

技術論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 41(8), 673-679(2013)

DOI:<http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2013.41.8.673>

안전분리 비행시험을 위한 사진계측 기법

김상진*, 유흥철**, 류태규**, 박정호***

Photogrammetric Techniques for Safe Separation Flight Test

Sang-Jin Kim*, Heung-Cheol You**, Taekyu Reu** and Jeong Ho Park***

Agency for Defense Development*, Agency for Defense Development**, LIG Nex1***

ABSTRACT

Photogrammetric techniques were used to analyze separation characteristics of store in safe separation flight test. In this analysis, we used single camera method to analyze 6 degrees of freedom of separated store. We established instrumentation requirements based on theoretical background of photogrammetry and guidelines of MIL-HDBK-1763. We applied the photogrammetry to flight test and extracted separation trajectory. We empirically estimated the input variables uncertainties of photogrammetry and its effects on separation trajectory. Using this trajectory which includes the photogrammetric error, we analyzed the safety of separation.

초 록

안전분리 비행시험에서 사진계측 기법을 이용하여 분리되는 외부장착물의 분리특성을 분석하였다. 한 대의 카메라를 사용하여 6자유도를 해석할 수 있는 기법을 적용하였으며, 사진계측의 이론적인 배경과 MIL-HDBK-1763에서 제시하는 내용을 토대로 계측 요구조건을 정립하고 비행시험에 적용하여 분리궤적을 추출하였다. 사진계측의 오차에 영향을 주는 입력변수들의 불확실성을 경험에 의해 추정하였으며, 각각의 입력변수들에 의한 궤적 오차를 고려하여 분리안전성을 분석하였다.

Key Words : Store Separation(외부 장착물 분리), Photogrammetry(사진계측), Collinearity Equations(공선 방정식), Flight Test(비행시험)

1. 서 론

새로운 항공기나 무장의 개발 또는 새로운 무장을 장착하는 경우에는 항공기와 무장의 안전한 운용한계를 명시하기 위하여 적합성(Compatibility)을 입증하여야 한다[1]. 이 중 안전분리 분야 적합성 입증은 계획수립, 풍동시험, 안전분리 비행영역 설정(Pre-flight Analysis), 비행시험, 비행

시험 결과분석(Post-flight Analysis) 및 안전분리 비행영역 입증의 순으로 진행된다[2]. 비행영역이 넓은 전투기급 항공기의 경우 일반적으로 CTS(Captive Trajectory System) 풍동시험으로부터 생성한 분리해석용 데이터를 이용하여 분리궤적을 해석한다. 분리궤적을 이용하여 항공기와 분리 무장 간의 시간에 따른 최소거리(Miss Distance)를 계산하며, 이를 이용하여 안전분리

† Received: April 3, 2013 Accepted: July 15, 2013

* Corresponding author, E-mail : bipoo@add.re.kr

<http://journal.ksas.or.kr/>

pISSN 1225-1348 / eISSN 2287-6871

비행영역을 설정한다. 비행시험은 설정된 안전분리 비행영역 내에서 낮은 고도, 높은 비행속도 등 위험도가 큰 비행조건에서 실시되며, 비행시험으로부터 실제 안전분리를 확인한 후 다음 비행시험 조건을 결정하거나 안전분리 비행영역을 입증하게 된다. 비행시험을 수행한 후, 분리되는 외부장착물의 분리 궤적을 추출하는 데는 일반적으로 외부장착물의 Telemetry 데이터나 사진계측(Photogrammetry) 방법을 사용한다. 이 중 사진계측 방법의 경우에는 시험 직후 영상으로부터 정성적으로 안전분리를 확인 할 수 있고, 영상을 이용하여 정량적인 데이터를 확보할 수도 있어 유용한 방법이다. 그렇지만, 사진계측 방법을 적용하기 위해서는 고속카메라의 개수, 장착위치, 카메라 성능뿐만 아니라 외부장착물의 6자유도 궤적 데이터를 추출하기 위한 해석 방법 등을 종합적으로 고려하여야 한다.

본 연구에서는 안전분리 비행시험에 적용한 사진계측 기법을 소개하고, 사진계측의 오차를 고려한 분리 안전성 분석 방안을 제안하고자 한다. 한 대의 카메라를 이용하여 6자유도 분리궤적을 해석하는 방법을 적용하였으며, 사진계측의 오차가 분리안전성에 미치는 영향을 분석하였다.

II. 사진계측기법

2.1 공선 방정식(Collinearity Equations)

사진계측의 기본 문제를 풀기 위한 방정식이 공선조건(Collinearity Condition) 방정식이며 식 (1)과 같이 표현된다. 여기서, 공선조건(Collinearity Condition)이란 공간상의 임의의 점과 그에 대응되는 사진상의 점 및 카메라의 투영 중심점이 일직선상에 있어야 한다는 조건으로 카메라 좌표계와 피사체 좌표계 사이의 관계를 나타낸다.

사진계측을 위해서는 먼저 피사체 및 카메라 좌표계를 정의해야 한다. 피사체 좌표계(XYZ)는 피사체가 있는 공간에 임의로 설정할 수 있으며, 카메라 좌표계(xyz)는 투영 중심점(Perspective Center)을 원점으로 하는 좌표계로, xy 평면은 사진이 찍히는 CCD 또는 필름 평면과 평행하다.

피사체 및 카메라 좌표계를 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1은 피사체의 한 점 $[X_i, Y_i, Z_i]$ 에서 들어오는 빛이 카메라 투영 중심점을 통과하여 영상평면 $[x_i, y_i]$ 에 도달하게 되는 영상 생성 절차도 포함하고 있다. Fig. 1에서 f 는 투영중심점 O와 영상평면의 중심점인 사진주점(Principal Point)과의 거리를 나타낸다.

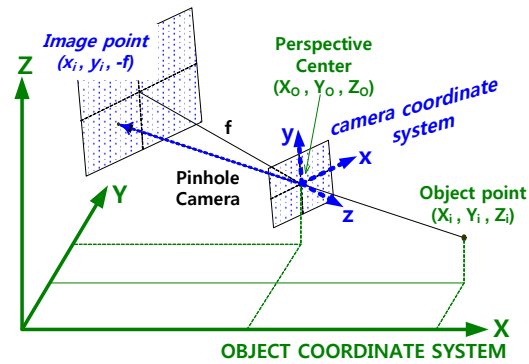


Fig. 1. Coordinate systems and imaging process

두 좌표계간의 관계를 이용하여 식 (1)의 공선 조건 방정식을 유도할 수 있다. 식 (1)에서 μ 는 영상의 비례인자(scale factor), R 는 회전행렬을 각각 나타낸다. 회전행렬은 카메라 좌표계를 피사체 좌표계와 평행하게 만들기 위하여 X, Y, Z 축에 대응되는 회전각 ω, ϕ, κ 만큼 식 (2)와 같이 회전시킨 회전행렬이다. 또한 $[X_i, Y_i, Z_i]$ 는 피사체 좌표계 상의 i 번째 기준점 좌표, $[x_i, y_i, -f]$ 는 i 번째 기준점이 사진에 찍혔을 때의 카메라 좌표계상의 좌표, $[X_0, Y_0, Z_0]$ 는 피사체 좌표계 상의 투영중심점 좌표를 각각 의미한다. 이상적인 카메라 모델에서는 공간상의 임의의 점과 그에 대응되는 사진상의 점, 카메라의 투영중심점이 일직선상에 있다. 그렇지만 실제 카메라의 경우 이미지 센서(Image sensor)의 편평도 및 해상도, 렌즈 등으로 인해, 식 (1)과 같이 i 번째 기준점이 사진에 찍혔을 때 카메라 좌표계상의 좌표는 $[x_i - x_{pp} + dx, y_i - y_{pp} + dy, -f_c]$ 이 된다.

$$\mu R \begin{bmatrix} x_i - x_{pp} + dx \\ y_i - y_{pp} + dy \\ -f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_i - X_0 \\ Y_i - Y_0 \\ Z_i - Z_0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$r_{11} = \cos \kappa \cos \phi, \quad r_{12} = -\sin \kappa \cos \phi, \quad r_{13} = \sin \phi,$$

$$r_{21} = \sin \kappa \cos \omega + \cos \kappa \sin \phi \sin \omega,$$

$$r_{22} = \cos \kappa \cos \omega - \sin \kappa \sin \phi \sin \omega,$$

$$r_{23} = -\cos \phi \sin \omega,$$

$$r_{31} = \sin \kappa \sin \omega - \cos \kappa \sin \phi \cos \omega,$$

$$r_{32} = \cos \kappa \sin \omega + \sin \kappa \sin \phi \cos \omega,$$

$$r_{33} = \cos \phi \cos \omega$$

식 (1)에서 x_{pp}, y_{pp} 는 사진 주점의 좌표이며, dx, dy 는 렌즈왜곡 보정항, $-f_c$ 는 보정된 초점거

리이다. 상대적으로 왜곡 효과가 큰 렌즈왜곡에 대한 보정항만 고려한다면, 보정항은 일반적으로 식 (3)과 같이 대칭 및 비대칭 왜곡에 대한 보정항으로 구성된다[3].

$$dx = dx_{sym} + dx_{asym}, \quad dy = dy_{sym} + dy_{asym} \quad (3)$$

여기서, $dx_{sym} = x \cdot dr_{sym}/r$, $dy_{sym} = y \cdot dr_{sym}/r$

$$dr_{sym} = A_1(r^3 - r_0^2 r) + A_2(r^5 - r_0^4 r) + A_3(r^7 - r_0^6 r)$$

$$dx_{asym} = B_1(r^2 + 2x^2) + 2B_2xy$$

$$dy_{asym} = B_2(r^2 + 2y^2) + 2B_1xy$$

$$r^2 = (x - x_{pp})^2 + (y - y_{pp})^2 \quad (4)$$

이며 대칭 및 비대칭 왜곡 보정항의 계수 A, B 및 방사방향 렌즈왜곡 곡선(distortion curve of a lens)이 두 번째로 0이 되는 점을 의미하는 r_0 는 카메라 보정 기법을 통해 구한다.

2.2 카메라 포즈 예측(Pose Estimation)

카메라 포즈(Pose) 예측이란 피사체 좌표계상에서 카메라의 자세와 위치를 결정하는 6개의 미지수($\omega, \phi, \kappa, X_0, Y_0, Z_0$)를 찾는 것을 의미하며, 후방교선법(Space Resection)이라고도 불리어 진다. 좌표값을 알고 있는 피사체 좌표계의 기준점과, 이에 대응되는 카메라 좌표계의 값으로부터 카메라 포즈를 구할 수 있다. 포즈를 구하기 위한 방법으로는 크게 반복법(Iterative Method)와 비반복법(Non-iterative Method)으로 구분할 수 있다. 이 중 반복법의 경우 식(1)의 비선형 공선조건 방정식을 선형화 시킨 후, Newton 방법을 적용하여 해를 구하는 방법이다[4]. 미지수가 6개이므로 해를 구하기 위해서는 최소 3개의 기준점 정보가 있어야 하며, 4개 이상일 경우 최소제곱법을 이용하여 해의 정확도를 높일 수 있다. 그렇지만 이 방법은 적절한 초기값의 설정이 필요하다. 초기값을 설정하기 위하여 Liu 등은 DLT(Direct Linear Transformation)를 사용하였는데[5], 카메라 렌즈 왜곡이 심하지 않은 범위에서 간편하게 사용할 수 있다. 그러나, 이 방법의 경우 DLT 매개변수의 수가 11개이므로 초기값 계산을 위해 최소 6개의 기준점 데이터가 필요하다는 것과 렌즈 왜곡이 심할 경우 반복 계산 알고리즘을 도입해야 하므로 복잡해진다는 단점이 있다. 초기값의 설정이 필요없는 다른 방법으로 Easa는 공선조건 방정식을 최적화 문제로 변환한 후 유전 알고리즘을 적용하여 해를 구하기도 하였으며[6], Zeng 등은 코사인 정리를 이용하여

피사체의 각 기준점과 카메라와의 거리를 구하고, Rodrigues 행렬 기반의 회전행렬을 구하여 카메라의 자세와 위치를 결정하는 알고리즘을 개발하였다[7].

카메라 포즈 예측을 위한 각 기법에서 공통적으로 중요한 사항은 투영중심점(Perspective Center) 및 피사체 기준점을 꼭지점으로 할 때 만들어지는 사면체(예를 들어 3개의 기준점일 경우)의 형태가 정방형에 가까울 때, 좀 더 정확한 포즈 예측이 가능하다는 점이다. 안전분리 비행 시험에서는 이점을 고려하여 기준점을 분포시킬 수 있도록 하였다.

2.3 두 좌표계간의 상대 위치와 자세 해석 (6 자유도 해석)

한대의 카메라에 찍힌 움직이는 두 좌표계의 기준점들을 이용해서 두 좌표계 간의 상대적인 위치와 자세를 구할 수 있다. 편의상 두 좌표계를 항공기 좌표계와 외부장착물 좌표계로 구분한다. 항공기 좌표계 및 외부장착물 좌표계에 대하여 식(5), (6)과 같이 각각 카메라의 포즈를 예측한 후, 각 좌표계에서 공통되는 카메라의 위치 \mathbf{x}' 를 소거하여 식 (7)을 유도하게 된다[8].

$$\mathbf{X} = \mathbf{X}_0 + \boldsymbol{\mu} \cdot \mathbf{R}_A \cdot \mathbf{x}' \quad (5)$$

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}_0 + \boldsymbol{\mu} \cdot \mathbf{R}_s \cdot \mathbf{x}' \quad (6)$$

$$\mathbf{X} = \mathbf{X}_0 + \mathbf{R}_A \cdot \mathbf{R}_s^{-1}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0) \quad (7)$$

여기서, \mathbf{X}_0 는 항공기 좌표계에 대한 카메라의 위치 벡터, \mathbf{x}_0 는 장착물 좌표계에 대한 카메라의 위치 벡터이며, $\mathbf{R}_A, \mathbf{R}_s$ 는 항공기 좌표계 및 장착물 좌표계에서 카메라의 자세를 정의하는 회전행렬을 각각 의미한다. 또한 식 (7)을 통해 최종적으로 구해지는 \mathbf{X} 는 장착물 좌표계 상의 점 \mathbf{x} 가 항공기 좌표계 상으로 변환된 좌표를 의미한다. 고속카메라 영상의 경우에는 매 frame마다 식 (7)을 적용하여 두 좌표계간 시간에 따른 상대적인 위치와 자세를 구할 수 있다.

III. 분리 비행시험에서의 사진계측

3.1 사진계측 요구조건

MIL-HDBK-1763, Appendix B. TEST 271.2 Data requirements에는 사진계측의 요구조건으로 “항공기의 파일런(Pylon)에 접촉되어 있는 상태부터 항공기 유동장을 빠져 나갈 때 까지(대략

20 ft) 촬영할 수 있어야 한다.”라고 기술되어 있다[1].

이를 바탕으로 안전분리 비행시험에서의 분리 안전성 확인과 분리 궤적 분석을 위한 촬영범위, 고속카메라 셔터 속도, 카메라 수에 대한 요구조건을 다음과 같이 설정하였다.

- 촬영범위 : 비행시험 전에 수행한 분리해석 결과를 바탕으로 항공기 장착 상태에서 하방으로 15 ft, 후방으로 9.6 ft 이상을 촬영할 수 있어야 하며, 항공기 및 외부장착물에 부착된 궤적분석용 표적을 동시에 촬영할 수 있어야 한다.
- 셔터속도 200 frames/sec 이상이어야 한다.
- 카메라 개수 : 한 대의 카메라에 찍힌 영상을 이용하여 궤적분석을 수행하나, 카메라의 고장, 노출문제, 기상 등으로 인한 화질저하 등 비행시험에서 발생할 수 있는 예상치 못한 상황을 대비하여 두 대 이상을 추천한다.

3.2 카메라 설치

비행시험 계측팀에서는 사진계측 요구조건을 만족시킬 수 있는 고속카메라를 선정하였다. 선정된 고속카메라는 초점거리 6.5mm, 이미지 센서의 크기 17.6mm × 13.2mm, 해상도(Resolution) 800 × 600 pixels에 셔터속도는 500 frame/sec이다. 또한, 운용중인 항공기에 장착 가능한 외장형 영상포드(Pod)를 개발하여, 선정된 카메라를 포드 내에 장착하였다[9]. Fig. 2에 F-4 항공기에 장착된 외장형 영상 포드를 나타내었다.

3.3 카메라 포즈 예측을 위한 기준점 설정

카메라 포즈를 예측하기 위해서는 피사체 좌표계 기준으로 기준점의 좌표값을 알고 있어야 한다. 포즈 예측의 정확도는 기준점의 공간적인 분포, 카메라 및 피사체 좌표계상에서의 좌표 정확도에 영향을 받는다. 따라서, 비행시험 전에 수행했던 분리해석 결과로부터 분리 운동의 경향을 파악한 후 기준점을 분포시켰다. 또한, 카메라에



Fig. 2. Camera for Photogrammetry

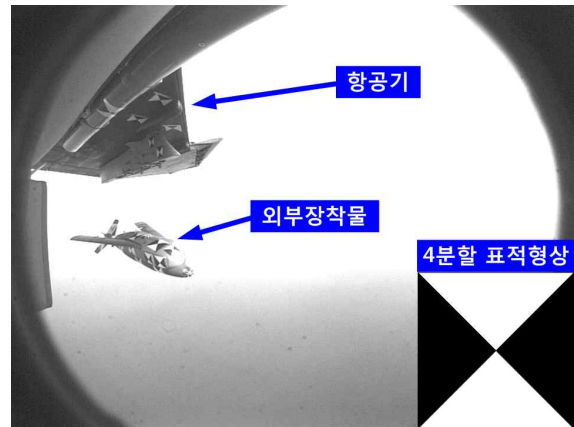


Fig. 3. Control Points Position and Quadrant Symmetry Target

찍힌 영상으로부터 기준점의 좌표를 추출할 때, 기준점을 식별하기 쉽도록 4분할 형태의 표적 (Quadrant Symmetry Target)을 부착했으며, Inboard Pylon 하방 10~15 ft 에서 표적의 크기가 10 pixel 이상이 되도록 표적의 크기를 정하였다. Fig. 3에 4분할 형태의 표적과 함께 카메라에서 촬영한 기준점들을 나타내었다. 초점거리가 짧고 화각이 넓은 광각렌즈의 사용으로 가장자리가 심하게 왜곡되어 있다.

3.4 렌즈 보정

Figure 3과 같은 렌즈 왜곡 현상을 AICON S/W[3]를 이용하여 보정하였다. AICON S/W로부터 식 (4)의 사진주점, 초점거리 및 렌즈왜곡 보정항의 계수들을 구하게 된다. Figure 4에는 AICON을 이용하여 렌즈를 보정하는 절차를 간략하게 도시하였으며, 여기에는 보정판 (Calibration Board) 촬영을 위한 7개의 기준 위치를 함께 나타내었다. 보정결과는 Table 1에서 확인할 수 있다.

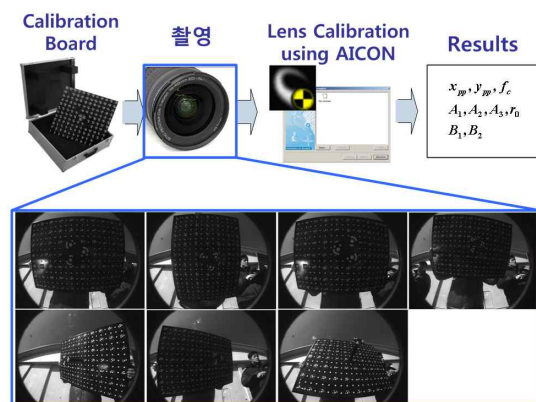


Fig. 4. Lens Calibration Procedure

Table 1. Lens Calibration Results

$x_{pp} = -0.39682$, $y_{pp} = -0.22849$, $f_c = 5.46185$
$A_1 = -0.00746$, $A_2 = 4.4593e-5$, $A_3 = 0.0$
$r_0 = 6.6$, $B_1 = -1.2443e-5$, $B_2 = -0.00014764$

IV. 6자유도 분리궤적 및 분리안전성 분석

4.1 6자유도 분리궤적분석

비행시험에서 한 대의 카메라(Single Camera)로 촬영한 고속카메라 영상을 이용하여 항공기에서 분리되는 외부장착물의 6자유도 분리궤적을 해석하였다. 2.3절에서 기술한 바와 같이 분리궤적이란 외부장착물의 항공기좌표계에 대한 상대적인 자세와 위치를 의미하며, 분리궤적의 해석에는 사진계측 S/W인 TrackEye[10]를 사용하였다. TrackEye는 고속카메라 영상, 렌즈보정 파일, 항공기와 외부장착물에 부착된 표적(기준점) 좌표를 입력으로 6자유도 궤적을 해석한다. 카메라 포즈 예측에는 반복법을 이용하며, 이때 초기값은 사용자가 직접 입력하거나, 비반복법으로 설정한다. TrackEye를 이용한 궤적해석 절차를 Fig. 5에 나타내었다.

1번 Load Image에서는 고속카메라 영상을 읽어 들인 후 기준시간에 대한 각 frame별 시간을 해석한다. 2번 Tracking에서는 각 좌표계에서의 기준점 좌표를 입력으로 각 기준점을 카메라 좌표계 값으로 변환시켜준다. 궤적분석의 효율성을 감안하여 Fig. 3과 같이 자동추적(Auto Tracking)에 용이한 4분할 형태의 표적으로 기준점을 식별할 수 있도록 하였다. 기준점의 카메라 좌표값은 궤적의 오차에 큰 영향을 미치므로, 실제로는 기준점의 추적에 매 frame별로 위치를 확인해 가며 추적하는 반자동 추적 기법을 사용하였다. 3번 Distortion Correction에서는 렌즈보정 결과 (Table 1) 파일을 읽어 들여 렌즈왜곡 효과를 보

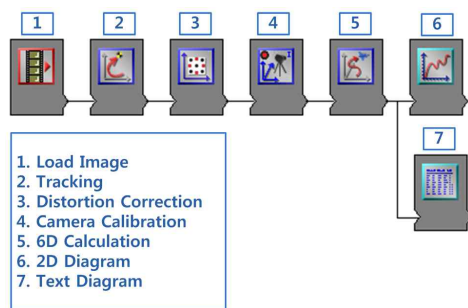


Fig. 5. 6DOF Procedures of TrackEye[10]

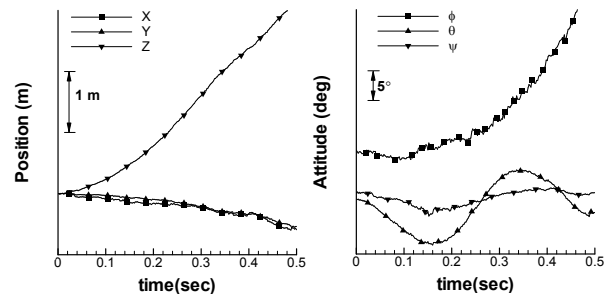


Fig. 6. Position and Attitude of Separated Store with respect to Aircraft

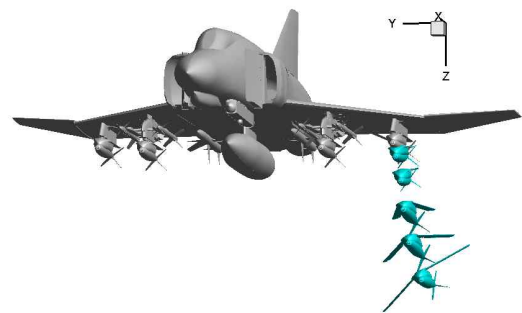


Fig. 7. Separation Trajectory of Store

정한다. 4번 Camera Calibration에서는 항공기 좌표계 내에서 카메라의 위치와 자세를 계산하고, 이를 바탕으로 5번 6D Calculation에서 외부장착물의 분리궤적을 계산하게 된다. 1번에서 5번까지에 대한 모든 준비를 완료한 후에 2번 Tracking에서 항공기 및 외부장착물의 각 기준점들을 추적하여 궤적을 계산하며, 6번, 7번의 Diagram에서 궤적분석결과를 확인할 수 있다.

Figure 6에 사진계측 S/W TrackEye를 이용하여 분석한 분리궤적을 0~0.5 sec 까지 나타내었다. 이는 F-4 항공기 왼쪽 날개 Outboard Pylon에서 분리되는 외부장착물의 분리궤적이며, 이를 재 구성해 보면 Fig. 7과 같다.

4.2 분리 궤적 민감도 분석

사진계측을 이용한 6자유도 분리궤적 해석의 오차는 카메라 포즈 예측의 오차에서 발생하게 된다. 카메라 포즈 예측에서 오차를 발생시킬 수 있는 요소는 초점거리, 렌즈 왜곡 등 카메라 변수, 피사체(항공기 및 외부장착물) 및 카메라 좌표계에서 측정된 기준점 좌표의 정확도, 그리고 피사체의 기하학적 형상에 따른 기준점의 분포 등이다. 이 요소들은 카메라 포즈 예측을 위한 입력변수이며, 이를 Table 2에 요약하였다. Table 2의 데이터는 실제 안전분리 비행시험 또는 6자

Table 2. Input Variables Uncertainty

입력변수		불확실성
영상 좌표	$[x_i, y_i]$	± 1 pixel
피사체 좌표	$[X_i, Y_i, Z_i]$	± 1 mm
카메라 변수	f_c	± 0.0076 mm
	x_{pp}	± 0.0062 mm
	y_{pp}	± 0.0092 mm
	A_1	± 0.0002756
	A_2	$\pm 4.9424\text{E-}06$
	B_1	$\pm 4.5761\text{E-}05$
	B_2	$\pm 5.1717\text{E-}05$

유도 분리궤적 해석 과정에서 발생될 수 있는 입력변수의 불확실성을 경험에 의해 추정된 값이다. 불확실한 입력변수로 인해 발생하는 6자유도 분리궤적 오차를 실제와 유사하게 분석하기 위해서는 모든 입력변수들을 동시에 고려하여야 한다. 본 연구에서는 이러한 분석에 앞서 각 입력변수들이 6자유도 분리궤적에 미치는 영향을 분석하기 위하여 Table 2에 요약된 각 입력변수들을 독립적으로 변화시켜가며 분리궤적에 미치는 민감도를 분석하였다.

TrackEye를 이용한 궤적해석에서 4분할 표적(Fig. 3)에 대한 자동 또는 반자동 추적에 의해 영상좌표가 미세하게 변화될 수 있다. 그러므로 정상적인 표적 추적을 통한 분리궤적 해석에서 발생할 수 있는 궤적 표본 표준편차(Sample Standard Deviation)의 최대값을 5회의 반복적인 해석을 통해 분석하였으며, Table 3에 요약하였다. 이때, 고속 영상의 각 frame별로 총 5~6개의 표적을 추적하였으며, 정상적인 추적 과정에서는 0.2 pixel 이하의 편차가 발생하였다. 이 편차로 인한 위치 및 자세각의 표본 표준편차는 최대 20mm, 1.4도이다.

Table 4~6에는 Table 2의 각 입력변수에 따른 분리궤적의 최대 편차를 요약하였다. 영상좌표 및 피사체 좌표에서 아래첨자 1은 기준점 1번을 의미하며, 항공기 기준점 좌표 1개의 불확실성에서 오는 분리궤적의 편차이다. 외부장착물의 경

Table 3. Maximum Sample Standard Deviation of Separation Trajectory in Normal Tracking

Unit : m(position), deg(attitude)

구 분	ΔX	ΔY	ΔZ	$\Delta\phi$	$\Delta\theta$	$\Delta\psi$
반복성	0.005	0.009	0.020	1.388	0.585	0.213

Table 4. Maximum Trajectory Deviations due to Image Coordinates Uncertainties

Unit : m(position), deg(attitude)

구분	ΔX	ΔY	ΔZ	$\Delta\phi$	$\Delta\theta$	$\Delta\psi$
$[x_1, y_1]$	0.012	0.001	0.012	0.506	0.297	0.135

Table 5. Maximum Trajectory Deviations due to Object Coordinates Uncertainties

Unit : m(position), deg(attitude)

구분	ΔX	ΔY	ΔZ	$\Delta\phi$	$\Delta\theta$	$\Delta\psi$
$X_1 + 1mm$	0.009	0.004	0.005	0.077	0.107	0.011
$Y_1 + 1mm$	0.003	0.005	0.005	0.270	0.114	0.010
$Z_1 + 1mm$	0.006	0.004	0.003	0.099	0.099	0.005
합계	0.018	0.013	0.013	0.446	0.320	0.026

Table 6. Maximum Trajectory Deviations due to Camera Parameter Uncertainties

Unit : m(position), deg(attitude)

구분	ΔX	ΔY	ΔZ	$\Delta\phi$	$\Delta\theta$	$\Delta\psi$
Camera Parameter	0.022	0.075	0.009	1.58	0.39	0.68

우, 항공기 기준점에 대한 영상좌표 1 pixel의 효과는 장착상태에서는 그대로 적용될 수 있으나, 분리 후 항공기에서 멀어지면 증가된 거리의 비율 만큼을 고려하여야 한다. 여기서 영상 좌표의 1 pixel은 기준점의 정상적인 추적에서 발생할 수 있는 편차의 5배에 해당하는 보수적인 값이나, 5개 이상의 기준점으로 최소제곱법을 이용하여 카메라의 포즈를 예측하므로 5배 보다는 적은 영향을 미칠 것으로 판단된다. 또한, Table 5의 합계는 X, Y, Z 각 방향의 오차가 분리궤적에 선형적으로 작용한다고 가정할 때 편차의 크기를 확인하기 위하여 제시한 값이다.

민감도 분석 결과, 사진계측 기법을 안전분리 비행시험에서의 분리궤적 분석에 적용할 때 고려할 수 있는 입력변수 중, 카메라 변수에 의한 편차가 가장 크게 나타났으며, 위치 및 자세각의 최대 편차는 75mm, 1.58도이다.

4.3 분리안전성 분석

안전분리란 항공기에서 분리되는 외부 장착물이 예상치 못한 급격한 거동을 하지 않고, 항공기와 충돌 없이 분리되는 것을 의미한다. 일반적으로 안전분리 판단의 기준변수로는 항공기와 분리되는 외부장착물간의 최소거리를 나타내는 Miss Distance를 사용하며, MIL-HDBK-1763[1]에서 제시하는 안전분리 기준은 Miss Distance 6

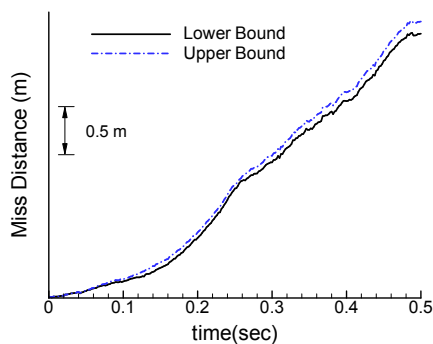


Fig. 8. Miss Distance : Safe Separation

inch(15.24 cm) 이상이다. 분리 후 시간에 따라 Miss Distance를 계산한 후, Miss Distance가 계속 증가하면 안전분리라고 판단할 수 있다. 그러나 Miss Distance가 증가하다가 감소하는 경우는 분리되는 외부장착물이 항공기 쪽으로 접근한다는 것을 나타내며, Miss Distance가 계속 감소하여 0이 되면 항공기와의 충돌을 의미한다. Miss Distance가 감소하다가 다시 증가할 때, 그 최소 거리를 Critical Minimum이라고 하며, 이때 Critical Minimum이 6 inch 이상이면 MIL-HDBK-1763의 기준에 따라 안전분리로 판단할 수 있다.

사진계측으로 분석한 분리궤적을 이용하여 Miss Distance를 계산한 후, Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8은 민감도가 가장 큰 카메라 변수에 의한 궤적의 편차로부터 도출된 값이다. 6자유도 궤적의 최대, 최소값으로부터 총 2^6 개의 궤적 조합을 만든 후 Miss Distance를 계산하였으며, Miss Distance의 최대, 최소 경계를 나타내었다. 그림에서 Miss Distance가 시간에 따라 계속 증가하고 있으므로 외부장착물은 안전하게 분리된다는 것을 알 수 있다.

V. 결 론

안전분리 비행시험에서 분리되는 외부장착물의 분리특성을 사진계측 기법을 이용하여 분석하였다. 한 대의 카메라를 사용하여 6자유도를 해석할 수 있는 기법을 적용하였으며, 사진계측의 이론적인 배경과 MIL-HDBK-1763에서 제시하는 내용을 토대로 계측 요구조건을 정립하고 비행시험에 적용하여 분리궤적을 추출하였다. 사진계측의 오차에 영향을 주는 입력변수들의 불확실성을 경험에 의해 추정하였으며, 각각의 입력변수들에 대한 민감도 분석결과를 비교하였다. 본 연구에서는 사진계측 입력변수 중, 카메라 변수에 의한 편차가 가장 크게 나타났으며, 위치 및 자세각의 최대 편차는 75mm, 1.58도이었다. 6자유도 궤적

의 최대, 최소값으로부터 총 2^6 개의 궤적 조합을 만든 후 Miss Distance를 계산하였으며, Miss Distance의 최대, 최소 경계로부터 분리 안전성을 확인하였다. 본 연구에서 경험에 의해 추정된 사진계측 입력변수의 오차범위와 2^6 개의 궤적 조합으로부터 분리안전성을 예측하는 기법은 향후 유사한 안전분리 비행시험에서 분리 안전성 분석에 유용하게 사용될 수 있을 것으로 기대한다.

References

- 1) Anonymous, "Aircraft/Stores Compatibility: Systems Engineering Data Requirements and Test Procedures," MIL-HDBK-1763, 1998. 6.
- 2) In Mo Kang, Sang-Jin Kim, "A Study on the Store Separation Procedure of the Korean Fighter," ADD Research&Development Report, MADC-401-050595, 2005.
- 3) Robert Godding, "Geometric Calibration and Orientation of Digital Imaging Systems," AICON 3D Systems GmbH.
- 4) Paul R. Wolf, Bon A. Dewitt, *Elements of Photogrammetry with Applications in GIS*, McGraw-Hill, 2000.
- 5) Tianshu Liu, L. N. Cattafesta III, R. H. Radeztsky and A. W. Burner, "Photogrammetry Applied to Wind-Tunnel Testing," *AIAA Journal*, Vol. 38, No. 6, 2000, pp. 964~971.
- 6) Said M. Easa, "Space Resection in Photogrammetry Using Collinearity Condition without Linearisation," *Survey Review*, Vol. 42, No. 315, 2010, pp. 40~49.
- 7) Huaien Zeng, Qinglin Yi, Yi Zheng, "A Non-iterative Algorithm to Determine Camera Position and Orientation," *Key Engineering Materials*, Vol. 500, 2012, pp. 409~415.
- 8) Thomas Luhmann, "Precision Potential of Photogrammetric 6DOF Pose Estimation with a Single Camera," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 64, 2009, pp. 275~284
- 9) Hyeong-Seop Yeom, Jong-Hoon Oh and Duck-Yong Sung, "Development of the External Instrumentation System of a Fighter Aircraft for Flight Test," *Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 38, No. 9, 2010. pp.907~913.
- 10) <http://www.imagesystems.se/image-systems-motion-analysis/products/track-eye.aspx>