

초점거리 편이가 지상 정확도에 미치는 영향 비교 연구 - 세가지 라인 스캐너를 대상으로 -

Comparative Analysis of Focal Length Bias for Three Different Line Scanners

김창재¹⁾

Kim, Changjae

Abstract

Most space-borne optical scanning systems adopt linear array configurations. The well-known three different types of space-borne sensors are along-track line scanner, across-track line scanner, and three line scanner. To acquire accurate location information of an object on the ground with those sensors, the exterior and interior orientation parameters are critical factors for both of space-borne and airborne missions. Since the imaging geometry of sensors might change time to time due to thermal influence, vibration, and wind, it is very important to analyze the Interior Orientation Parameters (IOP) effects on the ground. The experiments based on synthetic datasets are carried out while the focal length biases are changing. Also, both high and low altitudes of the imaging sensor were applied. In case with the along-track line scanner, the focal length bias caused errors along the scanline direction. In the other case with the across-track one, the focal length bias caused errors along the scan line and vertical directions. Lastly, vertical errors were observed in the case of three-line scanner. Those results from this study will be able to provide the guideline for developing new line sensors, so as for improving the accuracy of laboratory or in-flight sensor calibrations.

Keywords : Along-track Line Scanner, Across-track Line Scanner, Three-line Scanner, Focal Length bias

초 록

다수의 광학 위성 센서들이 선형 배열 형태에 기반을 두고 설계되었다. 널리 알려진 광학 위성 센서의 종류는 다음과 같이 경로평행방향 1열 스캐너(along-track line scanner), 경로직각방향 1열 스캐너(across-track line scanner), 3열 스캐너(three-line scanner)로 구분할 수 있다. 이들 센서들을 이용하여 위성 및 항공기에서 지상 지물의 정확한 위치 정보를 획득하려고 할 때 센서의 외부표정요소와 내부표정요소들은 매우 중요한 요소들이다. 이들 센서들의 영상 생성 기하구조는 태양에 의한 열영향, 진동, 바람 등의 다양한 물리적 현상들에 의해서 시시각각 변동될 가능성이 있기에 내부표정요소의 편이가 지상에 미치는 영향을 분석하는 것은 매우 중요하다. 실제적인 비행 경로와 자세 정보를 바탕으로 생성된 시뮬레이션 자료를 이용하여 본 연구에서는 각 센서의 초점거리에 편이량을 점진적으로 추가하면서 실험과 분석을 수행하였으며, 또한 비행 고도를 높고 고도와 저고도의 두 가지 경우로 비교하였다. 실험 결과, 경로평행방향 1열 스캐너의 경우에 초점거리 편이량의 증가가 지상 스캐너인 방향(Y 방향)의 오차를 유발하였으며, 경로직각방향 1열 스캐너의 경우 스캐너인 방향과 수직 방향으로 오차가 증가하였고, 3열 스캐너의 경우에는 수직 방향으로만 오차가 증가하였다. 이들 실험 결과는 향후 새로운 센서 개발과 센서 캘리브레이션 정확도에 가이드 라인을 제공할 수 있다고 본다.

핵심어 : 경로평행방향 1열 스캐너, 경로직각방향 1열 스캐너, 3열 스캐너, 초점거리 편이

Received 2014. 08. 12, Revised 2014. 08. 13, Accepted 2014. 08. 21

1) Member, Department of Civil Engineering, Sangmyung University (E-mail: cjkim@smu.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

사진측량분야에 있어서 주요한 연구중의 하나가 우리 주변의 공간을 보다 정밀하게 관측하고 재구성하는 것이다. 이의 목적을 위해 다양한 센서들이 개발되어 왔으며 특히 위성의 경우에는 주로 라인스캐너에 기반을 둔 센서를 사용하고 있다. 라인 스캐너는 크게 세 종류로 구분할 수 있는데 1) 경로직각방향 1열 스캐너 (across-track line scanner, Fig. 1(a)), 2) 경로평행방향 1열 스캐너 (along-track line scanner, Fig. 1(b)), 3) 3열 스캐너 (three-line scanner, Fig. 1(c))가 그 종류를 이룬다. 그림에서 보는 바와 같이 세가지 센서 모두에 있어서 Charge-Coupled Device (CCD) 배열이 비행방향에 대하여 직각으로 놓여있게 된다.

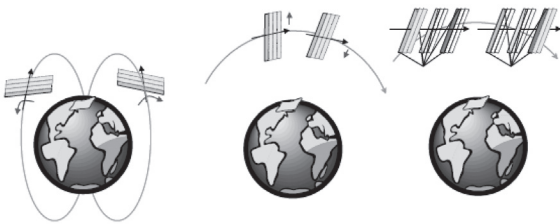


Fig. 1. Stereo coverage achieved by across-track line scanners using roll angle rotation (a), along-track line scanners using pitch angle rotation (b), and three-line scanners (c) (courtesy of Morgan *et al.*, 2004)

이들 센서들을 사용하여 지형지물을 정확히 관측하고 재구성하기 위해서는 카메라의 내부표정요소와 외부표정요소가 매우 중요하게 작용한다(Lee and Bethel, 2004). 내부표정요소는 초점거리, 주점, 렌즈왜곡요소들로 구성되어 있어 센서내부의 특징을 정의하게 된다. 외부표정요소는 촬영시 센서의 위치와 자세를 나타내는 요소들로 구성되어 있으며 이들 요소들을 알아내는 방법은 지상기준점 (Ground Control Points, GCP)를 이용하는 간접지형보정 (indirect geo-referencing)과 위성에 장착된 Global Positioning System(GPS)/Inertial Navigation System(INS)를 이용하는 직접지형보정 (direct geo-referencing)으로 구분할 수 있다. 위성에 장착된 센서의 내부표정요소는 일반적으로 위성체 발사 이전에 지상에서 캘리브레이션 과정을 거쳐 분석된다 (McGlone *et al.*, 2004; Tsai, 1986; Brown, 1971; Lichti, *et al.*, 2010; Lichti and Kim, 2011; Rau *et al.*, 2011). 그러나, 위성체가 발사되고 궤도에 안착하는 과정에서 진동에 의한 영향이나 태양열에 의한 영향 등을 받게 된다. 이에 위성체가 발사되기 이전에 지상의 실험실에서 검정된 센서의 내부표정

요소 값들이 위성체가 발사된 이후에 센서의 내부표정요소 값들과 아무런 오차도 없이 정확히 일치한다고 할 수 없게 된다. 이에 우주상에서 임무수행중인 센서를 직접 캘리브레이션하려는 연구가 있었으며 이를 위해서는 다양한 높이 값을 가진 실험지역 내에서 정확한 지상기준점의 취득이 필수적이다 (Jacobsen *et al.*, 2005). 일반적으로 IKONOS나 퀵버드와 같은 고해상도 센서들은 좁은 촬영시야각 AFOV(Angular Field Of View)를 가지게 되는데 이는 내부표정요소와 외부표정요소간의 강한 상관성을 만들어 낸다 (Jacobsen, 2005; Baltsavias and Zhang, 2005; Habib *et al.*, 2007). 많은 연구자들이 카메라 캘리브레이션에 대한 연구를 해왔음에도 불구하고 라인 스캐너의 내부표정요소의 정확도가 지상의 지형지물의 정확도에 미치는 영향에 대해서는 몇몇 논문을 제외하고는 찾아보기가 쉽지 않다 (Kim and Kim, 2013; Kim, 2014). Kim and Kim (2013)과 Kim(2014)에서는 초점거리편의가 경로평행방향과 경로직각방향 스캐너에 미치는 영향에 대하여 각각 언급하였다. 하지만, 앞에서 언급한 1) 경로평행방향 1열 스캐너, 2) 경로직각방향 1열 스캐너, 3) 3열 스캐너의 세 센서의 내부표정요소의 정확도가 지상에 미치는 영향을 종합적으로 비교 분석을 수행하지는 않았으며, 수평정확도를 중요시하는 응용분야인지 수직정확도를 중요시하는 응용분야인지에 따라 어떤 센서로부터 얻어진 영상을 이용해야 하는지에 대하여서도 언급을 하고 있지 않다.

이에 본 연구에서는 세가지 센서의 내부표정요소 중 특별히, 초점거리의 편의가 지상 지형지물의 정확도에 미치는 영향을 중심으로 논하고자 한다. 이를 위하여 우선 세가지 센서들의 특징에 대하여 서술하였으며, 이를 바탕으로 하여 어떻게 위성의 위치와 자세를 결정하였고 실험자료를 생성하였는지를 언급하였다. 실험은 세가지 센서에서의 초점거리에 편의량을 달리하여 추가하면서 분석하였다. 또한 고고도와 저고도로 비행고도를 달리 하면서 실험하여 위성체와 항공체에 실린 센서의 상태를 모사하려 하였다. 지형보정은 GPS와 INS를 사용하는 직접지형보정을 따랐다. 초점거리의 편의에 대한 다양한 실험을 바탕으로 하여 종합적인 비교평가를 수행하였다.

2. 라인 스캐너 시스템

사진측량학에서 사용되었던 종래의 필름을 이용한 사진기는 전자기기의 발달에 힘입어 디지털 사진기로 변화되었다. 그러나 항공사진측량에서 사용되었던 필름을 대체할 수 있는 정도와 거의 유사한 해상도를 가지기 위해서는

20,000×20,000의 영상소를 가져야 하는데 이러한 영상을 취득할 수 있는 사진기를 구하여 위성체에 장착하고 데이터를 저장 및 전송하기는 쉽지 않다. 이러한 이유로 인하여 프레임 사진의 대안으로 라인스캐너(line scanner)가 등장하게 되었으며 CCD 배열의 수에 따라 1열 방식과 3열(three-line) 방식이 있다 (Fig. 2).

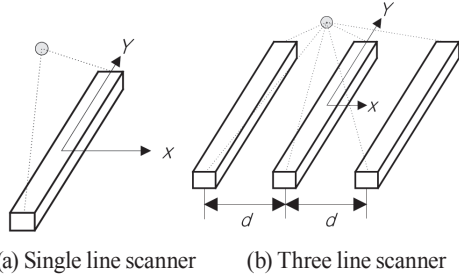


Fig. 2. Different array configurations of single and three line scanners

1열 방식 (Fig. 2(a))은 SPOT, IKONOS, QuickBird, KOMPSAT 등의 대부분의 지구관측위성과 HRSC와 같은 몇몇 항공 push broom 스캐너에서 채택하고 있다. SPOT 1~4, ASTER, KOMPSAT-1, IRS-1C/1D 센서와 SPOT-5 HRS 센서의 경우는 영상을 취득하는 중에 자세를 바꾸지 않는다. 이와 달리 IKONOS, QuickBird, OrbView, EROS-A, TES 등의 고해상도 위성의 경우는 위성의 자세를 다양하게 변화시킬 수 있다. 그러나 이와 같은 특성은 위성의 취득 기하에 영향을 미친다 (Jacobsen *et al.*, 2005). 위성의 경우에 경로평행방향 1열 스캐너와 경로직각방향 1열 스캐너의 대표적인 예는 IKONOS와 SPOT을 들 수 있다.

3열 방식(Fig. 2(b))은 1차원 스캐너가 전방(forward), 후방(backward), 연직방향(nadir)에 있는 것으로 독일의 우주 계획에 사용되고 있는 MOMS, 미국의 라이카 (Leica)와 독일의 항공우주센터(DLR)에서 공동 개발한 ADS40, 일본에서 개발한 TLS(Three Line Scanner) 등이 있다 (Murai and Matsumoto, 2000; Murai, 2001; Chen *et al.*, 2001; Gruen and Zhang, 2003). 3열 스캐너는 동시에 각기 다른 방향을 바라보는 세 개의 1차원 스캐너가 촬영한 연속영상을 만들어 내는 시스템으로 이들 세 개의 스캐너가 같은 투영중심을 공유하게 된다.

1열 방식과 3열 방식에서 지상좌표계와 영상좌표계를 관계 짓는 수학적 모델은 두 방식 모두 공선조건식(Eq. (1))을 사용하게 된다. 아래의 Fig. 3는 정의된 지상좌표계와 영상좌표계 그리고 두 좌표계상에 존재하는 P점과 p점 그리고 이를 연결하는 벡터를 나타내고 있다. 일반적으로 위성센서와 항

공센서에서의 X축 방향은 비행체의 진행방향과 일치시킨다 (Fraser *et al.*, 2002; Habib *et al.*, 2007).

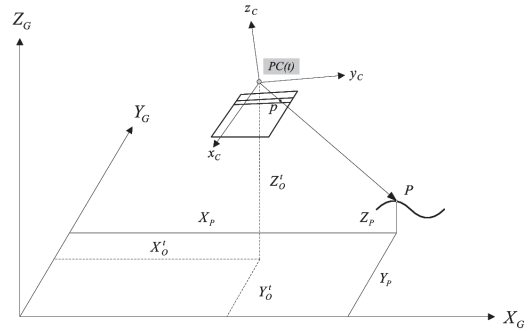


Fig. 3. Geometric relationship between ground coordinate system and image coordinate system

$$\begin{aligned}
 x'_p &= x_o - f \frac{m'_{11}(X_p - X'_O) + m'_{12}(Y_p - Y'_O) + m'_{13}(Z_p - Z'_O)}{m'_{31}(X_p - X'_O) + m'_{32}(Y_p - Y'_O) + m'_{33}(Z_p - Z'_O)} \\
 y'_p &= y_o - f \frac{m'_{21}(X_p - X'_O) + m'_{22}(Y_p - Y'_O) + m'_{23}(Z_p - Z'_O)}{m'_{31}(X_p - X'_O) + m'_{32}(Y_p - Y'_O) + m'_{33}(Z_p - Z'_O)}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

where (x'_p, y'_p) : Image coordinates of the object point, P, at time t, (x_o, y_o, f) : IOP of the imaging sensor, (X_p, Y_p, Z_p) : Ground coordinates of the object point, P, (X'_O, Y'_O, Z'_O) : Ground coordinates of the perspective center at the moment of exposure, m'_{11} to m'_{33} : Elements of the rotation matrix at the moment of exposure.

3. 연구자료구축

기하학적인 특성이 다른 센서들 간에 비교 연구를 수행하기 위하여 실험 자료를 시뮬레이션 생성하였다. 동일지역을 비행한 세가지 서로 다른 센서들에 의하여 취득된 실영상을 실험에 사용하는 것이 가장 신뢰성이 높은 연구이나, 동일 지역, 유사 촬영시기, 동일 지상기준점을 모두 만족시킬 수 있는 실험데이터를 획득하는 것이 손쉬운 일이 아니며, 오차가 없는 내부표정요소(True IOP)를 획득하는 일은 불가능한 일이다. 이에 실제 광학위성센서와 유사한 조건을 바탕으로 시뮬레이션 자료를 생성하여 본 연구에서 사용하게 되었으며, 그 조건들은 다음의 Tables 1 and 2에서 보는 바와 같다. Table 1은 센서의 비행경로, 영상관측오차, 체크포인트 정확도, 그리고 높이값 변위량을 나타내고 있다. 센서의 비행경로는 직선으로 정의되었으며, 영상관측오차는 1화소 정도로 정하였다. 체크포인트는 4cm의 정확도를 가진 100개의 점을 생성하였다

으며, 그 변위량은 ±500m정도이다. 직접지형보정을 이용하는 본 연구에서는 내부표정요소의 편이가 미치는 영향의 분석을 그 목적으로 하므로 외부표정요소는 시뮬레이션에서 생성된 참값을 사용하였다. 또한 추후 정확도 검증을 위하여 100개의 체크포인트 모두가 정확도의 검증에 사용되었다.

Table 1. Flight trajectory, image measurement accuracy, check point accuracy, and terrain height variation

Items	Contents
Sensor trajectory	Straight line
Image measurement error	1 pixel
Check point accuracy	0.04m(X), 0.04m(Y), 0.04m(Z)
Terrain height variation	± 500m

Table 2는 센서의 비행고도, 화소크기, 내부표정요소값, Ground Sampling Distance (GSD), Angular Field of View (AFOV), 내부표정요소의 편이량을 나타내고 있다. 고고도 비행의 경우는 IKONOS와 SPOT을 기반으로 자료를 구축하였으며, 저고도 비행은 ADS40을 기반으로 구축하였다. 경로 평행방향 1열 스캐너와 3열 스캐너는 지상고도 680km에서

비행하도록 하였으며 경로직각방향 1열 스캐너는 822km상공으로 비행고도를 정의하였다. 경로평행방향 1열 스캐너의 초점거리는 10m이며, 3열 스캐너에서의 전방 및 후방 방향의 초점거리도 10m로 정의되었다. 하나의 투영중심을 사용하는 3열 스캐너에서의 직각방향의 초점거리는 8.98794 m이며, 경로직각방향 1열 스캐너의 초점거리는 1,082mm이다. 주점의 위치는 세 센서 모두에 있어서 (0,0)을 따른다. 비행고도, 화소의 크기, 초점거리로 계산되는 GSD는 경로평행방향 1열 스캐너와 3열 스캐너에서 모두 동일하게 0.68m이다. 한편 경로직각방향 1열 스캐너의 경우에는 4.9m로 결정된다. 또한 이들 센서들은 AFOV는 1°에서 4°사이의 좁은 각을 가지고 있다. 내부표정요소의 편이량은 주점의 위치에 50µm가 추가되었으며, 초점거리 편이량은 50µm부터 50,000µm까지 단계적으로 증가되었다. 저고도의 경우에는 지상 5.5km 상공에서 비행하였으며, 초점거리는 75mm로 정의되었다. GSD는 0.73m이며, AFOV는 80° 근처이다. 주점 편이량은 0.375µm를 추가하였고, 초점거리의 편이량은 0.375µm 부터 375µm까지 변동되었다. 고고도 비행과 저고도 비행 모두의 경우에 있어서 처음의 초점거리 편이량 (즉, 50µm, 0.375µm)은 초점거리의 20만분의 1로 계산되었으며, 이후 10배씩 증가시켜 실험하였다.

Table 2. Flight height, pixel size, IOP, GSD, AFOV and amount of biases

Category		Along-track scanner	Across-track scanner	Three-line scanner
High Altitude	Flying height (m)	680,000	822,000	680,000
	Pixel size (µm)	10	6.5	10
	x_p (mm)	0	0	0
	y_p (mm)	0	0	0
	f (mm)	10,000	1,082	8,987.94 (nadir), 10,000 (forward & backward)
	GSD(m)	0.68	4.9	0.68
	AFOV	~0.9°	~4.1°	~1.1° (nadir), ~0.9°(forward & backward)
	Amount of bias	50 µm ($\Delta x_p, \Delta y_p$), 50 µm ~ 50,000 µm (Δf)		
Low Altitude	Flying height (m)	5,500	5,500	5,500
	Pixel size (µm)	10	10	10
	x_p (mm)	0	0	0
	y_p (mm)	0	0	0
	f (mm)	75	75	67.40955 (nadir), 75 (forward & backward)
	GSD(m)	0.73	0.73	0.73
	AFOV	~77.3°	~77.3°	~83.3° (nadir), ~77.3°(forward & backward)
	Amount of bias	0.375 µm ($\Delta x_p, \Delta y_p$), 0.375 µm ~ 375 µm (Δf)		

4. 실험결과분석

4.1. 고고도 비행의 경우

Tables 3, 4, and 5에서는 고고도 비행의 경우, 세 개의 센서 즉, 경로 평행방향 1열 스캐너, 경로 직각방향 1열 스캐너, 3열 스캐너에서 초점거리편의가 증가함에 따라 수평 및 수직 방향으로의 RMSE값이 어떻게 변화하는지를 보여주고 있다. 본 실험에서 RMSE는 100개의 체크포인트 좌표(X, Y, Z)와 원래의 내부표정요소값에 편의를 추가한 후 광속조정법을 이용하여 얻어진 지상점을 비교하여 계산되었다. 또한 보다 가시적인 분석을 위해 Figs. 4, 5 and 6을 추가하였다. Table 3과 Fig. 4에서 보는 바와 같이 고고도 경로평행방향 1열 스캐너의 경우에 초점거리가 증가할수록 다음과 같은 현상들이 나타난다. 우선 위성진행방향 (X방향) 및 스캔라인 (Y방향)으로 4m가량의 오차가 발생하는데 이는 x_p 와 y_p 에 더해진 $50\mu\text{m}$ 의 편의에 의해서 오는 것으로 5-6화소 ($50\mu\text{m}/10\mu\text{m}$) 정도의 편의가 각각 X와 Y방향으로 5-6 GSD에 해당하는 오류를 유발하였다. 초점거리편의량이 증가함에 따라 위성의 진행방향(X방향)의 수평위치오차는 증가하지 않았고, 스캔라인(Y방향)을 따라 수평위치오차는 증가하였으며, 고도 오차는 아주 조금 증가하였다. 이는 다음과 같이 해석할 수 있다. 경로평행방향 1열 스캐너의 경우에 편의가 추가된 새로운 초점거리는 투영중심에서 스캔라인(Y 방향)의 한 점을 잇는 벡터의 방향을 변화시킨다. 그러나, 경로평행방향 1열 스

캐너에서 취득된 스테레오영상에 초점거리편의를 적용시에 두 영상에 동일하게 벡터의 방향 변화량이 적용되므로 (벡터의 방향이 변화하되 그 벡터는 스캔라인을 반드시 통과한다) 일정편의 이상이 되었을 때 Y 방향으로의 오차는 증가하되 Z방향으로는 별다른 변화가 보이지 않게 된다. 초점거리대비 1/2000에 해당하는 편의량($5000\mu\text{m}$)까지는 그 편의량이 지상에 미치는 영향이 미미하여 수용할 만 한 것으로 판단된다.

Table 4와 Fig. 5는 고고도 경로직각방향 1열 스캐너의 실험 결과를 보여주고 있다. 위성진행방향 (X방향) 및 스캔라인 (Y방향)으로 나타나는 40m가량의 오차는 x_p 와 y_p 에 더해진 $50\mu\text{m}$ 의 편의에 의해서 오는 것으로 8화소 ($50\mu\text{m}/6.5\mu\text{m}$)

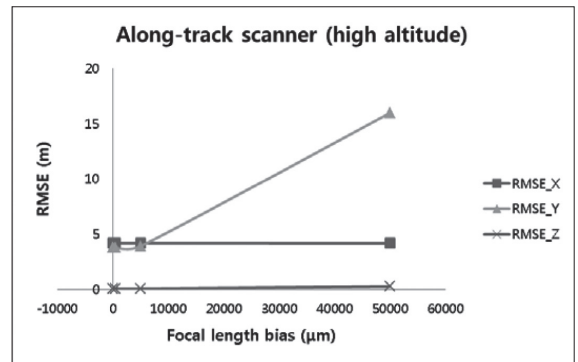


Fig. 4. Relationship between focal length bias and ground accuracy(along-track line scanner, high altitude)

Table 3. Along-track line scanner (high altitude)

Exp	Geo-referencing	IOP Bias(μm)			GCP	CP	$\hat{\sigma}_0$	RMSE(m)				
		Δx_p	Δy_p	Δf				X	Y	Z	XY	XYZ
HI_A1	Direct	50	50	50	0	100	0.0005	4.19	3.78	0.06	5.65	5.65
HI_A2				500			0.0005	4.19	3.77	0.06	5.64	5.64
HI_A3				5000			0.0003	4.19	3.91	0.06	5.73	5.73
HI_A4				50000			0.0028	4.18	15.97	0.25	16.51	16.51

Table 4. Across-track line scanner (high altitude)

Exp	Geo-referencing	IOP Bias(μm)			GCP	CP	$\hat{\sigma}_0$	RMSE(m)				
		Δx_p	Δy_p	Δf				X	Y	Z	XY	XYZ
HI_A1	Direct	50	50	50	0	100	0.0007	46.64	47.82	1.77	64.07	64.10
HI_A2				500			0.0007	46.63	48.44	1.78	64.52	64.55
HI_A3				5000			0.0006	42.45	99.22	3.25	107.92	107.96
HI_A4				50000			0.0003	40.77	845.91	26.55	846.89	847.31

≈ 8) 정도의 편의가 각각 X와 Y방향으로 약 8 GSD에 해당하는 오류를 유발하였다. 초점거리편의가 증가함에 따라 위성진행방향 (X방향)으로의 수평위치오차는 변화를 일으키지 않았으며, 스캔라인 (Y방향)을 따라서는 경로평행방향 1열 스캐너에 비해 위치오차가 증가하였고, 고도오차도 더 많이 나타났다. 이러한 원인은 우선 roll angle 을 이용하여 스테레오영상을 찍는 경로직각방향 스캐너의 촬영기하에서 그 첫 번째 원인을 들 수 있으며, 경로평행방향 스캐너에 비해 상대적으로 큰 촬영시야각 (AFOV)을 그 두 번째 이유로 들 수 있다. 경로직각방향 1열 스캐너의 경우에 편의가 추가된 새로운 초점거리는 투영중심에서 스캔라인(Y 방향)의 한 점을 잇는 벡터의 방향을 변화시킨다. 그러나 경로 직각방향 스캐너가 roll angle을 이용하여 스테레오영상을 촬영하므로, 방향이 변화된 벡터가 지상에 닿는 위치는 위성에서 먼 위치일 수로 크게 영향을 받게 된다. 이는 따라서 Y방향으로의 심각한 오차를 유발시키고, 또한 Z방향으로의 오차도 많이 유발시킨다. 본 센서에서 초점거리대비 1/20000에 해당하는 편의량 (500 μ m)까지는 그 편의량이 지상에 미치는 영향이 미비하여 수용할 만 한 것으로 판단된다.

3열 스캐너의 경우에는 Table 5와 Fig. 6에서 보는 바와 같은 현상을 나타내었다. 즉, 위성진행방향 (X방향) 및 스캔라인방향 (Y방향)을 따라 존재하는 4m가량의 오차는 x_p 와 y_p 에 더해진 50 μ m의 편의에 의해서 오는 것으로 5화소 (50 μ m/10 μ m) 정도의 편의가 각각 X와 Y방향으로 약 5 GSD에 해당하는 오류를 유발하였다. 초점거리의 편의에 의한 위성진행방향과 스캔라인방향으로의 오차는 전혀 발생하지 않았다. 고도의 경우 초점거리의 편의에 정비례하여 많이 증가함을 볼 수 있다. 이는 다음과 같이 설명할 수 있다.

우선 3열 스캐너에서는 세 개의 라인 스캐너가 동일한 투영중심을 공유하므로 (Fig. 2(b) 참조) 초점거리에 편의량이 추가되면 스캔라인을 초점거리편의량 만큼 하방으로 끌어내리게 된다. 투영중심에서 하방으로 위치가 내려온 스캔라인의 한 점을 잇는 벡터의 성분은 X, Y방향으로는 변화가 없

지만, Z방향으로는 아래로 내려가게 된다 (Kim, 2014). 따라서, 3열 스캐너를 통하여 얻어진 스테레오 영상으로부터 지상의 3차원점을 복원할 때, X, Y방향으로는 오차가 발생하지 않지만 Z방향으로는 오차가 심각하게 증가하게 되는 것이다. 본 센서에서 초점거리대비 1/20000에 해당하는 편의량 (50 μ m)까지는 그 편의량이 지상에 미치는 영향이 미비하여 수용할 만 한 것으로 판단된다.

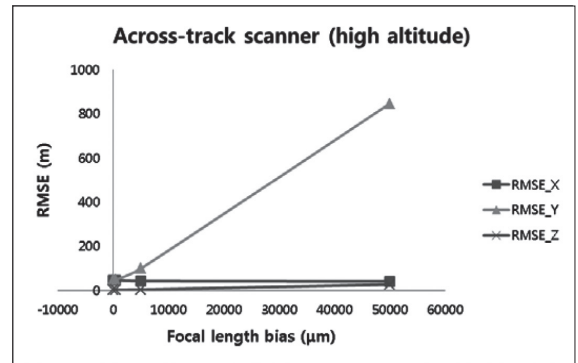


Fig. 5. Relationship between focal length bias and ground accuracy(across-track line scanner, high altitude)

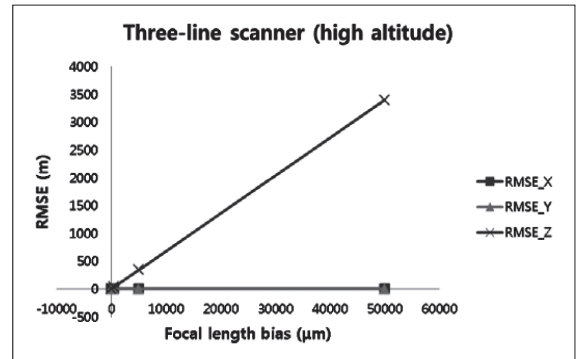


Fig. 6. Relationship between focal length bias and ground accuracy(three-line scanner, high altitude)

Table 5. Three-line scanner (high altitude) (Kim, 2014)

Exp	Geo-referencing	IOP Bias(μ m)			GCP	CP	$\hat{\sigma}_0$	RMSE(m)				
		Δx_p	Δy_p	Δf				X	Y	Z	XY	XYZ
HI_A1	Direct	50	50	50	0	100	0.0006	3.77	3.78	3.40	5.34	6.33
HI_A2				500			0.0055	3.77	3.78	34.00	5.34	34.41
HI_A3				5000			0.0552	3.79	3.78	339.96	5.35	340.01
HI_A4				50000			0.5519	4.00	3.78	3399.63	5.50	3399.64

4.2. 저고도 비행의 경우

저고도의 경우에 대하여서도 초점거리편의가 증가함에 따라 수평 및 수직 방향으로의 RMSE값이 어떻게 변화하는지를 Tables 6, 7, and 8과 Figs. 7, 8, and 9에서 보여주고 있다. 저고도 경로평행방향 1열 스캐너의 경우에는 Table 6과 Fig. 7에서 보는 바와 같이 저고도 경로평행방향 1열 스캐너와 유사하게 위성의 진행방향(X방향)의 수평위치오차와 고도오차는 초점거리가 증가함에 따라 거의 증가하지 않았으며 스캔라인(Y방향)을 따라서는 수평위치오차가 증가하였다. 본 센서에서 초점거리대비 1/2000에 해당하는 편의량(37.5 μ m)까지는 그 편의량이 지상에 미치는 영향이 수용할 만 한 것으로 판단된다.

Table 7과 Fig. 8에서 보는 바와 같이 저고도 경로직각방향 1열 스캐너의 경우에도 저고도 경로직각방향 1열 스캐너의 경우와 유사한 경향을 보이고 있다. 즉, 위성진행방향 (X방향)으로의 수평위치오차는 변화를 일으키지 않았다. 고도오차와 스캔라인 (Y 방향)을 따라서는 초점거리편의가 증가함에 따라 해당 오차도 증가하는 경향을 보였다. 본 센서에서 초점거리대비 1/2000에 해당하는 편의량(37.5 μ m)까지는 그 편의량이 지상에 미치는 영향이 수용할 만 한 것으로 판단된다.

저고도의 3열 스캐너의 경우에는 Table 8과 Fig. 9에서 보는 바와 같은 현상을 나타내었다. 즉, 위성진행방향 (X방향) 및 스캔라인방향 (Y방향)을 따라서는 오차의 증감이 발생하지 않았고 고도의 경우 초점거리의 편의에 정비례하여 증가함을 볼 수 있었다. 본 센서에서 초점거리대비 1/2000에 해당

하는 편의량(37.5 μ m)까지는 그 편의량이 지상에 미치는 영향이 수용할 만 한 것으로 판단된다.

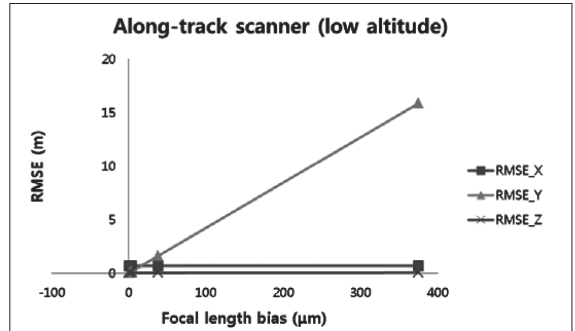


Fig. 7. Relationship between focal length bias and ground accuracy(along-track line scanner, low altitude)

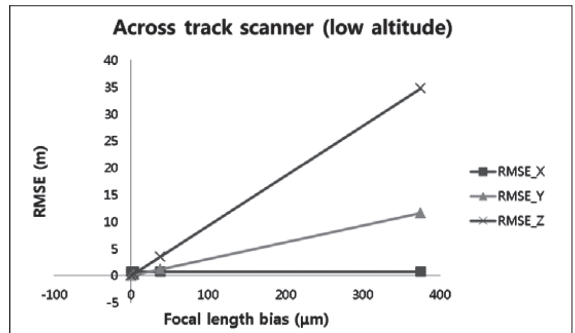


Fig. 8. Relationship between focal length bias and ground accuracy(across-track line scanner, low altitude)

Table 6. Along-track line scanner (low altitude)

Exp	Geo-referencing	IOP Bias(μ m)			GCP	CP	$\hat{\sigma}_0$	RMSE(m)				
		Δx_p	Δy_p	Δf				X	Y	Z	XY	XYZ
HI_A1	Direct	50	50	50	0	100	0.0001	0.71	0.06	0.06	0.71	0.71
HI_A2				500			0.0002	0.71	0.18	0.06	0.73	0.73
HI_A3				5000			0.0012	0.71	1.61	0.06	1.76	1.76
HI_A4				50000			0.0116	0.72	15.87	0.08	15.89	15.89

Table 7. Across-track line scanner (low altitude)

Exp	Geo-referencing	IOP Bias(μ m)			GCP	CP	$\hat{\sigma}_0$	RMSE(m)				
		Δx_p	Δy_p	Δf				X	Y	Z	XY	XYZ
HI_A1	Direct	50	50	50	0	100	0.0001	0.73	0.05	0.04	0.73	0.73
HI_A2				500			0.0001	0.73	0.12	0.34	0.74	0.82
HI_A3				5000			0.0001	0.73	1.16	3.48	1.38	3.74
HI_A4				50000			0.0001	0.73	11.62	34.74	11.64	36.64

Table 8. Three-line scanner (low altitude) (Kim, 2014)

Exp	Geo-referencing	IOP Bias(μm)			GCP	CP	$\hat{\sigma}_0$	RMSE(m)				
		Δx_p	Δy_p	Δf				X	Y	Z	XY	XYZ
HI_A1	Direct	50	50	50	0	100	0.0001	0.71	0.05	0.06	0.71	0.72
HI_A2				500			0.0001	0.71	0.05	0.26	0.71	0.76
HI_A3				5000			0.0003	0.69	0.05	2.70	0.70	2.79
HI_A4				50000			0.0039	0.54	0.05	27.19	0.54	27.20

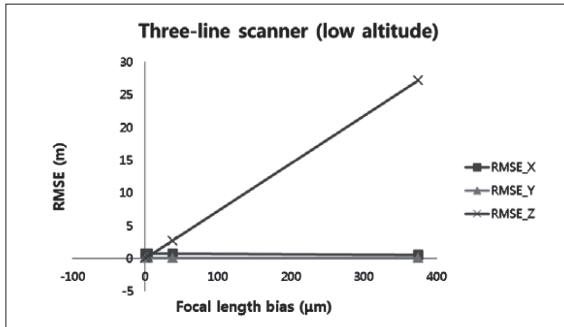


Fig. 6. Relationship between focal length bias and ground accuracy(three-line scanner, high altitude)

5. 결론

본 연구에서는 서로 다른 기하학적 특성을 가지는 라인 스캐너에 있어서 초점거리편의가 지상의 지형지물의 정확도에 어떠한 영향을 미치는가를 비교 분석하였다. 우선 방향별 정확도 측면에서 초점거리편의량의 증가에 경로평행 방향 스캐너는 Y방향의 오차가, 경로직각방향 스캐너는 Y와 Z방향의 오차가, 그리고 3열 스캐너의 경우는 Z방향의 오차가 유의미하게 증가하였다. 또한, 본 연구에서는 초점거리대비 얼마의 편의량이 추가되었을 때 지상에 미치는 영향을 무시할 수 없는 양인지에 대해서도 각 센서별로 언급되었다. 본 연구를 통하여 내부표정요소의 편의가 각 센서별로 영향을 미치는 방향에 대하여 알아보았기에, 사용자가 어떤 목적으로 가지고, 또는 어느 방향의 정확도를 보다 중요시 하는가를 기준으로 어떤 센서로부터 얻어진 영상을 사용할 것인가를 결정할 수 있을 것으로 본다. 또한, 초점거리대비 얼마의 편의량이 추가되었을 때 지상에 미치는 영향을 무시할 수 없는 양인지에 대해서도 각 센서별로 알아보았기에, 이를 바탕으로 실험실 또는 in-flight 캘리브레이션에서 요구되는 정확도 또한 결정할 수 있게 된다. 또한, 이러한 연구는 향후 우리나라에서 새로운 센서를 개발하고자 할 때 유

용한 가이드라인으로써 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 2013학년도 상명대학교 교내연구비를 지원받아 수행되었습니다.

References

Baltsavias, E., Zhang, L., and Eisenbeiss, H. (2005), DSM generation and interior orientation determination of IKONOS images using a test field in Switzerland, *ISPRS Hannover Workshop 2005 on High-Resolution Earth Imaging for Geospatial Information*, 17-20 May, Hannover, Germany, unpaginated CD-ROM.

Brown, D. (1971), Close range camera calibration, *Photogrammetric Engineering*, Vol. 37, No. 8, pp. 855-866.

Chen, T., Shibasaki, R., and Morita, K. (2001), High precision georeference for airborne three-line scanner (TLS) imagery. *3rd International Image Sensing Seminar on New Developments in Digital Photogrammetry*, Sept. 24-27, Gifu, Japan, pp. 71-82.

Fraser, C., Baltsavias, E. P., and Gruen, A. (2002), Processing of IKONOS imagery for sub-meter 3D positioning and building extraction, *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, Vol. 56, No. 3, pp. 177-194.

Gruen, A. and Zhang, L. (2003), Sensor modeling for aerial triangulation with three-line-scanner (TLS) imagery, *Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation (PFG)*, No. 2, pp. 85-98.

Habib, A., Shin, S., Kim, K., Kim, C., Bang, K., Kim, E., and Lee, D. (2007), Comprehensive analysis of sensor modeling alternatives for high resolution imaging satellites, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 73, No. 11, pp. 1241-1251.

Jacobsen, K. (2005), Geometry of satellite images—calibration and

- mathematical models, *ISPRS International Conference*, Korean Society of Remote Sensing, Jeju, Korea, pp. 182-185.
- Jacobsen, K., Büyüksalih, G., and Topan, H. (2005), Geometric models for the orientation of high resolution optical satellite sensors, *International Proceedings of ISPRS Annual Convention*, Vol. XXXVI 1/W3. Hannover, unpaginated CD-ROM.
- Kim, C. (2014), Analysis of the effects of three line scanner's focal length bias, *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, Vol. 32, No. 1, pp.1-8.
- Kim, E. and Kim, C. (2013), Geometric understanding of spaceborne optical sensors' biases and effects on the ground, *International Journal of Digital Content Technology and its Applications(JDCTA)*, Vol. 7, No. 11, pp. 25-32.
- Lee, C. and Bethel, J. (2004), Extraction, modelling, and use of linear features for restitution of airborne hyperspectral imagery, *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, Vol. 58, pp. 289-300.
- Lichti, D. D., Kim, C., and Jamtsho, S. (2010), An integrated bundle adjustment approach to range camera geometric self-calibration, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 65, No. 4, pp. 360-368.
- Lichti, D. D. and Kim, C. (2011), A comparison of three geometric self-calibration methods for range cameras, *Remote Sensing*, Vol. 3, No. 5, pp. 1014-1028.
- McGlone, C., Mikhail, E., and Bethel, J. (2004), *Manual of photogrammetry*, 5th Edition, ASPRS, pp. 215-216.
- Morgan, M., Kim, K., Jeong, S., and Habib, A.(2004), Epipolar geometry of linear array scanners moving with constant velocity and constant attitude, *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol.35, (Part B3), pp. 52–57.
- Murai, S. (2001), Development of helicopter-borne three line scanner with high performance of stabilizer and IMU, *3rd International Image Sensing Seminar on New Developments in Digital Photogrammetry*, Sept. 24-27, Gifu, Japan, pp. 1-3.
- Murai, S. and Matsumoto, Y. (2000), The development of airborne three line scanner with high accuracy INS and GPS for analyzing car velocity distribution. *IAPRS*, Vol.33, Part B2, Amsterdam, pp. 416-421.
- Rau, j., Habib, A., Kersting, A., Chiang, K., Bang, K., Tseng, Y., and Li, Y. (2011), Direct sensor orientation of a land-based mobile mapping system, *Sensors*, Vol. 11, No. 7, pp. 7243-7261.
- Tsai, R. (1986), An efficient and accurate camera calibration technique for 3D machine vision, *In: Proc. IEEE Computer Vision and Pattern Recognition Conference*, pp. 364–374.