

무타겟 사진측량 기반 모형 토조 내 지반 변위 측정 Soil Deformation Tracking in Model Chamber by Targetless Close-Range Photogrammetry

이창노¹⁾ · 오재홍²⁾

Lee, Chang No · Oh, Jae Hong

Abstract

This paper presents soil deformation measurement in model chamber based on photogrammetry. We created an aluminum framed acrylic model chamber with soil inside and applied photogrammetry to measure soil deformation caused by loading tests. The soil consists of 40% black and 60% regular sand to create image contrast in soil images. In preprocessing, the self camera calibration was carried out for IOPs (Interior Orientation Parameters), followed by the space resection to estimate EOPs (Exterior Orientation Parameters) using control points located along the aluminum frame. Image matching was applied to measure the soil displacement. We tested different matching window sizes and the effect of image smoothing. Experimental results showed that 65x65 pixels of window size produced better soil deformation map and the image smoothing was useful to suppress the matching outliers. In conclusion, photogrammetry was able to efficiently generated soil deformation map.

Keywords : Close-range Photogrammetry, Sand Chamber, Pile-load, Soil Deformation, Measurement

초 록

본 논문에서는 근접 사진측량에 기반하여 모형 토조 내 지반의 변위를 측정하기 위한 연구를 진행하였다. 알루미늄 프레임 및 투명 아크릴로 제작된 실내 모형 토조 내에 토사를 채워 넣고, 하중 재하 장치를 이용한 하중 재하를 통한 토사의 변위를 사진측량 기법으로 측정하였다. 토조 내의 토사는 영상 기반 자동 매칭을 위하여 검은 모래 약 40%, 일반 모래 약 60% 혼합하여 영상 대비의 정도를 높일 수 있도록 계획하였다. 전처리 과정으로서 실험실 카메라 캘리브레이션을 통해 내부표정요소를 도출하였고, 토조 프레임에 배치된 기준점을 이용한 후방교회법을 통해 외부표정요소를 예측하였다. 이후 영상 매칭을 통해 하중 전, 후의 토사 변위 패턴을 측정하였으며, 영상 매칭 시 활용되는 매칭 윈도우 크기 및 영상 스무딩 정도를 변경 적용하여 그 결과를 평가해보았다. 실험 결과, 매칭 윈도우 크기 65x65픽셀의 경우 안정적인 변위 도출이 가능하였으며, 영상 스무딩은 매칭의 과대 오차를 감소하는 효과를 보여주었다. 이를 통해 사진 측량을 통한 토조 내 지반 변위 패턴을 도출할 수 있었다.

핵심어 : 근접 사진측량, 모형 토조, 하중 재하, 지반 변위, 계측

Received 2019. 11. 28, Revised 2019. 12. 04, Accepted 2019. 12. 05

1) Member, Dept. of Civil Engineering, Seoul National University of Science and Technology (E-mail: changno@seoultech.ac.kr)

2) Corresponding Author, Member, Dept. of Civil Engineering, Korea Maritime and Ocean University (E-mail: jhoh@kmou.ac.kr)

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

지반에 대한 하중재하시험은 지반에 대한 변형성이나 강도 등 지지특성을 조사하기 위한 시험이다. 현장 또는 실험실 내 하중재하시험을 통해 지반의 허용지지력과 상부 구조물의 침하 패턴을 예측함으로써 안정된 시공 설계를 위한 기초 자료로 활용된다.

현장 하중재하시험의 경우 실물 또는 반력을 이용하는 방식으로서, 지반의 허용지지력을 예측하는 것이 어느 정도 가능하나, 지중 내 변형 특성을 예측하기는 어려우므로, 실험실 실내 모형에 의한 하중재하시험 및 지중 변위 측정 등에 대한 연구가 이루어지고 있으며, 지반의 변형 특성과 관련된 토조 모형실험이 많이 요구되고 있다(Lee, 2006). 시각적인 정보의 도출 및 정보 표출을 위해서는 토사의 분포, 팽창, 입자 파괴를 그림으로 나타내어 효율적인 말뚝 선단부 토사 연구를 수행하기도 하였다(Simonini, 1996).

영상을 이용한 지반 변위 측정기법은 X-ray를 이용하거나 입체 영상측정 기법을 이용하는 등 1960~70년대에 시작되었으며(Roscoe et al., 1963; Butterfield et al., 1970), 그 효율성을 인정받았다. 이후 디지털 영상을 이용한 본격적인 지반 변위 적용은 2000년대 들어 시작되었는데, White et al.(2003)이 사진측량 기법과 Particle image velocimetry를 이용하여 토사 변위를 영상으로 모니터링하기 위한 연구를 계속해오고 있으며, 최근 들어 Stanier et al.(2015)에 의해 해당 기법을 발전시켜오고 있다. 또한 Shao et al.(2018)은 카메라 및 거울, LED (Light Emitting Diode) 등을 활용한 토사 변위 측정에 대한 연구를 진행하는 등 다양한 장치를 이용한 측정에 대한 연구도 진행되고 있다.

국내에서는 유사연구로서 수치사진측량을 이용하여 보강토 옹벽 실내모형 장치에 모형지반 변형량을 측정하기 위한 연구가 수행되었고(Lee, 2008), 근접 사진측량 기법을 적용하여 모형 사면의 지표부 및 내부 3차원 변위를 정밀하게 측정하기 위한 연구가 진행되었다(Jung et al., 2011). 또한 말뚝 관입에 따른 말뚝 선단부 주변의 지반 변형 측정을 위해 근접 사진측량을 이용하는 방법이 연구되었다(Lee and Oh, 2013).

일반적으로 영상을 이용한 지반 변위 측정을 위해서는 일정한 재질을 갖는 토사에 영상 처리의 정확성 및 효율성을 올리기 위한 타겟을 삽입하여 해당 위치에 대한 변위를 측정하거나 모니터링 하는 방식이 일반적이다. 그러나 이러한 방식은 적절한 위치에 타겟을 배치하는 것이 쉽지 않으며, 설치된 타겟이 거동하는 모래에 묻혀서 보이지 않는 문제가 발생한다. 따라서 본 연구에서는 이러한 인공 타겟을 활용하지 않는 경우 토조 내의 지반 변위를 측정하기 위한 방법을 연구해보았다. 별도의 타겟을

활용하지 않고 혼합토사를 이용하여 영상의 대조도를 증가시켜 활용하였으며, 혼합 토사의 불규칙성 등으로 인해 매칭의 불확실성 또한 향상되므로 이를 고려하여 매칭 윈도우 크기, 영상 스무딩 등이 매칭 및 변위 측정에 미치는 효과에 대한 평가를 수행해 보았다.

본 논문의 구성은 아래와 같다. 2장에서는 근접 사진측량을 모형 토조 변위 측정에서 활용하기 위해 필요한 변들 조정 및 영상 매칭에 대한 내용이 설명된다. 3장에서는 카메라 캘리브레이션, 실험 모형 구성 및 사진 측정, 매칭 윈도우 및 영상 스무딩 실험 내용 및 실험결과를 제시하였다. 마지막으로 4장에 결론이 제시된다.

2. 사진측량 전처리 및 영상 매칭

2.1 전처리

사진측량을 위한 영상 획득 처리를 위해서 필수 전처리 과정으로 거쳐야할 부분이 카메라 캘리브레이션 및 변들 조정이다. 카메라 캘리브레이션은 카메라의 내부표정요소를 정밀하게 예측해내는 과정이며, 변들 조정은 사진 촬영 당시의 위치 및 자세 정보인 외부표정요소를 예측해내는 과정이다. 두 과정 모두 공선조건식에 기반하여 이루어지는 절차이다.

저가의 카메라를 이용할 경우 공선조건식은 초점거리(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 Eq. (1)과 같은 식을 활용한다.

$$\begin{aligned} x - x_0 + \Delta x_r(K_1, K_2, K_3) + \Delta x_d(P_1, P_2) + \Delta x_f(b_1, b_2) &= -f \frac{U}{W} \\ y - y_0 + \Delta y_r(K_1, K_2, K_3) + \Delta y_d(P_1, P_2) &= -f \frac{V}{W} \end{aligned} \quad (1)$$

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

where, x, y are image coordinates, X, Y, Z are ground coordinates, X_L, Y_L, Z_L are perspective center coordinates, M is rotation matrix consisting of roll(ω), pitch(ϕ), yaw(κ) ($M = M_r M_\phi M_\omega$). f is focal length, x_0, y_0 are principal offset, K_1, K_2, K_3 are radial distortion parameters, P_1, P_2 are decentering distortion parameters, b_1, b_2 are in-plane distortion parameters.

카메라 캘리브레이션의 경우 외부표정요소, 내부표정요소 및 지상기준점 모두를 미지수로 설정하고, 지상기준점의 초기

치 값을 기반으로 하여 상기 비선형 Eq. (1)을 테일러급수 전개를 통해 선형화하고 단일 최소제곱식(unified least square equation)인 Eq. (2)를 구성하여 정규방정식을 통해 해법을 도출한다(Mikhail *et al.*, 2001). 이 때 내부표정요소 매개변수별 편미분 계수는 아래 Eq. (3)와 같이 나타내질 수 있다 (McGlone *et al.*, 2004; Oh *et al.*, 2006).

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

where \cdot indicates exterior orientation parameters, $\hat{\cdot}$ is for interior orientation parameters, $\ddot{\cdot}$ is for the ground control points, B is coefficient matrices derived from Eq. (1), δ is correction, I is identity matrix, l is constant, v is residual vector.

$$\hat{B} = \begin{bmatrix} df & dx_0 & dy_0 & dK_1 & dK_2 & dK_3 & dP_1 & dP_2 & db_1 & db_2 \\ -\bar{x}/f & -1 & 0 & \bar{x}r^2 & \bar{x}r^4 & \bar{x}r^6 & (3\bar{x}^2 + \bar{y}^2) & 2\bar{x}\bar{y} & \bar{x} & \bar{y} \\ -\bar{y}/f & 0 & -1 & \bar{y}r^2 & \bar{y}r^4 & \bar{y}r^6 & 2\bar{x}\bar{y} & (\bar{x}^2 + 3\bar{y}^2) & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

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

카메라 캘리브레이션이 성공적으로 종료되어 카메라 내부표정요소가 정확하게 예측되면, 향후 촬영되는 사진을 이용하여 측정할 때는 내부표정요소를 상수로 고정시키고 외부표정요소만을 예측하는 식을 활용하면 된다.

2.2 변위 측정을 위한 하중 전후 영상 매칭

본 연구에서는 하중 재하 전, 후 영상간의 매칭을 상관계수 매칭을 통해 수행하였다. 상관계수는 Eq. (4)와 같이 계산되는 영역 기반 매칭기반 방법이다. 기준 영상 L의 관심지점 주변 $w \times w$ 픽셀 크기의 윈도우 내의 화소값과 대상 영상 R의 관심지점 주변 $w \times w$ 픽셀 내 화소값을 이용하여 유사도를 측정한다. 1에 가까운 값일수록 유사도가 높음을 의미하며, 일반적으로 0.7 또는 0.8 이상이면 유사도가 높다고 판단한다.

$$NCC = \frac{\sum_{i=1}^w \sum_{j=1}^w (L_{ij} - \bar{L})(R_{ij} - \bar{R})}{\sqrt{\left[\sum_{i=1}^w \sum_{j=1}^w (L_{ij} - \bar{L})^2 \right] \left[\sum_{i=1}^w \sum_{j=1}^w (R_{ij} - \bar{R})^2 \right]}} \quad (4)$$

where, L is the image patch in reference image, and R is the target image patch within the search region, both are in the size of $w \times w$. \bar{L}, \bar{R} are averages of all intensity value in the patches.

3. 실험 방법 및 결과

본 연구의 절차는 Fig. 1과 같다. 먼저 실험을 위한 토조를 제작하고, 카메라 캘리브레이션을 위한 정밀 타겟을 별도로 제작하였다. 정밀 타겟을 이용하여 카메라 캘리브레이션을 수행한 후 실험 카메라를 이용하여 토조에서 하중재하 전, 후에 대한 영상을 취득하고 각 영상에 대한 외부표정요소를 예측하였다. 이때 기준점은 토조 프레임에 설치한 타겟을 활용하였다. 무타겟 방식 변위 측정을 위해서 변위 측정 위치를 토조 표면에서 일정한 격자 간격으로 생성하고, 각 격자를 하중 재하 전, 후에 취득한 영상으로 투영하여 두 영상에서 격자 포인트를 생성하였다. 이때 영상 투영은 카메라 캘리브레이션으로 얻어진 내부표정요소 왜곡을 고려한 공선조건식을 활용하였다. 최종적으로 두 영상에서 생성된 격자 포인트 간에 영상 매칭을 통해 이동량을 도출하고 벡터 맵을 생성하였다.

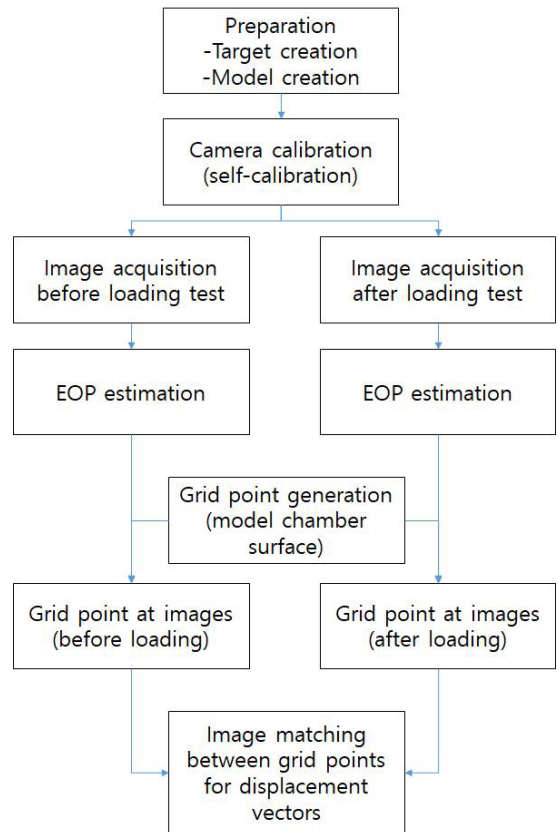


Fig. 1. The flowchart for measurement of soil deformation before and after loading test

3.1 카메라 캘리브레이션

본 연구에서 사용한 카메라의 제원은 Table 1과 같다. 약 2천만 화소를 갖는 비측정용 카메라이며 렌즈는 단초점 50mm를 사용하였다. 렌즈 및 카메라 제원에 따른 해상도는 거리 2m에서 약 0.26mm를 보인다.

Table 1. Camera specification

	Specification
Camera	Canon EOS 5D Mark II
Type	DSLR
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
GSD at 2 meters	maximum 0.26 mm

비측정용카메라의 카메라 캘리브레이션을 위해 Fig. 2와 같이 정밀 타겟을 생성하였다. 정밀한 초점거리의 예측을 위해 평면이 아닌 고도값을 갖는 3차원 형태의 타겟을 목재를 이용하여 제작하였고, 각 지점에는 시트타겟을 부착하여 토탈 스테이션을 활용하여 정밀한 위치를 측정하여 기준점으로 사용하였다.

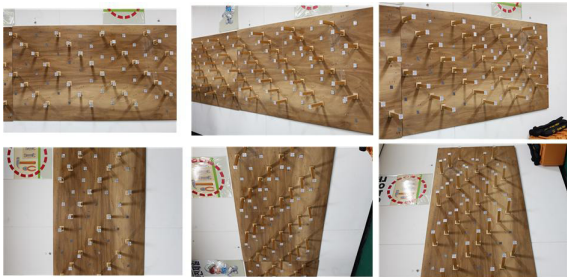


Fig. 2. Image acquisitions for camera calibration

Table 2는 각 기준 지점의 3차원 좌표값을 나타내고 있다. Z축이 타겟에 수직인 방향을 나타내며, 튀어나온 목재의 경우 약 20cm의 표고차이를 보이고 있다.

본 연구에서는 카메라 캘리브레이션 시 초점거리 및 왜곡 요소를 모두 포함하는 10개의 파라미터를 미지수로 하여 예측하였으며, 최종 조정 결과의 RMSE (Root Mean Square Error)가 1.1 픽셀정도로서 도출되었다. 각 영상별 외부표정요소는 Table 3과 같이 예측되었고, 내부표정요소는 Table 4와 같이 예측되었다.

Table 2. Control points coordinates measured using a total station

Point ID	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	Point ID	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)
1	96.5	882.3	214.3	31	1139.2	302.5	8.6
2	96.0	640.9	9.6	32	1133.3	23.8	217.0
3	98.0	392.4	215.0	33	1286.1	885.5	209.3
4	96.7	140.4	10.3	34	1285.8	602.6	5.7
5	240.7	754.1	215.0	35	1284.3	391.9	211.9
6	247.0	517.8	10.6	36	1285.6	169.8	9.4
7	243.7	267.9	215	37	1428.4	774.2	209.1
8	231.2	3.8	9.9	38	1430.3	580.2	6.7
9	390.9	884.4	9.8	39	1429.4	272.3	213.1
10	388.6	643.2	216.7	40	1424.5	24.0	13.1
11	392.5	393.4	11.5	41	1584.0	871.5	4.0
12	390.2	142.7	215	42	1584.6	641.9	209
13	537.6	759.8	10.1	43	1582.2	446.2	8.1
14	540.0	511.5	216.1	44	1575.3	152.7	214.6
15	542.6	270.9	11.1	45	1726.5	751.6	4.7
16	539.3	20.2	214.6	46	1727.0	532.7	209.6
17	690.4	883.2	212.5	47	1728.7	305.0	9.4
18	690.1	643.3	9.8	48	1722.0	26.6	216.9
19	690.3	394.0	215.4	49	1878.2	893.7	207.0
20	690.0	144.8	10.7	50	1880.4	622.8	5.3
21	840.3	762.8	213.1	51	1876.7	390.3	211.3
22	843.8	528.5	8.9	52	1878.2	167.7	12.0
23	839.9	269.7	215.2	53	2022.5	781.3	206.1
24	838.3	20.5	10.7	54	2030.0	581.7	4.2
25	990.5	868.4	5.7	55	2022.3	279.0	211.4
26	992.6	642.8	211.4	56	2033.6	85.8	12.3
27	988.7	434.4	8.1	57	2177.7	871.4	2.2
28	982.5	147.2	215.1	58	2178.5	637.3	206.0
29	1141.0	738.2	5.8	59	2167.7	450.2	6.3
30	1141.0	519.0	210.9	60	2173.2	148.8	213.7

Table 3. Bundle adjusted exterior orientation parameters

roll (degree)	pitch (degree)	yaw (degree)	XL (mm)	YL (mm)	ZL (mm)
-1	0	0	1123	486	3432
1	2	-90	1016	421	3432
-2	45	0	3579	491	2536
2	44	-92	3418	445	2573
-2	-39	-2	-1127	486	2584
0	-43	-91	-1207	425	2515

Table 4. Camera calibration results

focal length f [mm]	$f = 5.2219e+01$
principal offsets x_0, y_0 [mm]	$x_0 = -1.0061e-01$ $y_0 = 1.5801e-01$
radial distortions K_1, K_2, K_3	$K_1 = 4.0880e-05$ $K_2 = 7.9048e-08$ $K_3 = -1.6591e-10$
decentering distortions P_1, P_2	$P_1 = 3.3196e-05$ $P_2 = -9.2184e-06$
In-plane distortion b_1, b_2	$b_1 = 1.2517e-04$ $b_2 = -1.0894e-04$

3.2 모형 토조 구성 및 사진 측정

실험을 위한 대상 모형 토조는 Fig. 3에 보이는 것과 같이 알루미늄 프레임에 전, 후면 아크릴 판을 이용하여 제작되었으며 토조의 크기는 폭 1.5m, 깊이 1.0m, 높이 0.7m 이다. 상부에는 하중을 재하할 수 있는 하중재하장치를 좌우로 움직일 수 있도록 설치하였다. 토조 내의 토사의 변위는 영상매칭에 의해 측정하기로 하였으며, 따라서 색상의 차이를 생성하기 위해 검은 모래 약 40%, 일반 모래 약 60% 혼합하여 사용하였다.

사진 촬영은 하중 재하 전, 후 두 차례 이루어졌으며 알루미늄 프레임에는 18개의 사진측정 기준점을 설치하여 토조를 촬영한 카메라의 외부표정요소 예측에 활용하였다(Fig. 4).

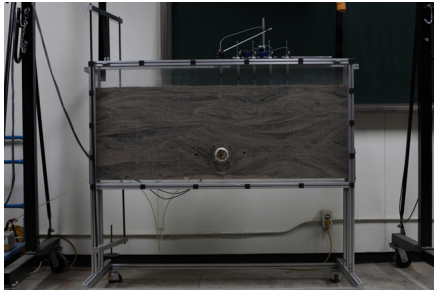


Fig. 3. Designed model chamber

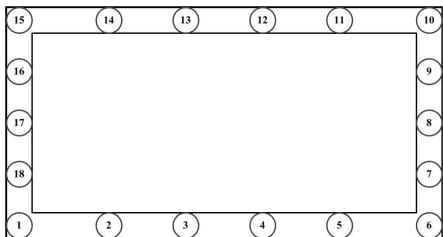


Fig. 4. Control points distribution around the model chamber

번들 조정 시에는 앞서 캘리브레이션을 통해 구해진 내부표정요소 값을 고정하고, 외부표정요소만을 미지수로 설정하여 진행하였다. 또한 알루미늄 프레임에 설치된 18개의 기준점 중 사진측정 후 탈착되어 기준점 위치가 달라지거나 하중 실험을 위한 봉에 가려진 타겟 7개를 제외한 나머지 11개 기준점으로 외부표정요소를 구하였다. 하중 재하 전, 후 영상의 외부표정요소 예측결과는 Table 5와 같다.

Table 5. Exterior orientation parameters estimation before and after loading test

EOPs	roll (degree)	pitch (degree)	yaw (degree)	XL (mm)	YL (mm)	ZL (mm)
Before	-0.23	1.22	-0.32	822.1	258.6	3650.6
After	-0.30	0.96	-0.20	815.4	261.8	3636.0

번들 조정 정밀도를 평가하기 위하여 하중 재하 전, 후에 대하여 11개의 기준점의 영상 좌표에 대한 잔차를 계산하여 Table 6에 제시하였다. 하중 재하 전, 후에 대하여 수평, 수직 방향 모두 1픽셀 이하로 RMSE가 도출되어 정밀한 번들조정이 이루어졌음을 알 수 있었다.

Table 6. Residuals at control points before and after loading test

Before loading			After loading		
Point ID	vx(pixel)	vy(pixel)	Point ID	vx(pixel)	vy(pixel)
1	-1.1372	-0.3683	1	-1.3672	-0.0596
2	-1.1466	-0.0963	2	-1.0948	-1.0266
3	0.2606	-0.3887	3	0.4603	0.3979
4	0.1916	0.7968	4	0.1182	0.3221
5	-0.1369	0.898	5	-0.7967	0.1363
6	-0.9968	-0.5818	6	-0.7715	0.4501
7	-0.1604	0.5816	7	-0.0509	0.804
8	0.2139	0.3095	8	0.3143	-0.0817
9	1.2452	-0.5189	9	1.3221	-0.5018
10	1.168	-0.5645	10	1.4072	-0.4679
11	0.4968	-0.0745	11	0.4568	0.0207
RMSE	0.7953	0.5312	RMSE	0.8822	0.4922

3.3 변위 측정

Fig. 5는 토사의 변위 측정을 위해 첫 번째 사진에서 격자 간격으로 생성한 대상 패치 중앙점이다. 해당 중앙점을 기준으로 추출된 패치를 기준으로 다음 사진과의 매칭을 통해 변위 패

턴을 추출하였다. 앞서 설명한 것과 같이 토사는 검은 모래 약 40%와 일반 모래 약 60% 혼합하여 사용하였기 때문에, 패치 내의 대조도가 존재하여 하중 전과 후의 패치 간 매칭이 가능하였다.

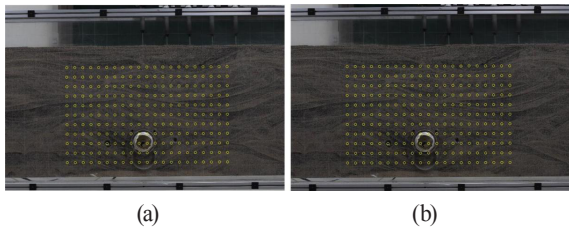


Fig. 5. Generated grid on the images (a) before loading (b) after loading

본 연구에서는 하중 전, 후 영상간의 매칭을 윈도우기반 상관계수를 통해 진행하였으며, 이 때 사용되는 윈도우의 크기의 변화에 따른 매칭률을 계산해보았다. 이때 매칭은 생성된 그리드 포인트에 대해 수행되었다. Fig. 6은 매칭 윈도우 크기를 증가시키에 따른 평균 상관계수(mean cross correlation)를 그래프로 나타낸 것으로서, 윈도우 사이즈가 클수록 평균 상관계수 수치가 낮아지는 경향을 보여주고 있다. 윈도우 크기가 커짐에 따라 패치 내에 변위에 의한 기하학적 변화가 많이 내포됨에 따라 영상 간의 상호 유사성이 낮아지기 때문에 판단된다.

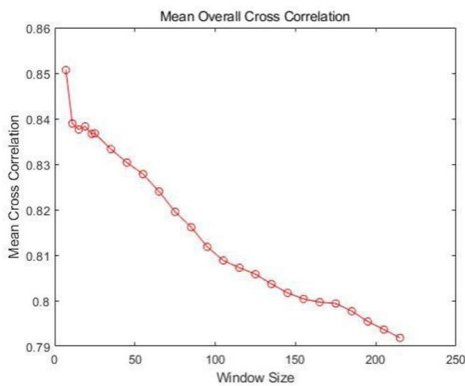


Fig. 6. Mean cross correlations for matching window sizes (all cases)

Fig. 7은 매칭 윈도우 크기를 증가시키에 따른 상관계수가 0.5를 넘는 매칭점의 비율을 그래프로 나타낸 것으로서, 매칭 윈도우 크기가 클수록 비율이 낮아짐을 볼 수 있으며, 이는 윈도우 크기가 커짐에 따라 영상간의 유사도가 낮아지므로 비율 또한

같은 경향을 보이는 것을 확인할 수 있다. 본 연구에서 0.5 이상의 값을 평균한 이유는 매칭 윈도우 크기에 따라 평균 상관계수의 변화를 보다 잘 보여주기 위한 것이다.

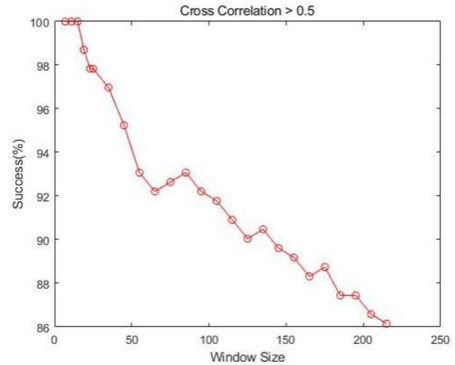


Fig. 7. High cross correlation rates for matching window sizes

Fig. 8은 0.5 이상의 상관계수를 보이는 지점에 대해서만 평균 상관계수를 구하여 그래프로 나타내 본 그림이다. 매칭 윈도우 크기가 커짐에 따라 평균 상관계수가 처음에는 급속히 낮아져서 15에서 최저점이 되었다가 다시 높아져서 65에서 최고점을 보이는 패턴을 나타내었다. 즉, 해당 실험에서는 매칭 윈도우 크기가 65픽셀일 때, 가장 높은 상관계수 값을 나타낸 것을 알 수 있었다.

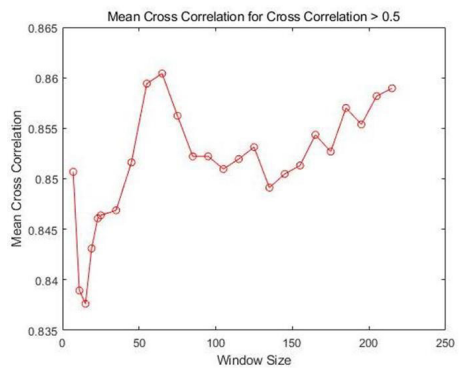


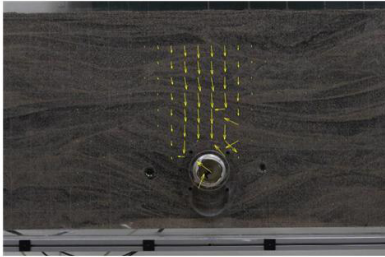
Fig. 8. Mean cross correlations for matching window sizes (correlation larger than 0.5)

Fig. 9는 윈도우 크기별로 매칭결과 도출된 변위를 영상 위 벡터의 형태로 나타낸 결과이다. 그림에서는 윈도우 크기 7x7 픽셀, 15x15픽셀, 65x65픽셀에 대해서 하중 전, 후에 대한 결과를 보여주고 있다. 7x7의 경우 앞서 제시한 결과에서 보면, 전체

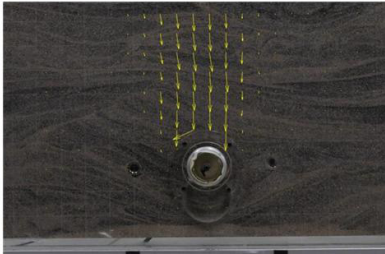
상관계수 평균값 및 매칭 성공률은 높았으나 과대 오차가 많은 것을 확인해볼 수 있고, 15x15픽셀 및 65x65픽셀로 윈도우 크기를 증가시키면 따라 과대 오차의 발생 정도가 급격하게 감소함을 알 수 있었다. 따라서 본 연구에서 진행한 토조 실험에서는 65x65픽셀 크기의 매칭 윈도우를 사용하는 것이 가장 안정적인 매칭의 개수와 과대 오차에 덜 민감한 결과를 보여주었다.



(a) window size 7x7



(b) window size 15x15

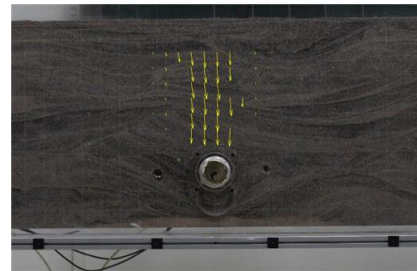


(c) window size 65x65

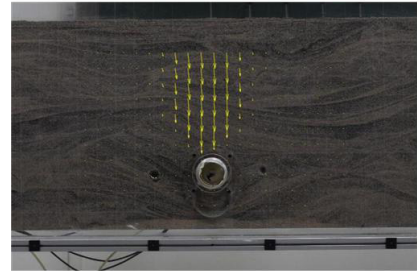
Fig. 9. Deformation vectors derived from image matching

다음으로, 영상 스무딩을 통한 노이즈 효과의 감소에 대한 실험을 진행하였다. 영상 스무딩에는 5x5 픽셀 크기의 Median 필터를 사용하였고, 매칭 윈도우 크기는 65x65픽셀이다. Median 필터는 비선형 필터로서 신호 잡음을 제거하는데 자주 사용되는 것으로서 선택되었다. Fig. 10(a)는 영상 스무딩 없이 상관계수 0.5 이상으로 매칭된 지점에 대한 변위를 벡터로 표시한 그림이며, Fig. 10(b)는 영상 스무딩을 진행하되, 모든 매칭점에 대한 변위를 벡터로 표시하였다. 마지막으로 Fig. 10(c)는 영상 스무딩을 진행하고, 상관계수 0.5 이상으로 매칭된 지점에 대한

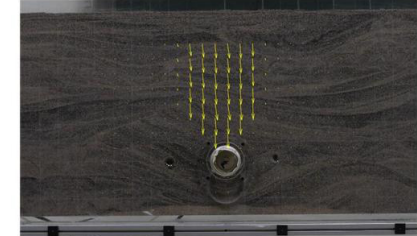
결과만을 변위 벡터로 표시한 그림이다. 영상 스무딩을 적용한 경우가 보다 나은 매칭의 성능을 보여주고 있는 것을 확인할 수 있었으며, 스무딩을 적용 시 상관계수 0.5 이상의 기준을 적용하지 않더라도 과대 오차 등의 영향이 크게 감소하여 변위 벡터를 유도한 결과가 나쁜 품질을 보이지 않는 것을 확인할 수 있었다.



(a) cross correlation > 0.5



(b) no cross correlation threshold with 5x5 median filter



(c) cross correlation > 0.5 and 5x5 median filter

Fig. 10. Effects of image smoothing and thresholding

4. 결론

본 논문에서는 모형 토조 내 지반의 하중 재하 전, 후의 변위를 무타겟 방식 사진측량 기법으로 측정하기 위한 연구를 진행하였다. 무타겟 측정을 위해 토조 내의 토사를 검은 모래 약 40%, 일반 모래 약 60% 혼합하여 영상 대비의 정도를 높여 진행하였다. 정밀 카메라 캘리브레이션 수행한 카메라를 이용하여 재하시험 전, 후 영상을 취득하였고 두 영상 내 동일 격자 포인트 위치에 대한 영상 매칭을 통해 하중 전, 후의 토사 변위 패

턴을 측정하고 벡터맵을 생성할 수 있었다. 추가적으로 영상 매칭 시 활용되는 매칭 윈도우 크기 및 영상 스무딩 정도를 변경 적용한 결과 매칭 윈도우 크기 65x65픽셀의 경우 안정적인 변위 도출이 가능하였으며, 영상 스무딩은 매칭의 과대 오차를 감소하는 효과를 보여주었다. 향후 토조 내 토사를 보다 다양한 색상의 흙으로 조합할 경우 컬러 영상을 이용한 매칭 성능을 향상시킬 수 있으리라 판단된다.

References

- Butterfield, R., Harkness, R.M., and Andrawes, K.Z. (1970), A stereo-photogrammetric technique for measuring displacement fields, *Géotechnique*, Vol. 20, No. 3, pp. 308-314.
- 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. (in Korean with English abstract)
- Lee, C.N. and Oh, J.H. (2013), Measurement of soil deformation around the tip of model pile by close-range photogrammetry, *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, Vol. 31, No. 2, pp. 173-180. (in Korean with English abstract)
- Lee, H.S. (2008), The deformation measurement of simulated ground using movable orientation board for photogrammetry, *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, Vol. 26, No. 4, pp. 323-331. (in Korean with English abstract)
- 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. (in Korean with English abstract)
- McGlone, C., Mikhail E., and Bethel, J. (2004), *Manual of Photogrammetry*, Fifth ed, ASPRS. pp.870-879.
- Mikhail, E.M., Bethel, J.S., and 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. (in Korean with English abstract)
- Roscoe, K.H., Arthur, J.R.F., and James, R.G. (1963), The determination of strains in soils by an X-ray method, *Civ. Engng Public Works Rev.*, Vol. 58, pp. 1009-1012.
- Shao L., Guo X., and Zhao B. (2018), Digital image measurement system for soil specimens in triaxial tests, In: Wu, W. and Yu, H.S. (eds.), *Proceedings of China-Europe Conference on Geotechnical Engineering, Springer Series in Geomechanics and Geoengineering*, Springer, Cham, pp.611-614.
- Simonini, P. (1996), Analysis of behaviour of sand surrounding pile tips. *J Geotech Geoenviron Eng*, Vol. 122, No. 11, pp.897-905.
- Stanier, S., Blaber, J., Take, W., and White, D. (2015), Improved image-based deformation measurement for geotechnical applications, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 53, No. 5, pp. 727-739.
- White, D., Take, W.A., and Bolton, M. (2003), Soil deformation measurement using particle image velocimetry (PIV) and photogrammetry, *Geotechnique*, Vol. 53, pp. 619-631.