

선형 Pushbroom 영상의 에피폴라 기하모델 수립을 위한 간소화된 방법론

이해연 · 박원규

(주) 세트랙아이 영상시스템 사업부

A Simplified Strategy for the Epipolar Geometry of Linear Pushbroom Imagery

Hae-Yeoun Lee and Won-Kyu Park

Image System Department, SaTReC Initiative(SaTReCi)

Abstract : In this paper, we proposed a simplified strategy for the epipolarity of linear pushbroom imagery. The proposed strategy is verified on “Gupta and Hartly” sensor model and “Orun and Natarajan” sensor model. It is also compared with the precise epipolarity model of each sensor model on SPOT and KOMPSAT imagery. For the quantitative analysis, 20 ground control points are used as independent checking points. Based on the results, the accuracy of the proposed strategy is not different from that of the precise epipolarity model of each sensor model (below 0.1 pixels). Under the worst circumstance, the proposed strategy is robust. We can assure that the proposed strategy will show high accuracy on most of sensor models based on the co-linearity equations.

Key Words : Epipolar Geometry, Linear Pushbroom imagery, Simplified Strategy.

요약 : 본 논문에서는 선형 Pushbroom 영상의 에피폴라 기하모델을 수립하기 위한 간소화된 방법을 제안한다. 제안한 알고리즘은 Gupta와 Hartly의 센서모델과 Orun과 Natarajan 센서모델을 사용하여 검증하였고, 각 센서모델에서의 정밀한 에피폴라 기하모델과 정량적인 비교 분석을 수행하였다. 실험을 위해 SPOT 영상과 KOMPSAT 영상을 사용하였고, 각 영상에 대해 20개의 지상기준점을 독립적 검사점으로 사용하였다. 실험 결과에 따르면 제안한 알고리즘은 각 센서모델에서의 정밀한 에피폴라 기하모델과 크게 차이가 없었고 (0.1픽셀 이내), 극단적인 가정 속에서도 충분한 견고함을 보였다. 본 논문에서 제안한 알고리즘은 공선조건식에 기반을 둔 대부분의 센서모델에 대해 적용이 가능하며 신뢰할 수 있는 정확도를 나타낼 것으로 생각한다.

1. 서론

수치사진측량(Digital Photogrammetry)이나 원격탐사(Remote sensing)에 있어서 3차원 지형정보의 추출에 대한 연구는 지속적으로 이어져 왔고, 고해상도 위성영상의 출현으로 이에 대한 연구는 가속화 될 것이다. 3차원 지형정보를 생성하기 위해 영상정합(Image matching)의 과정은 필수적이다. 영상정합이란 동일한 대상을 촬영한 영상에서 3차원 공간 상의 같은 점을 나타내는 정합점을 찾는 과정으로, 3차원 지형정보의 정확도에 크게 영향을 미친다. 영상정합은 비단 수치사진측량이나 원격탐사 뿐만 아니라 컴퓨터 비전에서도 매우 중요한 기술이나 기술적으로 어려워 현재까지 최적의 알고리즘이 제안되지는 않았다.

일반적으로 동일한 대상을 촬영한 영상들 사이에는 에피폴라 기하모델이라는 기하학적인 관계가 존재한다. 즉 하나의 영상 상에 존재하는 한 점은 다른 영상 상에 선형적인 직선 혹은 비선형적인 곡선 상의 한 점으로 매핑된다. 영상정합의 과정에서 이와 같은 에피폴라 기하모델을 적용할 경우 정합점이 존재하는 영역을 제한할 수 있어 정합의 정확도 및 처리 속도를 높일 수 있고, 이를 통해 3차원 지형정보의 정확도를 높일 수 있다.

항공영상과 같은 Perspective 센서의 경우 에피폴라 기하모델은 선형적인 특성을 갖는 직선으로 모델링이 된다. Perspective 센서의 에피폴라 기하모델은 수학적으로 잘 증명되어 있고, 컴퓨터 비전이나 수치사진측량에서 이미 활용이 되고 있다. Perspective 센서의 에피폴라 기하모델에 대한 연구 및 참고 문헌은 이미 잘 알려져 있으므로 상세한 설명은 생략하도록 한다(Zhang 1998). 위성 센서로 널리 사용되는 Pushbroom 센서의 경우 에피폴라 기하모델은 비선형적인 특성을 갖는 곡선으로 모델링이 되고, 사용되는 센서모델에 따라 다르다(Lee and Park, 2001). 특히 Perspective 센서와 달리 Pushbroom 센서의 경우 센서의 위치 및 자세가 시간에 따라 변하기 때문에 센서모델은 비

선형적인 특성을 갖고 이와 같은 센서의 에피폴라 기하모델은 복잡한 비선형식으로 표현되어 수학적으로 모델링하기 상당히 어렵고, 모델링을 하더라도 복잡한 계산 및 처리의 과정이 필요하다(Kim, 2000).

본 논문에서는 센서모델에 무관하게 선형 Pushbroom 영상의 에피폴라 기하모델을 수립하기 위한 간소화된 알고리즘을 제안한다. 제안한 알고리즘은 상기 설명한 것과 같이 Pushbroom 센서에 대해 수학적으로 어려운 에피폴라 기하모델을 수립하지 않고도 상당히 정확한 에피폴라 기하모델을 획득할 수 있고, 다양한 센서모델에 대해서 적용이 가능하며 계산에 필요한 비용도 높지 않다. 또한 제안한 알고리즘은 Perspective 영상에도 적용이 가능하다.

제안한 알고리즘의 성능을 정량적으로 분석하기 위해 대표적인 센서모델인 Gupta와 Hartly (1997)의 센서모델¹⁾과 Orun과 Natarajan(1994) 센서모델의 정밀한 에피폴라 기하모델을 구현하였고, 보령과 대전의 SPOT 영상과 대전과 논산의 KOMPSAT 영상을 사용하여 제안한 알고리즘과 비교·분석을 하였다. 각 모델의 수립을 위해 필요에 따라 지상기준점 및 위성 궤도 정보를 사용하였고, 정확도의 검증을 위해 20점의 지상기준점을 독립적 검사점으로 사용하였다. 비교·분석 결과에 따르면 본 논문에서 제안한 에피폴라 기하모델 알고리즘은 정밀한 모델링을 통해 수립한 에피폴라 기하모델과 비교해 볼 때 정확도 측면에서 크게 차이가 나지 않음을 확인할 수 있었다.

본 논문의 2절에서는 선형 Pushbroom 센서의 대표적인 센서모델에 대한 에피폴라 기하모델에 대해 정리한다. 3절에서는 본 논문에서 제안하는 일반화된 알고리즘에 대해 설명하고, 4절에서 실험을 통해 제안한 알고리즘의 성능을 대표적인 센서모델의 에피폴라 기하모델과 비교·분석하도록 한다.

1) 항공영상에서 사용되는 Direct Linear Transform 방법을 변형한 모델이다

2. 관련 연구

1) Gupta와 Hartly 센서모델의 에피폴라 기하모델

선형 Pushbroom 센서의 경우 촬영하는 동안 센서의 위치 및 자세가 변하게 되므로 이와 같은 센서의 모델링은 복잡하고, 시간이 소요된다. Gupta와 Hartly의 센서모델은 등속 직선 운동과 촬영하는 동안 센서의 자세 변화가 없는 것을 가정하여 복잡한 센서모델을 간소화한 방법으로 궤도 정보를 사용하지 않고 지상기준점만으로 수립이 가능하다(Gupta and Hartly, 1997).

Gupta와 Hartly 센서모델의 에피폴라 기하모델은 Gupta와 Hartly(1997)가 제시한 것과 Lee와 Park(2001)에 의해 제안된 방법이 있다. 실험 결과에 따르면 Lee와 Park에 의해 제안된 에피폴라 기하모델의 정확도가 높고, 견고한 것으로 나타났다. Lee와 Park의 에피폴라 기하모델은 다음과 같이 정의된다.

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

$$k_1 = c_1y_l^2 + c_2y_l + c_3,$$

$$k_2 = c_4y_l^2 + c_5y_l + c_6,$$

$$k_3 = (c_7x_l + c_8)y_l^2 + (c_9x_l + c_{10})y_l + (c_{11}x_l + c_{12}),$$

$$k_4 = (c_{13}x_l + c_{14})y_l^2 + (c_{15}x_l + c_{16})y_l + (c_{17}x_l + c_{18}).$$

여기서, (x_l, y_l) 과 (x_r, y_r) 은 각각 좌측 및 우측 영상 상에 존재하는 점의 좌표값이고, $c_1 \sim c_{18}$ 은 상수값이다.

식에 나타난 것과 같이 Lee와 Park의 에피폴라 기하모델은 비선형적인 특성을 갖는 쌍곡선(hyperbola)으로서, 위성 진행 방향(y_l)에 대해 2차, CCD 배열 방향(x_l)에 대해 1차식으로 모델링된다. 참고로 Gupta와 Hartly의 에피폴라 기하모델은 위성 진행 방향에 대해 1차로 모델링된다. 이와 같은 비선형적인 쌍곡선을 에피폴라 곡선(epipolar curve)라고 부른다(Lee and Park, 2001).

2) Orun과 Natarajan 센서모델의 에피폴라 기하모델

앞서 설명한 것과 같이 선형 Pushbroom 센서는 촬영 당시 센서의 위치 및 자세가 시간에 따라 변하기 때문에 모델링이 복잡하다. Orun과 Natarajan(1994)은 센서의 촬영 당시의 센서의 위치와 자세 중 Yaw를 2차식으로, Pitch와 Roll을 시간에 무관한 상수로 모델링하였다. Orun과 Natarajan의 센서모델의 수립을 위해서는 위성궤도정보와 지상기준점을 필요로 한다. 그러나 모델의 정확도가 높고, 상용 소프트웨어들에 사용되는 센서모델의 기반이 된다.

Orun과 Natarajan의 센서모델을 기반으로 하는 에피폴라 기하모델은 Kim에 의해 다음과 같이 정의되었다 (Kim, 2000).

$$y_r = \frac{k_1x_l + k_2y_l + k_3}{(k_4x_l + k_5y_l + k_6)\sin Q(x_r) + (k_7x_l + k_8y_l + k_9)\cos Q(x_r)}$$

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

식에 나타난 것과 같이 Kim의 에피폴라 기하모델은 쌍곡선과 유사한 형태(hyperbola-like)의 비선형적인 특성을 갖고 있다.

3. 일반화된 에피폴라 기하모델 알고리즘

본 절에서는 선형 Pushbroom 영상에 대해 에피폴라 기하모델을 수립하기 위한 간소화된 알고리즘을 제안한다. 제안하는 알고리즘은 모든 센서모델의 기반이 되는 공선조건식에 기반을 두고 있어, 대부분의 센서모델에 적용이 가능하다.

에피폴라 기하모델 알고리즘을 기술하기 위해,

- 2) 에피폴라 기하모델은 동일한 대상물을 촬영한 영상 상에 존재하는 것으로, 각각의 영상을 좌측, 우측 영상이라 칭하도록 한다.

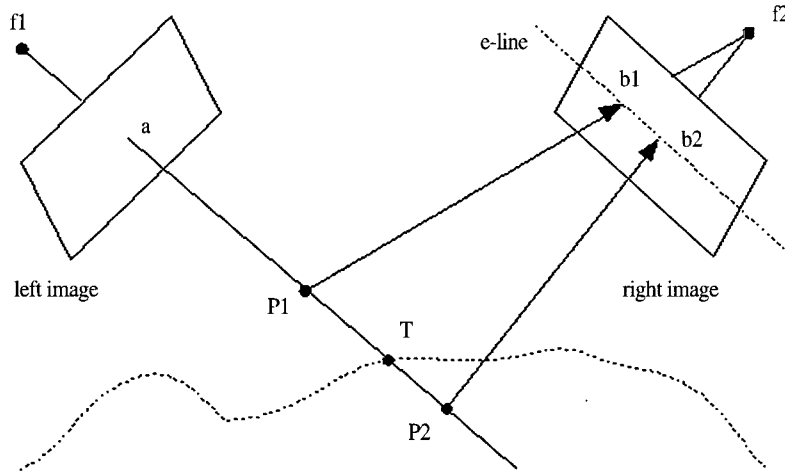


그림 1. 센서, 영상 및 대상물의 관계.

그림 1과 같이 동일한 대상물을 촬영할 당시의 센서, 영상 및 대상물과의 관계를 가정하면, 센서, 영상 및 대상물과의 관계는 다음과 같은 공선조건식으로 표현된다.

$$x = -f \frac{R_{11}(X-X_s) + R_{12}(Y-Y_s) + R_{13}(Z-Z_s)}{R_{31}(X-X_s) + R_{32}(Y-Y_s) + R_{33}(Z-Z_s)}$$

$$y = -f \frac{R_{21}(X-X_s) + R_{22}(Y-Y_s) + R_{23}(Z-Z_s)}{R_{31}(X-X_s) + R_{32}(Y-Y_s) + R_{33}(Z-Z_s)}$$

여기서 (X_s, Y_s, Z_s) 는 주어진 시각에서 센서 기준좌표 원점의 지상 기준좌표계 상에서의 좌표값이고, $(R_{11} \sim R_{33})$ 은 위성센서 기준좌표계를 지상 기준좌표계 변환하는 행렬의 각 인자로 다음과 같이 정의된다:

$$R = \begin{pmatrix} \cos\phi \cos\kappa & -\cos\phi \sin\kappa & \sin\phi \\ \sin\omega \sin\phi \cos\kappa + \cos\omega \sin\kappa & -\sin\omega \sin\phi \sin\kappa & -\sin\omega \cos\phi \\ -\cos\omega \sin\phi \cos\kappa + \sin\omega \sin\kappa & \cos\omega \sin\phi \sin\kappa + \sin\omega \cos\kappa & \cos\omega \cos\phi \end{pmatrix}$$

상기의 공선조건식은 대부분의 센서모델에 일반적으로 적용되는 수식이다. 2절에서 설명한 바와 같이 센서모델은 공선조건식에서 위성의 위치 (X_s, Y_s, Z_s) 와 위성의 자세 (κ, ϕ, ω) 를 어떻게 모델링 하느냐에 따라 Perspective 센서모델, Gupta와

Hartly 센서모델 및 Orun과 Natarajan 센서모델 등으로 구분하게 된다.

상기의 공선조건식에서 다음과 같이 정변환과 역변환을 정의할 수 있다.

1) 정변환

정변환(forward tracing)이란 영상 상의 한 점(a)에 대한 지상좌표점(P1 or P2)을 계산하는 과정이다. 즉 영상좌표점(x, y)에서 지상좌표점(X, Y, Z)를 계산하는 과정이다. 공선조건식에서 미지수의 개수는 3개(X, Y, Z)이나 수식은 2개로서 수학적으로 계산이 불가능하다. 그러나 해당 점의 높이값을 알 수 있을 경우 지상좌표를 계산할 수 있다.

2) 역변환

역변환(backward tracing)이란 지상좌표 상의 한 점(P1)에 대한 영상좌표(b1)를 계산하는 과정이다. 즉 지상좌표(X, Y, Z)에서 영상좌표(x, y)를 계산하는 과정으로, 공선조건식에서 미지수의 개수

가 2개 (x, y) 이고 수식도 2개로서 수학적인 계산이 용이하다.

물론 정변환과 역변환의 계산은 센서모델의 복잡도에 따라 다르지만, 다양한 비선형식 해법을 통하여 계산을 할 수 있다.

본 논문에서 제안하는 에피폴라 기하모델 알고리즘은 다음과 같다.

단계 1: 좌측 영상 상의 한 점(a)에 대한 지상 높이값 $(Z1, Z2)$ 을 추정한다.

영상 상의 한 점(a)에 대해 정변환을 수행하기 위해 높이값을 추정하는 단계로서, 높이값의 추정 은 지상기준점 혹은 수치지도 등을 사용하거나 영상정합 과정을 통해 계산된 높이값을 사용하면 된다. 본 단계에서 추정하는 높이값은 정확하지 않아도, 알고리즘은 충분히 정확한 에피폴라 기하모델을 생성할 수 있다. 실험에 따르면 높이값의 추정치가 최대/최소 10,000 미터의 오차를 갖고 있어도 정확함을 알 수 있다. 에피폴라 기하모델을 수립하기 위해서 두 개의 높이값을 추정하게 되는데, 일반적으로 해당 점이 존재하는 높이값의 범위를 추정하여 사용하면 된다.

단계 2: 추정 높이값을 사용하여 정변환을 통해 지상좌표점 $(P1, P2)$ 를 계산한다

추정한 높이값을 사용하여 공선조건식의 정변환을 통해 지상좌표값 $(P1, P2)$ 를 계산하는 과정으로, 단계 1에서 추정한 높이값 $Z1$ 과 $Z2$ 를 통해서 두 개의 공간 상의 지상좌표값 $P1(X1, Y1, Z1)$ 과 $P2(X2, Y2, Z2)$ 를 계산할 수 있다.

단계 3: 계산한 지상좌표점을 역변환을 통해 영상좌표점 $(b1, b2)$ 으로 변환한다.

지상좌표점 $(P1, P2)$ 를 우측영상의 공선조건식의 역변환 과정을 통하여 영상좌표 $(b1, b2)$ 로 변환하는 과정이다.

단계 4: 변환된 영상좌표를 사용하여 직선(e-line)을 모델링한다

상기의 과정에서 변환한 우측영상 상에 존재하는 두 개의 영상 점을 사용하여 직선을 계산하는 과정이다. 영상 상의 두 점 $b1$ 과 $b2$ 를 알면 직선의 방정식은 쉽게 수립할 수 있고, 이렇게 계산된

직선의 방정식이 본 논문에서 제안한 알고리즘을 통해 얻을 수 있는 에피폴라 기하모델이다.

본 논문에서 제안하는 알고리즘은 다음과 같이 정리할 수 있다.

[단계 1] 좌측 영상 상의 한 점(a)에 대한 지상 높이값 $(Z1, Z2)$ 을 추정한다.

[단계 2] 추정 높이값을 사용하여 정변환을 통해 지상좌표점 $(P1, P2)$ 를 계산한다

[단계 3] 계산한 지상좌표점을 역변환을 통해 영상좌표점 $(b1, b2)$ 으로 변환한다.

[단계 4] 변환된 영상좌표를 사용하여 직선(e-line)을 모델링한다

제안한 알고리즘에서는 2개의 지상 높이값을 추정하여 에피폴라 기하모델을 수립하는 과정을 기술하였다. 그러나 제안한 알고리즘은 N 개의 높이값을 추정하여 계산하는 방식으로 충분히 확장이 가능하다. 추정하는 높이값의 수에 따라 우측 영상에 N 개의 영상좌표값을 얻을 수 있고 해당 영상 점을 컴퓨터 비전이나 그래픽스에서 사용하는 추정(fitting) 방법을 사용하여 직선이나 곡선으로 모델링함으로써 에피폴라 기하모델의 수립이 가능하다.

4. 성능분석 및 고찰

본 절에서는 제안한 에피폴라 기하모델 알고리즘을 2절에서 설명한 (1) Lee와 Park(2001)에 의해 제안된 Gupta와 Hartly 센서모델의 에피폴라 기하모델(GH-Epi)과 (2) Kim (2000)에 의해 제안된 Orun과 Natarajan 센서모델의 에피폴라 기하모델(ON-Epi)과 비교·분석하고, 그 정확도를 분석한다.

1) 성능분석 실험방법

제안한 알고리즘의 성능을 분석하기 위해 표 1에 나타난 것과 같이 10미터 해상도 SPOT 영상과 6.6미터 해상도 KOMPSAT 영상을 사용하였다³⁾. Gupta와 Hartly의 센서모델의 모델링을 위해서는

표 1. 실험에 사용된 SPOT 및 KOMPSAT 영상 정보.

		SPOT 대전	KOMPSAT 대전
좌측영상	촬영시각	Nov. 15 1997	Mar. 9 2000
	촬영각도	4.2	26.0
우측영상	촬영시각	Oct. 14 1997	Mar. 1 2000
	촬영각도	25.8	-4.0

지상기준점을 사용하였고, Orun과 Natarajan의 센서모델의 수립을 위해서는 위성 궤도정보와 지상 기준점을 사용하였다. 이렇게 수립한 센서모델의 계수를 사용하여 각 센서모델의 에피플라 기하모델(GH-Epi, ON-Epi)을 계산하였다.

에피플라 기하모델의 정량적인 정확도의 분석은 실제 정합점과 선형적인 에피플라 기하모델과의 거리를 측정함으로써 수행하였다. 이를 위해 각각의 영상에 대해 모델링에 사용된 지상기준점 이외에 20점의 지상기준점을 독립적 검사점으로 사용하였다. 2절에서 설명한 것과 같이 비교에 사용한 센서모델의 에피플라 기하모델은 비선형적인 특성을 갖는 곡선이지만 지역적으로는 선형적으로 변환해서 사용해도 무관함이 실험적으로 증명되었다(Kim, 2000, Lee and Park, 2001).

본 논문에서 제안한 에피플라 기하모델 알고리즘을 적용하기 위해서는 높이값의 추정이 필요하다. 실험에서는 대략적인 높이값의 추정이 제안한 에피플라 기하모델의 정확도에 영향을 미치지 않음을 분석하기 위해, 다양하게 높이값을 변화하여

실험하였다. 실험을 위해서 사용한 높이값은 실제 높이값에 대해 $\pm 100m$, $\pm 1,000m$, $\pm 5,000m$ 과 $\pm 10,000m$ 를 하여 추정하였다. 구간적인 높이값을 포함하여 계산함으로써 본 알고리즘의 견고성을 확인할 수 있다.

2) Gupta와 Hartly 센서모델에서 정확도 비교

Gupta와 Hartly 센서모델에서 제안한 에피플라 기하모델 알고리즘과 Lee와 Park(GH-Epi)의 에피플라 기하모델의 비교 결과가 표 2에 정리되어 있다. 각 결과는 그림 2에 도식화 되어 있다.

그림 3에는 SPOT 영상의 경우 각각의 독립 검사점에서의 오차를 표시하였다. 그림에서 알 수 있는 것과 같이 제안한 에피플라 기하모델의 정확도가 Lee와 Park의 에피플라 기하모델의 정확도와 차이가 없음을 알 수 있다. 오차가 거의 없어 해당 그래프가 겹쳐서 나타나 있다. KOMPSAT 영상의 경우도 오차가 거의 없으나 지면 관계상 표시하지 않았다.

3) Orun과 Natarajan 센서모델에서 정확도 비교

Orun과 Natarajan 센서모델에서 제안한 에피플라

3) 실제 실험에는 대전, 보령 SPOT 영상과 대전, 논산 KOMPSAT 영상 등에 대해 다양한 실험을 하였으나 결과에는 크게 차이가 나지 않았고, 지면 관계상 본 논문에서는 대전 지역의 SPOT 영상과 KOMPSAT 영상의 결과만을 정리하였다.

표 2. Gupta와 Hartly 센서모델에서의 실험 결과 (단위: 픽셀).

		GH-Epi	Proposed (+/-100m)	Proposed (+/-1,000m)	Proposed (+/-5,000m)	Proposed (+/-10,000m)
SPOT	Mean	0.568254	0.568255	0.568286	0.569036	0.571379
	Std. D	0.316259	0.316259	0.316281	0.316804	0.318511
	RMS	0.650333	0.650333	0.650371	0.651280	0.654159
	Maximum	1.103328	1.103328	1.103378	1.104581	1.108339
KOMPSAT	Mean	0.325027	0.319288	0.319003	0.312347	0.322689
	Std. D	0.227463	0.236148	0.236000	0.235062	0.228374
	RMS	0.396714	0.397128	0.396811	0.390915	0.395326
	Maximum	0.902368	0.766617	0.765122	0.728875	0.830774

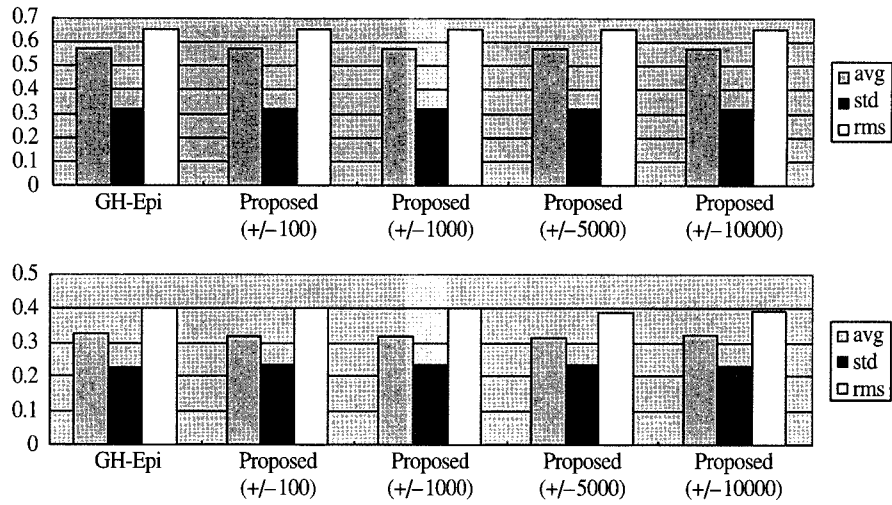


그림 2. Gupta와 Hartly 센서모델에서의 오차 (상 : SPOT 영상, 하 : KOMPSAT 영상).

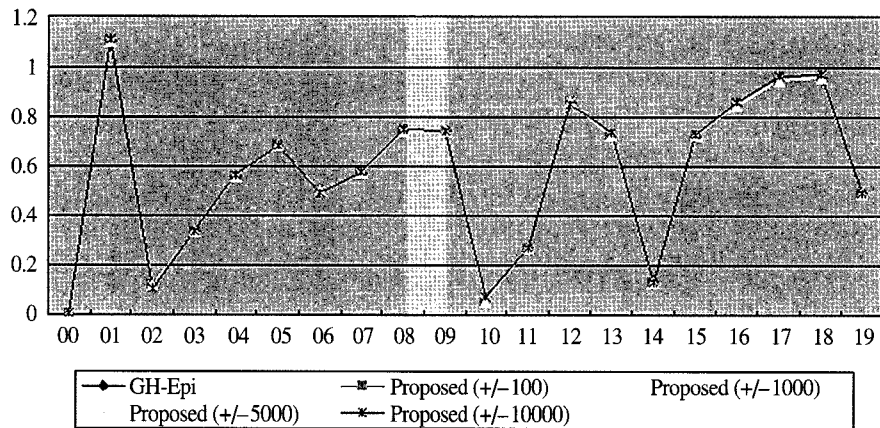


그림 3. 각각의 독립 기준점에서의 오차 분석 결과 (SPOT 영상, 단위 : 픽셀).

표 3. Orun과 Natarajan 센서모델에서의 실험 결과 (단위: 픽셀).

		ON-Epi	Proposed (+/-100m)	Proposed (+/-1,000m)	Proposed (+/-5,000m)	Proposed (+/-10,000m)
SPOT	Mean	0.563395	0.563031	0.563091	0.564552	0.569118
	Std. D	0.244699	0.242894	0.242864	0.242155	0.240079
	RMS	0.614241	0.613189	0.613233	0.614295	0.617684
	Maximum	0.955255	0.917260	0.917239	0.916728	0.915130
KOMPSAT	Mean	0.529993	0.529958	0.529712	0.526068	0.528021
	Std. D	0.357872	0.358071	0.358287	0.360986	0.361091
	RMS	0.639504	0.639586	0.639503	0.638011	0.639682
	Maximum	1.308318	1.312345	1.313222	1.334496	1.400998

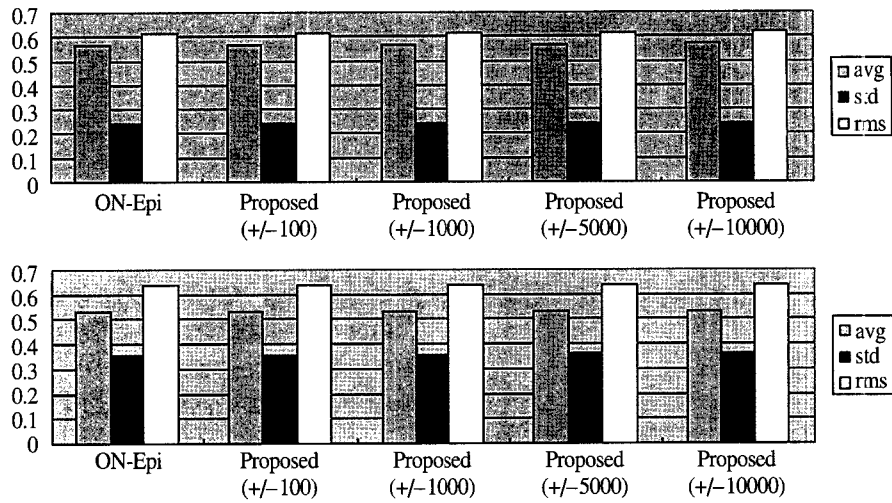


그림 4. Orun과 Natarajan 센서모델에서의 오차 (상 : SPOT 영상, 하 : KOMPSAT 영상).

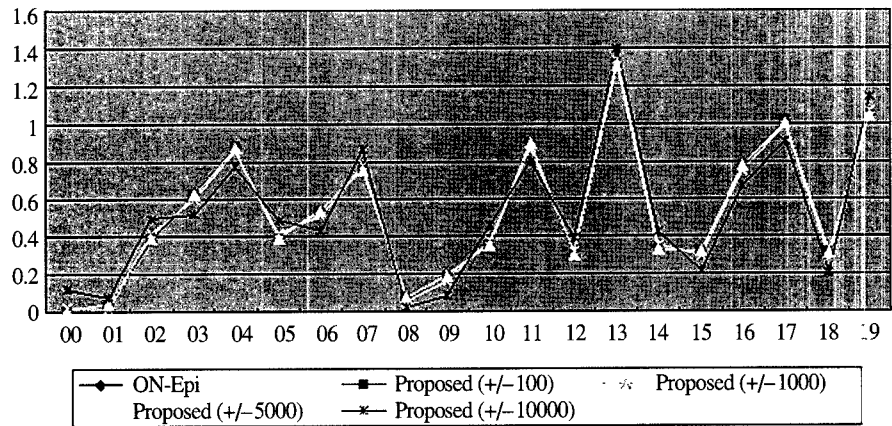


그림 5. 각각의 독립기준점에서의 오차 분석 결과 (KOMPSAT 영상, 단위 : 픽셀).

라 기하모델 알고리즘과 Kim(ON-Epi)의 에피플라 기하모델의 비교 결과가 표 3에 정리되어 있다. 각 결과는 그림 4에 도식화 되어 있다.

그림 5에는 KOMPSAT 영상의 경우 각각의 독립 검사점에서의 오차를 표시하였다. 그림에서 알 수 있는 것과 같이 제안한 에피플라 기하모델의 정확도가 Kim의 에피플라 기하모델의 정확도와 차이가 없음을 알 수 있다. SPOT 영상의 경우도 오차가 거의 없으나 지면 관계상 표시하지 않았다.

4) 고찰

실험 결과에 따르면 본 논문에서 제안한 에피플라 기하모델 알고리즘의 정확도는 각 센서모델의 에피플라 기하모델과 비교해 볼 때 크게 차이가 없음을 확인할 수 있다. 또한 제안한 알고리즘이 추정된 높이값의 정확도에 크게 민감하지 않음을 알 수 있다. 실제 응용에 있어서는 높이값의 추정을 위해 지상기준점이나 수치지도 등을 사용하거나 영상정합을 통해 높이값을 추정할 수 있어 제안한 알고리즘의 정확도는 충분히 확보된다. 특히 부가적인 데이터를 이

용할 수 없을 경우 극단적으로 높이값을 추정하여도 - 가령 0~10,000미터 - 제한한 알고리즘이 에피폴라 기하모형을 충분히 정확하게 모델링할 수 있다.

이와 같이 제안한 알고리즘이 충분한 정확도를 확보할 수 있는 것은 지상에서의 높이값 변화가 영상좌표의 변화에 미치는 영향이 작기 때문으로 생각된다. Kim(2000) 및 Lee와 Park(2001)에서 증명된 것과 같이 각 센서모델의 에피폴라 기하모형은 지역적으로 선형적인 특성을 갖는 직선으로 변환하여도 충분히 정확하다. 따라서 제안한 알고리즘에서 높이값이 크게 변해도 영상좌표 상에 변화는 작기 때문에 충분한 정확도를 확보할 수 있다.

본 논문에서는 대표적인 선형 Pushbroom 영상의 센서모델인 Gupta와 Hartly의 센서모델과 Orun과 Natarajan의 센서모델의 에피폴라 기하모형과의 비교만을 수행했으나, 제안한 알고리즘은 공선 조건식에 기반을 둔 대부분의 센서모델에 대해 적용이 가능하고, 높은 정확도를 나타낼 것으로 생각된다. 항공영상과 같은 Perspective 센서의 경우도 제안한 에피폴라 기하모형 알고리즘으로 계산이 가능하지만 Perspective 센서의 에피폴라 기하모형은 선형적 직선으로 표현되고, 쉽게 모델링이 되므로 오히려 주어진 알고리즘은 정확도는 보장되나 계산 시간이 느리게 된다.

5. 결 론

본 논문에서는 선형 Pushbroom 영상의 에피폴라 기하모형을 수립하기 위한 간소화된 방법을 제안하였다. 또한 제안한 알고리즘을 대표적인 센서모델인 Gupta와 Hartly의 센서모델과 Orun과 Natarajan 센서모델에서의 정밀한 에피폴라 기하모형과 비교·분석을 수행하였다. 본 논문에서 제안하는 간소화된 방법을 적용할 경우 센서모델에 종속적이고 수학적 으로 복잡한 에피폴라 기하모형을 모델링하지 않고 정밀한 에피폴라 기하모형을 수립할 수 있다.

제안한 알고리즘의 검증을 위해 10미터 해상도의 SPOT 영상과 6.6미터 해상도의 KOMPSAT

영상을 사용하였고, 각 영상에 대해 독립적인 검사 기준점을 사용하여 정확도를 검증하였다. 실험 결과에 따르면 제안한 알고리즘은 대표적인 센서 모델의 정밀한 에피폴라 기하모형과 차이가 없었다. 또한 제안한 알고리즘을 극단적인 가정을 수립한 후에 평가해 보아도 충분한 견고성을 갖고 있음을 확인할 수 있었다.

본 논문에서는 제안한 알고리즘을 Gupta와 Hartly 센서모델과 Orun과 Natarajan 센서모델만을 사용하여 검증하였지만 공선조건식에 기반을 둔 대부분의 센서모델에 적용이 가능하고, 충분한 정확도를 갖을 것으로 생각된다.

참고문헌

- Gagan, D.J. and I.J. Dowman, 1998. Accuracy and completeness of topographic mapping from SPOT imagery, *Photogrammetric Record*, 12(72): 787-796.
- Gupta, R. and R. Hartly, 1997. Linear Pushbroom Cameras, *IEEE Transaction on pattern analysis and machine intelligence*, 19(9): 963-975.
- Kim, T., 2000. A study on the epipolarity of linear pushbroom images, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 66(8): 961-966.
- Lee, H. and W. Park, 2001. Epipolarity analysis for Linear pushbroom imagery, *International symposium on Remote Sensing, Jeju, Korea*, pp. 593-598.
- Orun, A.B. and K. Natarajan, 1994. A modified bundle adjustment software for SPOT imagery and photography, *Tradeoff, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 60(12): 1431-1437.
- Zhang, Z.Y., 1998. Determining the epipolar geometry and its uncertainty : A review, *The international journal of computer vision*, 27(2): 161-195.