

# 연직사진과 경사사진을 함께 이용한 UAV 사진측량의 정확도 평가 연구

## A Study on the Accuracy Evaluation of UAV Photogrammetry using Oblique and Vertical Images

조정민<sup>1)</sup> · 이종석<sup>2)</sup> · 이병길<sup>3)</sup>

Cho, Jungmin · Lee, Jongseok · Lee, Byoungkil

### Abstract

As data acquisition using unmanned aerial vehicles is widely used, as one of the ways to increase the accuracy of photogrammetry using unmanned aerial vehicles, a method of inputting both vertical and oblique images in bundle adjustment of aerial triangulation has been proposed. In this study, in order to find a suitable method for increasing the accuracy of photogrammetry, the accuracy of the case of adjusting the oblique images taken at different shooting angles and the case of adjusting the oblique images with different shooting angles at the same time with the vertical images were compared. As a result of the study, it was found that the error of the checkpoint decreases as the angle of the input oblique images increases. In particular, when the vertical images and oblique images are used together, the height error decreases significantly as the angle of the oblique images increases. The current 『Aerial Photogrammetry Work Regulation』 requires RMSE (Root Mean Square Error), which is the same as GSD (Ground Spatial Distance) of a vertical image. When using an oblique images with a shooting angle of 50°, a result close to this standard is obtained. If the vertical images and the 50° oblique images were adjusted at the same time, the work regulations could be satisfied. Using the results of this study, it is expected that photogrammetry using low-cost cameras mounted on unmanned aerial vehicles will become more active.

Keywords : UAV, Oblique Image, Vertical Image, Accuracy, Aerial Triangulation

### 초 록

무인항공기를 이용한 데이터 취득이 널리 활용되면서 무인항공기를 이용한 사진측량의 정확도를 높일 수 있는 방안의 하나로 항공삼각측량의 번들 조정에 연직사진과 경사사진을 같이 사용하는 방법이 제시되고 있다. 본 연구에서는 사진측량의 정확도를 높이는 데 적합한 방법을 찾기 위해 촬영 각도를 달리하여 촬영한 경사사진을 조정하는 경우와 촬영 각도가 다른 경사사진을 연직사진과 동시에 조정하는 경우의 정확도를 비교하였다. 연구결과 입력되는 경사사진의 경사가 커질수록 검사점의 오차가 줄어드는 것으로 나타났으며, 특히 연직사진과 경사사진을 같이 사용할 때, 경사사진의 경사가 클수록 높이 오차가 크게 줄어드는 것으로 나타났다. 현행 『항공사진측량 작업규정』에서는 연직사진의 GSD (Ground Spatial Distance)와 동일한 RMSE (Root Mean Square Error)를 요구하고 있다. 촬영각도 50°의 경사사진을 이용할 때 이 기준에 거의 근접한 결과를 얻을 수 있었고, 연직사진과 50°의 경사사진을 동시에 조정할 경우 작업규정을 만족시킬 수 있었다. 본 연구 결과를 활용하면 무인항공기에 탑재된 저가의 사진기를 이용하는 사진측량이 더욱 활발해 질 수 있을 것으로 기대된다.

핵심어 : 무인비행장치, 경사사진, 연직사진, 정확도, 항공삼각측량

Received 2021. 01. 27, Revised 2021. 02. 08, Accepted 2021. 02. 16

1) Member, Dept. of Civil Engineering, Undergraduate Student, Kyonggi University (E-mail: chominit@kyonggi.ac.kr)

2) Member, Dept. of Civil Engineering, Ph.D. Student, Kyonggi University (E-mail: jstrend@naver.com)

3) Corresponding Author, Member, Professor, Dept. of Civil Engineering, Kyonggi University (Email: basil@kgu.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. 연구의 배경 및 필요성

최근 국내외에서 경사사진을 이용한 측량이 활발히 진행되고 있다. 경사사진은 주로 3D 모델링, 넓은 지역의 맵핑에 사용된다. Seo *et al.* (2014)은 촬영각도 45도의 경사사진을 이용하여 정사영상을 생성하였으며, 중복도를 60%이상으로 촬영한 경우 고해상도 영역에서 접합되는 것을 알 수 있다고 하였다. Rupnik *et al.* (2015)은 연직사진에 비해 경사사진은 보편적으로 도심지의 3D 모델링에서 벽면의 모델링의 품질을 위해 실시한다고 하였으며, Rau *et al.* (2015)은 수목, 유리, 벽면, 지붕, 도로, 그 외 등을 경사사진을 이용하여 생성된 고밀도의 포인트 클라우드를 통해 분류하였으며, Moe *et al.* (2016)은 경사사진을 이용하여 3차원 지도를 제작하고, 토지개발에 적용하여 사용범위를 확대하였다.

이와 같이 경사사진은 장점을 갖고 있으나, 연직사진과는 매칭점을 식별하는 데 차이가 있어 이를 극복하기 위한 방안이 Wiedemann and Moré (2012)에 의해 제시되었다. 이와 유사하게 매칭점을 잘 확보하기 위한 연구가 진행되었으며 (Rupnik *et al.*, 2014; Hu *et al.*, 2016), Xie *et al.* (2016)은 경사사진을 표정하기 위한 번들 조정법에서 매칭점의 중량을 조정하는 방법을 제안하였으며, Gerke *et al.* (2016)은 경사사진이 연직사진에 비해 항공삼각측량에서 기하학적 구조가 더 좋다고 하였으며, 모델링시 높이에 대한 정확도가 증가한다고 하였다. 또한 중, 횡 중복도 80%로 촬영하는 것이 중, 횡 60%로 촬영하는 것 보다 우연오차가 2~3배가량 더 작다고 하였다. Nesbit and Hugenholz (2019)은 UAV를 이용하여 중복도와 정확도, 경사사진과 정확도에 대한 다수의 실험을 진행하였다. 그 결과 높은 중복도의 경사사진을 사용할 경우 연직사진에 비해 50%가량의 모델링 정확도가 증가한다고 하였다. 이와 같이 최근 매칭점의 추출 정확도가 좋아지면서 경사사진을 항공삼각측량에 활용하는 연구가 많이 이루어지고 있다.

최근 Han and Hong (2020)은 UAV를 이용하여 얻어진 사진의 연직사진만을 사용한 경우와 경사사진을 같이 사용하는 경우의 항공삼각측량 결과를 비교하고, 그 결과로 경사사진을 연직사진에 함께 사용한 경우 정확도가 개선된다고 하였다. 국토지리정보원에서는 2020년 12월에 『항공삼각측량 작업규정』 (제2020-5165호)의 개정을 통해 사진측량의 전 과정에서 디지털 항공사진에서 도달해야할 정확도를 제시하였으나 Han and Hong (2020)의 연구에서는 이와의 비교는 이루어지지 않았다.

본 연구에서는 Han and Hong (2020)의 연구에서 검토되지 않았던, 연직사진과 함께 사용되는 경사사진의 경사에 따

라 정확도가 어떻게 개선되는지를 파악하고, 이러한 개선이 『항공삼각측량 작업규정』의 디지털 사진에 요구되는 정확도를 만족시킬 수 있는지를 파악해 보고자 하였다.

## 2. 실험 개요

연구대상지역은 경기대학교 수원캠퍼스 공과대학 일원으로 면적은 약 13,000m<sup>2</sup>이다. 연구 대상 지역은 공역이므로 비행승인신청 및 항공사진촬영허가를 얻었다. 본 연구에서는 Network RTK를 이용한 UAV를 사용하였기 때문에, 네트워크 연결이 단절될 것에 대비하여 경기대학교 수원캠퍼스 집현관 옥상 (6층)으로부터 AGL (Above Ground Level) 50m에서 촬영하였다. 이는 지상을 기준으로 약 75m에 해당한다.

촬영에는 Phantom4 RTK 장비를 이용하였으며, 기지국은 국토지리정보원 RTCM-SWUN31을 사용하였다. 무인항공기 촬영당시 위성은 최소 30개 이상 수신되었다. 카메라는 DJI사의 내장카메라를 이용하여 촬영하였다. 촬영시간은 태양의 남중고도가 크게 차이가 나지 않는 오전 11시에서 오후 2시 사이에 기상이 맑은 경우만 촬영하였다. 카메라 노출은 자동으로 설정하였고, 조리개는 4.0~5.6, 노출시간은 1/320~1/400초 정도로 촬영되었다. 중복도는 중, 횡 모두 60%, 촬영각도는 90°, 80°, 70°, 60°, 50°를 사용하였다. 이 때 촬영각도는 기체의 비행방향 전방을 향하였으며, 이중격자로 촬영하였다. 촬영경로는 DJI사의 전용 컨트롤러 3D 구축 기능을 이용하여 자동으로 설정하였다. Fig. 1는 연구 대상지역의 처리 범위 및 비행 경로, 촬영각도 90°와 70°를 나타내었다.

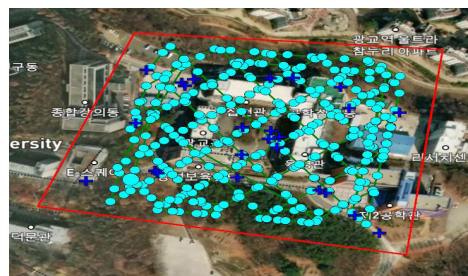


Fig. 1. UAV Flight Path and study area

이와 같이 촬영된 5회의 영상을 이용하여 촬영각도 별로 5회, 그리고 연직사진과 4개의 경사사진을 같이 사용하여 4회, 총 9회의 항공삼각측량을 시행하였다. Network-RTK를 이용하여 GCP(Ground Control Point) 5점과 CP (Check Point) 19점, 총 24점을 측량하였다. 측량결과는 평균 PDOP

(Positional Dilution of Precision) 2.2cm이고 RMSE (Root Mean Square Error)는 3.05cm로 공공측량 작업규정의 네트워크 측량에서 허용하는 규정인 수평 0.05m, 수직 0.1m 및 PDOP 3이하를 만족하였다. Fig. 2는 지상기준점(적색)과 검사점(청색)의 배치를 나타낸다.



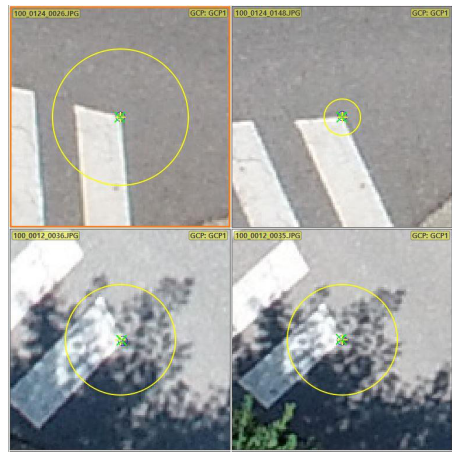
Fig. 2. Distribution of GCPs(red) and CPs(blue)

연직사진과 경사사진의 매칭 방법에 따라 평가 결과가 상이하게 발생하므로, 항공삼각측량과 정확도 평가를 위해서는 번들블록조정법을 실시 할 수 있는 Pix4Dmapper 프로그램을 사용하였다. 본 연구에서 GNSS측량으로 취득한 GCP의 정밀도를 Fig. 3의 (a)와 같이 입력하였고, Fig. 3의 (b)와 같이 GCP, CP로 사용되는 곳을 다양한 방향에서 촬영된 4매의 영상에서 선택하여 처리 후, 수동관측으로 인한 편차를 줄이기 위해 Pix4Dmapper의 오토마킹 기능을 이용하였다. 오토마킹 기능을 이용하기 위해서는 GCP 를 2매 이상의 상이한 영상에서 관측하여야 한다. 오토마킹을 시행하여 Fig. 3 (b)와 같이 마킹한 뒤, 1차 번들 조정을 거치고 Fig. 3 (a)의 오토마킹을 실시하면 Fig. 3 (c)와 같이 자동으로 중복 촬영된 영상에 마크를 추가한다. 마크된 이미지 수를 증가시킨 뒤, 번들 조정을 거쳐 정확도 평가를 실시하여 결과를 얻었다.

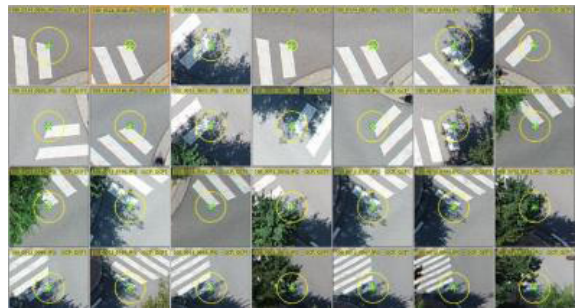
본 연구에서는 Fig. 3의 (b)와 같이 4매의 영상에서 GCP를 선택하고 오토마킹을 시행하여 Fig. 3의 (c)와 같은 결과를 얻었다. 연직사진과 경사사진을 같이 이용하는 경우에는 연직사진 2매와 경사사진 2매에서 각각 GCP를 선택하고 오토마킹을 시행하였다. 본 연구에서 타이포인트 등의 설정은 Pix4D의 기본값으로 하였다.

▼ 선택	
KY704 (3D GCP)	
리벨:	KY704
종류:	3D GCP
X [m]:	203355.671
Y [m]:	522481.951
Z [m]:	103.507
수평 정확성 [m]:	0.008
수직 정확성 [m]:	0.017
마크된 이미지 수:	29
S <sup>2</sup> [픽셀]:	0.2221
미분 오차 S(X,Y,Z) [m]:	0.002, 0.002, 0.005
최대 직각 선 거리 D(X,Y,Z) [m]:	0.002, -0.020, 0.001
GCP 초기 위치 오류 [m]:	-0.005, 0.001, -0.046
초기 위치 [m]:	203355.671, 522481.951, 103.507
계산된 위치 [m]:	203355.676, 522481.950, 103.953

(a) : GCP Horizontal and vertical precision data input



(b) : 4point marked



(c) : automarking after 4 point marked initial processing

Fig. 3. GCP selection in Pix4Dmapper

### 3. 실험 결과 및 해석

#### 3.1 단일 촬영각도 조정 정확도 평가

단일 촬영각도 별로 번들조정된 결과를 CP를 이용하여 정확도 평가하였다. CP를 이용하여 정확도를 평가한 결과는 수평에 대한 정확도를 H로, 표고에 대한 정확도를 Z로 표현하여 Table 1로 제시하였다. Fig. 4는 촬영각도에 따른 RMSE이다. 경사사진만을 처리할 경우의 오차가 연직사진의 RMSE 보다 줄어드는 것을 알 수 있으며 이는 경사사진의 기하학적 구조가 더 좋다는 선행연구의 결과를 뒷받침하고 있다(Lee *et al.*, 2018; Cho *et al.*, 2020).

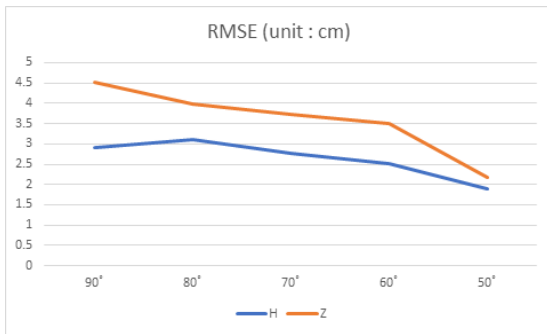


Fig. 4. RMSE according to the shooting angle

Table 2. Limits of adjustment and error

	GSD	RMSE(m)	Max(m)
Images taken with a digital aerial photogrammetric camera	≤ 8cm	0.08	0.16
	≤ 12cm	0.12	0.24
	≤ 25cm	0.25	0.50
	≤ 42cm	0.42	0.84
	≤ 65cm	0.65	1.30
	≤ 80cm	0.80	1.60

한편 『항공사진측량 작업규정』 제50조제2항에 따른 별표 18의 규정은 Table 2와 같다. Table 2에 의하면 모든 디지털 사진을 이용할 경우 조정계산 결과의 RMSE가 GSD에 상응하여야 한다. 이때의 GSD는 연직사진의 경우를 기준으로 하고 있으므로 디지털 사진을 이용할 경우 번들 조정의 오차 (RMSE)는 연직사진의 GSD 보다 작아야 한다. 본 연구의 경사사진을 처리한 결과, 촬영경사가 50°일 경우에 수평오차는 이 기준을 만족시켰으나 수직오차는 이 기준을 만족시키지 못하는 것으로 나타났다. 또한 항공사진측량 작업규정의 높이에 대한 최대오차는 GSD의 2배로 되어 있어 Table 1의 수직에 대한 최대 오차 역시 이 기준을 만족시키지 못하고 있는 것으로 나타났다.

#### 3.2 연직사진과 경사사진 동시 조정 정확도 평가

항공삼각측량에서 GCP를 관측하는 작업자에 따른 성과의 차이가 발생할 수 있으므로, 본 연구에서 GCP 관측은 Pix4Dmapper의 내보내기 기능을 사용하였다(Fig. 5). 동일한 영상에 대해 내보내기로 보내진 GCP, CP를 Fig. 5 와 같이 읽어 들임으로서 작업간의 편차를 방지하였다.

연직사진과 경사사진을 같이 사용하여 동시에 번들 조정된 결과 CP에 대한 정확도는 수평에 대한 정확도를 H로 표고에 대한 정확도를 Z로 표현하여 Table 3으로 나타내었다. Fig. 6는 연직사진과 동시에 조정된 경사사진의 촬영각도에 따른 RMSE이다. 실험 결과, 연직사진과 경사사진을 동시에 조정된 경우 RMSE가 단일 각도의 사진을 조정할 경우와 유사하게 작아지고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과는 Han and Hong(2020)의 연구결과와 동일하다.

Table 3에서 촬영각도 50°로 촬영된 경사사진을 연직사진과 같이 사용하여 동시 조정된 경우의 RMSE는 수직과 수평 모두 2.06cm인 연직사진의 GSD를 만족시키는 결과를 얻을 수 있었다. 그러나 최대오차의 경우에 수평오차가 작업규정의 범위를 벗어나고 있음을 알 수 있다.

Table 1. Results of horizontal and vertical Max error and 2D RMSE, vertical RMSE with single shooting condition

Observation	GSD at principal point (cm)	Max Error(cm)		RMSE Error(cm)				Number of Images
		H	Z	X	Y	H	Z	
50m 60% 90°	2.06	5.46	9.47	2.14	1.97	<b>2.91</b>	<b>4.52</b>	149
50m 60% 80°	2.09	6.84	8.62	2.49	1.85	<b>3.10</b>	<b>3.99</b>	163
50m 60% 70°	2.19	5.07	7.68	2.20	1.70	<b>2.78</b>	<b>3.74</b>	187
50m 60% 60°	2.38	4.27	8.97	1.69	1.87	<b>2.52</b>	<b>3.50</b>	200
50m 60% 50°	2.69	2.92	4.16	1.12	1.52	<b>1.89</b>	<b>2.18</b>	211

Table 3. Results of bundle adjustment with combined shooting conditions

Observation	GSD at principal point (cm)	Max Error(cm)		RMSE Error(cm)				Number of Images
		H	Z	X	Y	H	Z	
50m 60% 90°+80°	2.08	6.12	6.04	2.20	1.81	<b>2.85</b>	<b>3.46</b>	312
50m 60% 90°+70°	2.14	5.37	5.95	2.01	1.74	<b>2.66</b>	<b>3.11</b>	336
50m 60% 90°+60°	2.29	4.60	4.95	1.83	1.76	<b>2.54</b>	<b>2.59</b>	349
50m 60% 90°+50°	2.54	4.69	3.88	1.57	1.10	<b>1.92</b>	<b>2.04</b>	360

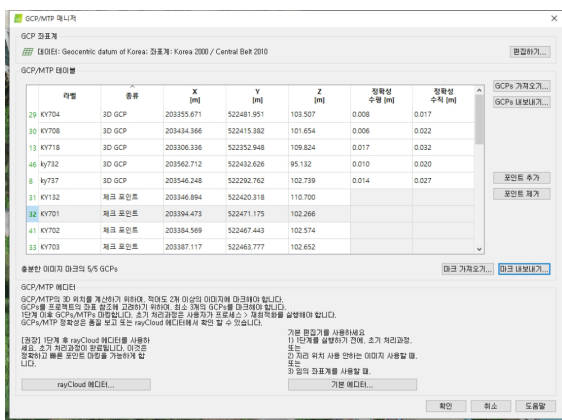


Fig. 5. Marked export and import

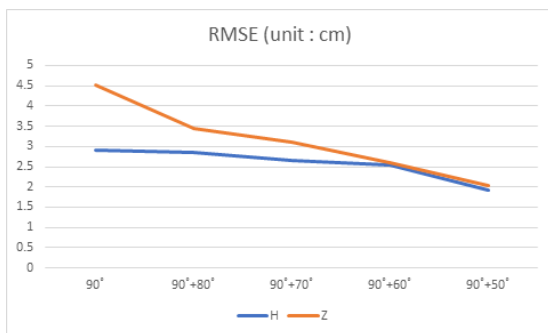


Fig. 6. RMSE according to the combined shooting angle

Fig. 4와 Fig. 6을 비교해 보면 연직사진과 경사사진을 같이 사용할 때의 Z 오차가 더욱 빠르게 줄어들고 있다. 이는 선행 연구(Han and Hong, 2020)에서도 지적된 바와 같이 에피폴라 기하가 더욱 잘 형성되기 때문인 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 단일 촬영각도로 획득된 영상을 조정하는 경우와 연직사진과 경사사진을 동시에 조정하는 경우의 정확도를 분석하여 최적의 작업조건을 제시하고자 하였다. 또한 최근 활용이 늘어나고 있는 무인항공기를 이용하여 개정된 정확도의 『항공사진측량 작업규정』의 정확도 수준을 만족시킬 수 있는지를 검증하고자 하였다.

본 연구에서는 단일 촬영각도에 대한 5회의 번들 조정과 연직사진과 경사사진을 동시에 조정한 4회의 번들 조정을 하여 그 결과를 분석하였다. 분석결과 다음의 결론을 도출하였다.

첫째, 촬영각도가 고경사로 촬영되었을 경우 저경사로 촬영된 경우보다 높이에 대한 정확도가 크게 개선되는 것을 확인하였다.

둘째, 정확도 향상을 위해 연직사진과 경사사진을 함께 사용하는 경우 경사사진은 촬영각도 50°를 연직사진과 함께 사용하는 조건에서 가장 좋은 정확도를 얻음을 확인하였다.

셋째, RMSE를 기준으로 할 때, 촬영경사 50°의 경사사진을 연직사진과 같이 조정하면 『항공사진측량 작업규정』의 정확도를 만족시킬 수 있으나, 최대오차를 기준으로 할 때는 만족시키지 못하였다.

한편 항공사진측량에서는 일반적으로 중복도를 높이면 GCP와 접합점의 잉여관측 증가로 조정의 정확도가 좋아지게 되는데, 본 연구에서는 60%의 중복도를 가진 연직사진과 경사사진을 사용하였다. 따라서 경사사진과 연직사진을 같이 조정하는 경우에 중복도를 높이면 어떤 정확도 개선 효과를 얻을 수 있는 지에 대한 연구가 필요할 것으로 생각된다.

## Reference

- Cho, J.M., Lee, J.S., and Lee, B.K. (2020), A Study on the Optimal Shooting Conditions of Drone Imagery for 3D Production and Orthophoto Generation, *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, Vol. 38, No. 15, pp. 645-653. (in Korean with English abstract)
- Gerke, M., Nex, F., Remondino, F., Jacobsen, K., Kremer, J., Karel, W., Hu, H., and Ostrowski, W. (2016), Orientation of Oblique Airborne Image Sets - Experiences from the ISPRS/EUROSDR Benchmark on Multi-Platform Photogrammetry, *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLI(B1), pp. 185–191.
- Han, S.H. and Hong, C.K. (2020), Accuracy Assessment of Aerial Triangulation of Network RTK UAV, *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, vol.38, no.6, pp. 663-670. (in Korean with English abstract)
- Hu, H., Ding, Y., Zhu, Q., Wu, B., Xie, L., and Chen, M. (2016), Stable least-squares matching for oblique images using bound constrained optimization and a robust loss function, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 118, pp. 53–67.
- Lee, K.R., Han, Y.K., and Lee, W.H. (2018), Comparison of orthophotos and 3D models generated by UAV based oblique images taken in various angles, *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, Vol. 36, No. 3, pp. 117-126. (in Korean with English abstract)
- Moe, K., Toschi, I., Poli, D., Lago, F., Schreiner, C., Legat, K., and Remondino, F. (2016). Changing the Production Pipeline – Use of Oblique Aerial Cameras for Mapping Purposes, *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLI(B4), pp. 631–637.
- Nesbit, Paul R. and Hugenholtz, Christopher H. (2019), Enhancing UAV–SfM 3D Model Accuracy in High-Relief Landscapes by Incorporating Oblique Images, *Remote Sensing*, Vol. 11, no. 3, 239.
- Rau, J., Jhan, J., and Hsu, Y. (2015), Analysis of Oblique Aerial Images for Land Cover and Point Cloud Classification in an Urban Environment, *IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING*, Vol. 53, No. 3, pp. 1304–1319.
- Rupnik, E., Nex, F., and Remondino, F. (2014), Oblique multicamera systems orientation and dense matching issues, *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-3/W1(February), pp. 107–114.
- Rupnik, E., Nex, F., Toschi, I., and Remondino, F. (2015), Aerial multi-camera systems: Accuracy and block triangulation issues, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 101 No. 60, pp. 233–246.
- Seo, S.I., Park, B.W., Lee, B.K., and Kim, J.I. (2014), Generation of Mosaic Image using Aerial Oblique Images, *Journal of Korean Society for Geospatial Information Science*, vol.22, no.3, pp. 145-154 (in Korean with English abstract)
- Wiedemann, A. and Moré, J. (2012), Orientation Strategies for Aerial Oblique Images, *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXIX-B1(September), pp. 185–189.
- Xie, L., Hu, H., Wang, J., Zhu, Q., and Chen, M. (2016), An asymmetric re-weighting method for the precision combined bundle adjustment of aerial oblique images, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 117, pp. 92–107.