

항공용 카메라 전방운동 보상기능의 실험실 입증방안

Laboratory Test Method for the Forward Motion Compensation of Airborne Camera

송대범* 윤용은*
Dae-Buem Song Yong-Eun Yoon

Abstract

Image blurring in airborne camera can be prevented through timely actuation of LOS(Line of Sight) into the opposite direction to the aircraft advancement, i.e. FMC(Forward motion compensation). Performance verification of FMC requires installation of camera to the aircraft. However, in many ways the verification process has little choice but to be implemented in the laboratory. In this paper verification method of FMC performance in the laboratory is introduced. With collimator target installed in the known reference position image obtained by actual mission plan naturally displays image blurring as well as LOS displacement by FMC effect. Through comparison of the amount of those image blurring and LOS displacement to the equivalent image distortion expected by the application of the FMC reference command can the performance be verified. In this paper we propose a new verification method of FMC performance in laboratory along with generalized solution of FMC reference command, and assess the validity of our proposition.

Keywords : Forward Motion Compensation(FMC, 전방운동보상), Airborne Camera(항공용 카메라)

1. 서론

항공용 카메라의 핵심목표는 원거리 고해상도 영상 정보를 획득, 실시간 전송 및 근실시간 처리이다. 주요한 핵심기술은 광학계 설계, 항공기 운동보상기법, 고정밀 안정화장치 및 실시간 고속 대용량 영상데이터 처리기술 등이 있다. 이 중 항공기 운동보상기법에

는 항공기 자세에 대한 보상, 진동에 대한 운용성 및 내구성, 전방운동에 대한 보상으로 크게 나눌 수 있다^[1~4]. 본 논문에서는 항공용 카메라의 FMC 기법을 시험하기 위한 실험실 입증방안을 제시하였다. 일반적으로 FMC 성능을 확인하기 위해서는 항공기 탑재시험이 필수적이다. 그러나, 비용 및 시간 등을 고려할 때 지상에서 충분한 검증이 이루어져야 한다. 지상 시험시 자동차와 같이 일정속도를 내는 환경에서 시험할 수도 있지만, 이 역시 비행속도만큼 자동차의 속도를 내기 어렵기 때문에 일부속도 구간에서만 FMC 성능을 간접적으로 측정하는 수준이다. 또한, 지상 시험시

† 2012년 3월 29일 접수~2012년 6월 29일 게재승인

* 국방과학연구소(ADD)

책임저자 : 송대범(song@add.re.kr)

진동과 같은 외란에 의해서 발생하는 오차 때문에 정확한 전방운동보상기능을 측정하기 곤란하다. 이에 본 논문에서는 실험실 레벨에서 FMC 성능을 입증하기 위해서 FMC 일반해와 시험 방안을 제시한다.

FMC 입증방안은 광학시준기(collimator) 2조를 이용하여 카메라 시선이 움직임을 측정하는 것이다. 시험결과 항공용 카메라의 FMC 성능을 충분히 확인할 수 있었으며, 타 과제에서도 활용이 가능하다고 판단된다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 FMC의 개념을 설명하고, 이를 바탕으로 항공기에서 지상을 촬영할 때 항공기 lead/lag pitch 각속도와 지면상의 선속도와 관계에서 FMC 기준명령의 일반해를 도출한다. 3장에서는 FMC 시험구성, 성능평가 방법, 시험절차, 성능판단 기준에 대해서 서술한다. 4장에서는 시험결과 및 분석을 통하여 제안된 시험방안에 대한 결과를 정리하고 5장에서 결론을 제시한다.

2. FMC 개념 및 일반해 도출

가. FMC 개념

항공용 카메라 촬영노출시간 동안 항공기 이동에 의해 영상흐름이 발생되어 화질의 저하가 발생된다. 이를 방지하기 위해서 비행속도와 고도를 고려하여 카메라의 시선을 비행 반대방향으로 제어하는 기술을 FMC라고 한다^{3,4)}.

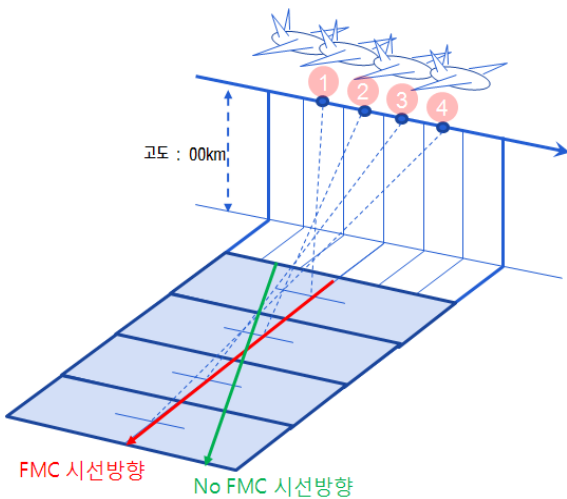


Fig. 1. Concept of FMC

Fig. 1은 FMC 개념도이다. 항공기가 ①번 위치에서 ④번 위치로 이동시 항공기에 장착된 카메라의 LOS는 ‘No FMC 시선방향’으로 향하게 된다. 그렇게 되면 촬영노출 순간 비행방향으로 화질저하 현상이 발생할 뿐만 아니라 촬영되는 영상 프레임이 비행방향과 수직으로 일직선에 놓이지 않게 된다. 이를 방지하기 위해서 항공기의 속도에 해당하는 양만큼 pitch축의 LOS를 비행 반대방향으로 이동시켜서 ‘FMC 시선방향’으로 변경시킨다. FMC 기능 수행시 촬영된 영상이 비행 수직 방향으로 고르게 분포될 뿐만 아니라 촬영 노출시간 동안의 화질저하 현상도 개선할 수 있다.

나. FMC 일반해

항공기 카메라의 FMC 일반해를 구하기 위해서 lead/lag pitch 각속도와 지면의 선속도와 관계를 Fig. 2 및 Table 1과 같이 구성한다.

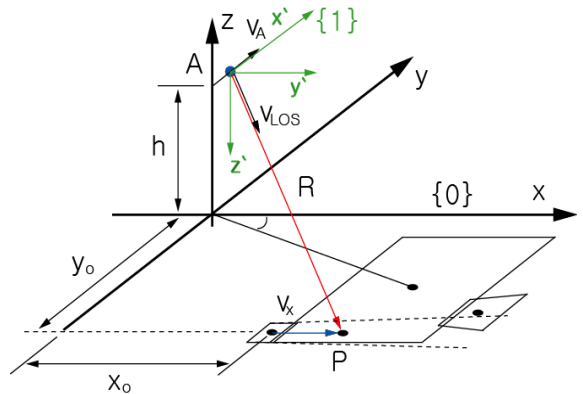


Fig. 2. FMC and Ground air speed

현재의 항공기(카메라부) 위치를 수식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$A = [0 \quad v_A t \quad h]^T \quad (1)$$

현재의 카메라의 시선이 지면과 만나는점은 수식 (2)와 같다.

$$P = [x_o + \int v_x dt \quad y_o \quad 0]^T \quad (2)$$

수식 (3)은 frame {0}에서 {1}로의 변환되는 matrix를 의미한다.

Table 1. Annotation to Fig. 2

| 변수 | 내용 |
|-----------|--|
| A | 현재 항공기(카메라)의 위치 |
| P | 현재 카메라의 시선이 지면과 만나는 점 |
| h | 비행 고도(00,0km) |
| y_0 | 시작지점(t = 0)에서 첫 번째 zero frame중심까지의 비행방향 거리 |
| x_0 | 시작지점에서 첫 번째 zero frame중심까지의 비행수직방향 거리 |
| v_A | 항공기 속도(00m/sec) |
| v_x | 횡렬영상 촬영시 P점의 이동속도 |
| R01 | frame {0}에서 {1}로의 변환 matrix |
| v_{LOS} | 벡터 AP와 방향이 같고 크기가 1인 단위벡터 |
| r | 카메라의 roll각(x'축 주위 회전각) |
| p | 카메라의 pitch각(y'축 주위 회전각) |
| \dot{r} | roll축 촬영 각속도(FOV/0.2s ~ = 2.51°/s) |
| R | slant range |

$$R_{01} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

수식 (4)는 벡터 AP와 방향이 같고 크기가 1인 단위 벡터이다.

$$v_{LOS1} = \begin{pmatrix} \sin p \\ -\cos p \sin r \\ \cos p \cos r \end{pmatrix} \quad (4)$$

현재 항공기에서 지면의 표적을 바라보는 시선을 수식 (5)와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \overrightarrow{AP_0} &= [x_0 + \int v_x dt \quad y_0 - v_A t \quad -h]^T, \\ &= R v_{LOS0} = R R_{01} v_{LOS1} = R \begin{pmatrix} -\cos p \sin r \\ \sin p \\ -\cos p \cos r \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (5)$$

수식 (6)은 수식 (5)를 미분한 것이다.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(\overrightarrow{AP_0}) &= \begin{pmatrix} v_x \\ -v_A \\ 0 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} -\dot{R} \cos p \sin r + R \dot{p} \sin p \sin r - R \dot{r} \cos p \cos r \\ \dot{R} \sin p + R \dot{p} \cos p \\ -\dot{R} \cos p \cos r + R \dot{p} \sin p \cos r - R \dot{r} \cos p \sin r \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (6)$$

수식 (6)을 정리하면 수식 (7)을 구할 수 있다.

$$\dot{p} = -\frac{\cos^2 p \cos r}{h} v_A - \dot{r} \sin p \cos p \tan r \quad (7)$$

수식 (7)에서 $-\frac{\cos^2 p \cos r}{h} v_A$ 은 FMC에 의한 성분이며, $-\dot{r} \sin p \cos p \tan r$ 은 pitch lead/lag각 지향시 roll 각 스캔에 의한 성분이다.

3. FMC 시험방안

가. FMC 시험구성

항공용 카메라 장비는 제어부와 카메라부로 구성된다. 카메라부는 광학계, 안정화 구동기, 구조부 등의 부분으로 나눌 수 있으며, 제어부는 시스템 제어기, 안정화 제어기, 영상데이터처리기, GPS/INS 등으로 구분된다. 카메라부와 제어부의 정상작동을 확인후 장비를 연결한 다음 광학시준기 2조를 이용하여 Fig. 3과 같이 시험환경을 구축한다.

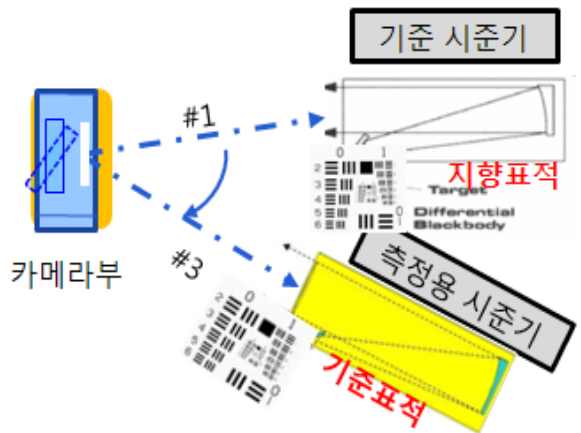


Fig. 3. Test configuration of FMC

본 논문의 시험에서 사용되는 카메라 장비는 정지 영상 35장(5프레임*7프레임)을 촬영하는 장비인데, #1 프레임이 촬영될 예상 위치에 기준시준기를 설치하고 USAF-1951 표적으로 영상을 확인한다. 그리고 #3 프레임이 촬영될 예상 위치에 측정용 시준기를 설치하고 USAF-1951 표적으로 영상을 확인한다.

Fig. 4는 FMC 시험시 촬영모습이며, 항공용 카메라 장비는 실제 장착되는 형태에서 90도 기울어진 상태로 설치된다.

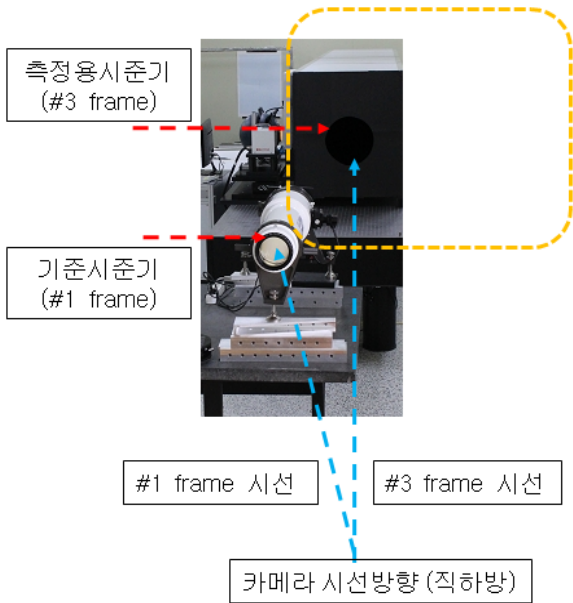


Fig. 4. Test scene of FMC

나. FMC 성능평가 방법

FMC 성능평가의 2가지 요소로 '이동거리'와 'pixel 번짐'이 있다. 이동거리를 측정하기 위해서 항공기 속도가 '0'일 때 촬영한 #3 프레임과 항공기 속도(예, 58m/sec)가 있을 때 촬영한 #3 프레임의 영상을 비교하면 된다. 속도가 있을 경우 카메라는 정지상태에서 가상으로 속도가 주어졌기 때문에 FMC가 작동한다. Fig. 5는 이동거리를 계산하기 위한 것으로 속도가 '0'일 때 #1 프레임에서 #5 프레임으로 Scan 방향으로만 이동하게 되지만, 속도가 있을 경우 점선방향으로 이동된 상태에서 #3 프레임이 촬영된다.

Pixel 번짐을 계산하기 위해서는 항공기 속도가 주어졌을 때 촬영된 #3 프레임의 번짐을 계산하면 된다. Fig. 6은 FMC 구동시 Pixel 번짐을 나타낸 것으로

USAF-1951 표적을 이용하여 속도 '0'일 때와 속도가 '58m/sec'일 때 촬영된 #3 프레임 영상을 오버랩하여 pixel 번짐을 계산할 수 있다. 'a' 길이는 노출시간동안 프레임의 총 길이이며, 'b'는 노출시간 동안 발생하는 pixel 번짐이다.

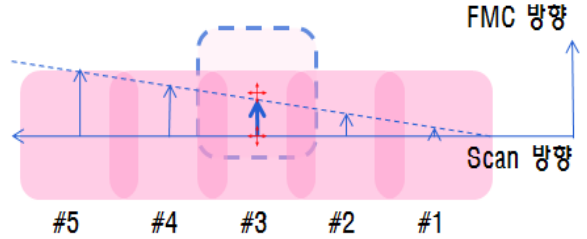


Fig. 5. LOS displacement due to FMC

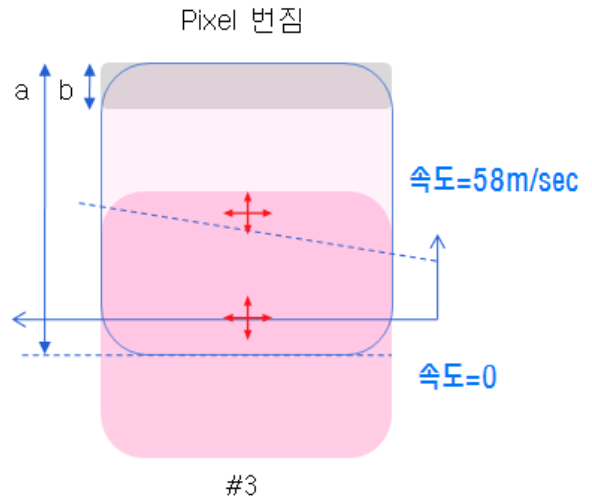


Fig. 6. Pixel blurring due to FMC

다. FMC 시험절차

FMC 시험절차는 아래와 같다.

- ① 카메라부를 직하방 촬영상태로 세팅하여 측정용 시준기 중심에 오도록 정렬시킨다.
- ② 측정용 시준기 표적이 촬영되는 35장의 프레임중 #3 프레임의 중심에 오도록 촬영명령을 인가
- ③ 촬영명령은 직하방 촬영이며, GPS/INS 모사기를 이용하여 현재 카메라부 위치를 비행체 고도로 모사하고, 표적은 위도/경도가 동일하고 고도만 상이한 지표면에 위치하는 것으로 정의
- ④ 비행속도 '0', '58m/sec'일 때 각각 협업촬영 후 3#

프레임 영상중심과 측정용 표적 중심의 pitch 축 거리와 pixel 번짐을 분석하여 FMC 성능확인

라. FMC 성능 판단기준

FMC에 따른 시선 이동거리와 영상 번짐 판단기준 계산은 아래와 같다.

- ① FMC기준명령값 계산 : 예를들어, 항공기 속도가 58m/sec, 고도가 7.64km 일 경우 수식 (7)에 따라 직하방 촬영시 카메라부가 움직여야 하는 각속도로 환산하면 7.595mrad/sec가 된다.
- ② 시선 이동거리 계산 : 한 프레임 촬영시 약 0.2초가 소요된다면 #3 프레임을 중심을 지날 때 소요시간은 0.5sec가 되며, 이를 pitch축 이동각도로 환산하면 3.7975mrad이 되며, pitch 축 FOV와 화소수를 이용하여 계산하면 840.8pixel이 된다.
- ③ 영상 번짐량 계산 : 7.595mrad/sec 만큼을 카메라 노출시간동안에 반대방향으로 움직여 줘야 하는데, 노출시간이 6msec라면, 노출시간동안 시선 이동각을 계산하면 0.002611deg가 되며, 이를 pixel로 환산하면 10.1pixel이 된다.

4. 시험결과

가. FMC 시험결과

항공기 속도가 '0'일 때 촬영된 영상은 Fig. 7과 같다. 기준시준기로 #1 프레임을 확인할 수 있는데, 참고로, 시험이 세팅된 후 기준시준기는 생략가능하다. #3 프레임은 측정용 시준기의 표적을 촬영한 영상인데, 주변에 #2, 4, 7, 8, 9 프레임에도 표적의 일부분이 촬영된 것을 알 수 있다.

항공기 속도 '58 m/sec'일 때 촬영된 영상은 Fig. 8과 같으며 측정용 시준기 표적이 #3, 8, 13, 18, 23, 28, 33 프레임에 반복해서 나타난다. 가상의 속도 '58m/sec' 입력시 pitch 축이 비행체 진행방향과 반대로 움직이면 촬영하므로 측정용 시준기 표적이 계속해서 촬영된다.

Fig. 7과 Fig. 8의 #3 프레임을 확대하면 Fig. 9와 Fig. 10과 같다. Fig. 9와 Fig. 10의 3# 프레임을 분석해보면, 속도가 '0'일 때 영상기준으로 속도가 '58m/sec'일 때 영상의 중심이 USAF-1951 표적의 하단으로 이동한 것을 확인할 수 있다.

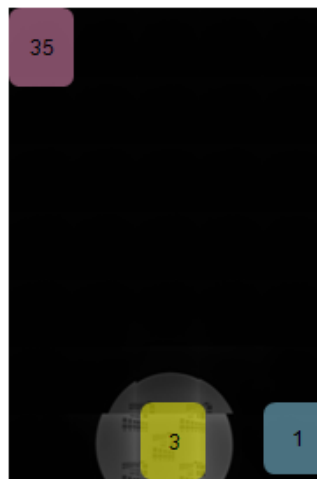


Fig. 7. Image when aircraft velocity = 0 m/sec

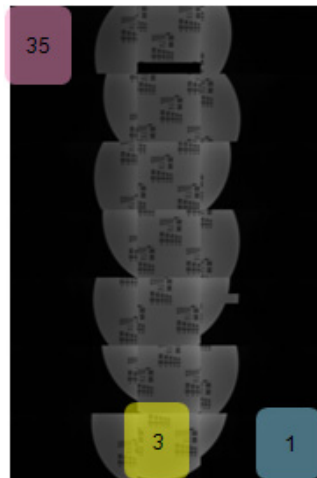


Fig. 8. Image when aircraft velocity = 58 m/sec



Fig. 9. #3 frame image when aircraft velocity = 0 m/sec

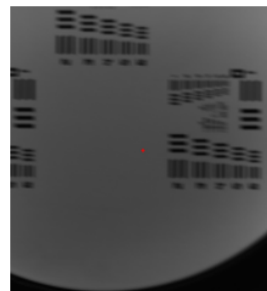


Fig. 10. #3 frame image when aircraft velocity = 58 m/sec

나. FMC 시험결과 분석

Fig. 10 및 Fig. 11을 분석하여 ‘3장. 라’ 절의 기준수치와 비교해 본 결과는 아래에 위치한 Table 2와 같다. 이 때 구동각속도는 기준명령을 완전히 추종하며, 촬영된 #3 프레임까지 시선이동량에 의해 평균 각속도를 산출했다.

Table 2. Test results of FMC

| 항 목 | 판단 기준 | 결 과 | 오 차 |
|---------|------------|--------------|--------|
| 시선 이동거리 | 992 pixel | 1010.5 pixel | +1.86% |
| 영상 번짐량 | 10.1 pixel | 10.5 pixel | +3.96% |



Fig. 11. Test result : displacement of #3 frame

5. 결 론

본 논문에서는 FMC 기능의 실험실 환경 입증 방안을 제안하였고 그 방법에 따라 FMC기능 시험을 수행하였다. 그 결과 FMC의 성공여부를 판단하는 두 가지 척도에서 각각 1.86%와 3.96%의 오차가 발생했다. FMC의 평균적인 추종속도에 대한 척도인 시선 이동거리에 비해 영상 번짐량이 더 높게 발생했는데 이는 영상 번짐량의 판단 기준이 pixel수이기 때문인 것으로 판단된다. 즉, 정수 단위로 측정할 수 있는 pixel수로써 소숫점 첫째자리까지 측정시에 측정 정밀도 문제가 발생하기 때문이다. 반면 두 척도 사이에 크지 않은 오차범위(1.86~3.96%)가 발생한 사실은 본 논문에서 제안한 FMC기능의 실험실 환경 입증 방안에 의한 측정 결과가 일관성이 있으며 따라서 그 이론적/경험적 타당성을 뒷받침한다고 할 수 있다. 향후 항공기에 장착하여 시험할 때 본 논문의 실험실 측정 데이터를 활용하여 지향정확도 평가 등의 성능 평가에 활용될 예정이다.

References

- [1] 박주광, “영상감지기 설계(VI)(안정화 구동부)”, 국방과학연구소, 연구보고서(TEDC-417-000601), 2000. 6.
- [2] 윤용은, “안정화구동부 상세설계”, 국방과학연구소, 연구보고서(ADDR-417-100859), 2010. 8.
- [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.