

암반 사면 영상을 이용한 절리의 방향성 해석

김중훈, 김재동
강원대학교

1. 서론

암반 사면 굴착은 단계적으로 조사, 시험, 안정성 해석, 시공, 변위 계측, 보강의 과정으로 이루어지며, 현재 지표 또는 노출된 암반 사면에서의 설계 과정은 절리분포 특성 조사, 절리면의 역학적 특성 시험, 절리 분포 및 역학적 특성을 고려한 안정성해석으로 구성된다. 각각의 단계중 조사와 시험으로부터 설계와 안정성 해석에 중요한 기초 입력자료들을 얻을 수 있다. 기초 입력자료에는 특히 암반의 생성 특성상 필연적으로 포함되어 있는 절리에 관한 항목들이 대부분을 차지하고 있으며, 이는 암반 사면의 안정성이 절리의 발달 구조 및 그 역학적 특성과 밀접한 상관 관계를 갖고 있기 때문이다. 즉, 암반 사면의 공학적 안정성 및 시공 경제성은 절리 구조 및 절리면의 물리, 역학적인 특성에 대한 자료를 정량적이고 구체적으로 파악하는 것이 가장 중요한 부분이라고 할 수 있다.

본 연구에서는 암반 사면의 설계 및 안정성 해석에 필수적인 암반 내 절리구조를 컴퓨터 영상분석에 의하여 획득할 수 있는 기법을 개발하고 이를 자동화하는 것을 목표로 하였다. 구체적으로는, 일반적으로 사용이 보편화되어 가고 있는 디지털 카메라에 의해 다각 촬영된 암반 사면 영상으로부터 절리 궤적을 인식하고 이들을 삼차원적으로 조합함으로써 절리면의 공간적 방향성을 해석할 수 있는 자동화된 프로그램을 개발하며, 이로부터 전체 조사대상 암반사면 내에 부존 하는 절리구조를 정량적이고 경제적으로 파악할 수 있는 기법을 개발하고자 하였다.

2. 이론적 배경

사진영상에 의한 공간 대상물의 정량적 특성을 추출하고 해석하는 방법은 사진측량과 컴퓨터 비전 분야에서 시작되었으며, 각각의 분야는 공학적인 응용을 위해 독자적으로 또는 동일한 이론적 배경에서 많은 연구가 진행되어져 왔다. 사실상 이론적 기초는 유사하나, 이론의 전개에서 사용되는 용어에 약간의 차이가 있으며 해석방법에 있어서도 구하고자 하는 목적, 즉 대상물의 형상에 대한 정밀도, 인식도 등에 따라 다소 차이가 있다.

사진측량은 촬영 거리와 촬영위치에 따라 구분되는데, 본 연구에서 적용한 근거리 사진측량은 보통 촬영 거리 200m 이내에서의 지상에서의 사진측량 작업을 말한다. 사진측량은 영상에 의한 대상물의 조사, 관측, 정량화, 계측 및 설계, 평가 등을 순서에 따라 실시하는 것으로 구성된다. 컴퓨터 비전은 영상으로부터 실제 공간상의 정보를 얻기 위한 것으로 투시된 영상들로부터 주어진 장면에 관한 유용한 정보를 추출하는 작업을 말한다. 즉, 여러 화소(pixel)들의 배열인 영상(image)으로부터 물리적인 대상(object)을 명확하고 의미 있게 인식하는 일련의 과정을 뜻한다.

공간좌표를 유도하기 위해 근거리 사진측량과 컴퓨터 비전에서는 공통적으로 중심투영 방정식(사진 측량에서는 공선조건식이라고 함)을 적용한다. 중심투영 방정식을 구성하기 위해

서는 사진기의 내, 외부 요소를 결정하여야 하며, 이 단계를 거쳐 촬영된 공간의 기하학적 특성을 해석할 수 있다. 사진기 요소는 공간좌표계 내에서 사진기의 위치 및 촬영 방향을 나타내며, 사진기의 위치나 촬영 방향이 바뀌면 달라지므로 매번 촬영에서 이를 결정해야만 한다. 이로 인해 공간 내에 이미 좌표를 알고 있는 여러 개의 지상조절점(ground control point)을 필요로 한다. 지상조절점의 공간좌표와 사진기 내, 외부 요소의 초기값을 이용하여 중심투영 방정식을 반복 계산함으로써 최적화된 사진기의 내, 외부 요소를 결정할 수 있다. 사진기 요소가 결정된 각각의 사진기들에 의해 여러 각도에서 촬영된 동일 대상물의 영상을 조합함으로써 대상물의 형상을 구성하는 공간좌표들을 구할 수 있다. 촬영 각도에 따른 많은 경우 중에서 가장 간단한 것은 스테레오 사진 촬영 기법을 적용하는 것이다. 스테레오 사진을 이용하는 목적은 공간내의 원근을 결정하기 위한 것으로, 촬영 방향이 평행한 두 개의 사진기를 이용한 것이다. 이 방법은 사진기의 촬영 방향이 평행한 특수한 경우에서의 제한된 해석 기법이라고 할 수 있다. 즉, 사진기의 내, 외부요소가 결정된 중심투영방정식은 시각차(parallax) 공식으로 간단하게 표현되어질 수 있다. 이는 중심투영방정식의 가장 간단한 형태라고 할 수 있으며, 일반적인 경우에 대하여 적용하기 위해서는 중심투영방정식의 일반식의 적용이 필요하다. 이는 임의 방향으로 촬영된 두 사진 영상으로부터 공간좌표를 해석하는 것으로, 촬영 조건에 따른 제한을 배제할 수 있고, 영상으로부터 보다 많은 정보를 얻을 수 있는 장점이 있으나, 해석 기법이 복잡하고 오차를 줄일 수 있는 검정 방법의 개발이 필요하다. 또한 고가의 측량용 장비를 이용하는 것보다는 일반적으로 쉽게 접할 수 있는 장비를 적용할 필요가 있다. 현재 두 분야는 활발한 교류 하에 서로의 장단점을 보완해나가고 있으며 근거리 사진 측량과 컴퓨터 비전에 의한 공간 내 대상물의 해석을 위한 전반적인 처리 절차는 거의 유사하나 사진기 검정부분과 3차원 공간좌표를 결정하는 방법에 있어서 다소 차이가 있다.

3. 해석 방법

2차원 사진좌표와 3차원 공간좌표 사이에는 중심투영(perspective projection)과 같은 기하학적 관계가 성립된다. 이러한 관계는 사진기 외부 요소인 사진기좌표계와 공간좌표계 사이의 회전(rotation)과 전이(translation) 및 사진기 내부 요소인 사진주점과 초점거리에 의해 구성되는 중심투영 방정식(perspective projection equation)으로 표현할 수 있다. 일반적으로 회전과 전이요소는 사진기 검정(camera calibration)에 의해 결정하는데 사진기 검정에는 이미 알고 있는 지상조절점(ground control point)들을 이용하는 방법과 동일 대상을 다른 각도에서 촬영한 2장 이상의 사진에 의해 구하는 방법이 있다. 본 연구에서는 지상조절점의 측량에 필요한 과정을 줄이는 대신 이에 필요한 해석 기법을 개발함으로써 후자의 방법을 적용하고자 하였다.

3.1 좌표계 설정

본 연구에서는 공간좌표계와 사진기좌표계를 원순좌표계를 기준으로 설정하고, 공간좌표계에 대한 사진기좌표계의 회전과 사진기의 위치 이동을 나타내는 전이에 따른 두 좌표계 사이의 중심투영관계에서 복잡한 사진기 검정 단계 없이 회전 행렬과 전이 벡터를 산정하였다. 각 축의 회전각은 촬영된 사진에서 산정하여 변화한 회전요소를 결정하였다. 사진기의

중심투영점은 전이 벡터 성분으로 적용하였다. 단일 사진기좌표계과 공간좌표계 사이의 중심투영 방정식의 일반식을 구성하고 스테레오 비전에 의한 두 사진기의 중심투영 방정식 사이의 관계를 이용하여 공간좌표를 유도하고자 하였다. 공간좌표계는 대상물과 사진기 및 사진면을 모두 포함하는 전체 공간에 공통적으로 설정된 좌표계이다. 공간좌표계는 그림 1과 같이 왼손좌표계를 기준으로 설정하였다. 사진기좌표계는 공간좌표계에 대해 각각의 사진기의 촬영방향에 따라 독립적으로 설정한 좌표계로서 (-)z축의 방향이 사진의 촬영방향으로 설정하여 광축이 사진기 z축과 평행하게 구성하였다. 따라서, 사진면은 사진기좌표계에서 xy 평면이 된다. 공간좌표계와 사진기좌표계 사이의 관계는 그림 2와 같이 공간좌표계가 회전과 전이에 의해 사진기좌표계로 전환된 것으로 나타낼 수 있다. 공간좌표계의 각 축이 이에 대응하는 사진기좌표계의 각 축으로의 회전은 각각의 축의 순차적인 회전의 합으로 구성된 회전행렬(rotation matrix)로 표현할 수 있으며, 전이는 공간좌표계의 원점이 사진기좌표계의 원점으로 이동한 것으로 전이벡터(translation vector)로 표현할 수 있다.

3.2 회전행렬

회전 행렬(rotation matrix)은 두 축 사이의 회전을 정의하기 위해 도입된 것으로 공간좌표계를 기준으로 했을 때 사진기좌표계가 얼마나 회전되어 있는가를 나타내어 준다. 왼손좌표계를 기준으로 공간좌표계로부터 사진기좌표계가 회전되어 있는 정도는 각각의 축에 대해서 그림 2와 같이 X축 중심으로 회전은 ω , Y축 중심으로 회전은 ϕ , Z축 중심으로 회전은 α 로 정의하고 부호는 축의 (+) 방향에서 보았을 때 반시계방향을 (+)회전으로 설정하였다. 예를 들면, X축 중심의 (+) ω 회전은 YZ면이 반시계방향으로 ω 각도만큼 회전한 것과 같다. 첫 번째 회전 ω , 두 번째 회전 ϕ , 세 번째 회전 α 에 대응하는 $R_x R_\phi R_\omega$ 행렬합은 $R_{\omega\phi\alpha}$ 로 표현된다. 모든 회전이 고려된 회전행렬은 식(1)과 같다.

$$R_{\omega\phi\alpha} = R_x R_\phi R_\omega = \begin{bmatrix} \cos \phi \cos \alpha & \sin \omega \sin \phi \cos \alpha + \cos \omega \sin \alpha & -\cos \omega \sin \phi \cos \alpha + \sin \omega \sin \alpha \\ -\cos \phi \sin \alpha & -\sin \omega \sin \phi \sin \alpha + \cos \omega \cos \alpha & \cos \omega \sin \phi \sin \alpha + \sin \omega \cos \alpha \\ \sin \phi & -\sin \omega \cos \phi & \cos \omega \cos \phi \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$= \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}$$

3.3 전이벡터

공간좌표계 원점 (X_0, Y_0, Z_0) 과 사진기의 중심투영점인 사진기좌표계 원점 (X_L, Y_L, Z_L) 사이의 위치 이동은 전이 벡터(translation vector) 성분으로 표현할 수 있다. 그림 2에서 두 좌표계 사이의 관계는 원점의 위치 이동 후에 축회전이 발생한 것으로 볼 수 있다. 따라서 전이 벡터, T는 식(2)와 같다.

$$T = [X_0 - X_L, Y_0 - Y_L, Z_0 - Z_L]^T \quad (2)$$

두 사진기의 전이벡터성분을 고려하면, 왼쪽 사진기의 중심투영점 위치를 공간좌표계의 원점으로 가정하면 식(2)의 $[X_L, Y_L, Z_L]^T$ 은 $[X_0, Y_0, Z_0]^T$ 이고, 오른쪽 사진기는 왼쪽 사진기 중심투영점으로부터 이동한 경우이므로 식(2)의 $[X_L, Y_L, Z_L]^T$ 는 $[X_R, Y_R, Z_R]^T$ 이다. 따라서 전이벡터의 일반식은 식(3)과 같다.

$$T_L = [X_0, Y_0, Z_0]^T \quad \text{and} \quad T_R = [X_R, Y_R, Z_R]^T \quad (3)$$

두 사진기 사이의 거리는 ΔT 로 나타낼 수 있다. 여기서, $\Delta T = T_R - T_L$ 이다.

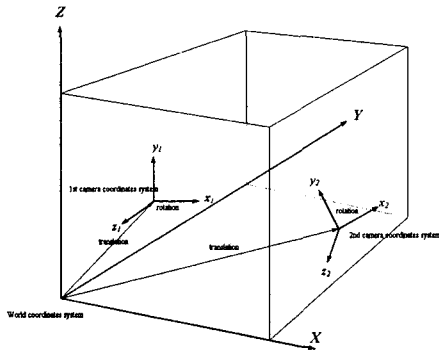


그림 1. 공간좌표계와 사진기좌표계의 관계

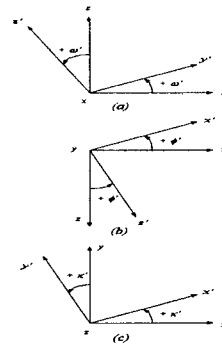


그림 2. 각 축의 (+) 각도 회전

3.4 중심투영방정식의 구성

공간내 임의 존재하는 A점에 대해 회전행렬과 전이벡터 성분을 고려한 중심투영 방정식은 식(4)와 같다.

$$\begin{bmatrix} x_a - x_0 \\ y_a - y_0 \\ -f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_A - X_L \\ Y_A - Y_L \\ Z_A - Z_L \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서, (x_0, y_0) 는 사진 주점 좌표, f 는 초점거리, (X_L, Y_L, Z_L) 는 사진기 위치 좌표, R 은 회전 행렬, (x_a, y_a) 는 사진 좌표, (X_A, Y_A, Z_A) 는 공간 좌표이다. R 은 직교행렬이기 때문에 식(4)의 inverse는 식(5)와 같이 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} X_A - X_L &= (Z_A - Z_L) \frac{[r_{11}(x_a - x_0) + r_{21}(y_a - y_0) + r_{31}(-f)]}{[r_{13}(x_a - x_0) + r_{23}(y_a - y_0) + r_{33}(-f)]} \\ Y_A - Y_L &= (Z_A - Z_L) \frac{[r_{12}(x_a - x_0) + r_{22}(y_a - y_0) + r_{32}(-f)]}{[r_{13}(x_a - x_0) + r_{23}(y_a - y_0) + r_{33}(-f)]} \end{aligned} \quad (5)$$

i) 두 사진기가 평행한 경우

그림 3과 같이, 두 사진기가 평행한 경우는 공간좌표계 내에서 두 사진기의 투영중심은 X축상에서 ΔT 만큼 떨어져 있고, 촬영방향은 (+)Y축 방향으로 평행하게 유지한 것이다. 이 경우 $\omega = 90^\circ$, $\phi = 0^\circ$, $\alpha = 0^\circ$ 일 때로 회전 행렬은 식(1)에 의해 식(6)과 같이 유도할 수 있다.

$$R_{\omega\phi\alpha} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

각각의 사진에서의 전이벡터 성분을 고려하면 왼쪽 사진의 경우, 왼쪽 사진기의 중심을 원점으로 가정하면 식(7)과 같고 오른쪽 사진의 경우, 촬영고도가 같고 X축상에 존재하므로 전이벡터 성분은 식(8)과 같다.

$$T_L = [T_x, T_y, T_z]^T = [X_0, Y_0, Z_0]^T = [0, 0, 0]^T \quad (7)$$

$$T_R = [T_x, T_y, T_z]^T = [X_R, Y_R, Z_R]^T = [X_R, 0, 0]^T \quad (8)$$

ii) 두 사진기가 수렴하는 경우

그림 4와 같이, 두 사진기가 수렴하는 경우는 두 사진기의 투영중심이 공간좌표계의 X축 상에서 ΔT 만큼 떨어져있고, 촬영방향이 (+)Y축 방향으로 서로 수렴된 것이다. 이 경우의 회전각은 $\omega = 90^\circ$, $\phi = 0^\circ$, $\alpha = \phi'$ 과 같다. 회전변화량 ϕ' 의 회전 방향을 고려하여 ϕ' 의 부호를 선택한 후, ϕ' 의 결정하면 회전행렬은 식(9)와 같이 구성되어진다.

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi' & \sin \phi' & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ \sin \phi' & -\cos \phi' & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

전이벡터 성분은 두 사진기가 평행한 경우와 동일하다.

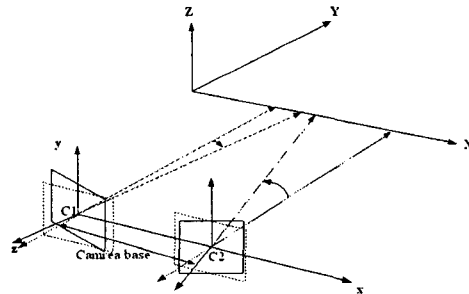
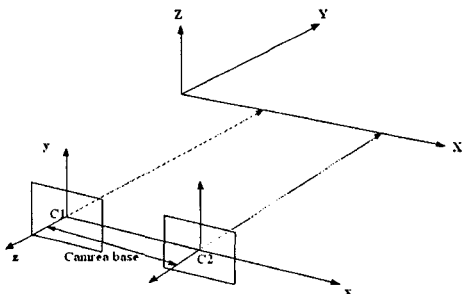


그림 3. 두 사진이 평행한 경우의 스테레오 비전 그림 4. 두 사진기가 수렴하는 스테레오 비전

3.5 디지털 영상의 해상도 분석 및 렌즈 왜곡 보정

일반적으로 디지털 영상을 얻기 위한 시스템의 기본 구성은 CCD(Coupled Charged Device) 사진기, 프레임 그래버(frame grabber), 컴퓨터의 세 부분으로 구성된다. 프레임 그래버는 보드(board)의 형태로 제작되어 컴퓨터 내에 장치할 수 있는 것과 디지털 사진기내에 일체화되어 있는 것이 있으나 영상이 컴퓨터에 저장되기까지의 전체적인 시스템의 구성은 동일하다고 할 수 있다. 본 연구에서 영상을 얻기 위해 사용한 디지털 사진기는 미국 폴라로이드사의 제품(모델 PDC-2000)으로 최대 해상도는 1600×1200 픽셀이며, CCD의 물리적인 크기는 가로 $6\mu\text{m}$, 세로 $12\mu\text{m}$ 이고 1600×1200 화소 크기의 디지털 영상을 구성하는 각 화소의 단위 크기는 가로, 세로 방향으로 $0.006\text{mm}/\text{pixel}$ 이다. 거리에 따른 디지털 영상의 최적 해상도를 유도하여 암반사면 영상을 이용한 절리 구조 해석에 따른 적정 촬영 거리를 알아보고자 촬영 거리에 따라 영상에 나타나는 절리 영상 화소수의 길이를 화소의 유효크기인 $0.006\text{mm}/\text{pixel}$ 에 의해 환산하여 적용하였다. 보통 암반 사면에 존재하는 절리의 길이 분포는 절리 길이가 길어질수록 빈도는 지수 함수적으로 감소하는 양상을 보인다. 실제로 절리의 길이는 0.5m 에서 4m 까지가 대부분을 차지한다. 그림 5에서 절리로 가정한 길이가 0.5m 인 경우에서 화소수가 증가할 때 촬영거리가 완만하게 감소하기 시작하는 부분이 촬영거리에 따른 화소수의 측정 오차가 감소하기 시작하는 임계지점이다. 따라서, s 가 0.5m 일 때 최대 촬영거리는 15m 정도로 추정할 수 있다. 0.5m 길이의 절리가 디지털 영상에 투영된 화소수를 읽을 때 경계선의 불명확성 등으로 인해 발생할 수 있는 화소수의 오차를 최대 ± 3 개라고 가정하면 거리의 변화에 따라 실제 길이에 발생할 수 있는 오차는 그림 6과 같다. 그림 6은 그림 5의 변화된 형태로서, 절리를 디지털 영상에 투영된 화소수로 읽을 때 발생할 수 있는 오차를 최대 ± 3 개라고 가정하고, 이때 나타날 수 있는 절리의 길이 오차 백분율을 절리 길이에 대하여 촬영거리별로 도시한 것이다. 절리의 길이가 0.5m 인 경우를 기준으로 할 때, 거리 10m 에서 오차가 약 3%정도의 수준을 보이고 있다. 이 결과는 그림 5의 경우보다 오차를 보다 구체적으로 나타내는 것으로, 작은 절리에 속하는 0.5m 정도의 크기의 경우 측정 오차를 3%이내로 줄이기 위해서는 촬영거리를 10m 이내로 하여야 하는 것을 의미한다. 거리가 가까울수록 촬영 범위가 작아져 해석에 필요한 사진의 수가 많아질 수 있는 단점이 있는 것을 고려하면 대체적인 적정 촬영거리는 10m 정도인 것으로 판단할 수 있다. 영상에서 ± 3 개의 화소수의 오차는 본 연구에서 사용된 디지털 사진기의 해상도 1600×1200 화소($0.006\text{mm}/\text{pixel}$)의 경우에는 $\pm 0.018\text{mm}$ ($\pm 3\text{pixel} \times 0.006\text{mm}/\text{pixel}$)에 해당한다. 이러한 오차는 물론 대상물의 크기가 커지거나 또는 영상의 해상도가 높을수록 줄어들고, 영상의 해상도는 동일한 크기의 영상에서 화소의 수가 많아질수록 또는 화소의 크기가 작아질수록 높아진다고 할 수 있다. 실제로 촬영조건은 지형과 조명 등 현장의 여러 가지 여건에 좌우된다. 그러나 디지털 영상의 해상도 1600×1200 화소($0.006\text{mm}/\text{pixel}$)를 기준으로 할 때 촬영거리는 10m 로 하는 것이 적절하고, 작은 절리들이 발달한 경우가 아니라면 15m 정도까지는 허용될 수 있는 것으로 판단된다.

렌즈의 선형적 왜곡은 반경방향으로 진행하며 영상왜곡을 발생시킨다. 반경반향 렌즈 왜곡은 영상의 선명도에는 영향을 미치지 않으며, 렌즈 aperture가 변화해도 그대로 유지된다. 렌즈의 보정은 초점으로부터 동일한 거리에서 임의로 선정한 각도를 촬영하여, 이 각도가 사진 주점을 기준으로 얼마만큼 떨어져 있는지 길이로 환산하고 이 길이와 초점거리의 탄젠트 값으로 환산한 각도를 오차 보정 모델에 입력시켜 그림 비선형 해석으로부터 각각의 보정모델 구성 요소를 구하여 실제 각도와 측정 각도 사이의 편차를 보정한다. 본 연구에서 얻은 렌즈의 반경방향 렌즈 왜곡 모델은 식(10)과 같다.

$$\Delta r = k_1 \cdot r + k_2 \cdot r^3 + k_3 \cdot r^5 + k_4 \cdot r^7 \quad (10)$$

$$k_1 = 0.00921, k_2 = -4.4077 \times 10^{-8}, k_3 = 3.5953 \times 10^{-14}, k_4 = -1.1688 \times 10^{-20}$$

3.6 절리면 구성 공간좌표로부터 방향성 유도

사각형의 절리면을 가정하고 면을 구성하는 4개의 꼭지점의 공간좌표로부터 면의 방향성을 유도하기 위해서는 식(11)과 같이 면의 법선 벡터와 벡터적에 의해 구할 수 있다. 경사방향은 법선 벡터의 XY 성분이 Y 성분과 이루는 사잇각에 의해 유도할 수 있고, 경사각은 법선 벡터가 Z 성분과 이루는 사잇각에 의해 유도할 수 있다. 이들 사잇각은 법선 벡터와 이들 벡터성분 사이의 벡터적에 의해 유도할 수 있으며, 실제 측정시 방위각에 의해 보정하여 최종 경사방향과 경사각을 유도한다.

$$N = ai + bj + ck \quad (11)$$

4. 실험실 모델 시험

실험실 모델은 가로 375mm × 세로 235mm의 직육면체 상자를 대상으로 사용하였으며, 촬영 조건은 두 사진기가 평행한 경우로서 그림 5.1과 같이 설정하였다. 촬영 거리(Shooting distance)는 5m로 설정하였으며, 두 사진기 사이의 거리는 250mm로 설정하였다($\Delta T = 250\text{mm}$). 그림 7의 촬영조건에 의해 S_1 과 S_2 에서 촬영한 사진은 그림 8과 같다. 모델 시험에서 사진기 외부 요소를 구성하기 위해서 회전각은 각 사진주점과 O_1 , O_2 점을 기준점으로 하여 두 점들 사이의 화소수(pixel)를 각도(degree)로 환산하여 기준점에서 회전된 각도를 계산하였다. 계산된 회전각을 식(1)에 입력하여 회전행렬을 구성하였다. 회전 행렬 R 의 요소를 구성하기 위하여, 사진상의 사진 주점 좌표와 기준점 좌표 사이의 화소 차이를 회전각으로 환산하였다. 따라서, 두 사진기가 평행한 경우의 회전각($\omega = 90^\circ$, $\phi = 0^\circ$, $\alpha = 0^\circ$)으로부터 변화한 각도(ω' , ϕ' , α')를 계산하여 촬영시의 두 사진기의 회전각($\omega = 90^\circ + \omega'$, $\phi = 0^\circ + \phi'$, $\alpha = 0^\circ + \alpha'$)을 결정하였다. 사진주점이 기준점보다 하부에 존재하는 것은 사진기좌표계가 X 축을 중심으로 회전한 것으로 사진주점이 기준점보다 왼쪽에 존재하는 것은 사진기좌표계가 Y 축을 중심으로 회전한 것으로, α 는 변화가 없는 것으로 가정하여 회전각을 계산하였다. 회전각의 변화량은 그림 10과 같이 계산하고 부호를 결정하였다. 각도의 계산 결과는 표 1과 같고 회전행렬 R 의 구성 요소는 다음과 같다.

표 1. 회전각 계산 결과(단위: 각도)

	ω'	ϕ'	ω	ϕ
왼 쪽 사진	-0.907	0.939	89.903	0.939
오른쪽 사진	-0.907	0.810	89.093	0.810

$$R_L = \begin{bmatrix} 0.999866 & 0.000000 & 0.016388 \\ 0.016386 & 0.015830 & -0.999740 \\ -0.000260 & 0.999875 & 0.015828 \end{bmatrix}$$

$$R_R = \begin{bmatrix} 0.999900 & 0.000000 & 0.014137 \\ 0.014135 & 0.015830 & -0.999710 \\ -0.000220 & 0.999875 & 0.015828 \end{bmatrix}$$

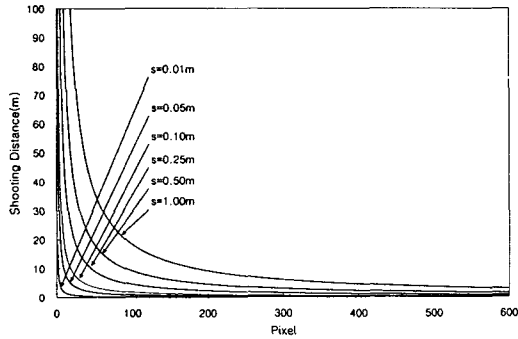


그림 5. 표식의 길이 변화에 따른 촬영거리와 화소수의 관계

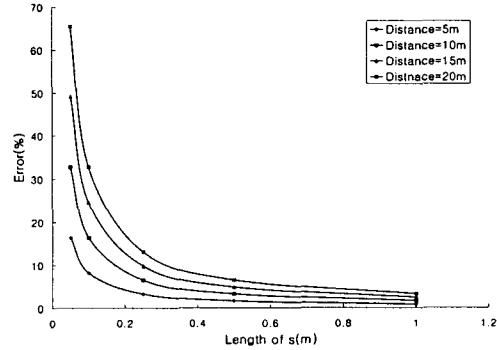


그림 6. ±3개 화소 측정오차에 따라 실제 길이에 발생하는 오차 백분율

두 사진기의 전이벡터 성분은 S_1 점을 공간좌표계의 원점으로 하고 공간좌표계의 X축상에서 ΔT 만큼 떨어진 S_2 점의 위치를 측정하여 결정하였으며, 두 사진기의 전이벡터 성분의 차이는 다음과 같다.

$$\Delta T = T_R - T_L = [250, 0, 0]^T$$

본 연구에 사용된 1600×1200 화소 영상에서 사진주점의 위치는 화소 기준으로 (800, 600)을 적용하였고 초점거리는 11mm하였다. 그림 8에서 설정한 해석 대상점들에 대하여 실측한 공간좌표와 해석에서 구한 공간좌표 사이의 오차 분포 양상을 도시하면 그림 11과 같다. 오차의 정도는 X는 0.34~3.58mm, Y는 19.92~163.83mm, Z는 2.69~6.51mm 수준이다. 오차의 발생 수준을 볼 때 X와 Z 방향에서의 오차는 촬영거리 5m를 고려할 때 최대 0.07~0.13% 정도로 매우 낮았으나, 촬영 방향인 Y방향의 경우 최대 약 3% 정도로 가장 큰 오차를 보였다.

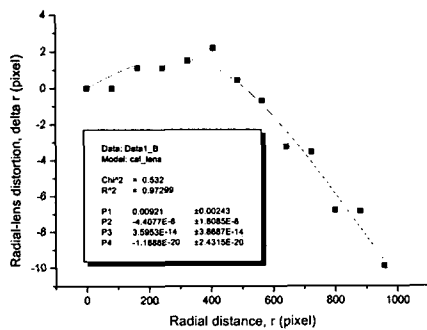


그림 7. 반경방향 렌즈왜곡 보정모델 유도

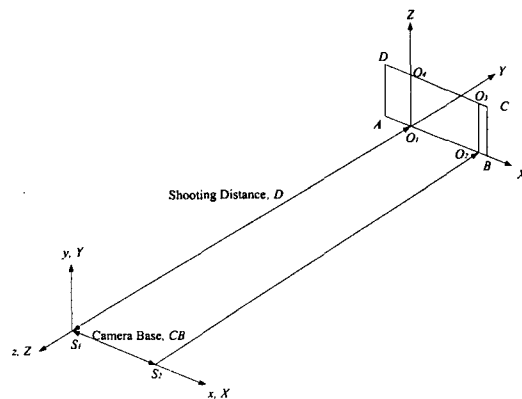
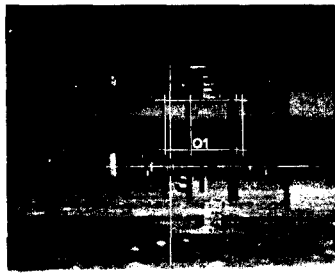
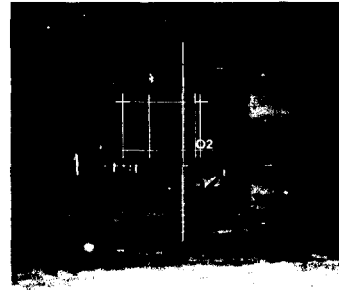


그림 8. 실험실 모델 및 촬영 조건

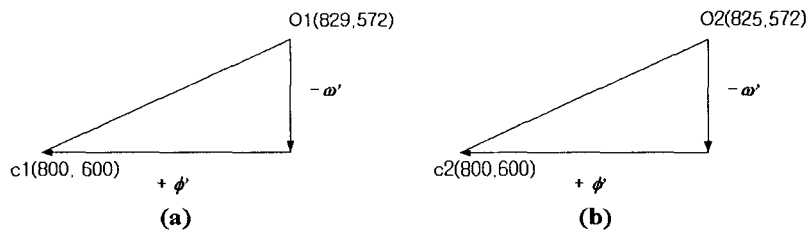


(a) 왼쪽 사진



(b) 오른쪽 사진

그림 9. 모델 촬영



(a) 왼쪽 사진

(b) 오른쪽 사진

그림 10. 회전각 변화량 계산을 위한 Δx , Δy 계산

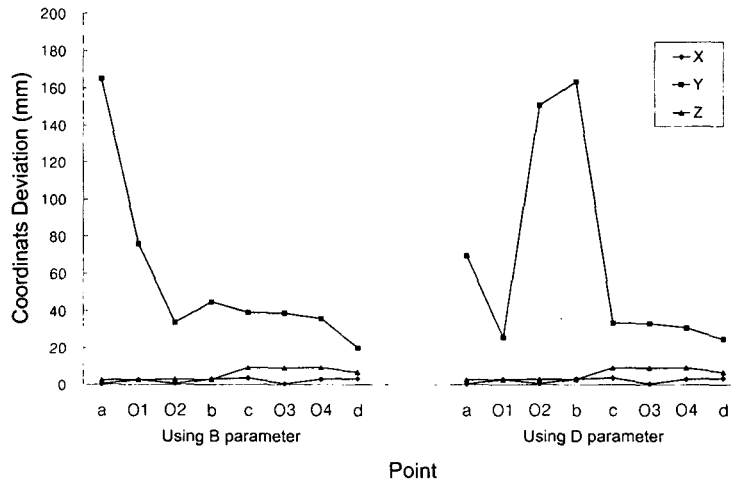


그림 11. 실험실 모델 공간좌표 계산 오차

5. 결론 및 고찰

본 연구에서는 암반 사면에 대해 적용할 수 있는 중심투영방정식을 근거리 사진측량과 컴퓨터 비전 분야에서 적용되고 있는 이론을 기초로 하여 유도하였으며, 유도된 중심투영방정식을 2개의 사진기로부터 촬영된 영상에 적용하여 조합함으로써 임의의 점에 대한 공간좌표를 해석할 수 있는 과정을 유도하였다. 또한 유도된 공간좌표 해석 기법을 실제 작업에 적용하기 위하여, 사용한 디지털 사진기에 의해 촬영된 영상의 해상도를 분석함으로써 적정 촬영 거리를 판단하였고, 렌즈의 형상과 조합과정에서 발생할 수 있는 왜곡 정도를 파악하여 보

정할 수 있는 보정식을 유도하였다. 연구 결과를 현장에 적용하기에 앞서 공간좌표 해석 과정을 검증하기 위하여 실내에서 실험을 수행하였다. 오차의 발생수준을 볼 때, X 와 Z 방향에서의 오차는 촬영거리 5m를 고려할 때 최대 0.07~0.13% 정도로 매우 낮았으나, 촬영 방향인 Y 방향의 경우 최대 약 3% 정도로 가장 큰 오차를 보였다. 이는 해석과정을 대략적으로 적용하는 데에는 큰 무리가 없을 것으로 판단되나, 정밀한 계측과 실제 현장 측정에서는 촬영거리가 더욱 멀어질 수 있는 점등을 고려할 때 문제가 발생할 수 있는 것으로 판단할 수 있다. 이러한 오차는 공간좌표계에 대한 사진기좌표계 축의 회전각 및 중심투영점의 정확한 위치, 렌즈 왜곡 보정 모델을 통한 각도 환산의 정확성을 높임으로서 줄일 수 있을 것으로 예상되며 계속 연구에서 보완할 필요가 있는 것으로 판단되었다.

참고문헌

1. K. B. Atkinson, 1996, Close range photogrammetry and machine vision, Whittles Publishing Services, 371p.
2. Emanuel Trucco & Alessandro Verri, 1998, Introductory techniques for 3-D computer vision, Prentice-Hall, pp.28-31