

효율적인 스테레오 위성자료 활용을 위한 기하요소 간 상관성 분석

Analysis of Correlation between Geometry Elements for the Efficient Use of Satellite Stereo Images

정재훈¹⁾

Jeong, Jaehoon

Abstract

This paper proposes the results of analysis of correlation between satellite geometry elements for an effective use of satellite images. To achieve accurate positional information, stereo images have normal range of convergence and BIE (BIsector Elevation) angles which are greatly influenced by azimuth and elevation angle of individual image. In this paper, the variations of convergence and BIE angles are estimated according to azimuth angle differences between two images and each elevation angle. The analysis provided strong support for predicting stereo geometry without complex analysis of epipolar geometry or mathematics. The experiment results showed that more than 150°, 130°, and 100° azimuth angle differences need to be constructed when elevation angle of two images is 50°, 60°, and 70°, respectively, in order to make the convergence and BIE angle within normal range. The results are expected to be fully used for various application using stereo images.

Keywords: Stereo Images, Geometry Element, Azimuth angle, Elevation Angle, Correlation

초 록

이 논문에서는 스테레오 위성자료의 효율적 활용을 위한 위성 기하요소간 상관성 분석결과를 제시한다. 정밀한 위치 정보 취득을 위해서는 스테레오 자료가 적정 범위의 수렴각과 이등분선고도각을 형성해야 하며, 이러한 기하요소는 개별 센서의 방위각과 고도각에 의해 큰 영향을 받는다. 논문에서는 스테레오를 구성하는 두 센서의 고도각과 센서간 방위각 차이에 따른 수렴각과 이등분선고도각 변이를 추정하였다. 이러한 분석을 통해 복잡한 에피폴라 기하구조 분석이나 수식적용 없이 두 센서의 방위각 및 고도각 정보 확인만으로 스테레오 기하요소를 추정할 수 있는 근거를 제시하였다. 실험 결과 수렴각과 이등분선고도각이 적정 범위 내로 형성되기 위해서는 두 센서의 고도각이 50° 일 때는 방위각 차이가 150° 이상, 60° 일 때는 방위각 차이가 130° 이상, 고도각이 70° 일 때는 100° 이상이어야 함을 각각 보여주었다. 실험결과는 향후 스테레오 위성자료를 이용한 다양한 분야에 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

핵심어: 스테레오 영상, 기하요소, 방위각, 고도각, 상관성

Received 2016. 08. 16, Revised 2016. 09. 20, Accepted 2016. 10. 20

1) Member, Korea Ocean Satellite Center, Korea Institute of Ocean Science and Technology (E-mail: jaehoon@kiost.ac.kr)

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

스테레오 위성영상으로부터 취득되는 3차원 위치 정보의 정확도를 결정하는 요인은 크게 2가지로 나눌 수 있다. 첫 번째는 스테레오를 구성하는 각 영상의 센서모델 정확도이며, 두 번째는 두 영상이 구성하는 스테레오 기하의 안정성이다. 센서모델은 영상 촬영 당시 센서의 물리적인 위치 및 자세 등을 추정하여 영상 내 픽셀위치와 각 픽셀에 해당하는 지상좌표 간의 기하학적 관계를 수립하는 과정이다. 센서 모델 정확도는 일반적으로 실제 지상 기준점과의 비교를 통해 계산된 수평 및 수직방향의 오차로 표현된다. 스테레오 기하는 스테레오를 구성하는 두 영상이 형성하는 에피폴라 평면의 기하학적 형태를 의미한다. 스테레오 기하 안정성은 에피폴라 평면의 기하 안정성을 의미하며 이는 두 영상이 이루는 수렴각 및 이등분선고도각 등으로 설명될 수 있다.

위성영상의 센서모델의 경우 지금까지 많은 연구들이 수행되어 왔다. 특히 고해상도 위성영상이 보급된 이후 IKONOS 위성영상을 시작으로, SPOT-5, QuickBird, FORMOSAT-2, KOMPSAT-2 등 새로운 위성영상이 보급될 때마다 해상영상의 센서모델 결과들이 제시되어 왔으며, 정밀 센서모델을 통해 수평 및 수직 방향으로 1~2 픽셀 내외의 정확도로 갖는 3차원 위치 결정이 가능함을 보여주었다 (Fraser *et al.*, 2002; Grodecki and Dial, 2003; Noguchi *et al.*, 2004; Büyüksalih *et al.*, 2005; Chen *et al.*, 2006; Jeong and Kim, 2009). 물리적 모델(rigorous sensor model) 뿐만 아니라 최근 일반적으로 사용되고 있는 RPC(Rational Polynomial Coefficient)를 이용한 RFM(Rational Function Model)에서도 유사한 정확도를 보여주었다. 특히 최근에 보급되는 WorldView, Geoeye, KOMPSAT-3 등 서브미터급 해상도를 갖는 위성영상에서는 1m 이내의 정확도로 3차원 위치 결정이 가능함이 제시되었다 (Fraser and Ravanbakhsh, 2009; Aguilar *et al.*, 2012; Choi and Kang, 2012; Aguilar *et al.*, 2013; Jeong *et al.*, 2014).

상기한 바와 같이 센서모델의 경우 많은 연구가 수행되어 온 반면, 위성 스테레오 기하의 경우 상대적으로 많은 연구가 수행되지는 않았다. 이는 지금까지 대부분의 연구에서 스테레오 위성영상 이용 시 동일한 센서 내에서 취득한 두 장의 영상을 활용한 동종센서 스테레오 영상을 이용하였으며, 이러한 동종센서 스테레오 위성자료의 경우 위성 내 스테레오 취득 원리에 따라 일정범위 내의 안정적인 스테레오 기하를 형성하도록 촬영되기 때문이다. 따라서 다양한 스테레오 기하변이에 대한 분석, 그리고 이러한 기하변이가 3차원 위치 정확도에 미

치는 영향 등에 대한 심도 깊은 고찰이 이루어지지 못했다. 이러한 배경들이 선행연구에 보다 자세히 기술되어 있다 (Jeong and Kim, 2014; Jeong, 2015).

스테레오 위성자료의 기하요소 분석에 대한 연구는 최근 이종위성 또는 다중위성 자료활용에 대한 관심과 중요성이 증가하면서 시작되었다 (Jeong and Kim, 2014; Jeong *et al.*, 2015). 이종위성 스테레오 영상의 경우 기존에 동종위성 스테레오에서 나타나지 않았던 다양한 스테레오 기하가 형성될 수 있으며 이는 3차원 위치 정확도의 다양한 변이로 이어지기 때문이다. 예를 들어, 서로 다른 센서에서 취득한 영상을 이용한 이종위성 스테레오의 경우 매우 작은 수렴각 또는 이등분선고도각 등이 형성되는 등 매우 불안정한 스테레오 기하가 형성될 수 있다. 그리고 이러한 불안정한 스테레오 기하는 3차원 위치 정확도를 크게 저하시킬 수 있다. 관련 이론과 실험적 검증이 최근 선행연구들에 소개되었다 (Jeong and Kim, 2015; Jeong and Kim, 2016).

따라서 이러한 이종위성 스테레오 자료의 적절한 활용을 위해서는 자료 이용 전에 해당 자료가 안정적인 스테레오를 형성하고 있는가에 대한 판단이 선행될 필요가 있다. 실제로 이러한 이유 때문에 선행연구에서는 스테레오 기하요소를 산출하기 위한 방법들이 제시되었다 (Li *et al.*, 2007; Jeong and Kim, 2014; Jeong and Kim, 2016). 제시된 방법들의 경우 스테레오를 구성하는 개별 센서의 위치정보를 이용하거나 방위각 및 고도각 정보를 이용하여 3차원 상의 에피폴라 평면 기하 구조를 분석하는 방식이다.

이 논문에서는 스테레오 기하구조에 대한 분석이나 복잡한 수식 없이 개별 센서의 방위각 및 고도각 정보 확인만으로 스테레오 기하요소를 예측할 수 있는 분석결과를 제시하고자 한다. 스테레오 기하요소 결정에 가장 큰 영향을 미치는 요인이 두 센서의 방위각 차이와 고도각 정보임을 이용하여, 이러한 개별 센서의 기하요소와 스테레오 기하요소간에 상관성을 분석하였다. 기존 기하요소 산출 공식을 이용하여 두 센서의 고도각이 각각 50°, 60°, 70° 일 때 센서간 방위각 차이 변이에 따른 스테레오 기하요소 변이를 나타내고 기하요소간 상관성 분석 결과를 제시했다. 이러한 분석 결과는 스테레오를 구성하는 개별 센서의 방위각 및 고도각 정보 확인만으로 스테레오 기하요소에 대한 빠른 예측을 가능하게 한다. 복잡한 기하구조 분석 및 수식적용 없이 이처럼 개별 센서의 기하요소 확인만으로 간단하고 빠르게 스테레오 기하요소를 추정할 수 있는 근거가 제시된다면, 많은 원격탐사 연구자들 또는 위성영상 사용자들이 효율적으로 스테레오 자료를 선택하고 활용하는데 있어서 유용할 것이다.

2. 스테레오 위성영상의 기하요소

Fig. 1에 스테레오 위성영상의 기하요소에 대해 나타났다. A_1, E_1 는 Scene 1의 방위각 및 고도각, A_2, E_2 는 Scene 2의 방위각 및 고도각을 각각 나타낸다. 위성영상의 스테레오 기하에는 크게 3가지 각도, 수렴각 (convergence angle), 이등분선고도각 (BIE angle), 비대칭각 (asymmetry angle)으로 설명될 수 있다. 수렴각은 스테레오를 구성하는 각 센서에서 지상점으로 향하는 두 벡터가 이루는 사이각을 의미한다. 이등분선고도각은 수렴각을 이등분하는 에피폴라 평면 내 선분(이등분선: bisector)의 고도각을 의미하며 이는 곧 에피폴라 평면의 기울기를 의미한다. 비대칭각은 지표면과 평행을 이루는 에피폴라 평면내의 선분의 수선과 이등분선간의 사이각을 의미하며 이는 스테레오를 구성하는 두 벡터의 비대칭성을 의미한다. 참고로 비대칭각의 경우 기존에는 기선(baseline)에 대한 수선과 이등분선과의 사이각으로 정의되었으나 최근 소개된 논문에서 Fig. 1에서와 같이 재정의되었다 (Jeong and Kim, 2016).

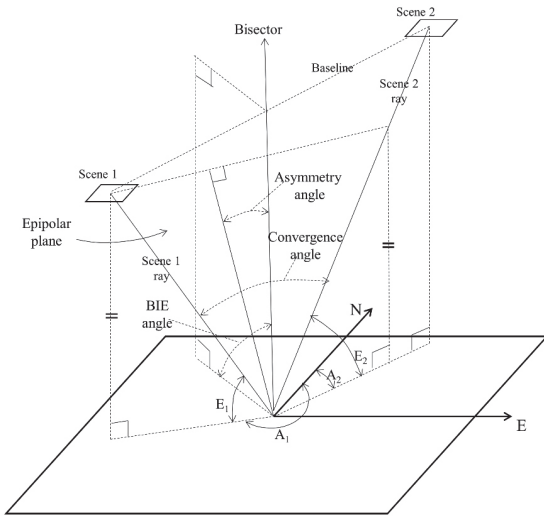


Fig. 1. Representation of satellite stereo geometry with convergence, BIE, and asymmetry angles (Jeong and Kim, 2016)

수렴각의 경우 오래 전부터 스테레오 기하 안정성을 설명하는 요소로 많은 논의가 진행되어 온 반면, 이등분선고도각과 비대칭각의 경우 이종위성 스테레오 자료의 활용과 그 중요성이 증가된 최근에서야 본격적으로 논의되었다 (Jeong and Kim, 2014; Jeong, 2015). 수렴각의 경우 적정 범위의 벗어나

게 되면 3차원 좌표의 수직 정확도에 크게 영향을 미칠 수 있음이 증명된 바 있다(Li et al., 2007; Li et al., 2009). 매우 작은 이등분선고도각과 매우 큰 비대칭각의 경우 3차원 좌표의 수평 정확도에 크게 영향을 미칠 수 있음이 최근 증명되었다 (Jeong and Kim, 2014; Jeong and Kim, 2016). 단, 비대칭각의 경우는 이종센서 스테레오의 경우에도 적정범위를 크게 벗어 나지 않는 경우가 대부분이며 따라서 실제로 3차원 위치 정확도에 큰 영향을 미치는 경우가 많지 않다(Jeong and Kim, 2016). 따라서 비대칭각은 본 연구의 분석대상에서 제외하기로 한다. 그러나 이론적으로는 영상조합에 따라 비대칭각이 커지는 경우가 발생하므로 향후 보다 다양한 이종센서 자료를 이용하여 분석될 필요가 있다.

이번에는 실제 위성자료를 이용하여 동종위성 및 이종위성 스테레오 기하요소를 산출하고 3차원 위치 정확도를 비교하여 나타났다. 단, 이번 절에서 사용된 실험 영상 및 일부 실험결과는 선행연구에서 발췌되었음을 밝힌다 (Jeong, 2015). Fig. 2와 같이 동일 지역을 촬영한 2장의 KOMPSAT-2 영상과 QuickBird 영상을 이용하여 스테레오를 구성하고 방위각 및 고도각으로부터 기하요소를 산출하였다. Table 1은 사용된 영상들의 속성을 나타낸다. 총 4장의 영상으로부터 2쌍의 동종위성 스테레오, 4쌍의 이종위성 스테레오 구성이 가능하며, 구성된 각 스테레오 자료의 기하요소 그리고 3차원 위치 정확도를 산출하여 Table 2에 제시하였다.

Table 2에 제시된 것과 같이 동종위성 스테레오의 경우 적정범위의 수렴각, 90°에 가까운 이등분선고도각을 형성하며 매우 정확한 3차원 위치 결정 정확도를 보여준다. 반면, 이종

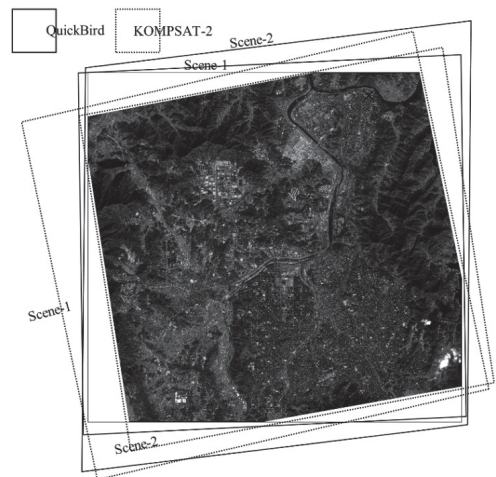


Fig. 2. Coverage of images used

Table 1. Property of image used

	KOMPSAT-2		QuickBird	
	Scene-1	Scene-2	Scene-1	Scene-2
Date of acquisition	10 May 2007	6 May 2008	16 Jan 2005	16 Jan 2005
Azimuth angle	79.7°	256.7°	199.5°	5.2°
Elevation angle	58.2°	74.1°	59.5°	58.7°
Orbit type	Ascending orbit		Descending orbit	
GSD (column/row)	1.30m / 1.10m	1.04m / 1.01m	0.71m / 0.79m	0.71m / 0.83m
Upper Left Latitude	36.430647°	36.432525°	36.461548°	36.462794°
Upper Left Longitude	127.228681°	127.290613°	127.272200°	127.269969°
Lower Right Latitude	36.322711°	36.321319°	36.296970°	36.298503°
Lower Right Longitude	127.497133°	127.501054°	127.488637°	127.486408°

Table 2. Comparison of stereo geometry and positioning accuracy between single-satellite stereos and dual-satellite stereos

Stereo type	Combination	Convergence angle	BIE angle	Horizontal accuracy	Vertical accuracy
Single-satellite stereo	KOMPSAT-2 (K2) stereo	47.7°	89.3°	2.08m	1.65m
	QuickBird (QB) stereo	61.3°	85.7°	1.17m	0.65m
Dual-satellite stereo	K2 scene-1/QB scene-1	53.2°	73.2°	1.81m	1.61m
	K2 scene-1/QB scene-2	36.9°	64.0°	2.22m	2.90m
	K2 scene-2/QB scene-1	25.3°	69.4°	1.95m	3.36m
	K2 scene-2/QB scene-2	39.1°	75.7°	1.52m	2.31m

위성 스테레오의 경우 다양한 스테레오 기하요소가 형성되어 있으며, 특히 2번째, 3번째 조합의 경우 매우 낮은 수렴각 또는 이등분선고도각이 형성되어 이로 인한 수평·수직 정확도 저하를 확인할 수 있었다. 실제로 다양한 이중센서 스테레오 자료 활용 시 Table 2에서 제시한 결과보다 훨씬 더 불안정한 기하가 산출되어 스테레오 모델 수립이 어려운 경우가 발생하기도 한다(Jeong and Kim, 2015). 이러한 실험 결과는 효과적인 스테레오 영상활용, 특히 이중위성 스테레오 자료 활용을 위해서는 스테레오 기하요소 예측이 필요함을 보여준다.

3. 기하요소간 상관성 분석

앞서 언급하였듯 스테레오 기하요소는 에피폴라 평면의 기하구조 분석을 통해 도출된 수식을 이용하여 산출될 수 있으며, 수렴각과 이등분선고도각 계산식은 각각 Eq. (1), Eq. (2)와 같다 (Li *et al.*, 2007; Jeong and Kim, 2014). 식에서 A_1 , E_1

는 Scene 1의 방위각 및 고도각, A_2 , E_2 는 Scene 2의 방위각 및 고도각을 각각 나타낸다.

$$\begin{aligned} \text{Convergence angle} &= \cos^{-1}(\cos A_1 \cos A_2 \cos E_1 \cos E_2 \\ &\quad + \cos E_1 \cos E_2 \sin A_1 \sin A_2 + \sin E_1 \sin E_2) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\text{BIE angle} = \sin^{-1}\left(\frac{\sin E_1 + \sin E_2}{\sqrt{2} \sqrt{1 + \cos(A_1 - A_2) \cos E_1 \cos E_2 + \sin E_1 \sin E_2}}\right) \quad (2)$$

수식에서 확인할 수 있듯이 스테레오 기하요소 산출을 위해 개별 센서의 방위각과 고도각 정보를 이용한다. 단, 여기서 고도각 정보의 경우 각도 자체가 높고 낮음에 따라 스테레오 기하요소가 영향을 받게 되지만, 방위각의 경우 방위각 값 자체보다는 두 센서의 방위각 차이가 스테레오 기하요소를 결정한다. 예를 들어, 고도각 정보의 경우 각도가 50° 인지 60° 인지에 따라서 에피폴라 평면의 기울기(이등분선고도각) 크기가 영향을 받지만, 센서 촬영의 방위각이 0° 인지 180° 인지에

따라 기하요소가 결정되지는 않는다. 오히려 두 센서의 방위각 차이가 기하요소에 크게 영향을 미친다. 대부분의 위성에서 스테레오 영상 획득 시 거의 반대 방향에서 180° 방위각 차이(최소 100° 이상의 방위각 차이)를 두고 촬영함으로써 안정적인 스테레오 기하를 형성하는 반면, 서로 다른 센서에서 임의의 방위각을 갖고 촬영된 영상간에 결합되는 이종위성 스테레오의 경우 두 영상간 방위각 차이가 매우 작은 경우 불안정한 기하를 형성한다.

본 연구에서는 센서 촬영 고도각 별로 두 센서의 방위각 차이에 따른 기하요소 변이를 분석하였다. 일반적으로 위성 영상 촬영 시 센서 고도각의 경우 최소 50° 이상을 가지며 최대 75° 이상은 거의 넘어가지 않는 것을 감안하여, 50°, 60°,

70°, 세 고도각을 가정하여 실험하였다. 센서간 방위각 차이의 경우 최소 0° 부터 최대 180° 까지 형성될 수 있으므로 0° 부터 180° 까지 10° 간격에 해당하는 모든 방위각 차이에 대한 실험 결과를 산출하였다. 상기한 수식들을 이용해 가정된 방위각과 고도각 정보에 해당하는 수렴각 및 이등분선고도각을 산출하고 Fig. 3과 Fig. 4에 결과를 나타냈다. 그래프는 스테레오를 구성하는 두 센서가 각각 50°, 60°, 70° 고도각을 갖고 영상을 촬영하였을 경우 두 센서의 방위각 차이에 따라 스테레오 기하요소가 어떻게 형성되는지 보여준다. Fig. 3은 센서간 방위각 차이에 따른 수렴각의 변이, Fig. 4는 센서간 방위각 차이에 따른 이등분선고도각의 변이를 각각 나타낸다.

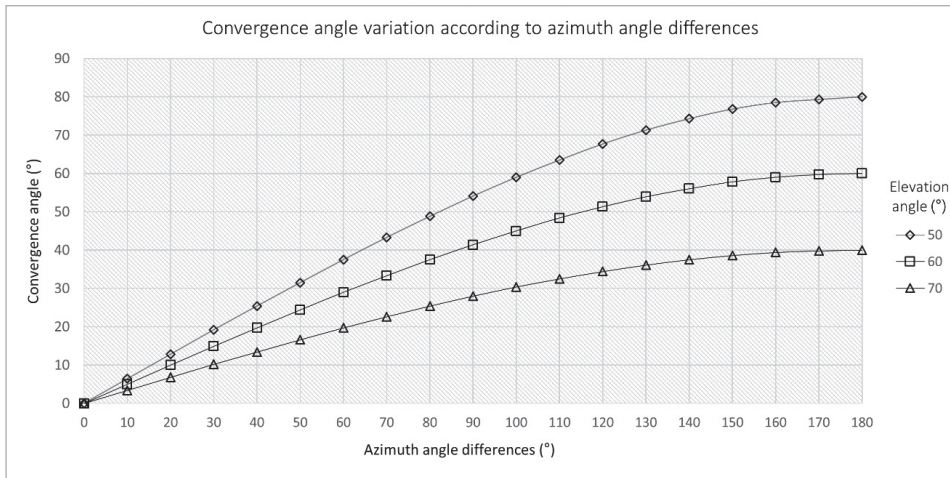


Fig. 3. Analysis of correlation between azimuth angle differences and convergence angle

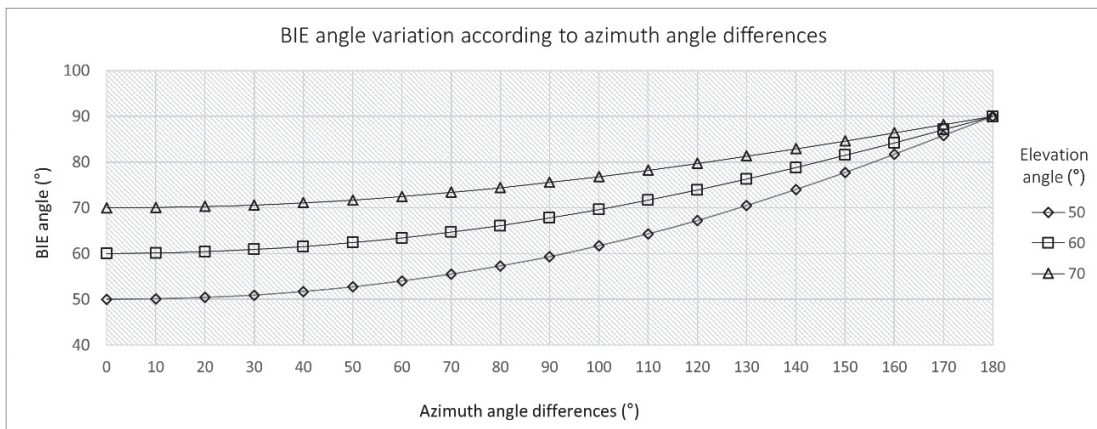


Fig. 4. Analysis of correlation between azimuth angle differences and BIE angle

참고로 스테레오 기하요소 즉, 수렴각과 이등분선고도각의 적정범위에 대해 기존 연구에서 구체적으로 명시된 바가 없다. Digital Globe사의 stereo image 제품군에서 제시하는 스테레오 기하요소 범위(30°~60° convergency, 60°~90° BIE, 0°~20° asymmetry)도 참고자료로 활용할 수 있겠으나, 대부분의 상용위성에서 스테레오 영상 촬영 시 30° 이상의 수렴각, 75° 이상의 이등분선고도각을 갖도록 촬영되고 있으며, 그 미만의 각도가 산출되는 경우 위치 정확도 저하가 발생할 수 있음을 실험적으로 확인했던 것(Jeong and Km, 2014; Jeong and Kim, 2015)을 근거로 본 연구에서는 수렴각의 경우 30° 이상 (최대 70° 미만), 이등분선고도각의 경우 75° 이상을 적정 범위로 설정한다. 물론 이 부분은 지속적인 연구를 통해 정립이 필요한 부분이다.

먼저 Fig. 3의 상관성 결과를 분석해 보면, 30° 이상의 수렴각을 형성하기 위해서는 두 센서의 고도각이 50° 일 때는 방위각 차이가 50° 이상, 고도각이 60° 일 때는 방위각 차이가 60° 이상, 고도각이 70° 일 때는 방위각 차이가 100° 이상이어야 함을 보여준다. 높은 고도각을 갖고 촬영될수록 적정범위의 수렴각을 형성하기 위해서는 센서간 방위각 차이가 커야 함을 보여준다. 다음으로 Fig. 4의 상관성 결과를 분석해 보면, 75° 이상의 이등분선고도각을 형성하기 위해서는 두 센서의 고도각이 50° 일 때는 방위각 차이가 150° 이상, 고도각이 60° 일 때는 방위각 차이가 130° 이상, 고도각이 70° 일 때는 90° 이상이어야 함을 보여준다. 수렴각과는 달리 낮은 고도각을 갖고

촬영될수록 적정범위의 이등분선고도각을 형성하기 위해서는 센서간 방위각 차이가 커야 함을 보여준다. Fig. 3과 4에 제시된 분석결과를 검증하기 위해 2절에 제시된 실제 스테레오 위성자료의 센서간 방위각 차이와 평균 고도각 그리고 각 스테레오 자료의 수렴각과 이등분선고도각을 산출하여 Table 3에 나타냈다. 확인 결과, 그래프에서 제시된 결과와 실제 산출 결과가 유사한 것을 확인할 수 있다. 예를 들어 QuickBird 스테레오 영상의 경우 두 센서의 고도는 60°, 방위각 차이는 165° 정도로 볼 수 있는데, 이에 따라 예측되는 수렴각과 이등분선고도각을 그래프(Fig. 3과 Fig. 4)에서 확인해 보면 실제 결과 (Table 3)와 유사한 것을 확인할 수 있다. 센서간 고도각 차이가 큰 경우 다소간의 오차를 보이지만, 전반적으로 그래프로부터 예측되는 스테레오 기하요소는 실제 산출된 값과 유사한 결과를 보여준다.

안정적인 스테레오 기하형성을 위해서는 수렴각과 이등분선고도각 모두 적정범위를 형성해야 한다. 실험결과를 종합해 보면, 두 스테레오 각도 모두 적정 범위를 형성하기 위해서는 즉 안정적인 스테레오 기하가 형성되기 위해서는 두 센서의 고도각이 약 50° 일 때는 방위각 차이가 150° 이상, 60° 일 때는 130° 이상, 70° 일 때는 100° 이상이어야 함을 각각 보여준다. 실험 결과는 센서간 방위각 차이와 스테레오 기하요소 간의 상관관계를 잘 나타내며, 이러한 상관성 분석을 통해 센서의 방위각과 고도각 정보의 확인만으로 스테레오 기하요소 예측이 가능함을 보여준다.

Table 3. Representation of geometry elements of stereo images for validation of analysis in Fig. 3 and 4.

Stereo type	Combination	Azimuth angle difference	Elevation angle average (difference)	Convergence angle	BIE angle
Single-satellite stereo	KOMPSAT-2 (K2) stereo	177.0°	66.2° (15.9°)	47.7°	89.3°
	QuickBird (QB) stereo	165.7°	59.1° (0.8°)	61.3°	85.7°
Dual-satellite stereo	K2 scene-1/ QB scene-1	119.8°	58.9° (1.3°)	53.2°	73.2°
	K2 scene-1/ QB scene-2	74.5°	58.5° (0.5°)	36.9°	64.0°
	K2 scene-2/ QB scene-1	57.2°	66.8° (14.6°)	25.3°	69.4°
	K2 scene-2/ QB scene-2	108.5°	66.4° (15.4°)	39.1°	75.7°

4. 결론

이 논문에서는 스테레오 위성영상의 기하요소간 상관성 분석을 통해 스테레오를 구성하는 개별 영상의 방위각과 고도각을 확인하여 실시간으로 스테레오 기하요소를 예측할 수 있는 실험결과를 제시하고자 하였다. 실험을 통해 기존에 센서의 위치정보를 이용한 에피폴라 평면의 기하구조 분석이나 수식적용 없이 센서간 방위각 차이와 고도각 정보 확인만으로 수렴 및 이등분선고도각 예측이 가능함을 확인하였다. 예측한 결과를 보면, 스테레오 기하요소가 적정 범위를 형성하기 위해서는 두 센서의 고도각이 50° 일 때는 방위각 차이가 150° 이상, 고도각이 60° 일 때는 방위각 차이가 130° 이상, 70° 일 때는 100° 이상이어야 함을 보여주었다. 단, 논문에서 제시한 실험 결과의 경우 두 센서의 고도각이 같다고 가정하였다. 이는 대부분의 위성영상이 적어도 60° 내외의 고도각, 많아도 80° 이내의 고도각을 가지고 촬영되기 때문에 실제로 위성간 고도각 차이는 크지 않은 경우가 대부분이기 때문이다. 하지만 보다 세밀한 예측을 위해서 서로 다른 고도각을 갖는 경우에 대해서도 향후 동일한 분석이 이루어져 할 것이다.

본 논문에서 제시한 스테레오 기하요소 예측 방법은 동일한 지역을 촬영한 여러 장의 다중 위성자료가 존재하는 경우 정밀 위치정보 산출을 위한 스테레오 자료로 활용 가능한 자료를 선택하거나 또는 특정 영상간 조합이 스테레오 자료로 활용될 수 있는지 등에 대한 판단에 유용하게 활용될 수 있다. 또한 스테레오 영상의 수렴각이 작을수록 스테레오 매칭 정확도가 향상될 수 있기 때문에 이러한 부분을 고려하여 적정범위 내에서 수렴각이 작게 산출될 것으로 예상되는 조합을 선택하는 경우에도 활용될 수 있다. 물론 상기한 경우들에 대해 기존처럼 에피폴라 기하구조에 대한 분석이나 계산식을 이용하여 스테레오 기하요소를 산출할 수 있겠지만, 논문에 제시한 것처럼 두 센서의 방위각과 고도각 정보 확인만으로 간단하고 빠르게 스테레오 사용 여부를 결정할 수 있다면 보다 효과적인 스테레오 위성영상 활용이 가능할 것이다.

감사의 글

이 논문은 2016년 해양수산부 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 “해양탐재체 통합자료처리시스템 개발”과 “정지궤도 해양위성 활용연구(2단계)”의 일환으로 수행되었습니다.

References

- Aguilar, M. A., Aguilar, F. J., and del Mar Saldana, M. (2012), Geopositioning accuracy assessment of GeoEye-1 panchromatic and multispectral imagery, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 78, No. 3, pp. 247-258.
- Aguilar, M. A., Saldana, M. M., and Aguilar, F. J. (2013), Assessing geometric accuracy of the orthorectification process from GeoEye-1 and WorldView-2 panchromatic images, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Vol. 21, pp. 427-435.
- Büyüksalih, G., Koçak, G., Topan, H., Oruç, M., and Marangoz, A. (2005), Spot revisited: Accuracy assessment, DEM generation and validation from stereo SPOT-5 HRG images, *Photogrammetric Record*, Vol. 20, No. 110, pp. 130-146.
- Chen, L., Teo, T., and Liu, C. (2006), The geometrical comparisons of RSM and RFM for FORMOSAT-2 satellite images, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 72, No. 5, pp. 573-580.
- Choi, S. and Kang, J. (2012), Accuracy investigation of RPC-based block adjustment using high resolution satellite images GeoEye-1 and WorldView-2, *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, Vol. 30, No. 2, pp. 107-116. (in Korean with English abstract)
- Grodecki, J., and Dial, G. (2003), Block adjustment of high-resolution satellite images described by rational polynomials, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 69, No. 1, pp. 59-68.
- Fraser, C.S., Hanley, H.B., and Yamakawa, T. (2002), Three-dimensional geopositioning accuracy of IKONOS imagery. *Photogrammetric Record*, Vol. 17, No. 99, pp. 465-480.
- Fraser, C.S. and Ravanbakhsh, M. (2009), Georeferencing accuracy of GeoEye-1 imagery, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 75, No. 6, pp. 634-640.
- Jeong, J. (2015), A study on the method for three-dimensional geo-positioning using heterogeneous satellite stereo images, *Journal of the Korean Society of Surveying,*

- Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, Vol. 33, No. 4, pp. 325-331. (in Korean with English abstract)
- Jeong, J., Kim, J., and Kim, T. (2014), Analysis of geolocation accuracy of KOMPSAT-3 imagery, *Korean Journal of Remote Sensing*, Vol. 30, No. 1, pp. 37-45. (in Korean with English abstract)
- Jeong, J. and Kim, T. (2009), Comparison of orbit-attitude model between Spot and Kompsat-2 imagery, *Korean Journal of Remote Sensing*, Vol. 25, No. 2, pp. 133-143. (in Korean with English abstract)
- Jeong, J. and Kim, T. (2014), Analysis of dual-sensor stereo geometry and its positioning accuracy, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 80, No. 7, pp. 653-662.
- Jeong, J. and Kim, T. (2015), Comparison of positioning accuracy of a rigorous sensor model and two rational function models for weak stereo geometry, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 108, pp. 172-182.
- Jeong, J. and Kim, T. (2016), Quantitative estimation and validation of the effects of the convergence, bisector elevation, and asymmetry angles on the positioning accuracies of satellite stereo pairs, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 82, No. 8, pp. 625-633.
- Jeong, J., Yang, C.-S., and Kim, T. (2015), Geo-positioning accuracy using multiple-satellite images: IKONOS, QuickBird, and KOMPSAT-2 stereo images, *Remote Sensing*, Vol. 7, No. 4, pp. 4549-4564.
- Li, R., Zhou, F., Nui, X., and Di, K. (2007), Integration of Ikonos and QuickBird imagery for geopositioning accuracy analysis, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 73, No. 9, pp. 1067-1074.
- Noguchi, M. Fraser, C.S. Nakamura, T. Shimono, T., and Oki, S. (2004), Accuracy assessment of QuickBird stereo imagery, *The Photogrammetric Record*, Vol. 19, No. 106, pp. 128-137.