 위한 (2) 중심투영 센서의 에피폴라 기하모텔, (3) Gupta와 Hartley의 에피폴라 기하모텔 및 (4) 궤도 모델을 사용하는 Orun과 Natarajan 센서

모델의 에피폴라 기하모텔과 비교 분석을 수행하였다.

에피폴라 기하모텔의 정량적인 비교를 위해 정확도 분석을 위한 방법을 고안하였고, 보령과 대전 SPOT 영상과 대전과 논산 KOMPSAT 영상을 사용하여 실험하였다. 에피폴라 기하모텔의 수립을 위해 필요에 따라 지상기준점, 지상기준점에서 생성한 모델링 데이터 및 위성 궤도정보를 사용하였고, 정확도의 검증을 위해 숙련된 운영자가 각 영상에 대해 30점의 검사점을 정밀하게 추출하였다.

실험결과에 따르면 본 논문에서 제안한 알고리즘은 궤도정보를 사용하지 않았음에도 궤도정보를 사용하는 Orun과 Natarajan 센서모델의 에피폴라 기하모텔과 유사한 정확도를 보였다. 중심투영 센서의 에피폴라 기하모텔과 Gupta와 Hartley의 에피폴라 기하모텔은 평균적으로 1픽셀 이내의 정확도를 보였으나 일부 검사점에서 다소 큰 오차를 보였다.

제안한 에피폴라 기하모텔은 위성의 궤도정보를 필요로 하지 않고, 지상기준점만을 사용하여 수립되므로, 대표적인 고해상도 상용위성인 IKONOS와 같이 위성의 궤도정보를 제공하지 않거나 부정확한 궤도정보를 제공하는 위성의 경우에도 정밀한 에피폴라 기하모텔을 수립할 수 있으므로 영상으로부터 추출된 3차원 정보의 정확도를 높일 수 있다. 또한 중심투영 센서의 에피폴라 기하모텔도 어느 정도의 오차를 고려하면 Pushbroom 영상에도 적용이 가능하다. 하지만 이 오차가 3차원 정보의 복원에 미치는 영향을 정량적으로 분석할 필요가 있다.

본 논문의 2절에서는 중심투영 센서 및 Pushbroom 센서의 에피폴라 기하모텔에 대한 관련 연구들에 대해서 정리한다. 3절에서는 제안하는 에피폴라 기하모텔을 수학적으로 정의하고, 4절에서 제안한 에피폴라 기하모텔 및 선형 Pushbroom 센

1) 항공 영상에서 사용되는 Direct Linear Transform 방법을 변형한 모델이다.

서를 위한 대표적인 에피폴라 기하모델을 정량적으로 비교 분석한다.

## 2. 관련 연구

중심투영 센서의 에피폴라 기하모델은 선형적인 관계를 갖지만, 선형 Pushbroom 센서의 에피폴라 기하모델의 경우 복잡한 비선형적인 관계를 갖는다. 본 절에서는 중심투영 센서의 에피폴라 기하모델과 대표적인 Pushbroom 센서 모델을 기반으로 하는 에피폴라 기하모델을 정리한다.

### 1) 중심투영 센서의 에피폴라 기하모델

항공영상과 같이 중심투영 센서에 의해 촬영한 영상의 경우 에피폴라 기하모델은 다음과 같은  $3 \times 3$  행렬로 모델링이 된다. 영상 촬영시점의 센서파라미터에 대한 정보를 통해 모델링한 행렬은 Essential 행렬이라 하고, 센서파라미터 정보를 사용하지 않고 수립된 행렬의 경우 Fundamental 행렬이라고 부른다. 컴퓨터비전이나 수치사진측량학에서 이와 같은 에피폴라 기하모델은 수학적으로 잘 증명되어 있다[Zhang, ZY., 1998].

$$(x_r \ y_r \ 1) \begin{pmatrix} f_{11} & f_{12} & f_{13} \\ f_{21} & f_{22} & f_{23} \\ f_{31} & f_{32} & f_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_l \\ y_l \\ 1 \end{pmatrix} = 0$$

여기서  $(x_l, y_l)$ 과  $(x_r, y_r)$ 은 각각 좌측 및 우측 영상 상에 존재하는 점의 좌표값이다.

상기 에피폴라 기하모델의 행렬식은 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$k_1 x_r + k_2 y_r + k_3 = 0$$

여기서

$$k_1 = f_{11} x_l + f_{12} y_l + f_{13},$$

$$k_2 = f_{21} x_l + f_{22} y_l + f_{23},$$

$$k_3 = f_{31} x_l + f_{32} y_l + f_{33} \text{이다.}$$

정리된 식을 분석해보면 중심투영 센서의 에피폴라 기하모델은 선형적 특성을 갖는 직선 형태로 나타남을 확인할 수 있고, 이와 같은 직선을 에피

폴라 라인(Epipolar line)이라고 한다.

중심투영 센서의 에피폴라 기하모델은 7개의 자유도를 가지고 있어서 7개의 정합점(corresponding points)을 취하여 계산하거나 8 또는 그 이상의 정합점을 사용하여 Gauss-Jordan, LU decomposition 및 Singular value decomposition과 같은 선형 최적화 알고리즘이나 M-estimator나 Least median of Square와 같은 비선형 최적화 알고리즘을 통하여 계산할 수 있다. 컴퓨터비전과 같은 응용에 있어서는 모델링의 정확도를 높이기 위해 입력데이터에 대한 정규화(Normalization)를 수행하거나 Rank2 제한을 가하는 등의 연구가 활발히 이루어지고 있다.

### 2) Gupta와 Hartley의 에피폴라 기하모델

선형 Pushbroom 센서의 경우 촬영하는 시점에서의 센서의 위치 및 자세가 변하게 되므로 이와 같은 센서의 모델링은 복잡하고, 시간이 소요된다. Gupta와 Hartley는 센서의 등속직선운동과 촬영하는 동안 센서의 자세변화가 없는 것을 가정하여 복잡한 센서모델을 간소화한 모델(a simplified model)을 제시하였다. Gupta와 Hartley의 센서모델은 중심투영 센서모델에 적용되는 DLT(Direct Linear Transform) 방법을 변형한 것으로 정확도에 있어서 위성궤도를 고려한 센서모델과 크게 차이가 나지 않았다. 이와 같이 간소화된 모델을 기반으로 하여 Gupta와 Hartley는 다음과 같이  $4 \times 4$  행렬로 표시되는 에피폴라 기하모델을 정의하였고, 중심투영 센서의 Fundamental 행렬에 대응하여 선형 Pushbroom Fundamental 행렬이라고 부른다.

여기서  $(x_l, y_l)$ 과  $(x_r, y_r)$ 은 각각 좌측 및 우측 영상 상에 존재하는 점의 좌표값이고, 행렬의 자유도는 11이다. 중심투영 센서의 에피폴라 기하모델과 마찬가지로 11개 또는 그 이상의 정합점을 취하여 선형적 혹은 비선형적 최적화 알고리즘을 사용하여 계산할 수 있다.

상기의 에피폴라 기하모델의 행렬식은 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$k_1x_r + k_2x_ry_r + k_3y_4 + k_4 = 0$$

여기서

$$k_1 = c_1y_l + c_2,$$

$$k_2 = c_3y_l + c_4,$$

$$k_3 = (c_5x_l + c_6)y_l + (c_7x_l + c_8),$$

$$k_4 = (c_9x_l + c_{10})y_l + (c_{11}x_l + c_{12})$$
이다.

정리된 식에 나타난 것과 같이 Gupta와 Hartley의 에피폴라 기하모델은 비선형적인 특성을 갖는 쌍곡선(hyperbola)으로 나타나고, 이와 같은 곡선을 에피폴라 커브(Epipolar curve)라고 부른다(Gupta and Hartley, 1997).

### 3) Orun과 Natarajan 센서 모델의 에피폴라 기하모델

Gugan과 Dowman(1988)은 선형 Pushbroom 센서의 촬영 당시의 센서의 위치 및 자세를 시간에 대한 2차식으로 모델링을 수행하였다. 그러나 Gugan과 Dowman 모델의 경우 위성센서의 Pitch 및 Roll이 각각 위성영상의 X축 방향과 Y축 방향과의 연관성으로 인해 해가 수립되지 않는 경우가 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 Orun과 Natarajan(1994)은 Pitch 및 Roll을 시간에 무관한 상수로 정의하였다. Orun과 Natarajan의 센서모델을 기반으로 하는 에피폴라 기하모델은 다음과 같이 정의된다(Kim, 2000).

여기서  $(x_l, y_l)$ 과  $(x_r, y_r)$ 은 각각 좌측 및 우측 영상 상에 존재하는 점의 영상좌표값이고,  $(k_1 \sim k_9)$ 는 좌측 영상의 스캔라인에 의해 계산되는 상수값이다.  $Q(x_r)$ 는 우측 영상의 yaw 각과  $x_r$ 에 대한 다항식이다.

상기의 에피폴라 기하모델은 쌍곡선과 유사한 형태(hyperbola-like)의 비선형적인 특성을 갖고, 모델링을 위해서는 정확한 위성에 대한 궤도정보를 필요로 한다. 따라서 IKONOS와 같이 위성의 궤도정보를 제공하지 않거나 제공되는 궤도정보가 부정확한 경우에는 이와 같은 에피폴라 기하모델은 수립될 수 없다.

### 3. 제안하는 에피폴라 기하모델

본 절에서는 위성의 궤도정보를 사용하지 않으나 높은 정확도를 갖고 견고한 에피폴라 기하모델을 제안한다. 제안하는 에피폴라 기하모델은 Gupta와 Hartley의 간소화된 센서모델에 기반을 두고 있다.

에피폴라 기하모델을 유도하기 위해 그림 1에 나타난 것과 같이 동일한 대상물을 촬영할 당시의 센서, 영상 및 대상물과의 관계를 가정하면 좌측 영상과 우측 영상에 대한 센서모델은 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} x_l &= A_0X + A_1Y + A_2Z + A_3 \\ y_l &= \frac{A_4X + A_5Y + A_6Z + A_7}{A_8X + A_9Y + A_{10}Z + A_{11}} \end{aligned} \quad (a)$$

$$\begin{aligned} x_r &= B_0X + B_1Y + B_2Z + B_3 \\ y_r &= \frac{B_4X + B_5Y + B_6Z + B_7}{B_8X + B_9Y + B_{10}Z + B_{11}} \end{aligned} \quad (b)$$

여기서  $(x_l, y_l)$ 과  $(x_r, y_r)$ 은 각각 좌측 및 우측 영상 상에 존재하는 점의 영상좌표값이고  $(A_0 \sim A_{11})$ 과  $(B_0 \sim B_{11})$ 은 회전, 확대 및 이동 변환을 나타내는 상수값이 된다.

좌측 센서모델식(a)에서 좌측 영상 상의 점  $(x_l, y_l)$ 이 정해지고, 높이값  $(Z)$ 을 상수로 가정하면 다음과 같이  $X$ 와  $Y$ 에 대해 정리할 수 있다.

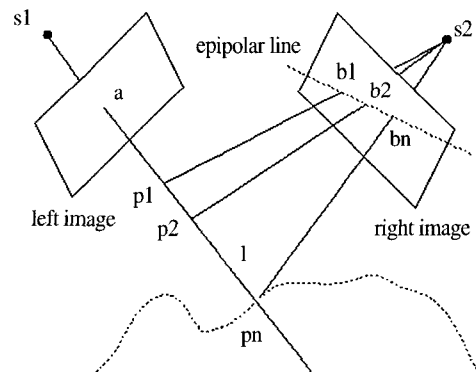


그림 1. 동일한 대상물 촬영시의 센서, 영상 및 대상물과의 관계.

$$X = \frac{(k_1y_i + k_2)Z + (k_3x_iy_i + k_4x_i + k_5y_i + k_6)}{i_1y_i + i_2} \quad (c)$$

$$Y = \frac{(j_1y_i + j_2)Z + (j_3x_iy_i + j_4x_i + j_5y_i + j_6)}{i_1y_i + i_2}$$

여기서  $(k_1 \sim k_6)$ ,  $(i_1 \sim i_2)$ 와  $(j_1 \sim j_6)$ 는  $(A_0 \sim A_{11})$ 로 이루어진 상수값이다.

정리된 식(c)을 우측 센서모델식(b)에 대입하고 높이값  $(Z)$ 에 대해 정리하면 다음과 같다.

$$(m_1y_i + m_2)Z = m_3x_r y_r + m_4x_r y_i + m_5x_r y_i + m_6x_r y_i + m_7x_r y_i + m_8$$

$$y_r = \frac{(n_1y_i + n_2)Z + (n_3x_iy_i + n_4x_i + n_5y_i + n_6)}{(n_7y_i + n_8)Z + (n_9x_iy_i + n_{10}x_i + n_{11}y_i + n_{12})}$$

이렇게 변형한 두 식을 높이값  $(Z)$ 을 사용해서 결합하면 다음과 같은 새로운 에피폴라 기하모델에 대한 식을 유도할 수 있다.

$$y_r = \frac{(c_1y_i^2 + c_2y_i + c_3)x_r + (c_4x_i + c_5)y_i^2 + (c_6x_i + c_7)y_i + (c_8x_i + c_9)}{(d_1y_i^2 + d_2y_i + d_3)x_r + (d_4x_i + d_5)y_i^2 + (d_6x_i + d_7)y_i + (d_8x_i + d_9)}$$

여기서  $(x_i, y_i)$ 와  $(x_r, y_r)$ 은 각각 좌측 및 우측 영상 상에 존재하는 점의 좌표값이고  $(c_0 \sim c_{11})$ 과  $(d_0 \sim d_{11})$ 은 좌측 및 우측 센서모델의 파라미터인  $(A_0 \sim A_{11})$ 과  $(B_0 \sim B_{11})$ 로 이루어진 상수값이다.

에피폴라 기하모델의 식은 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$k_1x_r + k_2x_r y_r + k_3y_r + k_4 = 0$$

여기서

$$k_1 = c_1y_i^2 + c_2y_i + c_3,$$

$$k_2 = c_4y_i^2 + c_5y_i + c_6,$$

$$k_3 = (c_7x_i + c_8)y_i^2 + (c_9x_i + c_{10})y_i + (c_{11}x_i + c_{12}),$$

$$k_4 = (c_{13}x_i + c_{14})y_i^2 + (c_{15}x_i + c_{16})y_i + (c_{17}x_i + c_{18})$$

이다.

식에 나타난 것과 같이 제안한 에피폴라 기하모델은 쌍곡선 형태의 비선형적 특성을 갖고 있고, 2.2)절에 나타난 Gupta와 Hartley에 의해 제시된 에피폴라 기하모델과 유사한 형태를 가지고 있다. 그러나 Gupta와 Hartley에 의해 제시된 에피폴라

라 기하모델과 달리 계수값을 추정함에 있어서 “ $y_i$ ”에 대한 2차항을 포함하고 있음을 알 수 있다. 제안된 에피폴라 기하모델에서 “ $y_i$ ”에 대한 2차항을 무시할 경우 Gupta와 Hartley의 에피폴라 기하모델과 동일함을 알 수 있다.

상기의 에피폴라 기하모델 식은 다음과 같이  $4 \times 6$  행렬식으로 표현할 수 있다.

$$(x_r \ x_r y_r \ y_r \ 1) \begin{pmatrix} 0 & f_{12} & 0 & f_{14} & f_{15} & f_{16} \\ 0 & f_{22} & 0 & f_{24} & f_{25} & f_{26} \\ f_{31} & f_{32} & f_{33} & f_{34} & f_{35} & f_{36} \\ f_{41} & f_{42} & f_{43} & f_{44} & f_{45} & f_{46} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_i y_i^2 \\ y_i^2 \\ x_i y_i \\ y_i \\ x_i \\ 1 \end{pmatrix} = 0$$

여기서  $(x_i, y_i)$ 와  $(x_r, y_r)$ 은 각각 좌측 및 우측 영상 상에 존재하는 점의 영상좌표값이다. 제안한 에피폴라 기하모델은 이와 같이 행렬식으로 표현이 가능하여 정합점만을 사용해서 모델링이 가능하다.

## 4. 각 알고리즘의 성능 분석

본 절에서는 제안한 에피폴라 기하모델 (Proposed-epi)의 성능을 검증하고, 2)절에서 설명한 (1) 중심투영 센서의 에피폴라 기하모델 (Perspective-epi), (2) Gupta와 Hartley의 에피폴라 기하모델 (Simplified-epi) 및 (3) 궤도 정보를 사용하는 Orun과 Natarajan 센서모델의 에피폴라 기하모델 (Reduced-epi)과 비교 분석한다.

### 1) 성능분석 실험방법

에피폴라 기하모델의 성능을 분석하기 위해서 표 1에 나타난 것과 같이 10미터 해상도의 SPOT 영상(보령, 대전 지역, 60km swath width)과 6.6미터 해상도의 KOMPSAT 영상(대전, 논산 지역, 17km swath width)을 사용하였다.

중심투영 센서의 에피폴라 기하모델과 Gupta와 Hartley 에피폴라 기하모델의 계산을 위해서 지상 기준점에서 생성한 모델링 데이터를 사용하였고, 제안한 에피폴라 기하모델은 지상기준점을 사용하여 수립하였다. 궤도모델을 사용하는 Orun과

표 1. 실험에 사용된 SPOT 및 KOMPSAT 영상 정보.

		SPOT 보령	SPOT 대전	KOMPSAT 대전	KOMPSAT 논산
좌측영상	촬영시각	Mar. 1 1997	-	Mar. 9 2000	May 1 2000
	촬영각도	-25.8	4.2	26.0	19.456
우측영상	촬영시각	Nov. 15 1998	-	Mar. 1 2000	April 28 2000
	촬영각도	0.6	25.8	-4.0	-12.305

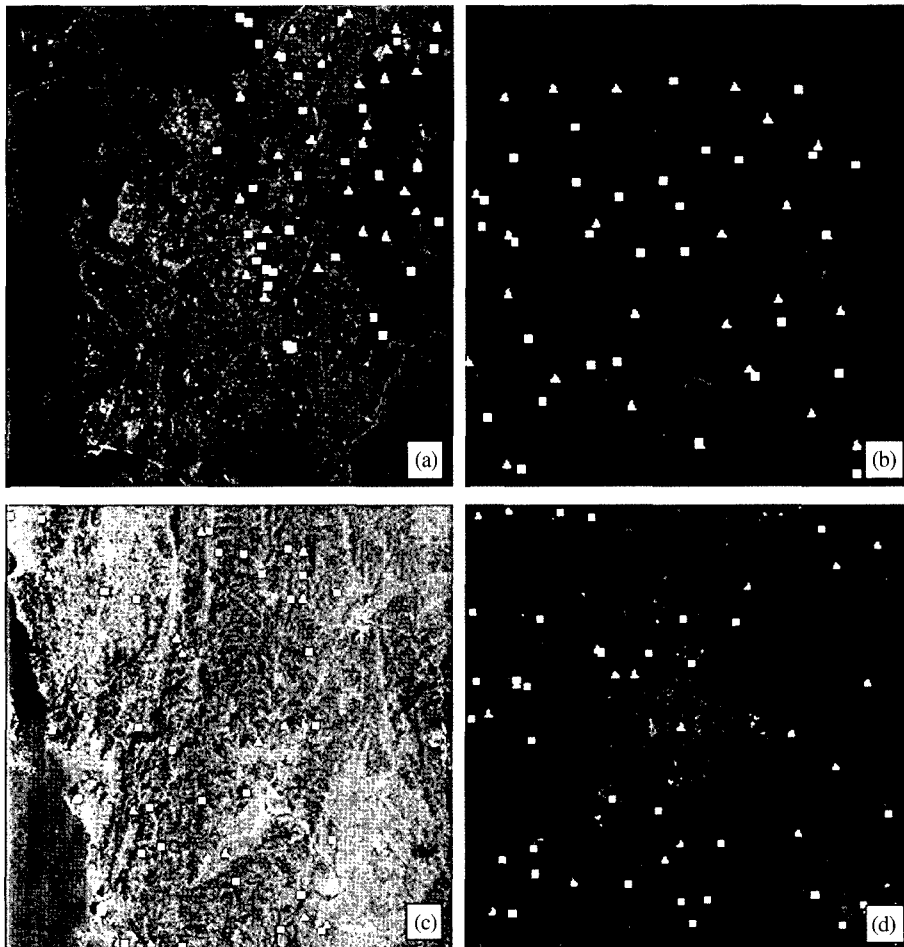


그림 2. 모델링 및 검사점 데이터의 분포(모델점: 삼각형, 검사점: 사각형),  
(a) KOMPSAT 대전, (b) KOMPSAT 논산, (c) SPOT 대전, (d) SPOT 보령.

Natarajan 센서모델의 에피폴라 기하모델의 계산을 위해서는 궤도정보와 지상기준점을 사용하였다.

에피폴라 기하모델의 정확도를 비교하기 위해 비선형적인 에피폴라 기하모델을 선형적인 모델로 변환하고, 실제 정합점과의 거리를 측정함으로써

정량적으로 분석하였다<sup>2)</sup>. 이를 위해 각 영상에 대해 숙련된 운영자가 30점의 정합점을 추출하여 독립검사점으로 사용하였다. 모델링 및 검사점 데

2) 일반적으로 비선형적인 에피폴라 기하모델을 선형적인 모델로 추정하여도 크게 오차는 없다(Kim, 2000).

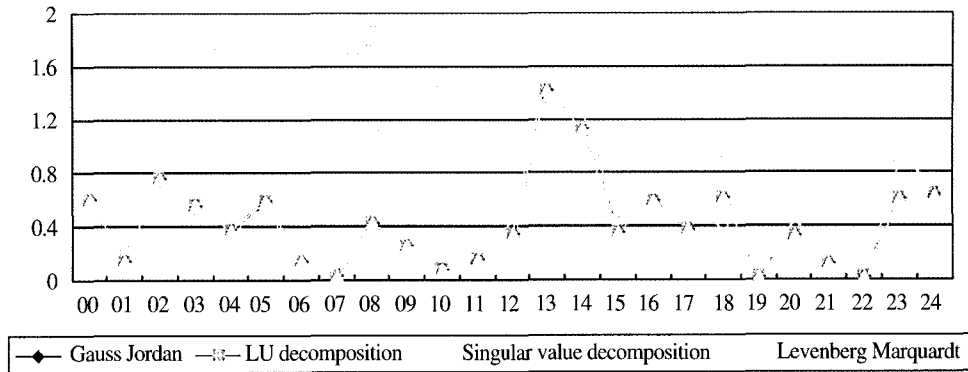


그림 3. KOMPSAT 논산 영상의 최소화 방법에 따른 모델링 정확도 결과 (x축 : 검사점, y축 : 오차).

이터는 그림 2에 나타난 것과 같이 영상 전체에 고르게 분포시켰다.

에피폴라 기하모델의 계산을 위한 최적화 방법은 Gauss Jordan 방법, LU decomposition 방법, Singular value decomposition 방법 및 Levenberg-Marquardt 방법 등이 있으나 실험 결과 그림 3에 나타난 것과 같이 큰 차이가 나타나지 않았다. 본 논문에서는 LU decomposition의 방법을 사용하여 분석한 결과를 정리하였다.

2) 성능분석 결과 및 고찰

4.1)절에 설명한 데이터를 사용하여 각 에피폴라 기하모델을 수립한 후에, 검사점을 사용해서

정량적인 분석을 수행한 결과가 표 2에 정리되어 있고, 각 검사점에 대한 오차는 그림 4, 그림 5, 그림 6 및 그림 7에 나타나 있다.

결과에 나타난 것과 같이 항공영상과 같이 중심투영 센서의 에피폴라 기하모델의 경우 제안하는 에피폴라 기하모델이나 Orun과 Natarajan 센서 모델의 에피폴라 기하모델에 비해 오차가 있지만 선형 Pushbroom 영상에 적용하여도 평균적으로 1 픽셀 이내의 오차를 나타냈다. 그러나 일부 검사점에서는 큰 오차를 가지고 있음을 확인할 수 있다. Gupta와 Hartley 에피폴라 기하모델의 경우 1 픽셀 내외의 오차를 가지고 있으나 항공영상의 에피폴라 기하모델에 비해 높은 정확도를 갖고 있지

표 2. 각 영상의 독립검사점에 대한 에피폴라 기하모델의 정확도. (단위: 픽셀)

		Perspective-epi	Simplified-epi	Proposed-epi	Reduced-epi
KOMPSAT 논산	Mean	0.309277	0.358783	0.275019	0.240343
	Std. D	0.190618	0.223384	0.178645	0.177657
	RMS	0.363301	0.422641	0.327947	0.298876
KOMPSAT 대전	Mean	0.716960	0.924104	0.299815	0.504873
	Std. D	0.669638	0.701874	0.222539	0.392881
	RMS	0.981043	1.160429	0.373380	0.639728
SPOT 보령	Mean	0.509432	0.519841	0.528735	0.505631
	Std. D	0.377703	0.452445	0.340813	0.336503
	RMS	0.634178	0.689160	0.629058	0.607369
SPOT 대전	Mean	0.537854	0.568532	0.521247	0.498325
	Std. D	0.267184	0.365917	0.302355	0.244057
	RMS	0.600562	0.676109	0.602592	0.554880

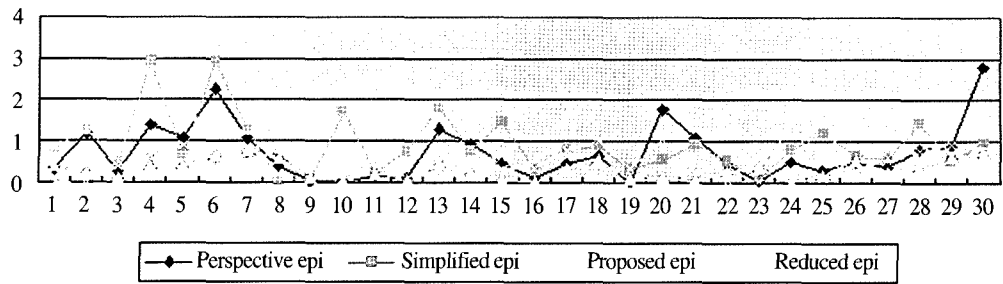


그림 4. KOMPSAT 대전 영상에 대한 검사점 오차 결과 (단위: 픽셀).

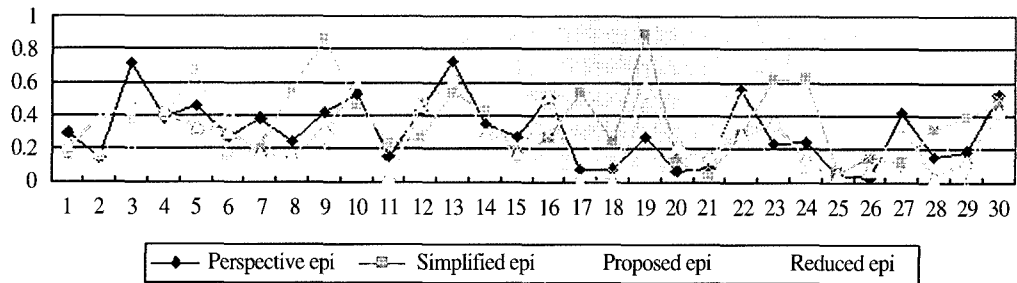


그림 5. KOMPSAT 논산 영상에 대한 검사점 오차 결과 (단위: 픽셀).

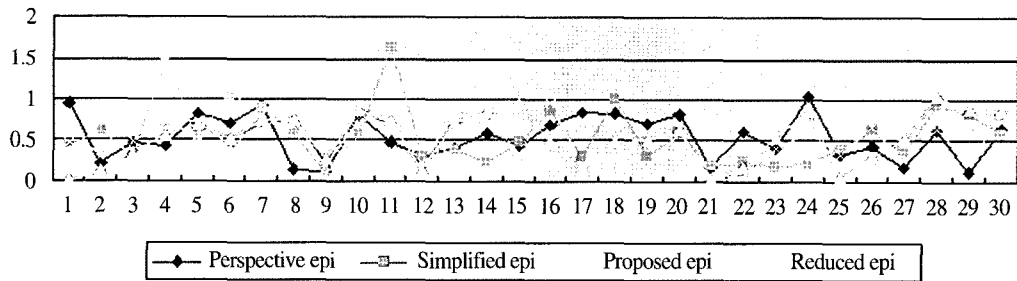


그림 6. SPOT 대전 영상에 대한 검사점 오차 결과 (단위: 픽셀).

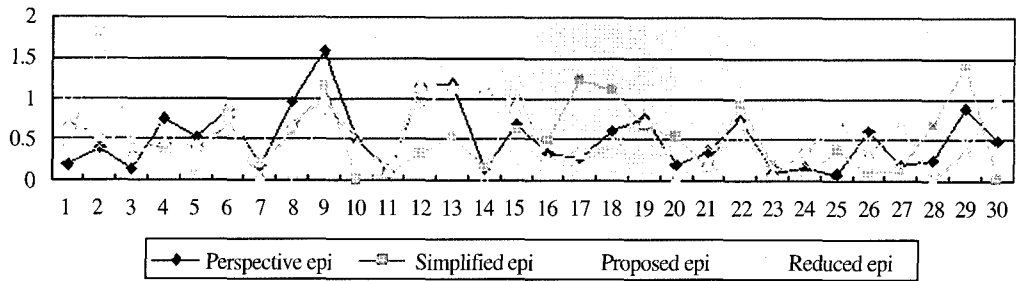


그림 7. SPOT 보령 영상에 대한 검사점 오차 결과 (단위: 픽셀).



는 않았다. 이러한 결과는 Gupta와 Hartley 에피폴라 기하모델이 본 논문에서 제안한 에피폴라 기하모델과 달리 위성진행방향에 대한 2차항( $y_1^2$ )을 고려하지 않았기 때문으로 생각된다.

Orun과 Natarajan 센서모델의 에피폴라 기하모델은 평균적으로 높은 정확도를 갖고 있고, 각 검사점에서도 오차가 크지 않았다. 그러나 Orun과 Nataraja 센서모델의 에피폴라 기하모델의 계산은 지상기준점 데이터와 위성궤도정보가 필수적이다. 본 논문에서 제안한 에피폴라 기하모델의 경우 중심투영 센서의 에피폴라 기하모델이나 Gupta와 Hartley 에피폴라 기하모델보다 높은 정확도를 갖고 있고, 위성의 궤도정보를 사용하지 않았음에도 불구하고 궤도정보를 사용한 Orun과 Natarajan 센서모델의 에피폴라 기하모델과 유사한 정확도를 가지고 있다. 본 실험에서는 제안한 에피폴라 기하모델의 수립을 위해 지상기준점을 사용했으나 3절에서 설명한 바와 같이 4×6의 행렬식으로도 모델링이 가능하여 중심투영 센서나 Gupta와 Hartley 에피폴라 기하모델과 마찬가지로 정합점만을 사용해서 수립이 가능할 것으로 생각된다.

## 5. 결론

본 논문에서는 위성의 궤도정보를 사용하지 않으나 높은 정확도를 가지고 있는 에피폴라 기하모델을 제안하였다. 또한 선형 Pushbroom 영상의 에피폴라 기하모델을 위해 제안한 에피폴라 기하모델을 중심투영 센서의 에피폴라 기하모델, Gupta와 Hartley 에피폴라 기하모델 및 궤도정보를 사용하는 Orun과 Natarajan 센서모델의 에피폴라 기하모델과 정량적인 비교를 수행하였다.

에피폴라 기하모델의 분석을 위하여 대전과 보령 SPOT 영상과 대전과 논산 KOMPSAT 위성영상을 사용하였고 정량적인 분석방법을 사용하여 정확도를 비교하였다. 중심투영 센서와 Gupta와 Hartley 에피폴라 기하모델을 위해 지상기준점

에서 생성한 모델링 데이터를 사용하였고, 제안한 에피폴라 기하모델은 지상기준점을 사용하여 수립하였으나 모델링 데이터만 사용해서도 수립이 가능할 것으로 생각된다. Orun과 Natarajan 센서모델의 에피폴라 기하모델은 위성의 궤도데이터와 지상기준점을 사용하였다. 각 영상에서 추출한 30점의 독립검사점을 사용하여 분석한 결과에 따르면 제안한 에피폴라 기하모델은 궤도정보를 사용하지 않았음에도 높은 정확도를 보였고 중심투영 센서의 에피폴라 기하모델도 평균적으로 1픽셀 이내의 정확도를 보였으나 일부 검사점에서 큰 오차를 갖고 있었다.

본 논문에서의 실험은 SPOT과 KOMPSAT 영상을 대상으로 이루어졌으나 그 외의 다른 위성영상에서도 유사한 결과를 나타낼 것으로 생각된다. 특히 제안한 알고리즘은 대표적인 상용위성인 IKONOS와 같이 궤도정보를 제공하지 않거나 궤도정보가 부정확한 영상에서 매우 유용하다. 그러나 본 논문에서 제시한 방법 및 결과가 일반화되기 위해서는 다양한 영상 데이터를 사용한 실험이 필요할 것으로 생각된다.

향후 연구에서는 본 논문에서 제시한 에피폴라 기하모델 및 다양한 에피폴라 기하모델의 정확도가 3차원 지형정보의 정확도에 어떠한 영향을 주는지에 대한 분석을 수행할 필요가 있다.

## 참고문헌

- Kim, T., 2000. A Study on the epipolarity of linear pushbroom Images, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 66(8): 961-966.
- Orun, A.B. and Natarajan, K., 1994. A Modified Bundle Adjustment Software for SPOT Imagery and Photography: Tradeoff, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 60(12): 1431-1437.
- Zhang, ZY., 1998. Determining the epipolar

- geometry and its uncertainty: A review, *The international journal of computer vision*, 27(2): 161-195.
- Gupta, R. and Hartley, R. 1997. Linear Pushbroom Cameras, *IEEE Transaction on pattern analysis and machine intelligence*, 19(9): 963-975.
- Gugan, D.J. and Dowman, I.J., 1988, Accuracy and completeness of topographic mapping from SPOT imagery, *Photogrammetric Record*, 12(72): 787-796.