

論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 41(5), 350-356(2013)

DOI: <http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2013.41.5.350>

사진계측기반 6자유도 포즈 예측의 오차 정량화

김상진*, 유홍철, 류태규

Error Quantification of Photogrammetric 6DOF Pose Estimation

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

Agency for Defense Development

ABSTRACT

Photogrammetry has been widely used for measuring the important physical quantities in aerospace areas because it is a remote and non-contact measurement method. In this study, we analyzed photogrammetric error which can be occur in six degrees of freedom(6DOF) analysis among coordinates systems with single camera. Error analysis program were developed, and validated using geometric problem converted from imaging process. We analogized that the statistic from estimated camera pose which is need to 6DOF analysis is normally distributed, and quantified the photogrammetric error using estimated population standard deviation.

초 록

먼거리에서 접촉하지 않고 측정할 수 있다는 장점으로 인해 사진계측은 항공분야에서도 널리 활용되고 있다. 본 연구에서는 한 대의 카메라로 6자유도 해석을 수행하는 사진계측에서 발생할 수 있는 오차를 분석하였다. 사진계측의 오차 분석 프로그램을 개발하였으며, 사진계측 문제를 공선조건에 기반한 기하학적 문제로 변환하여 프로그램을 검증하였다. 각 좌표계간 6자유도 해석을 위해 필요한 카메라 포즈에 대한 통계량은 정규분포한다는 것을 수치실험을 통해 유추할 수 있었으며, 모표준편차를 이용하여 사진계측의 오차를 정량화하였다.

Key Words : Photogrammetry(사진계측), 6DOF(6자유도), Pose Estimation(포즈 예측), Monte Carlo Method(몬테카를로 방법), Error Quantification(오차정량화)

1. 서 론

사진계측(Photogrammetry)이란 2차원 사진에서 좌표를 추출하고 이를 3차원 피사체 좌표계에 사상(mapping) 시키는 기법이다. 사진계측의 기본 문제는 2차원 사진과 3차원 피사체의 관계를 찾는 데 있으며, 이 관계가 정립된 이후에는 사진

으로부터 피사체에 대한 기하학적 정보와 물리량을 얻을 수 있다. 사진계측은 접근하기 힘든 물체나 빠르게 움직이는 물체들을 계측하는데 유용한 방법이며, 1990년대 이후 전자광학과 컴퓨터의 획기적인 발전에 힘입어 일반 카메라로도 계측을 할 수 있는 수준이 되었다.

먼거리에서 접촉하지 않고 측정할 수 있다는

† Received: February 8, 2013 Accepted: April 19, 2013

* Corresponding author, E-mail : bipoo@add.re.kr<http://journal.ksas.or.kr/>

pISSN 1225-1348 / eISSN 2287-6871

사진계측의 장점으로 인해 항공분야에서도 풍동 시험 및 비행시험에서 비행체의 자세와 위치, 공탄성학적 변형량 등의 측정에 널리 활용되고 있다[1]. 특히, 비행체의 자세와 위치 측정의 관점에서 항공기에서 분리되는 외부장착물의 분리특성을 파악하는데 사진계측은 대단히 유용한 방법이다. 6자유도의 분리 특성 분석을 위한 사진계측에는 한 대의 카메라(Single Camera)를 사용할 수도 있고, 다수의 카메라를 사용할 수도 있으나, 고속카메라가 고가라는 점, 다수의 카메라 장착 위치를 확보하기 어렵다는 점 등, 카메라 비용과 운용 측면을 고려할 때 한대의 카메라를 사용할 수 밖에 없는 상황이 자주 발생한다.

본 연구에서는 안전분리 비행시험 또는 풍동시험에서 한 대의 카메라로 분리특성을 해석할 경우를 가정하여, 여러 좌표계간 상대적인 자세와 위치를 구할 때 발생할 수 있는 사진계측의 오차를 분석하였다. 한 대의 카메라를 이용하여 6자유도 해석을 할 때는 각 좌표계에서 카메라의 자세와 위치를 구하는 카메라 포즈 예측(Pose Estimation)이 선행되어야 한다. 따라서, 포즈 예측 및 6자유도 분석 프로그램을 개발하였으며, 이 프로그램을 공선조건(Collinearity Condition)에 기반한 기하학적 문제로 변환하여 검증하였다. 또한, 포즈 예측의 불확실한 입력으로 인한 6자유도 해석의 오차를 몬테카를로(Monte Carlo) 시뮬레이션을 수행하여 정량화 하였다.

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 렌즈를 한 점으로 모델링한 투영 중심점(Perspective Center)을 원점으로 하는 좌표계로, xy 평면은 사진이 찍히는 CCD 또는 필름 평면과 평행하다.

피사체 및 카메라 좌표계를 Fig. 1에 나타내었

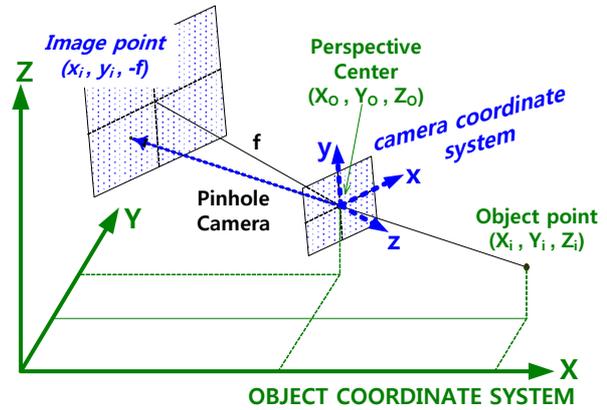


Fig. 1. Coordinate systems and imaging process

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

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, $[X_o, Y_o, Z_o]$ 는 피사체 좌표계 상의 투영중심점 좌표를 각각 의미한다. 이상적인 카메라 모델에서는 공간상의 임의의 점과 그에 대응하는 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.

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

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

$$r_{11} = \cos\kappa \cos\phi, \quad r_{12} = -\sin\kappa \cos\phi, \quad r_{13} = \sin\phi, \\ r_{21} = \sin\kappa \cos\omega + \cos\kappa \sin\phi \sin\omega,$$

$$\begin{aligned}
 r_{22} &= \cos \kappa \cos \omega - \sin \kappa \sin \phi \sin \omega, \\
 r_{23} &= -\cos \phi \sin \omega, \\
 r_{31} &= \sin \kappa \sin \omega - \cos \kappa \sin \phi \cos \omega, \\
 r_{32} &= \cos \kappa \sin \omega + \sin \kappa \sin \phi \cos \omega, \\
 r_{33} &= \cos \phi \cos \omega
 \end{aligned}$$

식 (1)에서 x_{pp}, y_{pp} 는 사진 주점의 좌표이며, dx, dy 는 왜곡 보정항, $-f_c$ 는 보정된 초점거리이다. 상대적으로 왜곡효과가 큰 렌즈 왜곡에 대한 보정항만 고려한다면, 보정항은 일반적으로 식 (3)과 같이 대칭 및 비대칭 왜곡에 대한 보정항으로 구성된다[2].

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

여기서,

$$\begin{aligned}
 dx_{sym} &= x \cdot dr_{sym}/r, \quad dy_{sym} = y \cdot dr_{sym}/r \\
 dr_{sym} &= A_1(r^3 - r_0^2 r) + A_2(r^5 - r_0^4 r) + A_3(r^7 - r_0^6 r) \\
 dx_{asym} &= B_1(r^2 + 2x^2) + 2B_2xy \\
 dy_{asym} &= B_2(r^2 + 2y^2) + 2B_1xy \\
 r^2 &= (x - x_{pp})^2 + (y - y_{pp})^2 \quad (4)
 \end{aligned}$$

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

2.2 카메라 포즈 예측 방법

카메라 포즈(Pose) 예측이란 피사체 좌표계상에서 카메라의 자세와 위치를 결정하는 6개의 미지수($\omega, \phi, \kappa, X_O, Y_O, Z_O$)를 찾는 것을 의미하며, 후방교선법(Space Resection)이라고도 불리어진다. 좌표값을 알고 있는 피사체 좌표계의 기준점과, 이에 대응되는 카메라 좌표계의 값으로부터 카메라 포즈를 구할 수 있다. 가장 잘 알려진 방법이 식(1)의 비선형 공선조건 방정식을 선형화시킨 후, Newton 방법을 적용하여 해를 구하는 방법이다[3]. 미지수가 6개 이므로 해를 구하기 위해서는 최소 3개의 기준점 정보가 있어야 하며, 4개 이상일 경우 최소제곱법을 이용하여 해의 정확도를 높일 수 있다. 그러나 이 방법은 Newton 방법에 기초한 방법이므로, 초기값에 따라 수렴된 해를 구할 수도 있고, 발산하기도 한다. 초기값을 설정하기 위하여 Liu 등은 DLT(Direct Linear Transformation)를 사용하였는데[4], 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 복잡해진다 단점이 있다. 초기값의 설정이 필요없는 다른 방법으로 Easa는 공선조건 방정식을 최적화 문제로 변환한 후 유전 알고리즘을 적용하여 해를 구하기도 하였으며[5], Zeng 등은 코사인 정리를 이용하여 피사체의 각 기준점과 카메라와의 거리를 구하고, Rodrigues 행렬 기반의 회전행렬을 구하여 카메라의 자세와 위치를 결정하는 알고리즘을 개발하였다[6].

본 연구에서는 선형화된 공선방정식을 Newton 방법으로 풀어서 카메라 포즈를 예측하는 프로그램을 Fortran90을 이용하여 작성하였으며, 이를 두 좌표계간 상대적인 자세와 위치를 구하는데 사용하였다.

2.3 두 좌표계간의 상대 위치와 자세 해석 (6 자유도 해석) 방법

한 대의 카메라에 찍힌 움직이는 두 좌표계의 기준점들을 이용해서 두 좌표계 간의 상대적인 위치와 자세를 구할 수 있다. 편의상 두 좌표계를 기준 좌표계와 움직이는(이동) 좌표계로 구분한다. 기준좌표계 및 이동 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[7].

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

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

$$\mathbf{X} = \mathbf{X}_0 + \mathbf{R}_{ref} \cdot \mathbf{R}_{mov}^{-1} (\mathbf{x} - \mathbf{x}_0) \quad (7)$$

여기서, \mathbf{X}_0 는 기준좌표계에 대한 카메라의 위치 벡터, \mathbf{x}_0 는 이동 좌표계에 대한 카메라의 위치 벡터이며, $\mathbf{R}_{ref}, \mathbf{R}_{mov}$ 는 기준좌표계 및 이동 좌표계에서 카메라의 자세를 정의하는 회전행렬을 각각 의미한다. 또한 식 (7)을 통해 최종적으로 구해지는 \mathbf{X} 는 이동 좌표계 상의 점 \mathbf{x} 가 기준 좌표계 상으로 변환된 좌표를 의미한다. 항공기 외 부장착물 분리를 고속카메라로 촬영한 영상과 같은 동영상의 경우에는 매 frame마다 식 (7)을 적용하여 두 좌표계 간의 시간에 따른 상대적인 위치와 자세를 구할 수 있다.

본 연구에서는 두 좌표계에서의 카메라 포즈를 앞 절에서 기술한 포즈예측 프로그램으로 각각 구한 후, 식 (7)을 이용하여 두 좌표계간의 6자유도(자세, 위치)를 구할 수 있도록 하였다.

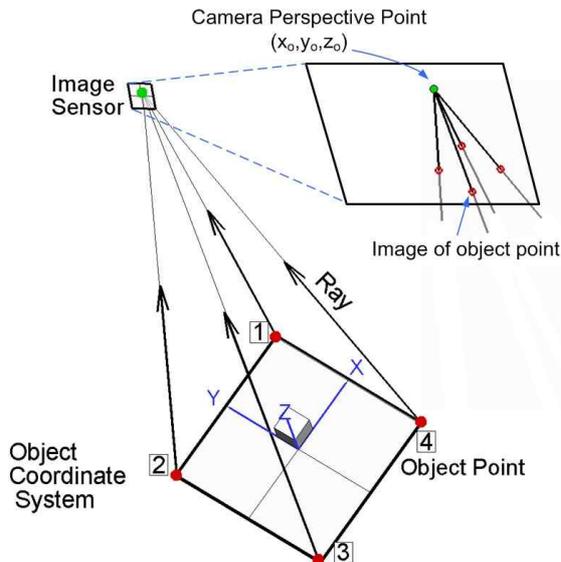


Fig. 2. Geometry of imaging process

III. 6자유도 포즈 예측 프로그램의 검증

카메라 좌표계에서 사진주점이 사진의 정 중앙에 있고 이미지에 대한 왜곡이 없다고 가정하면, 공선조건을 기반으로 하는 카메라의 포즈 예측 문제를 Fig. 2와 같이 단순한 기하학적 문제로 바꿀 수 있다. Fig. 2는 평판의 네 꼭지점(①,②,③,④)에서 나온 빛(Ray)이 카메라 투영중심점 O에 모이는 것을 도시한 그림으로 기하학적으로 피라미드 형태를 띠고 있다. 이 빛은 투영중심점에서 초점거리 f 만큼 떨어진 영상평면을 통과하므로, 영상평면을 통과하는 빛의 좌표는 카메라 좌표계에서 $[x_i, y_i, -f]$ 이 된다. 따라서 개발된 코드 검증을 위하여 카메라의 포즈 예측 문제를 기하학적 문제로 바꾸어 다음과 같이 설정하였다.

3.1 카메라 포즈 예측 결과

가로, 세로의 길이가 각각 300mm인 정사각 평판에 대한 사진을 초점거리 8mm인 카메라로 찍었을 때, 평판에 대한 카메라의 자세와 위치를 구하여 개발한 프로그램을 검증하였다. 평평한 바닥에 평판을 놓고 피사체 좌표계, 즉, 평판의 중심에서 카메라를 Table 1의 값만큼 회전($\omega \rightarrow \phi \rightarrow \kappa$), 병진 시킨 후 평판을 찍었다고 가정할 때, 카메라 좌표계에서의 좌표값을 피사체 좌표값과 함께 나타내면 Table 2와 같다. 개발된 코드를 이용하여 카메라의 자세와 위치를 예측하였으며, 그 결과를 Table 3에 나타내었다. 예측결과는 Table 1의 실제 카메라의 포즈와 잘 일치하고 있다.

Table 1. Camera Pose

X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	ω (deg)	ϕ (deg)	κ (deg)
100	200	1200	10	25	40

Table 2. Camera and Object Coordinate of Control Points (Unit : mm)

No.	Object Coordinate			Camera Coordinate	
	X	Y	Z	x	y
1	150	150	0	1.91086	-4.18521
2	-150	150	0	0.278011	-2.53504
3	-150	-150	0	-1.1851	-4.15507
4	150	-150	0	0.338775	-6.09002

Table 3. Result of Pose Estimation

구분	예측결과
ω (deg)	10.00049
ϕ (deg)	25.00004
κ (deg)	39.99990
x(mm)	100.00134
y(mm)	199.99022
z(mm)	1200.00037

3.2 두 좌표계간의 6자유도(상대위치와 자세) 해석 결과

사진계측을 이용한 두 좌표계간 6자유도 해석의 검증과 동영상을 이용할 경우에 대한 이해를 돕기 위하여 Fig. 3과 같은 시나리오를 설정하였다. Fig. 3에서 기준좌표계를 나타내는 큰 평판과 카메라는 고정되어 있으며, 움직이는 좌표계를 나타내는 작은 평판을 1의 위치에서 3의 위치로

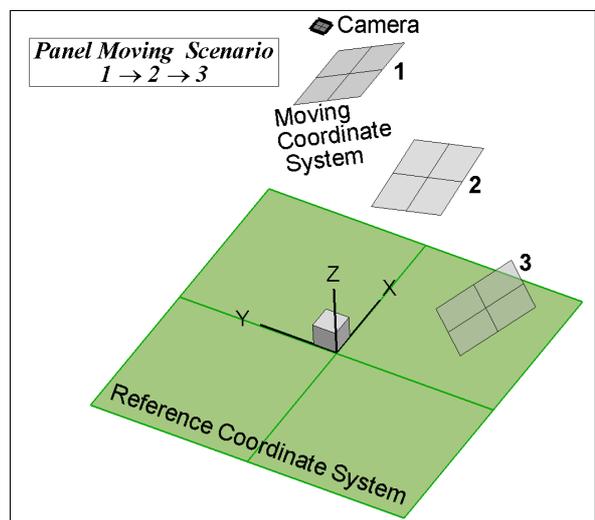


Fig. 3. Scenario for single camera 6DOF measurement

Table 4. Camera Pose in Moving Coordinate System

구분	Position		
	1	2	3
ω (deg)	30	20	10
ϕ (deg)	0	12.5	25
κ (deg)	0	0	40
x(mm)	0	50	100
y(mm)	0	100	200
z(mm)	200	700	1200

Table 5. Moving Panel 6D Information in Reference Coordinate system

ω (deg)	ϕ (deg)	κ (deg)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
-24.1677	-11.9523	-44.7915	41.3733	-563.849	418.167

옮겨가며 총 3장의 사진을 찍는다. 이 시나리오에서는 3장을 예로 들었지만, n 장의 영상에 대해서도 동일하게 적용할 수 있다.

기준좌표계에서 카메라의 자세 (ω, ϕ, κ)는 $(0, 0, 0)^\circ$ 이며, 위치 (X_O, Y_O, Z_O)는 $(0, 0, 1500)$ mm이다. 움직이는 좌표계에서의 카메라 위치와 자세는 평판의 각 위치별로 Table 4에 나타내었다. 여기서, 각 좌표계에서의 원점을 평판의 중심으로 가정한다. 평판이 3번 위치에 있을 때가 3.1 절의 예제와 동일한 문제이므로, 이 경우를 예로 들어 검증결과를 기술하고자 한다.

이동좌표계에 대한 카메라 포즈(Table 3)를 기준 좌표계에 대한 포즈로 변환해 주면, 기준 좌표계에 대한 이동 좌표계의 상대적인 자세와 위치를 구할 수 있다. 이때, 이동좌표계에 대한 카메라의 포즈예측 문제는 Fig. 2와 같은 기하학적 문제와 동일하므로, 카메라를 회전, 병진시킨다는 것은 피라미드 전체를 회전, 병진시킨다는 것을 의미한다. 즉, 피라미드 전체를 카메라 좌표계 기준으로 회전($-\kappa \rightarrow -\phi \rightarrow -\omega$) 시킨 후, 위치 $(0, 0, 1500)$ mm로 이동 시키면, 피라미드 밑면의 자세와 위치가 기준 좌표계에 대한 포즈가 되며 이를 Table 5에 나타내었다. Table 5는 이동 좌표계의 기준 좌표계에 대한 상대적인 위치와 자세를 나타내는 것으로, 이동 좌표계는 기준 좌표계에 대해 Table 5의 값만큼 회전 ($\omega \rightarrow \phi \rightarrow \kappa$)된 상태로 (X, Y, Z) 만큼 떨어져 있다는 것을 의미한다.

한편, 식 (7)에 각 회전행렬과 위치 벡터를 대입시키고 \mathbf{X} 를 계산하면 식(8)과 같다. 여기서, 기준좌표계에서 카메라의 자세는 $(0, 0, 0)^\circ$ 이므

로, \mathbf{R}_{ref} 는 단위행렬이 되며, 기하학적으로 회전, 이동시킨 결과와 비교하기 위한 위치가 이동좌표계의 원점이므로 \mathbf{x} 는 $(0, 0, 0)^T$ 가 된다. 계산 결과 \mathbf{X} 및 $\mathbf{R}_{ref} \cdot \mathbf{R}_{mov}^{-1}$ 행렬로부터 구한 자세각은 Table 5와 같다. 이로부터 두 좌표계간의 6자유도 해석 절차를 검증하였다.

$$\mathbf{X} = \mathbf{X}_O + \mathbf{R}_{ref} \cdot \mathbf{R}_{mov}^{-1} (\mathbf{x} - \mathbf{x}_O)$$

$$= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1500 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.69429 & -0.58261 & 0.42253 \\ 0.68926 & 0.70721 & -0.15743 \\ -0.20710 & 0.40053 & 0.89257 \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} 0 - 100 \\ 0 - 200 \\ 0 - 1200 \end{bmatrix} \quad (8)$$

IV. 6자유도 포즈 예측의 오차 분석

카메라 포즈 예측의 정확도는 초점거리, 렌즈 왜곡 등 카메라 변수의 함수이며, 카메라 좌표계 및 피사체 좌표계에서 측정된 좌표의 정확도, 그리고 피사체의 기하학적 형상에도 직접적인 영향을 받는다. 이와 같은 불확실한 입력 데이터가 각 좌표계에서의 카메라 포즈 예측과 두 좌표계간 자세와 위치의 정확도에 미치는 영향을 몬테카를로 방법을 이용하여 분석하였다.

4.1 몬테카를로(Monte-Carlo) 방법

몬테카를로 방법은 입력변수를 확률변수로 가정하고, 입력변수에 대한 무작위적인 표본을 추출한 뒤, 각 표본을 시뮬레이션 하여 그 결과를 통계적으로 분석하는 방법이다. 일반적으로 입력변수의 수가 많을 경우 효과적이며, 무작위적인 표본 추출에는 난수를 이용한다.

본 연구에서는 포즈예측의 오차를 분석하기 위하여 몬테카를로 시뮬레이션 프로그램을 Fortran90 으로 작성하였으며, 오차분석을 위한 입력변수를 Table 6과 같이 설정하였다. 각 입력변수의 불확실성은 Luhmann의 논문[7]에서 제시된 값을 이용하여 설정하였으나, 사진계측의 환경에 따라 달라질 수 있는 값이며, 렌즈보정과 관련된 식(3), (4)의 변수에 대한 불확실성도 추가될 수 있다.

Table 6. Input Variables and Variation

입력변수	불확실성
영상 좌표	$[x_i, y_i]$ ± 0.0017 mm
각 좌표계에서의 기준점 좌표	$[X_i, Y_i, Z_i]_{ref}$ $[X_i, Y_i, Z_i]_{mov}$ ± 0.1 mm
카메라 변수	f_c ± 0.0002 mm

균등하게 분포된 난수를 이용하여 각 표본에 대한 입력변수를 식 (9)와 같이 추출하였다.

$$x_{noisy} = x_{nominal} + (d_{max} - d_{min}) \cdot R_U \quad (9)$$

여기서, x_{noisy} 는 무작위적 입력변수, $x_{nominal}$ 는 기준입력변수, $d_{max} - d_{min}$ 는 입력변수 편차의 범위, R_U 는 0~1의 범위에 있는 균등한 분포 (Uniform Distribution)를 가지는 난수이다.

4.2 6자유도 포즈 오차 분석

4.2.1 표본수 선정

몬테카를로 방법에 적합한 표본 수를 결정하기 위하여 이동좌표계에서 카메라 포즈에 대한 수치 실험을 수행하였다. 표본수 결정을 위해서 점근적으로 카메라 포즈에 대한 표본 표준편차를 구했으며, Y 위치에 대한 표본 표준편차를 Fig. 4에 나타내었다. 5천개의 표본으로 총 5회의 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하였는데, 표본수가 3000개 이상이 되면 수렴하고 있다.

모집단의 평균을 식 (10)의 정밀도 지표 (Precision Index)를 이용하여 표본평균으로부터 예측하였다. 식 (10)에서 n 은 표본수, $t_{\alpha/2}$ 는 자유도가 $n-1$ 인 student t-분포의 임계값, s 는 표본 표준편차를 각각 나타내며, α 를 0.05로 하여 95% 신뢰도 구간을 가정하였다.

$$P_x = t_{\alpha/2} \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (10)$$

Table 7은 표본수 5천개 일 때의 평균과 정밀도 지표를 나타낸다. 카메라의 위치와 자세에 따라 영향성은 달라질 수 있겠으나, 카메라 포즈 중 y_0 에 대한 모평균을 추정해보면, y_0 의 모평균은 200.0895 ± 0.0905 내에 있다고 95% 확신할 수 있으며, 정밀도 한계는 0.0905로 최소~최대값 구간의 0.5% 수준임을 알 수 있다.

표본 표준편차의 수렴도와 정밀도 지표로부터 표본수 5천개가 카메라 포즈의 오차분석에 적합한 개수임을 확인하였다.

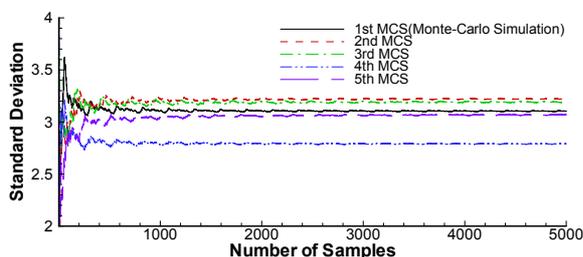


Fig. 4. Convergence of Standard Deviation of Camera Pose Y

Table 7. Estimation of Population Mean

포즈	평균	P_x	P_x/dx (%)
ω (deg)	9.99494	0.004404	0.50
ϕ (deg)	24.99694	0.003859	0.54
κ (deg)	40.00148	0.001318	0.55
x_0 (mm)	99.92923	0.086209	0.54
y_0 (mm)	200.0895	0.090459	0.49
z_0 (mm)	1199.988	0.025835	0.43

4.2.2 오차분석 방법

카이제곱분포(Chi square Distribution)를 따르는 식 (11)의 통계량에서, 모집단의 표준편차 σ 를 카메라 오차로 하였다. 이때 신뢰도 수준은 95%이다.

$$W = \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - \bar{x}}{\sigma} \right)^2 \quad (11)$$

여기서, n 은 표본수, \bar{x} 는 표본 평균(Sample Mean)을 의미한다.

이 분석의 전제조건은 불확실한 입력변수로 인한 카메라 포즈의 통계량이 정규분포하고 있어야 한다는 것이다. 카메라 포즈에 대한 통계량이 정규 분포하는지를 파악하기 위하여 표본수를 5천개에서 20만개까지 늘려가며 카메라 포즈의 분포를 파악하였다. Fig. 5에서 보여주고 있는 것과 같이 표본 개수가 20만개가 되더라도 정규분포하고 있지는 않지만, 표본수가 증가함에 따라 점차 정규분포에 가까워지고 있어 카메라 포즈에 대한 통계량은 정규분포 한다는 것을 유추할 수 있다.

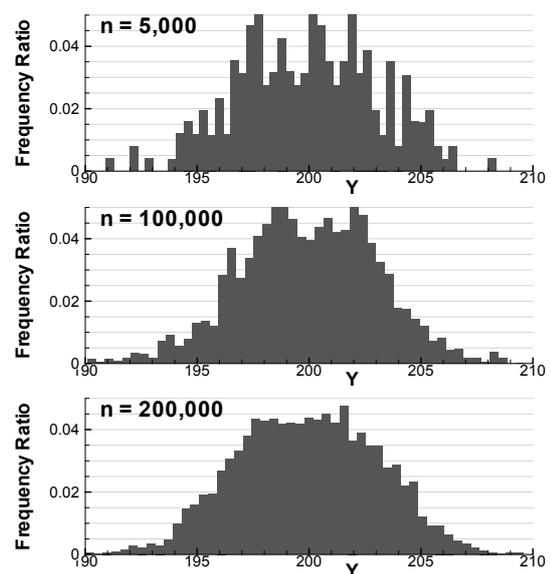


Fig. 5. Probability Distribution of Pose Y due to Number of Samples

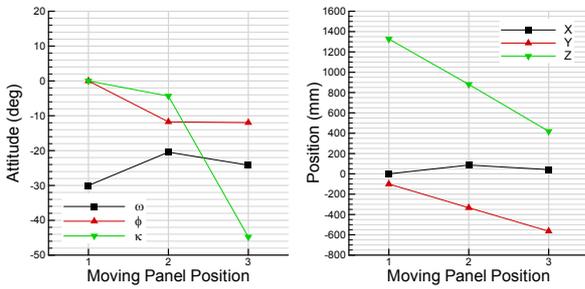


Fig. 6. Estimated 6D Pose

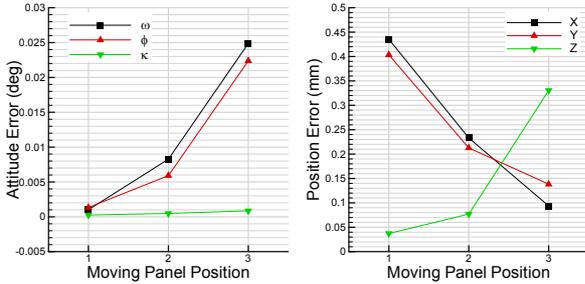


Fig. 7. Estimated 6D Pose Error

4.2.3 6자유도 오차분석

기준좌표계 위에서 이동 좌표계가 Fig. 3과 같이 이동할 때, 기준 좌표계에 대한 이동좌표계의 자세와 위치 오차를 분석하였다. 불확실한 입력 변수와 변수의 변화 범위는 Table 6과 같으며, 95% 신뢰도 구간을 가정하였다.

이동좌표계, 즉, 평판의 이동에 따른 자세와 위치의 모평균을 Fig. 6에 나타내었으며, Fig. 7에는 오차를 나타내었다. 자세 오차의 경우 최대 0.025도, 위치오차의 경우 최대 0.44 mm 정도로 예측되었다.

V. 결론

안전분리 비행시험 또는 풍동시험에서 한 대의 카메라로 분리특성을 해석할 경우를 가정하여, 여러 좌표계간 상대적인 자세와 위치를 구할 때 발생할 수 있는 사진계측의 오차를 분석하였다. 선형화된 공선방정식에 기반한 카메라 포즈 예측, 좌표계간의 6자유도 해석 및 오차분석을 위한 몬테카를로 시뮬레이션 프로그램을 각각 개발

하였으며, 사진계측 문제를 공선조건에 기반한 기하학적 문제로 변환하여 프로그램을 검증하였다. 각 좌표계간 6자유도 해석을 위해 필요한 카메라 포즈에 대한 통계량은 정규분포 한다는 것을 수치실험을 통해 유추할 수 있었으며, 표본으로부터 추정된 모표준편차로 사진계측의 오차를 정량화하였다. 본 연구의 방법은 사진계측을 기반으로 한 6자유도 해석 및 카메라 포즈 예측의 오차 정량화에 실용적으로 사용될 수 있을 것이다.

References

- 1) Tianshu Liu, Alpheus W. Burner, Thomas W. Jones, Danny A. Barrows, "Photogrammetric Techniques for Aerospace Applications," *Progress in Aerospace Sciences* 54, 2012, pp. 1~58.
- 2) Robert Godding, "Geometric Calibration and Orientation of Digital Imaging Systems," AICON 3D Systems GmbH.
- 3) Paul R. Wolf, Bon A. Dewitt, "Elements of Photogrammetry with Applications in GIS," McGraw-Hill, 2000.
- 4) 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.
- 5) Said M. Easa, "Space Resection in Photogrammetry Using Collinearity Condition without Linearisation," *Survey Review*, Vol. 42, No. 315, 2010, pp. 40~49.
- 6) 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.
- 7) 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.