

항공기 탑재용 카메라 위치출력오차 측정방안 연구

A Study of Test Method for Position Reporting Accuracy of Airborne Camera

송대범* 윤용은*
Dae-Buem Song Yong-Eun Yoon

ABSTRACT

PRA(Position Reporting Accuracy) for EO/IR(Electro-Optic/Infrared) airborne camera is an important factor in geo-pointing accuracy. Generally, rate table is used to measure PRA of gimbal actuated camera like EO/IR. However, it is not always possible to fix an EUT(Equipment for Under Test) to rate table due to capacity limit of the table on the size and weight of the object(EUT). Our EO/IR is too big and heavy to emplace on it. Therefore, we propose a new verification method of PRA for airborne camera and assess the validity of our proposition. In this method we use collimator, angle measuring instrument, 6 dof motion simulator, optical surface plate, leveling laser, inclinometer and poster(for alignment).

Keywords : EO/IR(Electro-Optic/Infrared), Position Reporting Accuracy(위치출력오차), Airborne Camera(항공기 탑재용 카메라)

1. 서론

항공기 탑재용 카메라의 핵심목표는 원거리 고해상도 영상정보를 획득, 실시간 전송 및 근실시간 영상 데이터 처리이다. 주요한 핵심기술은 광학계 설계, 고정밀 안정화 기술 및 실시간 고속 대용량 영상데이터 처리기술 등이 있다. 항공기 탑재용 카메라의 최종성능은 비행환경에서 원하는 지점을 정확하고 선명하게 촬영하는 것인데, 위치출력오차는 지향정확도(Geo-Pointing)

에 중요한 영향을 미친다^{1~4)}.

위치출력오차는 영상센서의 시선이 지향하는 실제위치(각도)와 장비에서 출력해내는 위치(각도)와의 차이값으로 정의된다.

일반적으로 위치출력오차는 Rate Table을 이용하여 정밀하게 측정하게 된다^{5,6)}. 그러나, 상용 Rate Table의 경우 Payload 중량이 최대 90kg 정도로 제한되어 있다. 정확도는 0.01° 이하 수준이다. 본 논문의 탑재용 카메라와 치구의 중량은 수백kg 수준으로 상용 Rate Table을 사용할 수가 없는 상황이다. 또한, 항공용 카메라와 장착 치구를 Rate Table에 장착하기 위한 공간도 충분하지 않은 상황이고, Rate Table을 주문제작할 경우 정밀도 0.01°의 1/10수준인 0.1°에 그친다. 이에 6자유도

† 2013년 6월 14일 접수~2013년 9월 13일 게재승인

* 국방과학연구소(ADD)

책임저자 : 송대범(song@add.re.kr)

모사기와 측각기, 광학시준기, 경사계를 이용하여 항공기 탑재용 카메라의 위치출력오차 측정방법을 개발하였다.

본 논문에서 제안한 항공용 카메라 위치출력오차 측정방법은 중량이나 사이즈 문제로 상용 Rate table에 장착이 불가능한 장비와 Rate table의 정확도가 떨어질 경우 응용 가능하다고 판단된다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 위치출력오차의 전체적인 개념 설명과 일반적인 측정방법을 설명하고, 3장에서 새롭게 제안한 측정방법을 제시한다. 4장에서 위치출력오차 측정 시험결과에 대해서 정리하고 결론을 제시한다.

2. 위치출력오차 개념 및 측정방법

가. 위치출력오차 개념

위치출력오차는 각위치 검출센서를 김벌에 장착시에 생겨나는 기계적 장착오차와 각위치 검출센서 자체가 구동각을 감지하는 과정에서 파생되는 오차요소들로 구성되어 있다^[7]. 검출센서 자체의 각도감지오차(Angle Sensing Error)는 데이터시트 상에 나타난 오차로서, 대표적으로 각도 불균형(Amplitude Imbalance), 불완전 구상(Imperfect Quadrature), 유도조화(Inductive Harmonics), 기준 상변이(Reference Phase Shift), 자극신호 왜곡(Excitation Signal Distortion), 신호처리 오차로 구성되어 있다. Fig. 1은 장착오차에 따른 위치출력오차이다.

김벌에 설치되는 각위치 검출센서(Resolver)는 일반적으로 원형이며, 구동축 안쪽과 바깥쪽에 각각 부착되어 구동될 때에 발생하는 내부축과 외부축 사이의 각도 차이를 검출해 낸다. 또한, 축에 설치될 때에 가공정밀도 등에 따라 자연스럽게 발생하는 기계적인 장착오차를 갖는데, 이들 오차는 Fig. 1에서 나타난 바와 같은 두 개의 파라미터(a, b)로 표현된다. 두 개 이상의 각위치 검출센서가 장착되었을 경우에도 기하학적으로 이와 같은 장착형상으로 설명될 수 있다. 이때 'a'는 이상적 장착면과 실제 장착면 사이의 교선이 이상적 장착면 좌표계의 회전축(x축)에 대해 틀어져 있는 각도이며, 'b'는 이상적 장착면과 실제 장착면이 이루는 각도이다. 각위치 검출센서가 이상적으로 장착되었을 때에는 Fig. 1에 나타난 실선 원과 같은 형상이지만 기계적인 장착오차를 가질 때는 Fig. 1의 점선 원과 같이 장착이 된다. 바로 이 이상적 장착면상을

움직이는 시선각과 실제 장착면상을 움직이는 시선각과의 차이가 위치출력오차가 되는데, 위치출력오차는 구동각(구동축은 Fig. 1의 x축)에 따라 값이 변한다.

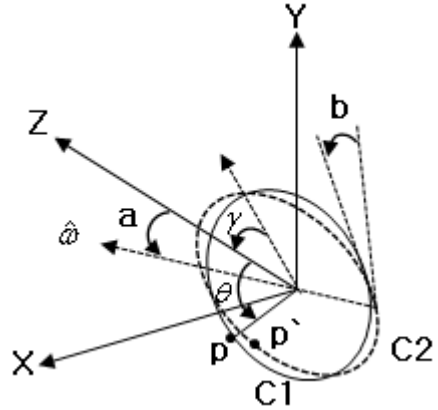


Fig. 1. Position reporting accuracy due to mounting error

X축 : 김벌의 구동각

Z축 : 구동각이 0° 일 때 기준시선(LOS)방향

$\hat{\omega}$: 각위치 검출센서 회전평면과 김벌의 구동원간의 교선방향 단위벡터

C1 : 김벌의 이상적 구동원

C2 : 각위치 검출센서의 회전원

p : 김벌 구동원상에서 구동각 θ 인 점

p' : 점 p가 각위치 검출센서 장착오차에 의해 이동한 검출센서 회전원상의 점

PRA(θ) : 위치출력오차

ASE(θ) : 각위치 검출센서 자체의 각도감지오차

$$PRA(\theta) = \sin^{-1}(\cos a(1 - \cos b) \times \sin(2\theta - a + \gamma) - \sin \gamma) + ASE(\theta) \quad (1)$$

수식 (1) 위치출력오차는 각위치 검출센서 장착오차와 검출센서 자체의 각도감지오차의 합이 된다. 위치출력오차는 일반적으로 sine 형태의 곡선이 된다. 구동각에 따른 위치출력오차를 부분적 구간에 대해 측정 한 후 위치출력오차 모델을 적용하여 전구간에 대한 위치출력오차를 추정할 수 있다.

위치출력오차를 수식 (2)와 같이 단순화하여 최소자승법에 의한 실측 데이터에 맞는 A, B 및 C값을 추정할 수 있다.

$$PRA(\theta) \approx A \sin(2\theta + B) + C \quad (2)$$

본 논문의 카메라는 3축 구동으로 구성되어 있는데, 내부에 2축 김벌(Roll, Pitch축)과 외부에 Shroud 구동축으로 구성되어 있다. Fig. 2와 같이 촬영하고자 하는 위치에 수직방향에 항공기가 도달하게 되면 Shroud 축을 roll 방향으로 구동한 다음, 내부 2축 김벌(roll, pitch축)을 이용하여 촬영을 수행하게 된다.

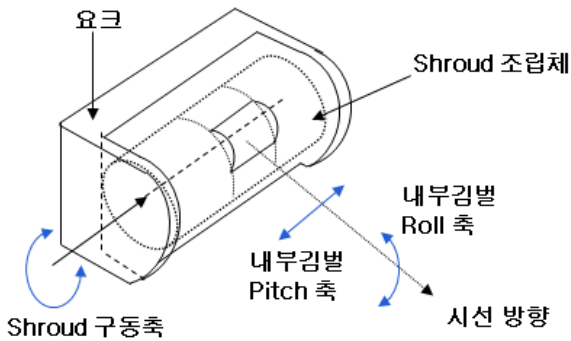


Fig. 2. 3-axis Airborne Camera

영상센서가 내부김벌에 장착되어 있는데, 이를 ‘탑재 카메라 조립체’라고 하며, ‘탑재카메라 조립체’는 ‘Shroud 조립체’에 각 김벌기(Resolver)를 사이에 두고 장착되어 있다. Shroud 조립체는 요크와 각위치 검출 센서를 사이에 두고 조립하는데 이를 ‘항공기 탑재용 카메라 조립체’라고 한다. 위치출력오차와의 관계는 Fig. 3과 같으며 위치출력오차는 바로 두 개의 리졸버의 기계적 장착오차로부터 발생한다.

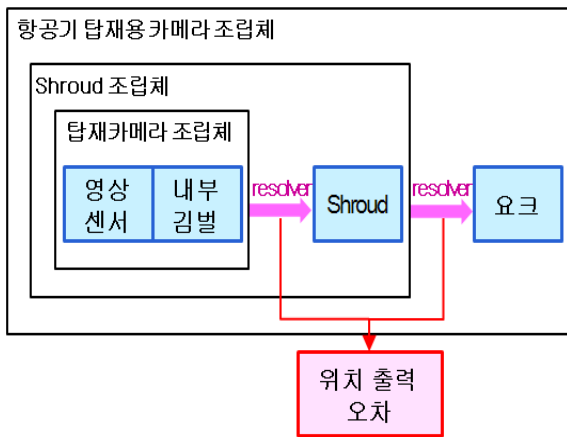


Fig. 3. Concept of position reporting accuracy

나. 위치출력오차 측정방법

일반적인 위치출력오차 측정방법을 알아보기 위해서 지금까지 가장 많이 개발된 전자광학장비인 EOTS (Electro-optical Tracking System)의 예를 들고자 한다. EOTS는 볼 모양의 형태가 많으며, 최근까지 내부 2축, 외부 2축으로 구성된 4축 김벌을 가지고 있는 장비가 다수를 차지한다.

EOTS의 위치출력오차를 측정하기 위한 시험 구성은 Fig. 4와 같으며, 측정방법은 다음과 같다.

- ① EUT(Equipment Under Test)를 Rate Table(회전구동 장비)에 설치한다.
- ② 광학시준기의 정렬용 레이저를 이용하여 센서정렬을 수행한다.
- ③ 방위각 방향으로 약 10 ~ 15° 회전시킨다.
- ④ 광학시준기 표적이 화면 중심에 오도록 EUT 방위각을 미세 조정하고 그때의 방위각을 측정한다.
- ⑤ rate table의 현재 회전각과 측정된 EUT 방위각 사이의 차이값을 기록한다.
- ⑥ EUT 방위각방향 전 구동범위에 대해 ③ ~ ⑤과정을 반복하여 얻은 오차값들의 실효치를 계산한다.
- ⑦ 고각 방향으로 동일한 방법(rate table 회전각도는 상황에 따라서 변동)으로 측정한다.

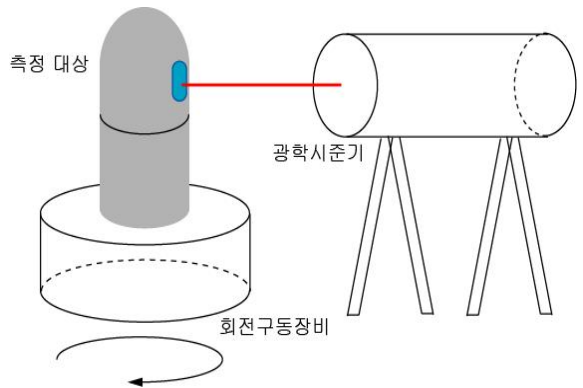


Fig. 4. General Test Method for position reporting accuracy

3. 새로운 측정방법

가. 시험장비 구성

시험장비의 구성은 Fig. 5와 같다.

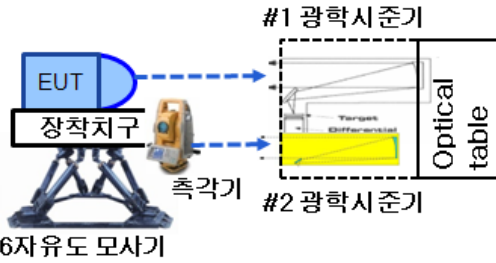


Fig. 5. Test configuration of position reporting accuracy

먼저 6자유도 모사기위에 EUT용 장착치구를 설치한다. 장착치구 위에 EUT와 측각기를 각각 설치한다. Optical table위에 포스터는 정렬용 레이저광원이 지나는 자리에 위치되는데 각각 광학시준기 바로 앞 Optical table 끝단에 위치시킨다. 정렬용 레이저 표적을 이용하여 #1 광학시준기와 EUT를 정렬한 다음, 측각기와 #2 광학시준기도 각각 정렬시킨다.

시험에 사용되는 장비는 6자유도 모사기를 비롯하여 Table 1에 정리하였다.

Table 1. Annotation to Fig. 5

장비	목적 및 특징
6자유도 모사기	roll, pitch, yaw방향 회전운동 뿐만 아니라, surge, sway heave방향 병진운동까지 모사할 수 있는 장비
측각기	방위각, 고각 방향으로 각도를 측정하는 장비이며, 본 논문에서 사용한 측각기는 TOPSON 사의 GPT-7500 모델이며, 측각정확도는 2" 수준
광학 시준기 #1	광학시준기는 평행광을 형성하기 위한 광학장치 이다. #1은 EUT 촬영용 시준기
광학 시준기 #2	#2는 측각기 관측용이며, 상대적으로 사이즈가 작은 1m 내외의 시준기 이용
경사계	기준면에 대한 경사를 측정하는 계기
정렬용 레이저	광학시준기와 함께 사용하여 시선정렬에 이용
정렬용 표적	십자망선을 이용하여 좌우 움직임 파악이 용이한 광학시준기용 표적
포스터	광학정반에 탈부착 가능한 정렬용 치구로 본 논문에서는 2개가 사용됨

나. 제안된 시험방안 개념

기본적인 원리는 6자유도 모사기가 rate table의 회전축 역할을 하고, 그 값을 계측하는 것은 측각기가 수행하는 것이다. 이는 6자유도 모사기의 구동정확도가 높지 않으므로 구동량을 측각기로 측정하는 방법이다. Fig. 6과 같이 6자유도 모사기가 roll축(표적을 바라보는 방향에서 상하방향)으로 회전 할 때 EUT와 측각기의 시선은 동일하게 움직이게 되는 원리를 이용하였다.

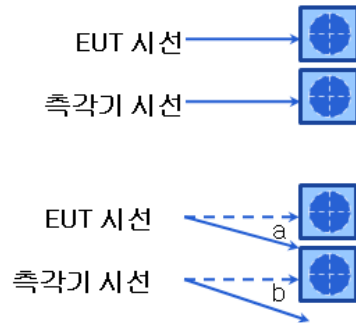


Fig. 6. Concept of test method

위치출력오차를 측정하기 이전에 EUT와 광학시준기의 정렬용 레이저와 정렬이 필요하다. 정렬절차는 다음과 같다.

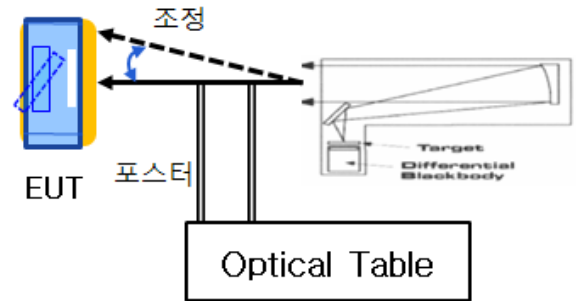


Fig. 7. Alignment between EUT and Laser

- ① 광학 시준기 정렬용 레이저와 광학정반 사이를 정렬한다. 정렬방법은 Fig. 7과 같이 정렬용 레이저가 두 개의 포스터(막대)의 끝을 지나도록 레이저 광원의 LOS를 미세 조정한다. 이때의 가정은 ‘광학정반이 평면이고, 두 개의 포스터의 길이가 동일하며, 막대는 광학정반 상에 완전히 수직으로 장착되어 있다’ 이다.

- ② 광학 시준기의 정렬용 표적이 항공기 탑재용 카메라 부경 중심에 오도록 6자유도 모사기를 평행 이동(surge, sway, heave 이용)하여 조정한다.
- ③ 항공기 탑재용 카메라와 광학 정반 사이를 정렬한다. 정렬방법은 레이저 진행방향으로 경사계를 광학정반과 6자유도 모사기 위에 설치하고, 두 값이 같아질 때 까지 6자유도 모사기를 회전(roll, pitch, yaw) 조정한다.
- ④ 광학시준기 시선과 EUT간 정렬을 수행한다. 광학시준기에 정렬용 표적을 설치하고 EUT를 (0°, 0°)으로 구동 후 EUT로 정렬용 표적을 촬영하여 화면 중심에서 떨어진 양만큼을 확인한다. 이때 Roll, Pitch 방향으로 각각 측정해야 한다.

다. 측정방법

Roll 방향으로 90° 시선 장착치구 및 직하방(0°) 시선 장착치구를 이용할 경우 물리적인 가림으로 인하여 각각 -8° ~ 8°, 73° ~ 85° 부근만 측정이 가능하다. 물론 45° 치구를 제작할 경우 37° ~ 53° 구간도 측정이 가능하지만, 90°와 직하방 치구만 제작하여 roll 축 위치출력오차를 계산해 낼 수 있다(4장 시험결과 참조).

Roll 방향 -8° ~ 8° 부근의 위치출력오차를 측정하기 위한 과정은 다음과 같다.

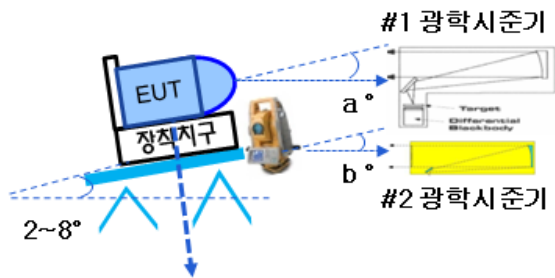


Fig. 8. 90° mounting fixture

- ① EUT를 90° 시선 장착치구를 이용하여 6자유도 모사기에 위치시킨다(Fig. 8 참조).
- ② 정렬용 레이저, 포스터 2조, 경사계, 광학시준기를 이용하여 센서정렬을 수행한다(3장. 나. 참조).
- ③ #1 광학시준기에 EUT용 정렬표적(픽셀값을 읽어낼 수 있는 특징점을 보유한 표적)을 설치한다.
- ④ #2 광학시준기에 측각기용 기준표적(픽셀값을 읽어낼 수 있는 특징점을 보유한 표적)을 설치한다.

- ⑤ 측각기 고각을 0°로 맞추고 측각기 영상중심에 위치하는 #2 광학시준기 표적의 특징점을 기록한다.
- ⑥ 6자유도 모사기를 EUT 기준으로 Roll 방향으로 -2°(반시계 방향) 기울인다.
- ⑦ 측각기를 고각으로 EUT 기준으로 Roll 방향으로 약 +2°(시계방향) 부근으로 기울인다. 기준표적의 특징점을 중심으로 측각기의 고각(b°)을 계측한다.
- ⑧ 측각기에서 계측한 고각(b°)만큼 EUT를 + Roll 방향 구동한다. EUT의 현재 시선중심(고각 a°)과 특징점의 중심사이의 고각방향 픽셀을 계측하고, 픽셀 값으로부터 위치출력오차를 측정한다.
- ⑨ 6자유도 모사기를 EUT 기준으로 Roll 방향으로 각각 -2°, -4°, -6°, -8°, -6°, -4°, -2°, 0°, 2°, 4°, 6°, 8°, 6°, 4°, 2° 기울여서 -8° ~ +8°의 각도에서 위치출력오차를 측정한다.
- ⑩ 위에서 측정한 -8° ~ +8°의 위치출력오차를 이용하여 전구간의 위치출력오차를 계산한다.

Roll 방향 -73° ~ 85° 부근의 위치출력오차를 측정하기 위한 과정은 다음과 같다.

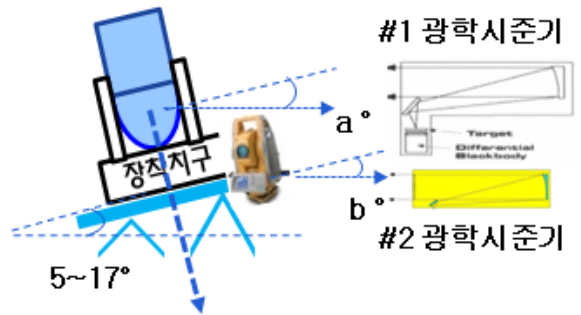


Fig. 9. 0° mounting fixture

- ① EUT를 직하방 시선 장착치구를 이용하여 6자유도 모사기에 위치시킨다(Fig. 9 참조).
- ② 정렬용 레이저, 포스터 2조, 경사계, 광학시준기를 이용하여 센서정렬을 수행한다(3장. 나. 참조).
- ③ #1 광학시준기에 EUT용 정렬표적(픽셀값을 읽어낼 수 있는 특징점을 보유한 표적)을 설치한다.
- ④ #2 광학시준기에 측각기용 기준표적(픽셀값을 읽어낼 수 있는 특징점을 보유한 표적)을 설치한다.
- ⑤ 6자유도 모사기를 EUT 기준으로 Roll 방향으로 -5°(반시계 방향) 기울인다.
- ⑥ 측각기 고각을 5°로 맞추고 측각기 영상중심에 위

- 치하는 #2 광학시준기 표적의 특징점을 기록한다.
- ⑦ 6자유도 모사기를 EUT 기준으로 Roll 방향으로 -2°(반시계 방향) 기울인다.
 - ⑧ 측각기를 고각으로 EUT 기준으로 Roll 방향으로 약 +2°(시계방향) 부근으로 기울인다. 기준표적의 특징점을 중심으로 측각기의 고각(b°)을 계측한다.
 - ⑨ 측각기에서 계측한 고각(b°)만큼 EUT를 + Roll 방향 구동한다. EUT의 현재 시선중심(고각 a°)과 특징점의 중심사이의 고각방향 픽셀을 계측하고, 픽셀 값으로부터 위치출력오차를 측정한다.
 - ⑩ 6자유도 모사기를 EUT 기준으로 Roll 방향으로 각각 5°, 7°, 9°, 11°, 13°, 15°, 17°, 15°, 13°, 11°, 9°, 7°, 5° 기울여서 85° ~ 73°의 각도에서 위치출력오차를 측정한다.
 - ⑪ 위에서 측정된 85° ~ 73°의 위치출력오차를 이용하여 전구간의 위치출력오차를 계산한다.

Pitch 방향 -8° ~ 8° 부근의 위치출력오차를 측정하기 위한 과정은 다음과 같다.

- ① EUT를 90° 시선 장착치구를 이용하여 6자유도 모사기에 위치시킨다(Fig. 8 참조).
- ② 정렬용 레이저, 포스터 2조, 경사계, 광학시준기를 이용하여 센서정렬을 수행한다(3장. 나. 참조).
- ③ #1 광학시준기에 EUT용 정렬표적(픽셀값을 읽어낼 수 있는 특징점을 보유한 표적)을 설치한다.
- ④ #2 광학시준기에 측각기용 기준표적(픽셀값을 읽어낼 수 있는 특징점을 보유한 표적)을 설치한다.
- ⑤ 측각기 방위각을 0°로 맞추고 측각기 영상중심에 위치하는 #2 광학시준기 표적의 특징점을 기록한다.
- ⑥ 6자유도 모사기를 EUT 기준으로 Pitch 방향으로 -2°(반시계 방향) 회전한다.
- ⑦ 측각기를 방위각으로 EUT 기준으로 Pitch 방향으로 약 +2°(시계방향) 부근으로 기울인다. 기준표적의 특징점을 중심으로 측각기의 방위각(b°)을 계측한다.
- ⑧ 측각기에서 계측한 방위각(b°)만큼 EUT를 + Pitch 방향 구동한다. EUT의 현재 시선중심(방위각 a°)과 특징점의 중심사이의 방위각방향 픽셀을 계측하고, 픽셀 값으로부터 위치출력오차를 측정한다.
- ⑨ 6자유도 모사기를 EUT 기준으로 Pitch 방향으로 각각 -2°, -4°, -6°, -8°, -6°, -4°, -2°, 0°, 2°, 4°, 6°, 8°, 6°, 4°, 2° 기울여서 -8° ~ 8°의 각도에서 위치

출력오차를 측정한다.

- ⑩ 위에서 측정된 -8° ~ 8°의 위치출력오차를 이용하여 전구간의 위치출력오차를 계산한다.

4. 시험결과 및 결론

Roll -8° ~ 8°, 73° ~ 85°, Pitch -8° ~ 8° 시험한 결과와 추정방법을 이용한 전구간 위치출력오차 예상치는 Table 2와 같다.

Table 2. Test and Predicted result

항목	시험결과(RMS)	전구간 예상치(RMS)
Roll -8 ~ 8°	0.0137°	0.1168° (-85 ~ 85°)
Roll 73 ~ 85°	0.1654°	0.1158° (-85 ~ 85°)
Pitch -8 ~ 8°	0.0108°	0.0202° (-15 ~ 15°)

본 논문에서 항공기 탑재용 카메라 위치출력오차를 Rate table로 측정하기가 곤란한 상황(중량, 크기문제)에서 6자유도 모사기, 측각기, 경사계, 광학시준기, 정렬용 레이저, 포스터 등을 이용한 새로운 측정 방법을 제시하였다. Roll, Pitch 방향으로 측정 결과가 일관성(측정값이 변화가 ±10 ~ 20% 수준)이 있었으며, 전구간 예상치는 기준값 이하로 만족하였다.

제안된 대형장비의 Roll, Pitch축에 대한 위치출력오차를 측정방법은 향후 유사과제나 다른 분야에도 응용이 될 수 있다고 판단된다.

References

- [1] Andre G. Lareau, "Optimum Coverage EO Framing Camera", Proc. SPIE, Vol. 2829, 1996.
- [2] Valerie Lavigne, Benoit Ricard, "Step-Stare Image Gathering for High-Resolution Targeting", NATO Research and Technology Organization, RTO-MP-SET-092, 2005.
- [3] A. Lareau, "Electro-Optical Image Array with Motion

- Compensation”, SPIE Conf. Proceedings, 1993.
- [4] K. James Held & Brendan H. Robinson, “TIER II Airborne EO Sensor LOS Control and Image Geolocation”, IEEE 1997.
- [5] R. Hoseinnezhad, A. Bab-Hadiashar, and P. Harding, “R. Calibration of Resolver Sensors in Electromechanical Braking Systems : A Modified Recursive Weighted Least-Squares Approach”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 54, No. 2, pp. 1052~1060, April 2007.
- [6] Matthew J. Corley and Robert D. Lorenz, “Rotor Position and Velocity Estimation for a Salient-Pole Permanent Magnet Synchronous Machine at Standstill and High Speeds”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 34, No. 4, pp. 784~789, July/August 1998.
- [7] Duane C. Hanselman, “Resolver Signal Requirements for High Accuracy Resolver to Digital Conversion”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 37, No. 6, pp. 556~561, 1990.