

항공기 탑재용 카메라 정렬오차 정의 및 시험방안 연구

A Study of Alignment Tolerance's Definition and Test Method for Airborne Camera

송대범* 윤용은* 이행복*
 Dae-Buem Song Yong-Eun Yoon Hang-Bok Lee

ABSTRACT

Alignment tolerance for EO/IR airborne camera using common optic is an important factor in stabilization accuracy and geo-pointing accuracy. Before airborne camera is mounted on the aircraft, defining alignment tolerance and verification of it is essential in production as well as research and development. In this paper we establish basic concept on the definition and elements of alignment tolerance for airborne camera and propose how to measure each of those elements. Components and the measurement sequence of alignment tolerance are as follows: 1) tolerance of alignment between EO and IR LOS. 2) tolerance of sensor alignment. 3) tolerance of position reporting accuracy. 4) tolerance of mount alignment

Keywords : EO/IR(Electro-Optic/ Infrared), Alignment(정렬), 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, 정렬오차는 지향 정확도(Geo-Pointing)와 광학분해능(GRD : Ground Resolved Distance)에 중

요한 영향을 미친다^{1~4)}.

본 논문에서는 항공기 탑재용 카메라의 정렬오차에 대한 정의와 오차 허용치를 공학적으로 계산하여 제시한다. 또한, 각각의 측정방법과 측정결과를 토대로 허용치와 계산치가 타당함을 입증한다.

항공기 탑재용 카메라는 센서부와 전자부로 나누어 지는데 센서부는 카메라부와 GPS/INS(Global Positioning System/Inertial Navigation System) 등으로 구성되어 있다. 일반적으로 항공기 탑재용 카메라의 GPS/INS는 구조 조립체 위에 별도의 탈부착 가능한 장비로 사용된다⁴⁾. 정렬오차는 영상센서 시선이 GPS/INS를 기반으로 표적을 지향하고자 할 때 초기 허용오차로 정의된다.

정렬오차의 정의와 요구도를 도출하기 위해서 GPS/

† 2013년 1월 24일 접수~2013년 3월 15일 게재승인

* 국방과학연구소(ADD)

책임저자 : 송대범(song@add.re.kr)

INS, 각검출기(Resolver), 영상센서(EO/IR), 내·외부 김발(Gimbal)의 성능뿐만 아니라 장착시 기계적 공차요소 등도 고려해야 한다. 정렬오차는 카메라를 항공기에 장착하기 이전에 지상에서 정렬오차에 대한 정의와 시험검증이 이루어져야 하며, 이는 연구개발과정과 카메라 양산과정에서도 필수적인 절차이다. 정렬오차는 영상센서간 정렬오차, 센서정렬오차, 위치출력오차, 장착정렬오차 순서로 시험이 진행되어야 하며, 최종성능(지향정확도, 광학분해능) 시험이전에 각각의 오차요소에 대한 허용치를 만족해야 한다.

본 논문에서 제안한 항공기 탑재용 카메라 정렬오차 연구의 결과를 이용하여 타 과제의 정렬오차 측정 및 오차개념 설정에 적용 가능하다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 정렬오차의 전체적인 개념을 설명하고, 정렬오차 시험전후의 시스템 점검사항과 시험항목에 대해서 논의하고자 한다. 또한, 영상센서간 정렬오차, 센서정렬오차, 위치출력오차, 장착 정렬오차에 대한 상세한 정의와 오차 허용치를 제안한다. 3장에서 정렬오차 시험방법 및 시험결과를 제시하고 4장에서 정렬오차에 대해서 정리하고 결론을 제시한다.

2. 항공기 탑재용 카메라 정렬오차 정의

항공기 탑재용 카메라의 전체 정렬오차는 Fig. 1과 같이 나타낼 수 있다. IR 영상센서 시선중심과 EO 영상센서 시선중심간의 오차를 영상센서간 정렬오차로 정의한다. 센서정렬오차는 각검출기가 '0°' 일 때 센서부 기구부(요크, yoke) 중심선과 영상센서의 중심시선의 오차로 정의된다. 위치출력오차는 영상센서의 시선이 지향하는 실제위치(각도)와 장비에서 출력해내는 위치(각도)와의 차이값으로 정의된다. 장착정렬오차는 GPS/INS와 EO/IR의 요크와의 장착오차로 정의된다.

각각의 정렬오차 시험전후 순서는 Fig. 2와 같다. 우선 영상센서간 정렬오차를 측정하여 허용치 이내값으로 측정되면, 영상센서를 탑재카메라 조립체에 조립을 한다. 센서정렬오차, 위치출력오차, 장착 정렬오차를 차례대로 측정하여 허용치 이내값으로 확인되면 최종적으로 지향정확도를 확인한다^{9,10)}.

영상센서간 정렬오차, 센서정렬오차, 위치출력오차, 장착정렬오차에 대한 허용치는 다음과 같다.

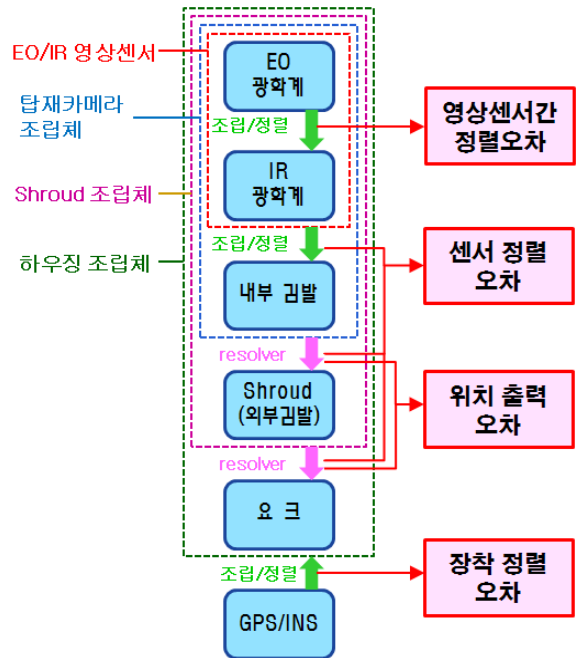


Fig. 1. Definition of Alignment Tolerance

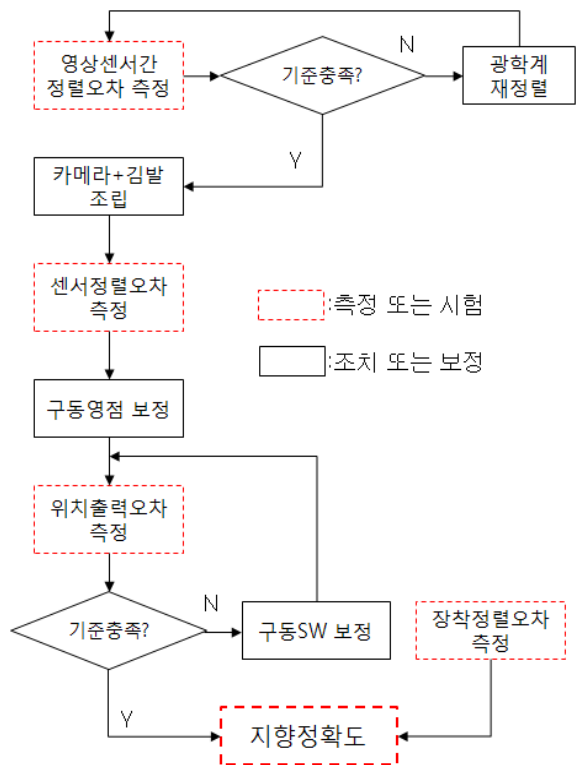


Fig. 2. Flowchart of Alignment

가. 영상센서간 정렬오차

영상센서간 정렬오차는 IR 영상센서를 기준으로 EO 영상센서의 시선중심의 벗어남을 구하는 것이다. 정렬 요구도는 각 센서의 FOV(Field Of View) 차이를 이용하여 정의 할 수 있다. IR 영상센서의 FOV와 EO 영상센서의 FOV를 빼준 값의 1/2로 정의될 수 있는데, 식 (1)과 같다.

$$\text{영상센서간 정렬오차} = \frac{|IR\ FOV - EO\ FOV|}{2} \quad (1)$$

일반적으로 EO/IR 공통광학계에서 EO FOV가 IR FOV보다 작은 경우가 대부분이다.

나. 센서정렬오차

센서정렬오차는 각 검출기가 '0°' 일 때 센서부 기구부 중심선과 영상센서의 중심시선간의 오차로 정의된다. 센서정렬오차의 허용치는 서보기준명령 인가 및 추종분해능의 한계치로 정할 수 있다. 즉, 센서정렬오차의 허용치는 구동명령 분해능이 작아지면 더욱 정밀하게 줄일 수 있다.

센서정렬오차 보정은 식 (2)와 같이 이루어진다.

$$\sigma = \frac{EO\ FOV}{EO\ \text{검출기 전체 픽셀수}} \times n \quad (2)$$

(σ : 오차각, n : 벗어난 픽셀 수)

식 (2)는 EO FOV가 IR FOV보다 작을 경우이며, 반대로 IR FOV가 클 경우 IR FOV와 픽셀수를 이용하면 된다.

다. 위치출력오차

위치출력오차는 영상센서의 시선이 지향하는 실제 위치(각도)와 장비에서 출력해내는 위치(각도)와의 차이값으로 정의된다. 센서정렬오차를 보정하고 나면 위치출력오차 시험을 수행하게 되는데, 위치출력오차의 허용치는 GPS/INS 출력오차, GPS/INS 장착오차, BSM (Back Scan Mechanism) 위치정확도, 지향정확도 목표치에 의해서 구할 수 있다.

Table 1은 위치출력 오차 허용치를 구하기 위해서 각 구성요소의 성능을 나타낸 것이다.

GPS/INS의 출력오차는 제품사양서에 나와 있는데 시중에 나와 있는 제품의 성능은 거의 유사한 수준이

다. N사, K사, H사, I사 제품의 CEP(Circular Error Probability)는 대부분 10m 전후이며, roll/pitch 출력오차는 0.05° 수준의 제품이 많이 있다. heading 출력오차는 roll 오차의 2~5배 정도이다. GPS/INS 장착오차는 장착면이 이루는 오차각을 기계적 공차 IT(International Tolerance) 등급 6으로 가공시 공차를 바탕으로 계산할 수 있다. BSM 위치정확도는 EO 영상센서 FOV의 2~5% 수준에서 정해진다. 지향정확도는 목표치의 항공기 탑재용 카메라의 FOV 수준으로 요구되는 경우가 대부분이다.

Table 1. Alignment tolerance of position reporting accuracy

항목	내용
GOr	GPS/INS 자세 roll축 출력오차
GOp	GPS/INS 자세 pitch축 출력오차
GOh	GPS/INS 자세 heading 출력오차
GAr	GPS/INS roll축 장착(정렬)오차
GAp	GPS/INS pitch축 장착(정렬)오차
GAh	GPS/INS heading 장착(정렬)오차
Pr, Pp	위치출력오차(roll/pitch)
Br	BSM 위치정확도
GPA	지향정확도(목표치)

이를 바탕으로 역으로 위치출력오차를 구하는 식은 다음과 같다.

$$(GOr + GAr + Pr + Br)^2 + (GOp + GAp + Pp)^2 + (GOh + GAh)^2 = GPA^2 \quad (3)$$

Roll, Pitch 구동범위를 이용하여 아래와 같이 Pr 대 Pp 간 비율을 구할 수 있다.

$$\text{비율} = \frac{P_p}{P_r} = \frac{\text{pitch 구동범위}}{\text{roll 구동범위}} \quad (4)$$

수식 (3), (4)를 이용하여 위치출력오차의 허용치(Pr, Pp)를 구할 수 있다.

라. 장착정렬오차

장착정렬오차는 GPS/INS를 센서부에 장착시 발생하는 오차각으로 정의된다. 공차규제는 IT 등급 6를 적용하는데, 주요가정으로 오차각은 GPS/INS와 외부김발(Shroud 축)간의 차이이며, roll, pitch 방향으로만 오차가 발생할 경우 최대치로 가정하였다.

2축에 의한 대각효과를 감안하면 다음과 같이 구해진다.

$$\text{최대장착정렬오차} = (MRa^2 + MPa^2)^{0.5} \quad (5)$$

여기서, MRa는 Roll 방향 최대 장착정렬오차, MPa는 Pitch 방향 최대 장착정렬오차를 각각 의미한다.

3. 측정방법 및 시험결과

가. 영상센서간 정렬오차 측정방법 및 결과

영상센서간 정렬은 우선, 카메라 조립체 단품시험으로 정렬을 수행한다. 광학시준기(Collimator)와 표적휠(Target Wheel)을 이용하여 IR 영상센서의 출력영상을 바탕으로 EO 영상센서의 출력영상이 벗어난 위치만큼 보상을 하게 되는데, 이때 EO 검출조립체의 위치를 직접 조정한다.

카메라 조립체 단품시험이 끝나면 센서부 조립과 balancing을 수행하고 다시 시스템 차원에서 영상센서간 정렬오차를 최종적으로 점검한다. 만약, 허용치를 만족하지 못할 경우, 제조립수준(S/W적으로 보정할 수 있는 범위를 넘어설 경우)인지를 판단하여 영상센서간 정렬오차를 다시 수행한다. 상세한 절차는 Fig. 3과 같다.

항공기 탑재용 카메라는 일반적으로 EO FOV가 IR FOV에 비해서 10~20% 이상 작는데 이는 EO 영상센서가 장거리를 촬영하기 때문이다. 본 항공기 탑재용 카메라에서 요구되는 센서정렬 요구도는 0.07°(1.2mrad)인데, 시험결과 호기별로 다르지만 요구도의 1/2~1/3 수준으로 측정된다.

나. 센서정렬오차 측정방법 및 결과

센서정렬은 정렬용 광학시준기와 레이저를 이용하는데 일반적인 전자광학 장비의 경우 Rate Table에서 정렬오차를 측정한다. 세부적인 방법은 아래와 같다.

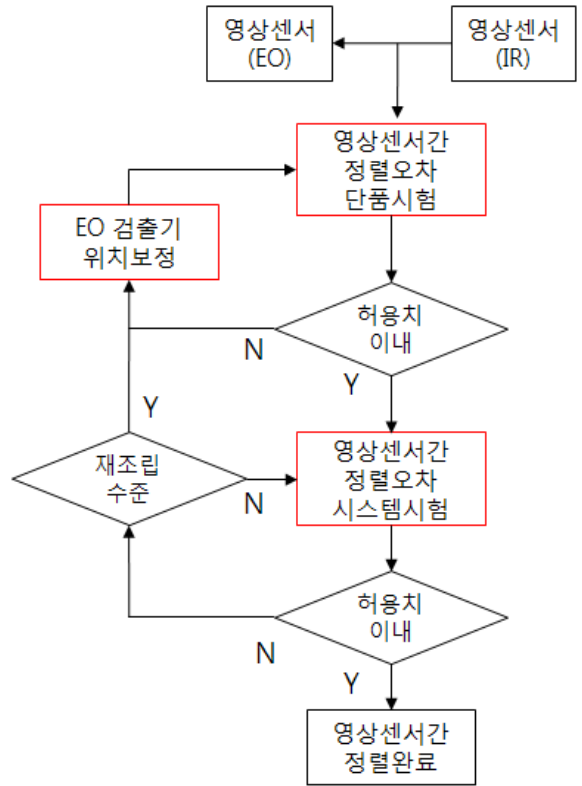


Fig. 3. Flowchart of image sensor alignment

- ① EUT(Equipment Under Test)를 2축 Rate Table에 설치하고 EUT에 정렬용 치구를 장착한다.
- ② 광학시준기의 정렬용 레이저를 EUT 정렬용 치구에 조사한다.
- ③ 레이저 반사각이 0°가 되도록 Rate Table의 방위각, 고각을 조정한다.
- ④ EUT에서 정렬용 치구를 탈거하고, 광학시준기는 표적이 출력되는 모드로 변경한다.
- ⑤ 표적이 화면중심에 오도록 EUT의 방위각, 고각을 조정하고 그때의 방위각, 고각을 측정한다.

영상센서간 정렬 후 조립 및 외부 balancing이 정상적으로 수행되었다면 일반적으로 센서정렬오차 보정 전 ‘수mrad’ 수준으로 오차값이 예측되는데, 이 값을 S/W 보정을 통하여 센서정렬오차 ‘0 mrad’에 근접하도록 만들어 주어야 한다. 이는 위치출력오차를 측정하기 위한 필수 과정이다.

본 논문의 항공기 탑재용 카메라는 내부 김발이 2축(roll/pitch)으로 이루어져 있는데, 센서정렬도 roll축

에 대해서 정렬 후 pitch축에 대해서도 정렬을 수행해야 한다. 시험결과 0.1mrad 이하로 정렬하여 ‘0 mrad’에 근접하도록 정렬가능하였다.

다. 위치출력오차 측정방법 및 결과

위치출력오차의 일반적인 측정방법은 다음과 같다.

- ① EUT(Equipment Under Test)를 2축 Rate Table에 설치한다.
- ② 광학기준기의 정렬용 레이저를 이용하여 센서정렬을 수행한다.
- ③ 방위각 방향으로 약 10~15도 회전시킨다.
- ④ 광학기준기 표적이 화면 중심에 오도록 EUT를 조정하고 그때의 방위각을 측정한다.
- ⑥ 각 각도에서 Rate Table과 측정된 방위각 오차의 실효값을 계산한다.
- ⑦ 고각 방향으로 동일한 방법(Rate Table 회전각도는 상황에 따라서 변동)으로 측정한다.

본 논문의 항공기 탑재용 카메라의 위치출력오차 측정결과는 호기마다 조금씩 차이는 있지만 0.1~0.05° (1.74~0.87mrad) 수준으로 측정되었다.

라. 장착정렬오차 측정방법 및 결과

장착정렬오차는 따로 측정하지는 않았는데, 그 사유는 다음과 같다. 2장에서 제시한 최대장착정렬오차를 IT6등급 기준으로 예측한 값은 0.17mrad 이다. 이 값은 2축 대각효과를 감안하여 한쪽 방향으로만 오차가 발생할 경우의 최대치로 가정하였으므로 실제로는 더 낮은 오차가 발생된다. 장착정렬오차는 공차규제와 지향정확도 측정만으로 확인가능한 항목이다.

4. 결론

본 논문에서는 항공기 탑재용 카메라의 정렬오차에 대한 정의와 오차허용치를 공학적으로 계산하여 제시하고 측정방법과 시험결과를 제시하였다. 또한, 정렬오차의 순서와 정렬오차 전후 시스템 조립과 최종성능확인 요소등과의 연계성을 확립하였다. Table 2에 정의와 허용치를 요약정리 하였다.

EO/IR FOV에서 정해지는 영상센서간 정렬오차 허용치는 실제로 검출기를 조정하여 오차를 줄여나가기

때문에 기준치의 1/2~1/3이하의 정확도를 가지는 것을 확인하였다. 센서정렬오차 허용치는 이론적으로 서보 구동명령 인가 및 추종 분해능 한계치로 허용치를 선정할 수 있는데, S/W 조정시 0mrad 근방 값으로 만들 수 있다. 위치출력오차 허용치는 각검출기의 조립 정밀도가 가장 큰 영향을 미치는데 일반적으로 항공기 탑재용 카메라의 경우 제시된 허용치의 약 1/2수준에서 만족한다. 장착정렬오차는 IT 6등급 가공이라고 예상할 때 한쪽방향으로 오차가 발생할 확률을 허용치로 규제했기 때문에 실제로는 제시된 값보다 작은 오차를 가진다.

본 논문에서 다룬 정렬관련 개념들과 허용치는 항공기 탑재용 카메라의 시선 지향정확도에 직접적인 영향을 미친다. GPS/INS 출력 오류와 시스템 제어기, 임무수행 중 구조 변형 등의 요소를 제외한다면 정렬관련 오차요소는 모두 포함되어 있다고 할 수 있기 때문이다. 따라서 지향정확도 오차를 논할 때 본 논문에서 다룬 정렬 개념은 핵심적으로 검토되어야 할 내용이라고 할 수 있다. 또한 본 논문에서 제시된 정의와 허용치는 유사한 타 과제에서 정렬에 대한 개념정립에 활용될 수 있으며, 양산시에도 필수적인 과정으로 확립시키야 한다.

Table 2. Definition & margin of Alignment tolerance

항목	오차정의	허용치 (mrad)
영상 센서간 정렬오차	IR과 EO의 영상센서 시선중심 오차	FOV 차이/2
센서정렬 오차	각 검출기가 0° 일 때 센서부 기구부 중심선과 영상센서의 중심시선간의 오차	서보명령 한계치
위치출력 오차	영상센서의 시선이 지향하는 실제위치(각도)와 장비에서 출력해내는 위치(각도)와의 오차	Pr, Pp ¹⁾
장착정렬 오차	GPS/INS를 센서부에 장착시 발생되는 오차각	0.1704

※ 주기 1) 위치출력오차 Pr, Pp는 GPS/INS 오차, BSM 위치정확도, 지향정확도에서 산출함

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 Organisation, 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] Andre G. Lareau, Michael R. Bown, "E-O Framing Camera Flight Test Results", SPIE Vol. 2272 Airborne Reconnaissance XVIII, 1994.
- [6] Donald M. Stuart, "Sensor Design for Unmanned Aerial Vehicles", IEEE Aerospace Conference, Vol. 3, pp. 285~295, 1997.
- [7] Richard G. Sementelli, "EO/IR Dual-band Reconnaissance System, DB-110", Proc, SPIE Vol. 2555, pp. 222~231
- [8] Richard N. Lane, John K. Delancy, "DB-110 Performance Update", Proc, SPIE Vol. 3431, pp. 108~118.
- [9] Jon C. Leachtenauer et al., "General Image-Quality Equation : GIQE", Applied Optics Vol. 36, No. 32.
- [10] Donald M. Stuart, "Sensor Design for Unmanned Aerial Vehicles", IEEE Aerospace Conference, 1997.