근접 사진측량에 의한 모형말뚝 선단부 주변의 지반 변형 측정

Measurement of Soil Deformation around the Tip of Model Pile by Close-Range Photogrammetry

이창노¹⁾ · 오재홍²⁾

Lee, Chang No · Oh, Jae Hong

Abstract

In this paper, we studied on measurement of soil deformation around the tip of model pile by close-range photogrammetry. The rigorous bundle adjustment method was utilized to monitor the soil deformation in the laboratory model pile-load test as function of incremental penetration of the pile. Control points were installed on the frame of the laboratory model box case and more than 150 target points were inserted inside the soil around the model pile and on the surface. Four overlapping images including three horizontal and one vertical image were acquired by a non-metric camera for each penetration step. The images were processed to automatically locate the control and target points in the images for the self-calibration and the bundle adjustment. During the bundle adjustment, the refraction index of the acrylic case of the laboratory model was accounted for accurate measurement. The experiment showed the proposed approach enabled the automated photogrammetric monitoring of soil deformation around the tip of model pile.

Keywords : Close-range Photogrammetry, Soil Deformation, Model Pile-load, Pile Tip

초 록

본 논문에서는 근접 사진측량을 이용한 모형말뚝 선단부 주변의 지반 변형 측정 방법에 대하여 연구하였다. 모형 토조에 말뚝을 단계적으로 관입하여 말뚝 주변에서 지반 변형이 발생하는 크기 및 궤적을 근접 사진측량으로 모니터링 하는 방법을 제시하였다. 토조에 설치된 평면 기준점을 셀프캘리브레이션 번들조정에 활용 가능하도록 가로 3장 및 세로 1장의 사진으로 구성하고, 정확하고 효율적인 사진측량을 위해 필요한 기준점 및 타겟점 영상 좌표 자동 독취, 그리고 토조 환경에서 필요한 토조 빛 굴절 등을 해결하기 위한 방법론을 제시하여 실험을 통해 검증하였다. 실험 결과, 말뚝 관입 단계에 따라 기준점 및 타겟점의 영상좌표를 자동으로 추출 가능하였고 토조 굴절이 고려된 번들조정을 통해 자동화된 지반 변형 측정이 가능하였다.

핵심어 : 근접 사진측량, 지반 변형, 모형 말뚝, 선단부

1. 서 론

토목공사에서 말뚝은 오래 전부터 상부 구조물에 대한 기초공법으로서 널리 활용되어 왔으나 지지력 성능에 대한 평가가 불확실한 경우가 많다 (Lee and Lee, 2012). 따라서 하중재하시험을 통해 말뚝 침하가 말뚝 선단부 주변 토사에 얼마나 영향을 주는지 조사하는 연구가 수행되어 왔으며,

Simonini(1996)는 토사의 분포, 팽창, 입자 파괴를 그림으로 나타내어 효율적인 말뚝 선단부 토사 연구를 수행하기도 하였다.

말뚝 선단부 주변의 변형률 거동 분석을 위해 모형을 대상으로 하여 영상 처리 기술을 이용하는 경우가 있지만 평면변형률 조건만을 고려하여 단일 카메라 기반으로 2차원적인 영상 분석에 그치는 경우가 많았고, 토조 모형의 경우 그 특성상

1) 정회원 · 서울과학기술대학교 건설시스템디자인공학과 부교수(E-mail : changno@seoultech.ac.kr)

2) 교신저자 · 정회원 · 한국전자통신연구원 융합기술연구부문 선임연구원(E-mail : ojh@etri.re.kr)

유리나 아크릴 등 투명한 케이스를 이용하여 토사를 담고 있어야 하는데 해당 매질에 의한 빛의 굴절에 의한 오차가 고려되지 못한 경우가 많다 (Lee and Lee, 2012).

말뚝에 의한 지반 변형률 분석 이외에도, 터널 굴착 등에 의한 지표면 침하 등에 대한 연구를 위해 지반의 변형 특성과 관련된 실내 모형실험이 많이 요구되고 있으므로 (Lee, 2006), 엄밀한 변형조정기법을 기반으로 한 근접 사진측량 기법의 적용을 통해 보다 정밀한 지반 변형 분석이 필요하다. 유사하게 사면 모형 진동 변위 측정을 위해 Jung et al.(2011)은 근접 사진측량 기법을 적용하여 모형 사면의 지표부 및 내부 3차원 변위를 정밀하게 측정하고자 하였다. 해당 연구에서는 별도의 카메라 캘리브레이션을 수행한 후 변형 조정을 통해 사면 모형 진동 단계별 사면 변위를 측정하였으나, 투명 아크릴로 제작된 케이스의 굴절률 등은 반영되지 못하였다.

본 논문에서는 말뚝 관입에 따른 말뚝 선단부 주변의 지반 변형 측정을 위해 근접 사진측량을 이용하는 방법에 대하여 연구하였다. 별도의 실험실 캘리브레이션 과정 없이, 토조에 설치된 평면 기준점을 셀프캘리브레이션 변형조정에 활용 가능하도록 가로 3장 및 세로 1장의 사진으로 구성하고, 정확하고 효율적인 사진측량을 위해서 기준점 및 타겟점 영상 좌표를 자동으로 독취하는 방법론을 제시하였다. 그리고 토조 환경의 특성상 발생하는 토조의 빛 굴절률을 변형 조정에 포함시켜 정확도를 향상시켰다.

본 논문의 구성은 아래와 같다. 2장에서는 근접 사진측량을 모형 토조 환경에서 활용하기 위해 필요한 변형 조정 및 굴절률에 대한 내용이 설명된다. 3장에서는 실험 모형 및 사진 측정을 위한 실험 구성에 대한 자세한 내용을 설명하고 기준점 및 타겟점 자동 독취 방법 등을 단계별 실험결과와 함께 제시된다. 마지막으로 4장에 결론이 제시된다.

2. 변형 조정 및 타겟 좌표 계산

2.1 변형 조정

비측정 카메라를 이용한 근접 사진측량을 위해서 초점 거리(Focal length), 주점(Principal points), 렌즈 방사왜곡(Radial lens distortion), 렌즈 편심왜곡(Decentering distortion), 초점면 왜곡(In-plane distortion) 등의 내부 표정요소를 포함한 Fraser(1997)에 의해 제안된 Equation (1)과 같은 공선조건식을 활용한다. 본 논문에서는 매개변수별 자세한 수식 구성은 기존의 논문 등(Fraser, 1997; Oh et al., 2006)에 자세히 서술되어 있으므로, 간략한 설명만을 기술하였다.

$$x - x_0 + \Delta x_r(K_1, K_2, K_3) + \Delta x_d(P_1, P_2) + \Delta x_f(b_1, b_2) = -f \frac{U}{W} \quad (1)$$

$$y - y_0 + \Delta y_r(K_1, K_2, K_3) + \Delta y_d(P_1, P_2) = -f \frac{V}{W}$$

$$\begin{bmatrix} U \\ V \\ W \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} X - X_L \\ Y - Y_L \\ Z - Z_L \end{bmatrix}$$

여기서 x, y 는 사진좌표, X, Y, Z 는 지상좌표, X_L, Y_L, Z_L 는 카메라 투영 중심이 좌표 그리고 M 은 카메라의 roll(ω), pitch(ϕ), yaw(κ) 회전각으로 구성된 회전행렬이다 ($M = M_\kappa M_\phi M_\omega$). 그리고 내부표정요소로 f 는 초점거리, x_0, y_0 는 주점 이동량, K_1, K_2, K_3 는 방사왜곡 계수, P_1, P_2 는 렌즈 편심왜곡 계수, b_1, b_2 는 초점면 2차원 왜곡계수이다.

가장 일반적인 변형 조정은 외부표정요소, 내부표정요소 및 지상기준점 모두를 미지수로 설정하고, 지상기준점의 초기치 값을 기반으로 하여 상기 비선형 Equation (1)을 테일러 급수 전개를 통해 선형화하고 단일 최소제곱식(unified least square equation)인 Equation (2)를 구성하여 정규방정식을 통해 해법을 도출한다 (Mikhail et al., 2001). 이 때 내부표정요소 매개변수별 편미분 계수는 아래 Equation (3)와 같이 나타낼 수 있다 (Mcglone et al., 2004).

$$\begin{bmatrix} v \\ \hat{v} \\ \ddot{v} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{B} & \hat{B} & \ddot{B} \\ -I & 0 & 0 \\ 0 & -I & 0 \\ 0 & 0 & -I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta \\ \hat{\delta} \\ \ddot{\delta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l \\ \hat{l} \\ \ddot{l} \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서, $\hat{\cdot}$ 는 외부표정요소, $\ddot{\cdot}$ 는 내부표정요소, $\cdot$ 는 지상기준점을 가리키며, B 는 Equation (1)을 각 해당 요소로 편미분한 계수 행렬, δ 는 보정량, I 는 단위행렬, l 는 관측방정식의 상수항, v 는 잔차벡터이다.

$$\hat{B} = \begin{bmatrix} df & dx_0 & dy_0 & dK_1 & dK_2 & dK_3 & dP_1 & dP_2 & db_1 & db_2 \end{bmatrix}^T$$

$$\hat{B} = \begin{bmatrix} -\bar{x}/f & -1 & 0 & -\bar{x}r^2 & -\bar{x}r^4 & -\bar{x}r^6 & \frac{(3\bar{x}^2 + \bar{y}^2)}{2\bar{x}\bar{y}} & \frac{2\bar{x}\bar{y}}{(\bar{x}^2 + 3\bar{y}^2)} & \bar{x} & \bar{y} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\hat{B} = \begin{bmatrix} -\bar{y}/f & 0 & -1 & -\bar{y}r^2 & -\bar{y}r^4 & -\bar{y}r^6 & \frac{2\bar{x}\bar{y}}{(\bar{x}^2 + 3\bar{y}^2)} & \frac{3\bar{x}^2 + \bar{y}^2}{2\bar{x}\bar{y}} & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

여기서, $\bar{x} = x - x_0, \bar{y} = y - y_0, r = \sqrt{\bar{x}^2 + \bar{y}^2}$ 이다.

내부 표정요소와 외부 표정요소를 상수로 고정시키고 타겟점의 지상좌표만을 미지수로 설정하여 구해낼 경우에도 상기 Equation (2)를 그대로 사용할 수 있으며, 이때는 내부표정요소와 외부표정요소의 초기치가 입력값으로 설정되는 관측방정식 부분인 Equation (2)의 두 번째와 세 번째 라인에 대해 높은 경중률을 설정하면 된다.

2.2 굴절률을 고려한 타겟 좌표 계산

지반 변형 측정을 위한 모형과 같은 경우에는 토사를 투명 한 케이스로 둘러싸인 모형에 설치한 후 일정한 조건에 따라 해당 토사의 변형을 측정하는 것이 일반적이다. 따라서 모형 외부에서 근접 사진측량을 위한 영상을 취득했을 경우 광선이 투명한 케이스를 거치며 굴절되게 되며, 따라서 굴절률을 고려해야만 정밀한 근접 사진측량이 가능하다.

굴절률(Refractive index)이란 광선이 한 매질에서 다른 매 질로 투과하여 움직일 때 그 휘는 정도를 나타내는 수치이다. 일반적으로 굴절률은 진공에서 빛의 속력을 매질 속에서의 빛의 속력으로 나눈 값과 같으며 빛의 파장에 따라 굴절률이 틀려진다. 예를 들어, 파장이 589nm인 빛의 경우 굴절률이 공기에서는 1.0002, 물에서는 1.333, 다이아몬드에서는 2.417 등으로 달라진다. 해당 굴절률을 바탕으로 해당 매질에 투과 할 때 휘는 정도는 광학에서 접촉된 두 물질의 경계를 통과 하는 광선과 각각의 굴절률 사이의 관계를 나타내는 법칙인 스넬의 법칙(Snell's law)에 의해 나타내지며, 그 공식은 아래 Equation (4)와 같다.

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (4)$$

여기서, n_1 과 n_2 는 두 물질의 굴절률을 나타내며, θ_1, θ_2 는 광선이 두 매질의 경계에 수직인 법선과 이루는 입사각과 굴절각이다.

근접사진측량에서 매질의 굴절률을 고려하여 광선 추적법(ray tracing)을 통해 타겟 좌표를 구해낼 수 있다. Figure 1에 서, 평면 매질위에 좌표계 (X, Y, Z) 가 로 설정되어 있다. 즉, Z 가 매질의 수직방향이다. 카메라 투영 중심에서 사진의 한 점 p 를 통하는 광선 벡터 v 가 연장되어 매질 상단에서 맺히는 점 P_1 의 좌표는 공선조건식을 이용하여 Equation (5)와 같이 계산된다. Equation (5)에서 $(x, y, -f)$ 는 카메라 투영중심으로 부터 사진 상의 점 p 로의 3차원 벡터이다. 해당 좌표에 회전 행렬의 역행렬을 곱하여 v 벡터가 구해진다. 이외의 심볼은 Equation (1)에 제시된 것과 동일하다.

$$X = X_L + (Z - Z_L) \times \frac{v_1}{v_3} \quad (5)$$

$$Y = Y_L + (Z - Z_L) \times \frac{v_2}{v_3}$$

여기서, $v = [v_1 \ v_2 \ v_3] = M^T [x \ y \ -f]^T$

스넬의 법칙에서 필요한 입사각의 사인값은 Equation (6)을 이용하여 계산할 수 있으며, 공기 굴절률을 1로 가정했을 때,

굴절각은 스넬의 법칙에 의해 Equation (7)과 같이 계산된다.

$$\sin \theta_1 = \frac{\sqrt{v_1^2 + v_2^2}}{|v|} \quad (6)$$

$$\theta_2 = \sin^{-1} \left(\frac{\sin \theta_1}{n_2} \right) \quad (7)$$

매질의 두께가 D 라고 했을 때, 매질의 하단에서의 타겟 좌 표 P_2 는 매질 상단 좌표 $P_1 = (X_1, Y_1, Z_1)$ 에 보정량 dX, dY 를 더해주는 것으로 계산가능하며(Equation (9)) 보정량은 아래 Equations (8)로부터 계산될 수 있다.

$$dX = (D \times \tan \theta_2) \times \frac{(X_1 - X_L)}{\sqrt{(X_1 - X_L)^2 + (Y_1 - Y_L)^2}} \quad (8)$$

$$dY = (D \times \tan \theta_2) \times \frac{(Y_1 - Y_L)}{\sqrt{(X_1 - X_L)^2 + (Y_1 - Y_L)^2}}$$

$$P_2(X_2, Y_2, Z_2) = P_1(X_1, Y_1, Z_1) + (dX, dY, -D) \quad (9)$$

Figure 1. Target coordinate computation for the refraction of a medium in close-range photogrammetry

3. 실험 방법 및 결과

근접 사진측량에 의한 모형말뚝 선단부 주변의 지반 변형 측정을 위하여 본 논문에서 제시한 연구 방법의 흐름도는 Figure 2와 같다. 지반 변형 측정을 위한 모형 토조 및 말뚝 을 제작하고 토조 가장자리에 근접 사진측량 변들 조정을 위 한 기준점을 설치한다. 그리고 지반 변형을 모니터링하기 위

Figure 2. The flowchart for measurement of soil deformation around the tip of model pile by close-range photogrammetry

한 타겟점을 말뚝 및 토조 내부에 설치하고, 말뚝을 단계적으로 지반 내부로 삽입하면서 연속된 사진을 측정한다. 각 말뚝 관입 단계별로 취득된 사진들에서 기준점 영상 좌표를 자동으로 독취하고 번들조정을 수행한다. 번들조정 결과로 계산된 내부/외부 표정요소를 활용하여 영상에서 자동으로 타겟점의 영상좌표를 독취한다. 다음으로 기준점과 타겟점 좌표만을 미지수로 한 번들조정을 통해 타겟 좌표를 계산한다. 이때 토조의 굴절률이 고려된 타겟의 좌표가 계산되며 이를 바탕으로 각 단계별로 말뚝 및 토조 내부에 설치된 타겟의 변형 궤적이 계산된다.

3.1 실험 구성

본 연구는 말뚝의 관입에 따른 흙의 거동변화를 알아보기 위하여 모형실험을 실시하였다. Figure 3은 실험 구성도를 나타내고 있다. 모형토조는 가로 150 cm, 세로 100 cm로 정중앙에 스틸 말뚝을 설치하여 실험을 진행하였다. 반사지를 활용한 기준점 및 타겟점을 모형 주변 및 내부에 설정하여 흙의 거동을 측정하는데 활용하였다. 토조 주위에 17개의 기준점을 부착하였고, 가로 5 cm, 세로 10 cm, 높이 50 cm의 스틸말뚝의 경우에도 12개의 타겟점을 부착하여 말뚝의 관입 깊이에 따른 지반의 거동변화도 파악할 수 있도록 하였다. 말뚝 주위에 설치하는 타겟점은 지름 5 mm, 길이 100 mm의 알루미늄 봉 선단부에 5 mm의 반사지를 부착하여 흙 입자로 가정하고 설치하였다. 말뚝 주위에는 5 mm의 타겟점 148개를 설치하였고, 18개의 타겟점은 지표면침하를 예측하기 위하여 흙 제일

위쪽에 설치하였다. 이 때 지표면의 경우 좀 더 세밀한 측정을 위하여 2 mm의 타겟을 사용하였다. 따라서 흙 입자로 가정한 총 166개의 타겟점과 토조 주위에 부착된 17개의 기준점에 의해서 말뚝의 관입에 따라 지반의 거동을 측정한다. Figure 4에서 실제 제작된 실험 토조, 말뚝, 그리고 기준점 및 타겟점을 확인할 수 있다.

Figure 3. Layout for measurement of soil deformation around the tip of model pile by close-range photogrammetry

Figure 4. Laboratory model pile-load test: control points around the model frame and targets inside

Figure 3에서 보인 것과 같이 카메라는 토조의 정면 3 m 거리에서 정면사진과 90°회전 사진을 찍고 같은 라인에서 2 m씩 좌우에서 측면사진을 촬영하도록 구성되었다. 본 실험에 사용된 카메라의 제원은 아래 Table 1과 같다. 본 실험 구성을 위해 4대의 다른 카메라를 사용하지 않으며, 단계별로 한 대의 카메라로 위치를 옮기며 총 4장의 중복 영상을 획득한다. 이를 통해, 현장 카메라 셀프캘리브레이션이 가능해진다. 가로 3장 및 세로 1장의 사진 조합을 사용한 이유는 Lee and Oh(2012)

가 수행한 효율적인 비측정카메라 캘리브레이션 연구 결과에서 제시한 것과 같이, 2차원 기준점을 활용한 경우 가로3장과 세로1장의 사진조합으로 현장 셀프캘리브레이션을 통한 근접 사진 측량을 수행한 결과가 실험실 셀프캘리브레이션을 통한 내부표정요소값을 측량에 이용한 경우와 비교했을 때 정확도의 차이가 없는 것으로 보였기 때문이다.

모형실험에서는 말뚝을 5 mm씩 관입할 때마다 사진을 측정하였다. 실험을 진행하기 전의 초기상태에서 말뚝의 변위가 최종 40 mm가 일어날 때까지, 총 9단계에서 사진을 얻는다. 따라서 각 단계별 4장씩, 9단계 총 36장의 사진이 취득되었다.

Table 1. Camera specification

	Specification
Camera	Canon EOS 5D Mark II
Type	DLSR
Sensor size	36 x 24 mm
one pixel size	6.4 micron
Image size	5616 x 3744 pixels
Lens	f=50mm, F=1.4 fixed

3.2 기준점 영상 좌표 자동 독취

앞서 실험 구성에서 보인바와 같이 토조의 가장자리 프레임에 기준점을 부착하였다. 실험의 자동화를 위해 기준점의 영상 좌표를 Figure 5에서 보이는 과정을 통해 자동 독취하였다. 우선 각 영상별로 밝기값 및 영상에서 맺히는 반사지 기준점 크기를 기반으로 한 영상 처리를 통해 후보 점을 추출하고, 토조의 범위를 기준으로 각 모서리에 위치한 점을 추출한다 (Figure 5의 1). 이 때 영상 분할을 위한 화소 밝기값 기준을 255로 설정하였고, 분할된 영역에 대해 라벨링을 수행하고 그 크기가 행, 열 방향으로 각각 3~30 픽셀 이내일 경우 후보점으로 선택하였다. 이 크기는 카메라 해상도 및 대상체까지의 거리 등을 기초로 실험 구성 시 설정할 수 있다. 영상 분할 결과 토조 테두리의 기준점 뿐 아니라, 토조 내의 타겟점도 기준점 후보로 선택되었으며, 플래시에 의해 반사되어 밝게 나타나는 영역 등 오류로 분할된 점들도 다수 생성되었다. 따라서 토조 경계를 부가적으로 이용하여 코너 기준점을 추출하였으며 그 결과 예는 아래 Figure 6(a)와 같다. 추출된 코너 기준점과 대응되는 지상좌표를 이용하여 투영변환식을 생성하고 (Figure 5의 2) 나머지 토조 테두리 상에 위치한 기준점(전체 17개 중 13개)에 대해 영상 좌표를 계산하여 대응되는 기준점 영상좌표를 필터링하였다 (Figure 5의 3). 그 결과 추출된 최종 기준점

은 Figure 6(b)와 같다.

Figure 5. Automatic identification of control points in the images

(a)

(b)

Figure 6. Automatic identification of control points (a) after image segmentation, circle-candidates, x-marks-corner points (b) results

3.3 타겟점 영상좌표 자동 독취

상기 과정에서 추출된 기준점을 활용하여 말뚝 관입 총 9 단계에 대해 각각 번들조정을 실시하고 그 결과 내부/외부 표정요소를 이용하여 타겟점의 자동독취를 수행하였다. 3.2절에서 영상 분할을 통해 추출한 후보점(예, Figure 6(a))에서 기 추출된 기준점을 제외한 점을 일차 타겟점 후보로 설정하였다. 결과적으로 말뚝 관입 단계별로 4장의 영상에 각각 후보점이 추출된다. 이차적으로, 각 단계의 영상별로 각 후보점에 대해 광선 추적법으로 토조 내 공간 좌표를 계산하고 최소한 두 장 이상에서 공통적으로 나타나는 후보점만을 최종 타겟점으로 인식하였다. 이 때, 타겟의 크기를 고려하여 광선 추적법을 통해 계산한 공간 좌표가 상호 10mm이하이면 동일한 점으로 간주하였다. 각 타겟점이 토조 내 아크릴 케이스 안쪽에 위치한다고 가정하고 공선조건식과 아크릴 굴절을 이용하여 수평좌표 X, Y 를 계산하였다. 그 방법은 2.2절에 상세히 설명한 것과 같다. 즉, 높이값 Z 는 모형 토조의 테두리를 기준으로 아크릴면의 깊이 (6mm) 및 아크릴 케이스 두께 (24mm)

를 고려하여 $Z=-30\text{mm}$ 로 고정하여 수평좌표를 계산하였다. 예로 말뚝 관입 첫 단계에서 독취된 타겟점의 영상 좌표 위치가 Figure 7에 제시되었다.

3.4 지반 변형 모니터링

3.3절에서 번들 조정을 통해 계산된 내부/외부표정요소와 자동 독취된 타겟 영상좌표를 이용하여 최종적으로 번들조정으로 토조 내 타겟의 공간좌표를 계산했다. Table 2는 최종 번들 조정 시 타겟들의 영상 내 최소제곱오차(RMSE, Root Mean Square Error)를 보여주고 있으며, 모두 1픽셀 이내로 만족할만한 번들조정결과를 보임을 알 수 있었다.

말뚝 관입 단계별로 추출된 타겟의 공간좌표간의 거리가 10mm이내인 경우 동일한 타겟점으로 인식하고 단계별 트래킹을 수행하였으며, 그 결과 Figure 8과 같이 타겟점의 궤적을 획득할 수 있었다. 말뚝 하단부에서는 말뚝 관입에 따라 말뚝 위의 타겟점의 궤적이 확인되고, 말뚝 주변의 지반 변형 궤적 또한 시각적으로 표현되었다.

Figure 7. Automatic identification of targets inside the model (the image of penetration step 0)
(a) center photo (b) center photo (rotated) (c) right photo (d) left photo

Table 2. Bundle adjustment results
(residuals of target image coordinates in RMSE)

Penetration step	Row [Pixels]	Column [Pixels]
0	0.596	0.482
1	0.552	0.300
2	0.622	0.567
3	0.683	0.677
4	0.868	0.678
5	0.788	0.548
6	0.864	0.623
7	0.907	0.506
8	0.995	0.672

Figure 8. The plot of incremental soil deformation on the image of penetration step 0

4. 결론

본 논문에서는 근접 사진측량을 이용한 모형말뚝 선단부 주변의 지반 변형 측정 방법에 대하여 연구하였다. 모형 토조를 제작한 후 말뚝 관입 단계별로 말뚝 주변에서 지반 변형이 발생하는 크기 및 궤적을 엄밀 번들 조정을 기반으로 한 근접 사진측량으로 모니터링 하였다. 이를 위해 필요한 사진 조합, 기준점 설치 및 자동 독취, 타겟점 설치 및 자동 독취, 그리고 토조 환경에서 발생하는 빛 굴절 등을 고려한 방법론을 제시하고 실험결과와 함께 제시하였다. 실험 결과, 말뚝 관입 단계에 따라 성공적으로 기준점 및 타겟점 영상좌표를 추출하고 번들조정을 통해 지반 변형을 자동화된 공정으로 모니터링할

수 있었다. 따라서 지반 변형 측정 분야에서 다수의 타겟에 대한 정확하고, 경제적이며 시각적인 모니터링이 가능한 근접 사진측량의 활용이 기대된다.

본 연구에서는 말뚝 관입 단계에 따라 일부 타겟점이 모래에 묻힘에 따라 변형 측정을 위한 트래킹 가능한 타겟의 개수가 점점 줄어드는 단점이 존재했으며, 이를 개선하기 위한 방법 등이 향후 연구과제이다.

감사의 글

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 (일부) 지원으로 수행되었습니다.

References

- Fraser, C.S. (1997), Digital camera self calibration, *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, Vol. 52, pp. 149–159.
- Jung, S.H., Lee, J.Y. and Choi, S.K. (2011), Vibration Displacements Measurement of Slope Models using Close Range Photogrammetry, *Korean Journal of Geomatics*, Vol. 29, No. 6, pp. 561–568.
- Lee, C.N. and Oh, J.H. (2012), A Study on Efficient Self-Calibration of a Non-Metric Camera for Close-range Photogrammetry, *Korean Journal of Geomatics*, Vol. 30, No. 6, pp. 525–532.
- Lee, Y.J. (2006), Comparison of Shallow Model Tunnel Test Using Image Processing and Numerical Analysis, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 22, No. 7, pp. 5–12.
- Lee, Y.J. and Lee, J.M. (2012), Investigation of Strain Behaviour around the Tip of Model Pile – Comparison between Laboratory Model Test and Numerical Analysis, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 32, No. 4C, pp. 159–167.
- McGlone, C., Mikhail E., and Bethel, J. (2004), *Manual of Photogrammetry*, Fifth ed, ASPRS. pp. 870–879.
- Mikhail, E. M. and Bethel, J. S., McGlone, J. C. (2001), *Introduction to modern photogrammetry*, John Wiley & Sons Inc., New York, pp. 136–137.
- Oh, J.H., Lee, C.N. and Eo, Y.D. (2006), A Photogrammetric Network and Object Field Design

for Efficient Self-Calibration of Non-metric Digital Cameras, *Korean Journal of Geomatics*, Vol. 24, No. 3, pp. 281–288.

Simonini, P. (1996), Analysis of Behaviour of sand surrounding pile tips. *J Geotech Geoenviron Eng*, ASCE, Vol. 122, No. 11, pp. 897–905.

(접수일 2013. 04. 05, 심사일 2013. 04. 08, 심사완료일 2013. 04. 18)