

# 고해상도 입체 위성영상 처리를 위한 무기준점 기반 상호표정 Relative RPCs Bias-compensation for Satellite Stereo Images Processing

오재홍<sup>1)</sup> · 이창노<sup>2)</sup>

Oh, Jae Hong · Lee, Chang No

## Abstract

It is prerequisite to generate epipolar resampled images by reducing the y-parallax for accurate and efficient processing of satellite stereo images. Minimizing y-parallax requires the accurate sensor modeling that is carried out with ground control points. However, the approach is not feasible over inaccessible areas where control points cannot be easily acquired. For the case, a relative orientation can be utilized only with conjugate points, but its accuracy for satellite sensor should be studied because the sensor has different geometry compared to well-known frame type cameras. Therefore, we carried out the bias-compensation of RPCs (Rational Polynomial Coefficients) without any ground control points to study its precision and effects on the y-parallax in epipolar resampled images. The conjugate points were generated with stereo image matching with outlier removals. RPCs compensation was performed based on the affine and polynomial models. We analyzed the reprojection error of the compensated RPCs and the y-parallax in the resampled images. Experimental result showed one-pixel level of y-parallax for Komsat-3 stereo data.

Keywords : Satellite Image, RPCs, Stereo, Relative Orientation, Bias-compensation

## 초 록

고해상도 입체 위성영상을 보다 정확하고 효율적으로 처리하기 위해서는 종시차를 제거한 정밀한 에피폴라 영상을 생성하는 것이 필요하다. 종시차 제거를 위해서는 두 입체 영상간의 정밀한 센서모델링이 선행되어야 하는데, 이를 위해 일반적으로 지상 기준점을 이용한 번들 조정을 수행한다. 그러나 접근이 힘들거나, 참조 데이터를 확보하기 어려운 지역, 또는 절대적 위치 정확성이 크게 중요치 않은 경우에는 기준점을 활용하지 않고, 공액점(conjugate points)만을 활용한 상호표정을 수행하여야 한다. 항공, 지상 사진 등에 사용되는 프레임 카메라와는 달리, 위성 센서에 활용되는 푸쉬부름 센서의 경우 상호 표정의 정확성 등의 분석의 검증이 필요하므로, 본 연구에서는 고해상도 입체 영상 처리를 위해 가장 많이 활용하는 RPCs의 무기준점 편위 보정을 통하여 상호표정의 정밀성을 분석하고 입체 영상 생성 시 종시차 달성의 정확성을 분석하였다. 연구 과정에서 공액점은 영상간의 매칭을 통해 생성하였고, 공액점의 오차를 고려하여 과대오차 제거 기법을 적용하여 필터링하였다. RPCs 편위보정은 affine과 다항식 기반으로 진행되었으며, 보정 후 RPCs의 투영 오차를 검토하였다. 최종적으로 에피폴라 영상을 생성하여 종시차를 평가하였으며, 그 결과 아리랑 3호 영상의 경우 2차 다항식으로 1픽셀 수준의 종시차를 달성할 수 있음을 알 수 있었다.

핵심어 : 위성 영상, RPCs, 입체, 상호 표정, 편위 보정

Received 2018. 07. 13, Revised 2018. 08. 11, Accepted 2018. 08. 27

1) Member, Dept. of Civil Engineering, Korea Maritime and Ocean University (E-mail: jhoh@kmou.ac.kr)

2) Corresponding Author, Member, Dept. of Civil Engineering, Seoul National University of Science and Technology (E-mail: changno@seoultech.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

고해상도 위성영상은 입체로 취득될 경우 DSM (Digital Surface Model)의 생성 및 3차원 도화를 통한 지도 제작 등에 사용될 수 있다. 하지만 국내 아리랑 고해상도 입체 위성 영상은 해외 입체영상과는 달리 종시차가 존재하고 있다. 따라서 스테레오로 취득된 고해상도 위성영상의 3차원 처리 및 디스플레이를 위해서는 종시차를 제거한 정밀한 에피폴라(epipolar) 영상의 생성이 필수적이다(Song and Oh, 2014). 에피폴라 영상의 생성 기법은 사용하는 센서 모델링의 특징에 따라 달라질 수 있으나, 최근에는 RPCs 모델을 활용한 영상 전역에 대한 에피폴라 커브 도출 및 에피폴라 영상 생성 기법을 활용하고 있다(Oh *et al.*, 2010; Wang *et al.*, 2011). 이러한 기법은 제공된 RPCs 정보가 정확하다는 전제 조건 하에서 적용되는 기법이므로, 입체 위성영상 처리에 앞서 전처리 과정으로 지상기준점을 활용한 센서모델링을 먼저 수행하여 RPCs 정보를 보다 정밀하게 보정하게 된다.

지상기준점을 이용하여 RPCs (Rational Polynomial Coefficients)를 보정하고 정확도를 분석한 연구는 많이 수행되었다. 오래전부터 지상기준점을 이용하여 RPCs의 편위 보정을 통해 1픽셀 정도의 정확도를 확보할 수 있음이 알려졌다(Fraser and Hanley, 2005). 또한 기준점의 개수 및 분포에 따른 정확도 평가에 대한 연구도 수행되었으며, Fraser and Ravanbakhsh (2009)는 하나의 정확도 높은 기준점으로도 사용해서도 GeoEye-1 영상의 경우 서브픽셀의 정확성을 확보할 수 있음을 보였다. 하지만 이는 대상으로 하는 위성의 성능에 따라 달라질 수 있다. 대상지 방문 측량을 통한 기준점 확보가 어려운 경우, 참조 데이터를 이용하여 기준점을 추출할 수 있으며 이 때 기 구축 정사영상, LiDAR (Light Detection And Ranging), 수치지형도 등을 사용하기도 한다(Oh and Lee, 2015).

접근이 힘들거나, 참조 데이터를 확보하기 어려운 지역, 또는 절대적 위치 정확성이 크게 중요치 않은 경우에는 기준점을 활용하지 않고, 공액점만을 활용한 상호표정(relative orientation)을 수행하여야 한다. 상호표정이란 공액점과 입체 영상의 RPCs 정보를 이용하여 의사(quasi) 기준점을 생성하고, 공액점에서의 재투영 오차를 영상 전역에 대하여 분석하여 해당 오차를 최소화하기 위한 모델을 수립하여 표정을 수행하는 기법이다(de Franchis *et al.*, 2014; Ghuffar, 2016; Gong and Fritsch, 2017). 의사 기준점에 기반한 상호 표정의 기법에 관한 기존의 연구들은 RPCs 보정을 위한 하나의 모델(일반적으로 affine)을 적용하여 상호 표정을 수행하고 그 정

밀도를 분석하였다. 본 연구에서는 상호 표정 기법을 affine 모델과 2차 다항식에 대하여 각각 적용해보고 정밀도 달성의 차이를 분석해보았다. 또한 고해상도 입체 영상 처리에 활용 가능성을 적용 모델별로 살펴보기 위해 입체 영상 생성을 통해 종시차 달성의 정확성을 비교 분석해 보았다.

상호 표정의 실험을 위해 입체 영상간 매칭을 통해 생성한 공액점을 활용하였으며, 매칭의 오차가 있음을 전제로 과대 오차 탐지를 통해 필터링을 진행하였다. 이후 과대오차가 제거된 공액점을 바탕으로 상호 표정을 실행 및 RPCs를 보정하였다. RPCs 보정은 affine 및 다항식의 경우로 나누어 진행하였고, 보정후 RPCs를 활용한 매칭점의 재투영을 통해 투영오차 분석을 진행하였다. 최종적으로 에피폴라 영상을 생성한 후 종시차를 분석하기 위해 공액점들이 동일 라인에 위치하는 것을 확인하였다.

## 2. 입체 위성영상의 무기준점 기반 상호표정

본 연구는 Fig. 1과 같이 진행하였다. 입체로 취득된 두 영상과 RPCs, 그리고 두 영상간의 매칭을 통해 생성된 공액점을 이용하여 연구를 진행하였다. 첫 단계로 공액점과 입체 영상의 원 RPCs를 이용하여 지상 좌표를 계산한다. 이렇게 생성된 지상 좌표를 의사기준점이라 한다. 다음으로, 해당 의사 기준점을 다시 각각의 영상으로 투영하게 되면, 원래 매칭을 통해 추출된 공액점 좌표와 다른 값을 갖게 된다. 해당 좌표값의 차이를 영상 전역에 대하여 분석하여 모델링하고 이를 통해 과대 오차인 공액점은 제거해낸다. 최종 공액점을 활용하여 RPCs 편위 보정을 진행하고, 보정된 RPCs를 활용하여 에

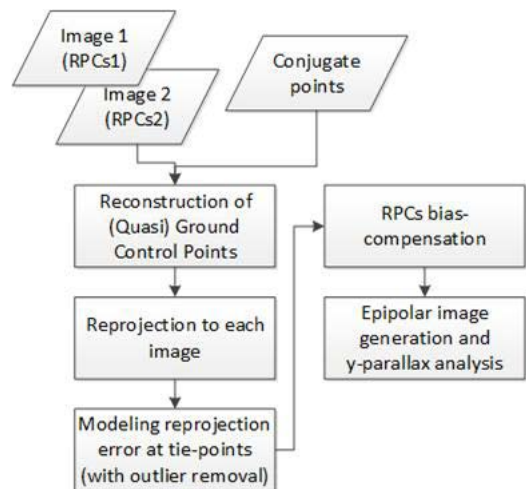


Fig. 1. Flowchart of the study

피폴라 영상을 제작하고 종시차를 분석한다.

## 2.1 의사 기준점 생성 및 재투영

입체 영상간의 매칭으로 좌(L)/우(R) 영상에 대한 공역점 행(line)/열(sample) 좌표  $(l_j^{(L)}, s_j^{(L)})$ ,  $(l_j^{(R)}, s_j^{(R)})$ 이 확보되면, Eq.(1)의 각 입체 영상의 RPCs식을 이용하여 매칭점 쌍에 대한 의사기준점  $\phi_j, \lambda_j, h_j$ 을 계산하게 된다. 의사기준점을 다시 각 영상으로 재투영하게 되면, 투영좌표점 좌표  $(l_j^{(L)'}, s_j^{(L)'})$ ,  $(l_j^{(R)'}, s_j^{(R)'})$ 가 계산된다. 따라서 해당 지점에 대한 오차는 Eq.(2)와 같이 계산될 수 있다. Fig. 2에서 이러한 과정을 보다 쉽게 이해할 수 있다.

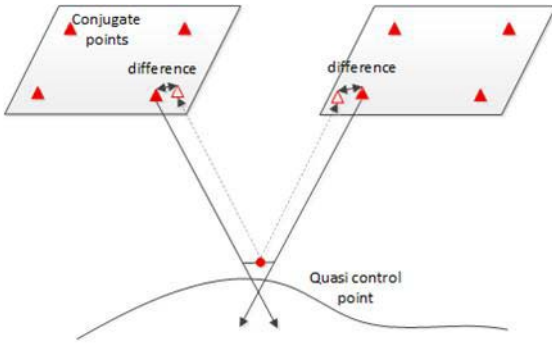


Fig. 2. Space intersection and reprojection of conjugate points

$$\begin{aligned} l &= PC_l(\phi, \lambda, h) = \frac{a^T u}{b^T u} L_S + L_0, \\ s &= RPC_s(\phi, \lambda, h) = \frac{c^T u}{d^T u} S_S + S_0 \end{aligned} \quad (1)$$

with

$$u = [1 \quad V \quad U \quad W \quad VU \quad VW \quad UW \quad V^2 \quad U^2 \quad W^2 \quad UVW \quad V^3 \quad VU^2 \quad VW^2 \quad V^2U \quad U^3 \quad UW^2 \quad V^2W \quad U^2W \quad W^3]^T$$

$$U = \frac{\phi - \phi_0}{\phi_S}, V = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_S}, W = \frac{h - h_0}{h_S}, Y = \frac{l - L_0}{L_S}, X = \frac{s - S_0}{S_S}$$

$$a = [a_1 \ a_2 \ \dots \ a_{20}]^T, b = [b_1 \ b_2 \ \dots \ b_{20}]^T, c = [c_1 \ c_2 \ \dots \ c_{20}]^T, d = [d_1 \ d_2 \ \dots \ d_{20}]^T$$

where  $X, Y$  normalized image coordinates,  $U, V, W$  normalized ground coordinates,  $\phi, \lambda, h$  latitude, longitude, ellipsoidal height,  $l, s$  image coordinates,  $\phi_0, \lambda_0, h_0, S_0, L_0$  offsets for latitude, longitude, ellipsoidal height, image sample, line), and  $\phi_S, \lambda_S, h_S, S_S, L_S$  scales.

$$\begin{aligned} \Delta l_j^{(L)} &= l_j^{(L)'} - l_j^{(L)}, \\ \Delta s_j^{(L)} &= s_j^{(L)'} - s_j^{(L)}, \\ \Delta l_j^{(R)} &= l_j^{(R)'} - l_j^{(R)}, \\ \Delta s_j^{(R)} &= s_j^{(R)'} - s_j^{(R)} \end{aligned} \quad (2)$$

where  $(l_j^{(L)}, s_j^{(L)}), (l_j^{(R)}, s_j^{(R)})$  are  $j$ -th conjugate point coordinates for the left and right image, respectively.  $(l_j^{(L)'}, s_j^{(L)'})$ ,  $(l_j^{(R)'}, s_j^{(R)'})$  are projected coordinates of the quasi ground points.

## 2.2 투영오차 모델링 및 RPCs 보정

투영오차를 영상 전역에 대하여 도출한 후, 투영오차를 모델링한다. 이 때, Eq.(3)의 affine식 또는 Eq.(4)의 2차 다항식을 사용할 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta l &= A_0 + A_1 l + A_2 s \\ \Delta s &= B_0 + B_1 l + B_2 s \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \Delta l &= A_0 + A_1 l + A_2 s + A_3 l s + A_4 l^2 + A_5 s^2 \\ \Delta s &= B_0 + B_1 l + B_2 s + B_3 l s + B_4 l^2 + B_5 s^2 \end{aligned} \quad (4)$$

where  $l, s$  are locations in the image (line and sample),  $A, B$  are coefficients of the models,  $\Delta l, \Delta s$  are the projection errors of quasi ground control points.

이 때, 의사기준점에는 매칭의 오류 등으로 인해 과대오차가 포함되어 있을 수 있으므로, 해당 모델식의 평균제곱근 오차(RMSE: Root Mean Square Error)보다 3배 이상인 매칭점은 과대오차로 간주하고 제거하였다(Lehmann, 2013).

RPCs 보정은 Eq.(1)에 투영오차 모델을 반영하여, Eq.(5)를 생성하고, 이 식의 계수인 새로운 RPCs를 새로 생성하게 된다(Tao and Yong, 2001).

$$\begin{aligned} l + \Delta l &= RPC'_l(\phi, \lambda, h) = \frac{a'^T u}{b'^T u} L_S + L_0, \\ s + \Delta s &= RPC'_s(\phi, \lambda, h) = \frac{c'^T u}{d'^T u} S_S + S_0 \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \text{with } a' &= [a'_1 \ a'_2 \ \dots \ a'_{20}]^T, b' = [b'_1 \ b'_2 \ \dots \ b'_{20}]^T, \\ c' &= [c'_1 \ c'_2 \ \dots \ c'_{20}]^T, d' = [d'_1 \ d'_2 \ \dots \ d'_{20}]^T \end{aligned}$$

## 2.3 에피폴라 영상 제작 및 종시차 평가

에피폴라 영상의 생성은 Oh *et al.* (2010)에서 제안한 piecewise기법을 사용하였다. 해당 기법은 보정된 RPCs를 기반으로 좌/우 영상 투영을 통해 에피폴라 선형을 생성해 낸

후, 이를 에피폴라 영상의 조건으로 재배열하는 방법이다. 우선, 에피폴라 포인트들을 y시차를 제거하기 위해 좌우영상의 에피폴라 선에 동일한 행 좌표값을 부여하고, 다음 과정으로 x시차와 지상고도와의 선형관계를 만들기 위해 각 에피폴라 점들 사이의 거리를 동일한 값으로 부여한다(Fig. 3).

이렇게 생성된 에피폴라 영상의 종시차 평가는 일반적으로 두가지 방법으로 시행한다. 첫째, 공액점의 에피폴라 영상 내 위치를 이용하여 좌표값으로 종시차를 비교하고, 둘째, 에피폴라 영상을 확대하여 종시차를 시각적으로 비교 분석한다.

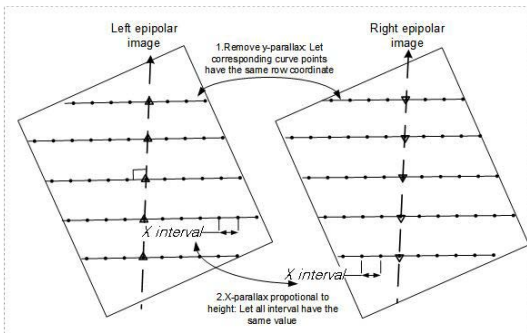


Fig. 3. Epipolar image resampling (Oh et al., 2010)

### 3. 실험 및 결과분석

#### 3.1 실험 데이터

실험은 몽골 울란바토르에 대해 동일 궤도로 취득된 아리랑 3호 스테레오 영상을 활용하여 진행되었다. 아리랑 3호 입체 영상의 스펙은 Table 1에 제시되었다. 특징점 추출, 상관계수 매칭, 최소제곱매칭으로 이루어진 입체 영상 매칭을 통해 121점의 공액점을 취득하였다. Fig. 4에서 아리랑 3호 영상 및 각 영상 내에 골고루 분포되어 있는 공액점 분포 현황 등을 확인할 수 있다. 영상 상단과 하단에 산악지형이 분포해 있고, 그 사이 평지에 건물이 분포해 있는 형태의 지형이다.

Table 1. Specification of tested Kompsat-3 stereo data

Product level	Level 1R	
Acquisition date	2016-06-17	
Image ID	208	322
Image size [pixels]	Sample 24060 Line 19368	Sample 24060 Line 19524
Incidence/Azimuth	23.95°/145.87°	23.28°/3.42°
GSD(col/row)	0.77/0.83m	0.77/0.82m

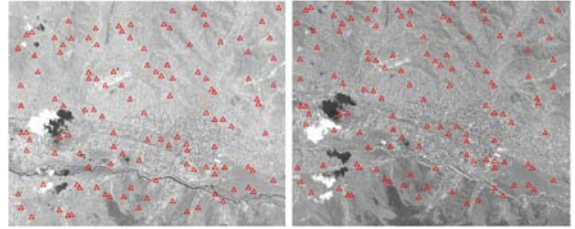


Fig. 4. Tested Kompsat-3 stereo data and conjugate point distribution

#### 3.2 투영 오차 분석 및 RPCs 보정

스테레오 매칭을 통해 취득된 121개의 공액점을 이용하여 RPCs 공간회피법을 통해 지상 의사기준점 좌표를 계산하였고, 이를 각 영상으로 재투영하여 원 공액점 영상 좌표값과의 차이를 계산하였다. Fig. 5와 Fig. 6은 121개의 공액점에 대한 투영후 좌표값 차이를 affine 및 2차 다항식으로 모델링하고 그 잔차(residual)를 그래프로서 나타내었다. 즉, 영상의 라인과 샘플방향을 따라 공액점의 샘플(sample)좌표값이 모델과 얼마나 차이를 보이는지 나타낸 것이다. 두 그림에서 동그라미로 표시한 1개의 점이 샘플좌표값에서 큰 차이를 보이는 것을 알 수 있다.

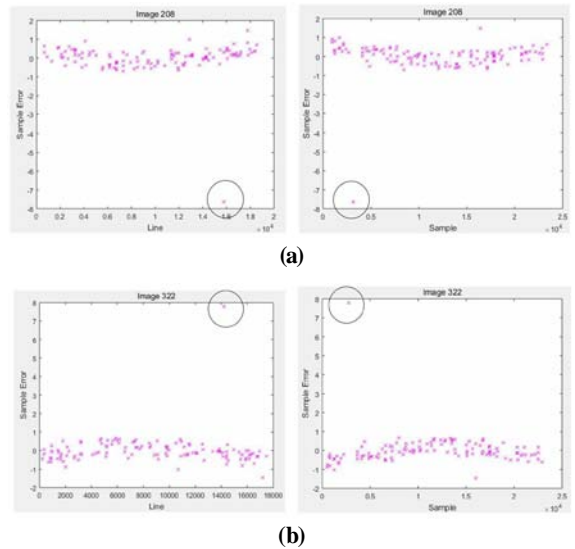
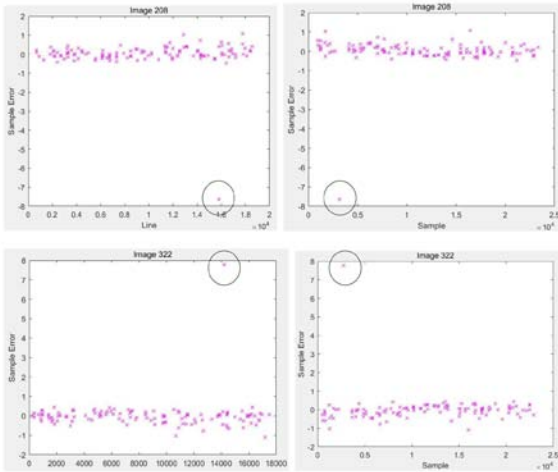


Fig. 5. Residuals at conjugate points along the line and sample direction [affine model] for (a) image 208, (b) image 322



**Fig. 6. Residuals at conjugate points along the line and sample direction [2nd polynomial model] for (a) image 208, (b) image 322**

다음으로 영상 전역에 대하여 각 좌표값의 차이를 affine식과 2차 다항식을 이용하여 모델링하였다. 모델링 후의 계산된 잔차의 평균제곱근오차 결과를 Table 2에 제시하였다. 두 영상 모두 라인(line)방향으로는 약 0.001픽셀로서 0에 가까운 값을 보이며 원 좌표값과의 차이가 없음을 알 수 있었으나, 샘플방향으로는 약 0.8픽셀로서 유의미한 차이값을 보였다. 이는 Fig. 5와 Fig. 6에서 샘플방향으로의 과대오차가 있음과 일치하는 결과이다. 따라서 과대오차 공액점을 탐지하고 제거하기 위해 평균제곱근오차 값의 3배를 기준으로 설정하여 좌표값 차이가 기준값을 넘는 점을 제거하였다(Lehmann, 2013). 그 결과 Fig. 5와 Fig. 6에서 보았던 과대오차 공액점을 제거할 수 있었다.

**Table 2. Error modeling residuals in at 121 conjugate points**

Image ID	RMSE in pixels [Line/Sample]	
	Affine	2nd polynomial
208	0.0013/0.7987	0.0011/0.7493
322	0.00099/0.8093	0.00093/0.7652

다음 과정으로 과대 오차를 제거 후의 120개의 공액점의 의사기준점 및 공액점 영상 좌표를 이용하여 RPCs 편위보정 수행 후 새로운 RPCs를 생성해 내었다. 제대로 RPCs가 생성되었는지 검사하기 위해 편위 보정 후의 RPCs를 이용하여 의 사기준점을 영상으로 투영한 후 영상 좌표를 계산하고, 원 공

액점의 영상좌표와의 차이를 계산하여 이를 affine과 2차 다항식으로 모델링하였다. 모델링 후 잔차의 평균제곱근오차와 최대값을 Table 3에 나타내었다. 최대 오차량을 살펴보았을 때, affine식의 경우 208영상에 대해 샘플방향으로 1.4픽셀 가량의 차이가 나는 반면, 2차 다항식의 경우 그 차이가 1픽셀 가까이 줄어들어 해당 실험 영상에 대해서는 2차 다항식을 활용하는 것이 affine식을 사용하는 것보다 정확성이 있는 것을 알 수 있었다. 그러나 여전히 샘플방향으로의 차이가 라인방향으로의 차이보다 약간 큰 값을 보임을 관찰할 수 있다.

**Table 3. RPCs resection**

Image ID		Residual in pixels [Line/Sample]	
		Affine	2nd polynomial
208	RMSE	0.1179/0.4024	0.1180/0.2622
	Max	0.2026/1.4737	0.2035/1.1815
322	RMSE	0.1281/0.3863	0.1281/0.2663
	Max	0.2307/1.1296	0.2311/0.9978

### 3.3 에피플라 종시차 분석

Affine 모델 또는 2차 다항식 모델을 통해 편위 보정한 RPCs를 이용하여 piecewise기법으로 에피플라 영상을 각각 생성하였다. 종시차를 분석하기 위해 120개의 공액점의 영상 좌표를 에피플라 변환식에 따라 에피플라 영상 좌표로 변환하였으며, 해당 지점에서 도출한 종시차를 결과를 Table 4에 나타내었다. Affine식을 통한 편위 보정의 경우 평균제곱근 오차가 0.74, 최소/최대 종시차가 -2.7~1.5픽셀로 나타났으며, 2차 다항식의 경우 평균제곱근 오차가 0.46, 최소/최대 종시차가 -2.2~0.9픽셀로 나타났다. 두 모델 모두 평균제곱근 오차를 기준으로 1픽셀 이내로 에피플라 영상 생성이 가능하여 만족스러운 결과를 보였으나, 2차 다항식의 경우가 보다 종시차를 줄이는데 효과적이었음을 알 수 있었다.

**Table 4. y-parallax at conjugate points**

y-parallax [pixels]	Affine	2nd polynomial
RMSE	0.74	0.46
Min/Max	-2.7/1.5	-2.2/0.9

시각적으로 종시차를 분석하기 위해 여색 입체시를 생성하였으며, Fig. 7에 그 결과를 나타내었다. 시각적으로 에피플라 영상의 품질을 분석하기 위해서는 Fig. 8과 같이 확대한 그림

을 통해 종시차를 확인하게 되며, 청록색과 빨간색과의 라인 이 얼마나 다른지를 확인하면 된다. Fig. 8에서 좌측 그림의 경우 affine 모델을 통한 편위를 보정한 RPCs를 활용한 경우이며, 우측 그림은 2차 다항식을 통해 편위를 보정한 RPCs를 활용한 경우의 결과이다. 건물 좌상단 모서리를 확인해보면 두 모델 모두 종시차에 큰 차이를 보이지 않아 시각적인 차이도 두드러지지 않지만, affine모델의 경우 강조 표시한 지역에서 붉은색이 기준선보다 올라와 보이는 것을 확인할 수 있다. 즉, 즉 2차 다항식의 경우보다 조금 큰 종시차 차이를 보임을 어렵게나마 시각적으로도 확인할 수 있었다. 즉, 별도의 지상기준점을 활용하지 않고 공역점 추출만을 통한 상호표정만을 통해서도 1픽셀이하의 종시차를 확보한 입체 영상 처리가 가능함을 알 수 있었다.

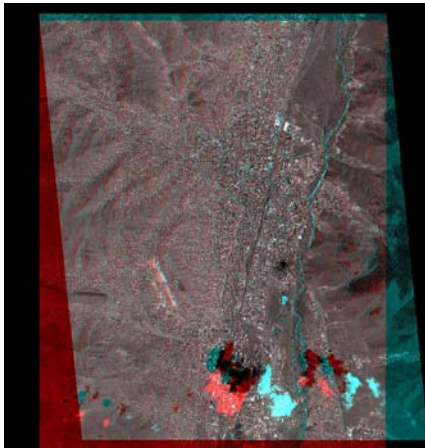


Fig. 7. Generated epipolar images in anaglyph(affine model)

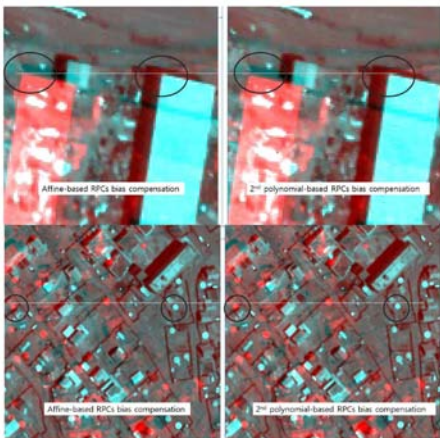


Fig. 8. An example of visual y-parallax analysis

#### 4. 결론

본 연구에서는 종시차가 존재하는 아리랑 3호 고해상도 입체 위성영상을 대상으로 상호 표정의 정확성을 분석하고 상호표정 기법을 통한 RPCs 편위보정을 통하여 에피폴라 영상 생성하고 종시차의 정도를 분석해보았다. 획득된 공역점의 의사기준점 재투영 오차를 분석하여 과대 오차를 보이는 공역점을 탐지할 수 있었고, 과대 오차 제거 후 의사기준점을 지상기준점으로 활용하는 상호 표정 방식의 적용을 통해 affine 및 2차 다항식으로 RPCs 편위를 보정할 수 있었다. 아리랑 3호 영상에 대해 실험을 진행한 결과 2차 다항식의 경우가 최대 1픽셀가량의 오차를 보이며, 1.4픽셀가량의 오차를 보인 affine의 경우 보다 약간 높은 RPCs 편위 보정 정밀도를 보였다. 실험에 활용한 아리랑 3호의 경우 샘플방향으로의 오차가 라인방향으로의 오차보다 약간 큰 값을 보임을 관찰할 수 있었다. 최종적으로 상호 표정으로 보정된 RPCs를 이용하여 제작한 에피폴라 영상의 종시차를 확인해본 결과 평균계급근 오차 1픽셀 이하의 에피폴라 영상을 제작할 수 있음을 확인할 수 있었고, 2차 다항식으로 편위보정을 수행한 경우가 affine모델의 경우보다 약간 정밀한 종시차를 확보할 수 있음을 알 수 있었다.

#### 감사의 글

본 연구는 국토교통부 위성정보 활용센터 설립 운영 사업(과제명: 국토위성정보 수집 및 활용기술개발)의 연구비지원(과제번호: 18SIUE-B148326-01)에 의해 수행되었습니다.

#### References

De Franchis, C., Meinhardt-Llopis, E., Michel, J., Morel, J.M., and Facciolo, G. (2014), An automatic and modular stereo pipeline for pushbroom images, *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 5-7 Sep 2014, Zurich, Switzerland, pp. 49-56.

Fraser, C.S. and Hanley, H.B. (2005), Bias-compensated RPCs for sensor orientation of high-resolution satellite imagery, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 71, No. 8, pp. 909-915.

Fraser, C.S. and Ravanbakhsh, M. (2009), Georeferencing accuracy of GeoEye-1 imagery, *Photogrammetric*

- Engineering & Remote Sensing*, Vol. 75, No. 6, pp. 634-638.
- Ghuffar, S. (2016), Satellite stereo based digital surface model generation using semi global matching in object and image space, *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 12-19 July 2016, Prague, Czech Republic, pp. 63-68.
- Gong, K. and Fritsch, D. (2017), Relative orientation and modified piecewise epipolar resampling for high resolution satellite images, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 6-9 June 2017, Hannover, Germany, pp. 579-586.
- Lehmann, R. (2013), 3sigma-rule for outlier detection from the viewpoint of geodetic adjustment, *Journal of Surveying Engineering*, Vol. 139, No. 4, pp. 157-165.
- Oh, J.H. and Lee, C.N. (2015), Automated bias-compensation of rational polynomial coefficients of high resolution satellite imagery based on topographic maps, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 100, pp. 14-22.
- Oh, J.H., Lee, W.H., Toth, C.K., Grejner-Brzezinska, D.A., and Lee, C.H. (2010), A piecewise approach to epipolar resampling of pushbroom satellite images based on RPC, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 76, No. 12, pp. 1353-1363.
- Song, J.H. and Oh, J.H. (2014), Epipolar resampling from Kompsat-2 and Kompsat-3, *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, Vol. 17, No. 4, pp. 156-166. (in Korean with English abstract)
- Tao, C. and Yong, H. (2001), A comprehensive study of the rational function model for photogrammetric processing, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 67, No. 12, pp. 1347-1357.
- Wang, M., Hu, F., and Li, J. (2011), Epipolar resampling of linear pushbroom satellite imagery by a new epipolarity model, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 66, No. 3, pp. 347-355.