

디지털카메라를 이용한 사면 변형해석

Analysis of Slope Deformation for Inclined Plane by using Digital Camera

김명배¹⁾, Myoung-Bae Kim, 박종호²⁾, Jong-Ho Park

1) 명지전문대학 부교수, Assitant Professor, Dept. of Civil Engineering, Myong Ji College

2) 대원토질(주) 전무이사, Managing Director, Daewon Soil CO., Ltd

1. 서 론

1.1 연구 필요성 및 목적

사회간접자본시설 등은 국민들의 손과 발의 역할을 담당하는 중요한 시설물로서 그에 대한 안전성확보를 위한 노력은 국민의 생명을 보장하는 중요한 일이다. 그의 일환으로 구조물에 대한 건설 및 일정시간이 경과한 후의 구조물의 안전여부를 확인하는 정밀안전진단을 실시하고 있으며, 그의 결과를 토대로 구조물의 보수보강을 통해 안전성을 확보하고 있다. 그러나 이들 구조물에 대한 안전진단에 사용되고 있는 장비들 중 대부분이 외국에서 수입되어오는 장비로서 그 가격이 매우 높을 뿐만 아니라 장비의 보수 및 검정이 매우 어려운 실정이다. 또한 대부분의 장비들이 센서를 구조물내에 부착하여 구조물에서 전달하여오는 진동주파수 등의 신호주파수를 받아 구조물의 변화를 해석하도록 하는 방법이기 때문에 센서의 부착위치에 따라 구조물의 변화여부가 달라질 수 있는 문제를 내포하고 있고, 실질적인 육안확인이 불가능한 상태라 할 수 있다. 또한 최근 수치영상 장비와 기술의 발달로 인해 각종 분야 즉, 인공위성에 의한 영상정보의 획득에서부터 각종 분야에서의 영상감시분야에 까지 수치사진측량에 대한 활용이 활발히 이루어지고 있으며 특히 변위해석의 기하학적 3차원 위치결정에 있어서 신뢰성이 있고 사용하기 쉬우며 상대적으로 값싼 수치사진기(Digital Camera)를 이용한 수치사진측량기법이 빠르게 확산되고 있다. 이에 수치사진기에 의한 구조물(특히 보강된 사면)의 변위관측시스템의 개발을 모색하도록 한다.

1.2 연구 방법

본 연구에서는 비 측정용 카메라인 CCD형 디지털카메라를 활용하여 촬영한 두 장의 사진으로부터 영상 상의 타겟 중심좌표를 측정하고 직접선형변환에 의한 좌·우측 영상의 외부표정요소를 도출한 후 후방교선법에 의한 3차원 지상좌표를 얻어내고자 한다. 이 모든 일련의 과정을 절차형 프로그램이 아닌 객체 지향 기법을 사용하여 각 단위 과정을 함수화, 객체화 하였으며 이들 객체를 통합함으로써 윈도우 환경의 통합환경 기반을 완성하고 사용자 인터페이스를 조성하여 원하는 데이터를 손쉽게 획득할 수 있도록 하였다. 또한 시스템 운용의 효과를 증대시키기 위해 타겟 번호를 인식하여 자동으로 좌우 영상의 타겟을 매칭 할 수 있도록 하였다. 이에따른 기본적인 과정은 다음과 같다.

1.2.1 클래스 제작

타겟 인식과 타겟의 좌표측정을 위해, 관련 매소드와 프로퍼티를 정의한 객체를 하나의 클래스로 구성하여 타겟 클래스를 제작하였다. 영상의 수치 자료화를 통해 타겟의 자동인식 루틴을 형성하고 영상좌표의 측정정확도 향상을 위한 영상 분할과 부화소 위치측정 방법을 객체화하여 사용자의 요구에 적합한 프로퍼티를 갖게 하였으며 DLT 클래스에서는 DLT 계수 $L_1 \sim L_{11}$ 를 구하여 내부 외부 표정요소를 계산하였고 Get3Dcoord 클래스에서 전방교회법을 사용하여 구하고자 하는 타겟의 3차원 공간 좌표를 계산하였다.

1.2.2 수치 사진측량 시스템

본 연구에서는 수치사진측량의 일련의 과정을 수행하기 위한 수치사진측량 컴포넌트를 개발하고자, 소프트웨어 공학에서의 객체지향 프로그래밍 기법을 사용하였다. 그림 1.1은 윈도우 응용프로그램의 클래스 계층도를 나타낸 것으로, 사용자는 이벤트에 대한 반응을 정의하여 프로그램을 완성하게 된다.

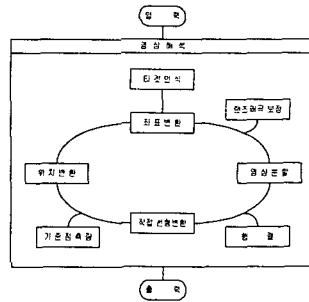


그림 1.1 클래스 계층도

영상 분할방법을 이용하여 각 측정점에 대한 임계값을 결정하였으며 임계값을 기준으로 타겟의 밝기값을 255, 타겟 이외의 밝기값을 0으로 하여 255 밝기값이 5픽셀 이상이면 타겟으로 인식하게 하였다. 인식된 타겟에 번호를 부여하고 도심측정 방법을 통하여 타겟 중심의 좌표값을 계산하고 이를 출력창에 나타내었다.

2. 연구 내용

2.1 CCD사진기의 영상취득 원리

대상물에서 반사된 빛은 CCD 사진기의 렌즈에 의해 연속신호로 수집되고 CCD 센서가 강도를 감지함으로써 수집된 빛은 아날로그 전압신호로 전달된다. 이 신호가 A/D(analog to digital)변환자에 의해 수치정보로 변환이 이루어지는데, 관측목적에 위하여 이 강도는 전형적으로 0(black)에서 255(white)범위의 밝기 값으로 변환된다. 일반적으로 CCD사진기를 이용하여 수치영상을 실시간으로 얻기 위해서는 컴퓨터 영상보드의 프레임포착기가 필요하며 그림 2.1과 같이 A/D 변환을 수행하여 영상을 모니터상에 출력한다.

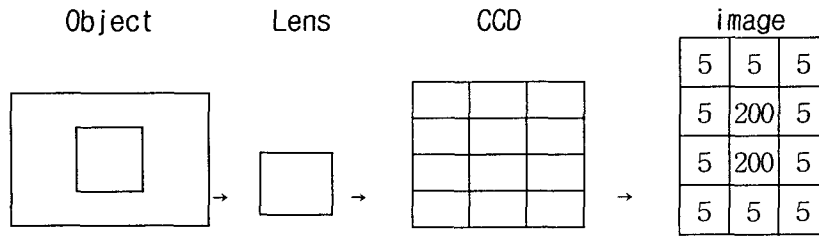


그림 2.1 CCD사진기의 영상취득 원리

2.2 타겟인식 및 타겟 중심좌표 측정

2.2.1 영상 분할

임계값은 가장 폭넓게 사용되는 영상분할 방법으로 중요한 영상처리 과정중의 하나이며, 검색 영역내 밝기정보의 평균값과 분산, 그리고 표준오차를 이용하여 결정될 수 있다. 임계값을 결정하는 방법을 나타낸 것이다. 일반적으로 간단히 수행할 수 있는 영상분할방법은 다음 식과 같다.

$$T = \alpha_1 \mu + \alpha_2 \sigma$$

$$\mu = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n a(i, j)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (a(i, j) - \mu)^2} \quad 2.1$$

여기서 μ 는 평균 밝기값, σ 는 밝기값의 표준오차, α_1, α_2 는 영상의 특수계수(1~2), n, m 는 검색 영역 크기, $a(i, j)$ 는 i, j 화소의 밝기값이다.

2.2.2 위치 측정

타겟의 중심위치를 보다 정확히 측정하기 위한 방법으로 도형의 도심을 이용한 도심측정방법과 외곽선 검출에 의한 타원피팅방법이 많이 활용되고 있다. 도심측정방법은 검색 영역내 영상의 밝기값을 정보로 이용하여 타겟의 중심위치를 계산하는 방법으로서, 타겟의 밝기값을 경중률로 사용하며 경중률을 달리하여 타겟의 중심 위치를 계산한다. 상수, 밝기값, 밝기값의 자승을 경중률로 사용한 3가지 도심측정방법의 수학적 모형식은 식 2.2와 같다.

$$x_t = \frac{\int_{i=1}^m \int_{j=1}^n i \cdot w(i, j)}{\int_{i=1}^m \int_{j=1}^n w(i, j)}, \quad y_t = \frac{\int_{i=1}^m \int_{j=1}^n j \cdot w(i, j)}{\int_{i=1}^m \int_{j=1}^n w(i, j)} \quad 2.2$$

여기에서, x_t, y_t 는 타겟의 검색 영역 크기, m, n 는 타겟의 검색 영역 크기 $w(i, j)$ 는 i, j 화소의 경중률이다.

2.2.3 직접 선형 변환

비측정용 카메라는 주점좌표를 모르기 때문에 주점좌표를 사용하지 않고 공간좌표를 구할 수 있는 많은 독특한 방법이 개발되었으며 그중 하나가 직접선형변환 방법이다

$$x + (x - x_0)(K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6 + \dots) + [r^2 + 2(x - x_0)^2]P_1 + 2(y - y_0)(x - x_0)P_2 = \frac{L_1 X + L_2 Y + L_3 Z + L_4}{L_9 X + L_{10} Y + L_{11} Z + 1}$$

$$y + (y - y_0)(K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6 + \dots) + 2(x - x_0)(y - y_0)P_1 + [r^2 + 2(y - y_0)^2]P_2 = \frac{L_5 X + L_6 Y + L_7 Z + L_8}{L_9 X + L_{10} Y + L_{11} Z + 1}$$

여기서, $r^2 = (x^2 + y^2)$ 이고 x, y 는 측정된 영상 점의 정밀좌표측정기 좌표, x_0, y_0 는 정밀좌표 측정기 좌표계에서의 주점의 위치, K_1, K_2, K_3, P_1, P_2 는 렌즈 왜곡 계수, X, Y, Z 는 영상 점의 대상공간좌표, $L_1 \sim L_{11}$ 는 미지의 변환 계수이다.

3. 실험 및 정확도 분석

3.1 정확도 분석실험

구조물의 변위관측에 대한 효과 검증과 개발한 프로그램의 적용성을 파악하기 위하여 본 연구에서는 그림 3.1과 같이 구성후 촬영하였으며, 촬영에 사용된 관측대상물에 대한 대상점 분포도는 그림 3.2과 같다. 또한 구조물의 위치등 카메라촬영조건에 따른 측정결과의 정확도를 분석하기 위하여 대상물에 수직방향과 경사방향으로 각각 카메라에 의해 촬영되도록 하였다.

관측대상물의 모형은 그림3.1, 그림3.2에서 보는 바와 같이 검정색 캔트지에 5mm 및 12mm 크기의 시트식 반사타겟을 5cm×5cm 간격으로 부착한 후 카메라에 대해 정면을 향하도록 설치하였다.

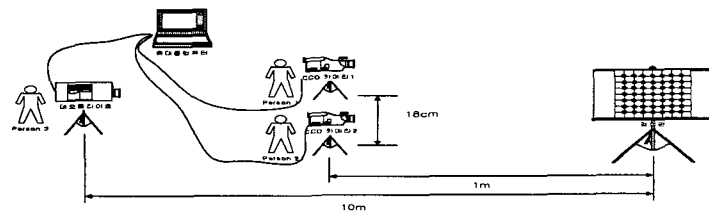


그림 3.1 촬영모형

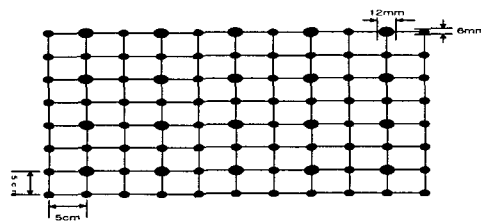
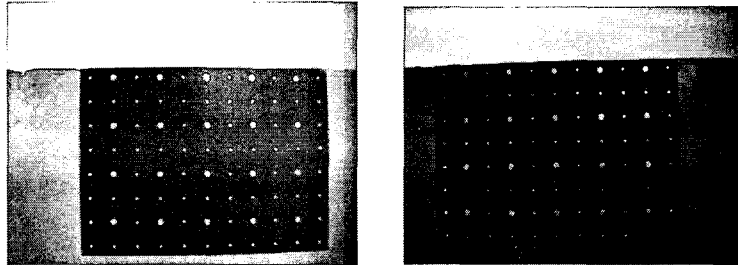


그림 3.2 측정점의 분포현황

3.1.1 대상물에 대한 영상자료 취득

영상자료의 취득을 위해 SONY TRV-17 1/4"CCD방식 Digital 6mm캠코더를 사용하였으며, 이 캠코더는 총화소수가 68만화소이며, 초점거리가 3.3~ 33mm로 변경가능하다. 정지화상 해상도는 640×480 이고 기록방식은 JPEG 이다. 이를 통해 그림 3.3에서의 대상점에 대한 좌측, 우측의 영상을 얻었다.



a) 좌측영상

b) 우측영상

그림 3.3 디지털 카메라에 의해 취득된 영상

3.1.2 CCD 영상의 검정 및 영상변환

본 연구에서 사용된 CCD 사진기는 일반용으로 사진측량에 적용하기 위해서는 렌즈의 방사 및 편심방향왜곡을 엄밀하게 검정하여야만 정확한 결과를 도출할 수 있다. 따라서 실험모형을 제작한 후 사용한 CCD 카메라에 의한 수치영상을 취득하고 그림 3.4의 과정으로 CCD 사진기의 렌즈검정을 실시하였다.

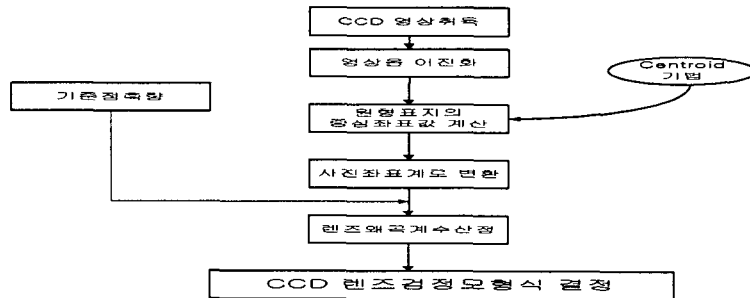


그림 3.4 CCD 렌즈검정모형식 결정과정

또한 영상의 판측 정확도는 수치영상의 해상도에 의해 결정된다. 따라서 제한된 해상도상에서 판측의 정확도를 높이기 위해서는 표지의 중심을 부영상소단위로 취득하는 것이 중요하다. 따라서 왜곡에 의해 중심점의 위치가 가장 잘 변하지 않는 성질을 가지는 원형으로 표지를 제작하였다.

원형표지의 중심좌표값을 계산하기 위하여 영상에 대한 히스토그램을 분석한 후 원형표지와 배경에 대한 밝기값의 평균을 구하였다. 이를 이용하여 원래의 영상을 이진영상으로 변환한 후 이를 역상으로 전환하였다. 이러한 과정을 통해서 변환된 영상은 그림 3.5와 같다.

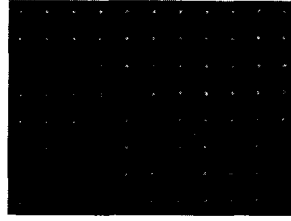


그림 3.5 기준점관측을 위하여 변환된 영상

3.1.3 대상물의 3차원 위치결정

이진화하여 변환한 영상을 이용하여 원형표지의 중심좌표를 밝기값에 의해 부영상소 단위로 계산하였으며 정밀좌표측정기 좌표계로 측정된 타겟 중심 좌표에 대해서 사진좌표계로 변환 후 좌표를 계산하였다. 이때 사진좌표는 (320, 240)을 원점으로 하고, 한 영상소의 크기인 $8\mu\text{m}$ 를 고려하여 계산하였다. 또한 관측된 측정점의 영상소좌표와 기준점 측량성좌표에 최소자승법을 적용하여 구한 변환계수와 내·외부표정 요소는 각각 표 3.1과 같다.

표 3.1 직접선형변환계수 및 외부표정요소

구분	직접선형변환계수				구분	외부표정요소			
	수직촬영		경사촬영			수직촬영		경사촬영	
	좌측영상	우측영상	좌측영상	우측영상		좌측영상	우측영상	좌측영상	우측영상
L_1	0.20702079	0.08802757	0.10954768	0.37245185	ω	0.00074548	0.00630943	0.00579220	-0.01784220
L_2	0.00210384	0.00315780	0.00289012	0.00089453	ϕ	-0.01602166	0.01123019	-0.04512153	0.19803720
L_3	-0.04110875	-0.10835916	-0.16473835	-0.01843463	κ	0.19280873	0.88748569	0.01897601	0.00331696
L_4	-1.72149774	0.14546655	0.49709657	-3.62409723	x_p	-0.04442170	-0.10738155	1.63519573	-0.71006712
L_5	-0.00088179	-0.00175038	0.00003341	-0.00023495	y_p	0.01373592	-0.04397734	0.16351397	-1.81953559
L_6	0.21304353	0.09110760	0.11849165	0.39423748	C_x	2.14026146	1.41819986	0.98408481	4.74211805
L_7	0.01388238	-0.04338649	-0.01628172	0.13736260	C_y	2.16526133	1.02397658	1.14202752	5.05035608
L_8	-2.28530079	-0.47173946	-1.04338290	-5.38550070	X_0	10.26131223	10.45445862	10.51632164	10.24538490
L_9	0.00157965	-0.00110261	0.00467630	-0.01530100	Y_0	10.09722230	10.20398361	10.20271277	9.87427960
L_{10}	0.00007349	0.00061945	0.00059988	-0.00136041	Z_0	10.31532691	10.13268601	10.18962604	10.88430740
L_{11}	-0.98586450	-0.09817670	-0.10356591	-0.07623841					

계산된 표정요소들을 이용하여 각 측정점들의 타겟 중심 좌표(X_0, Y_0, Z_0)를 계산하였다. 계산 결과는 수직촬영시와 경사촬영시별로 다음의 표 3.2와 같다. 이때 영상으로부터 계산된 3차원 결과에 대한 정확도의 분석을 위하여 3차원측량기인 Total Station(속기아 SET3000)을 이용하여 총 88점에 대해 정밀측량을 실시하였으며, 그 결과와 상호 비교하였으며, 그에 따른 각 표준편차는 표 3.2와 같다.

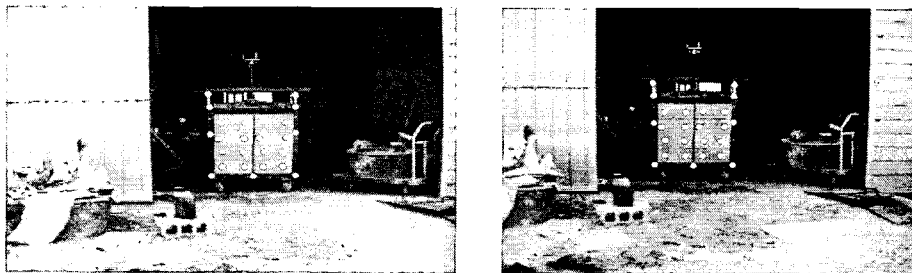
표 3.2 수평 및 수직 위치 오차

	수직 촬영시 오차(mm)			경사 촬영시 오차(mm)		
	X	Y	Z	X	Y	Z
MEAN	-1.1	-0.5	0.5	-0.66	-0.07	0.50
RMSE	±1.769	±1.195	±4.419	±1.250	±1.038	±1.623

카메라의 촬영 각도에 대하여 분석한 결과 오차 평균은 X, Y, Z축에 대하여 두 경우가 거의 비슷한 정도를 가지나 표준편차는 경사방향으로 촬영했을 때의 오차가 더 적음을 알 수 있으며 X, Y축의 오차는 비슷한 정도를 가지나 Z축 오차가 X,Y축에 비해 상대적으로 큼을 알수 있었다. 이는 3차원측량기에 의해 측정된 결과에 대한 오차요인이 촬영조건보다 더 많은 영향을 미칠 수 있기 때문에 단순 비교에 대한 결과분석보다 영상정보로부터 산출된 결과의 접근성 및 분석 결과의 정도에 더욱 중요한 것으로 판단된다.

3.2 토조 시험

보강된 사면에 대한 안정성 해석을 위해서는 사면보강후의 주기적인 측정을 통해 사면의 변화를 측정하여야 하며, 이를 통해 사면의 변화여부를 판단후 보강에 대한 효과를 검증하여야 할 필요가 있다. 따라서 이 연구에서는 이에 대한 사진측량시스템의 적용여부를 판단하고자 토조에 모래를 채운상태에서 1차 초기상태의 촬영을 실시하였으며, 2, 3차의 토압을 주는 과정에서 사진측량시스템에 의한 촬영을 실시하였다. 이때 토조의 토압에 의한 변형여부의 확인을 위하여 토조내에 5cm×5cm크기의 측정점 16점을 부착하였으며, 절대변위의 해석을 위한 기준점 6점을 부착한 후 촬영하였다. 이를통해 그림3.6에서의 대상점에 대한 좌측, 우측의 영상을 얻었다. 또한 사진측량시스템의 검증을 위하여 측정점에 대해 3차원측량기인 1초독 Total Station(GTS 601 : 탑콘)을 이용하여 정밀측정을 실시하였다.



(A) 좌측영상

(B) 우측영상

그림3.6 디지털카메라에 의한 대상물의 영상

그림3.6의 영상에 대해 이진영상으로 변환한 후 이를 역상을 전환하였다. 이러한 과정을 통해 변환된 영상은 그림3.7과 같다.

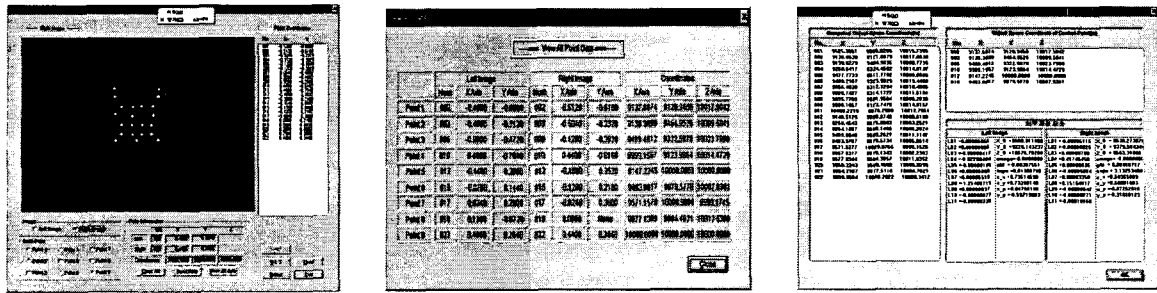


(A) 좌측면의 정사영상

(B) 우측면의 정사영상

그림3.7 이진화하여 변환된 영상

이진화하여 변환된 영상을 이용하여 사진좌표계로 변환한 후 기준점 측량성상을 통해 각측정점에 대한 타겟중심좌표를 계산하였다. 그에 대한 과정은 그림3.8과 같다.



(A)이진화된 영상의 사진좌표 (B) 기준점 좌표의 입력 (C) 계산된 3차원 좌표
그림 3.8 영상의 3차원 취득과정

초기상태 및 1차, 2차등의 토압을 준 상태에 대해 촬영된 영상에 대해 그림3.7, 그림3.8의 과정을 거친후 취득된 3차원 좌표결과와 3차원측량기에 의해 측정된 결과는 다음 표3.3과 같다.

표3.3 3차원측량 및 사진측량에 의한 결과

측점	3차원측량									사진측량								
	1차측량			2차측량			3차측량			1차해석			2차해석			3차해석		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
1	9113.4	8945.8	9834.0	9111.9	8945.9	9832.8	9112.7	8945.9	9835.5	9114.0	8946.3	9834.2	9111.6	8945.8	9833.3	9111.9	8945.2	9835.0
2	9137.7	9120.9	10017.5	9136.1	9121.0	10015.7	9137.6	9121.0	10018.6	9138.5	9120.9	10017.4	9135.9	9120.4	10016.5	9137.1	9120.3	10018.3
3	9138.4	9465.0	10009.6	9136.8	9465.0	10006.4	9139.0	9466.0	10009.7	9137.1	9464.9	10009.4	9136.3	9464.8	10006.5	9139.9	9465.5	10010.0
4	9263.2	9323.5	10022.9	9260.7	9324.4	10040.7	9260.8	9327.4	10073.5	9264.2	9322.6	10023.7	9260.0	9323.5	10041.5	9261.3	9327.5	10074.4
5	9479.1	9511.6	10032.2	9476.6	9512.2	10045.6	9476.5	9516.2	10072.5	9480.4	9511.3	10032.7	9475.7	9511.6	10046.0	9477.4	9515.6	10073.0
6	9489.5	9322.6	10023.8	9486.8	9324.2	10043.0	9488.0	9328.2	10079.8	9489.7	9321.6	10024.7	9487.2	9323.7	10043.2	9488.2	9327.6	10080.3
7	9658.3	9312.4	10026.0	9658.4	9311.8	10043.9	9664.1	9315.8	10076.9	9660.1	9312.7	10026.7	9658.1	9311.3	10044.5	9664.6	9315.2	10076.4
8	9894.7	9502.5	10029.9	9895.1	9502.6	10044.7	9899.7	9506.6	10063.0	9893.6	9503.1	10030.4	9894.6	9502.0	10045.6	9899.6	9506.5	10063.8
9	9899.8	9315.5	10021.9	9898.4	9312.6	10039.8	9894.9	9318.6	10064.5	9898.8	9316.8	10022.3	9898.8	9312.3	10040.7	9894.6	9318.3	10065.4
10	9999.2	9124.0	10014.5	9998.2	9124.0	10014.5	9998.3	9124.0	10014.5	9999.1	9124.2	10014.0	9998.8	9123.1	10015.0	9997.7	9123.8	10013.7
11	10027.8	8963.1	9829.4	10026.0	8963.1	9829.3	10028.5	8963.1	9831.5	10028.6	8963.6	9830.3	10026.6	8962.8	9830.0	10028.8	8962.4	9831.7
12	9147.2	10000.0	10000.0	9147.9	10000.0	10000.0	9148.4	10000.0	10000.0	9147.9	10000.1	9999.4	9148.5	9999.4	10000.2	9149.1	9999.9	9999.7
13	9260.4	9877.5	10005.4	9258.9	9878.4	10008.4	9258.0	9879.4	10017.9	9261.3	9878.1	10006.4	9258.0	9879.1	10008.0	9257.5	9879.6	10018.5
14	9264.5	9678.5	10011.8	9262.9	9679.4	10020.7	9264.0	9681.4	10039.2	9264.8	9679.4	10012.5	9262.7	9680.2	10020.7	9264.8	9681.1	10039.8
15	9469.7	9687.5	10011.0	9469.6	9687.1	10024.6	9467.4	9690.1	10044.8	9469.6	9686.4	10010.9	9469.2	9687.3	10024.7	9467.0	9689.4	10045.2
16	9483.9	9879.6	10007.0	9483.6	9880.2	10011.1	9482.4	9882.2	10027.2	9483.8	9879.6	10009.0	9483.6	9880.9	10010.7	9481.4	9881.7	10028.1
17	9571.2	10009.0	9999.2	9570.8	10008.5	9999.4	9572.7	10008.5	10002.6	9570.7	10008.9	9999.2	9571.8	10009.0	9999.2	9573.4	10009.0	10001.9
18	9666.4	9878.4	10005.6	9667.7	9878.8	10012.3	9670.8	9880.8	10028.9	9665.1	9878.7	10005.7	9667.5	9878.1	10012.4	9670.6	9880.5	10029.5
19	9677.1	9684.5	10012.5	9678.4	9684.9	10025.0	9681.0	9687.9	10044.6	9677.2	9684.6	10013.2	9678.2	9684.7	10025.9	9681.6	9688.3	10045.5
20	9859.2	9692.3	10009.8	9860.0	9692.5	10022.5	9862.1	9695.5	10038.8	9860.2	9693.1	10010.5	9860.3	9692.8	10021.8	9861.8	9696.1	10039.5
21	9863.6	9878.4	10004.7	9864.1	9879.5	10010.2	9867.1	9881.5	10024.8	9863.0	9879.2	10004.8	9864.3	9880.0	10010.6	9866.9	9880.9	10024.9
22	10000.0	10000.0	10000.0	10000.0	10000.0	10000.0	10000.0	10000.0	10000.0	10000.3	9999.7	9999.7	10000.6	10000.5	10000.8	9999.8	9999.5	10000.5

사진측량결과의 정확도 분석을 위해 3차원측량결과와의 좌표축간의 차이값을 비교하여 본 결과 그림3.9에서 보는 바와 같이 ±1mm정도의 오차가 발생되었음을 볼 수 있다

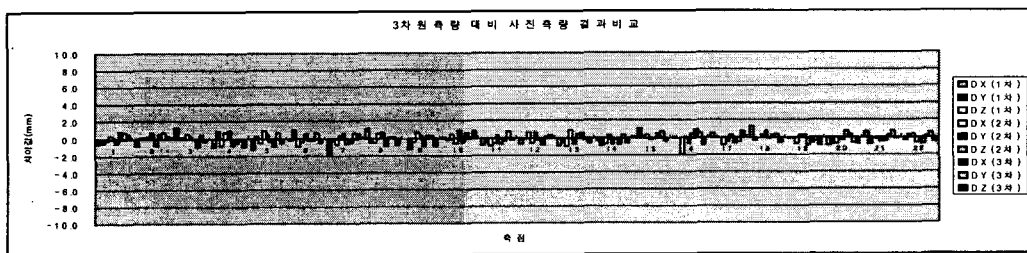


그림3.9 3차원측량대비 사진측량결과 비교

측정점별 좌표축간의 변위량을 계산하기 위해 토압을 주지 않은 상태의 측정결과(1차) 및 촬영결과(1차)를 기준으로 토압을 준 상태의 측정결과를 비교한 결과 그림3.10, 그림3.11과 같음을 보여주고 있다. 여기서 Z축이 실제 카메라의 광축의 방향으로서 토압에 의한 토조의 변형이 일어나는 주요 방향이다. 그림에서 보는 바와 같이 각 차수별로 비교한 결과 3차원측량결과와 사진측량결과에 대해 나타나는 각 축별 변위량이 거의 같은 방향으로 변위가 발생하고 있음을 보여주고 있다.

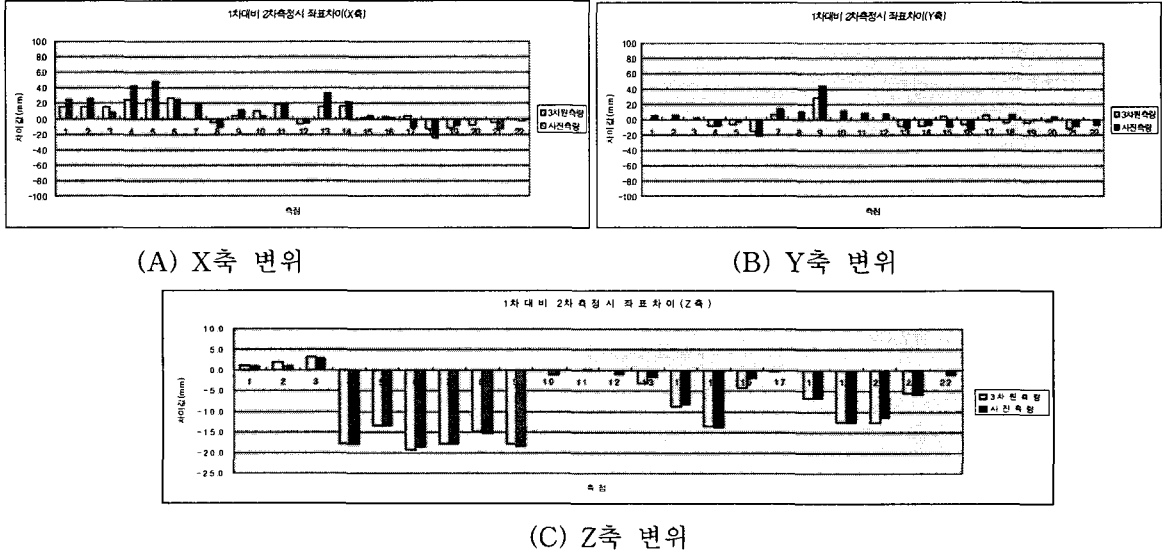


그림3.10 1차측정시 대비 2차측정시 측정방법별 변위

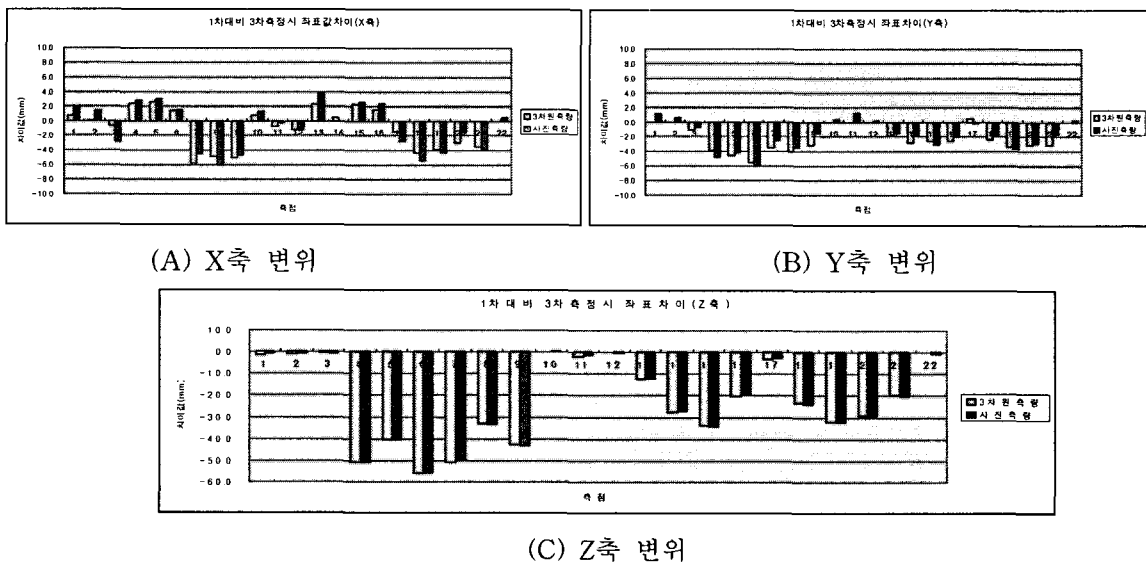


그림3.11 1차측정시 대비 3차측정시 측정방법별 변위

4. 결론

수치사진측량에 의한 방법으로 구조물의 변위량을 측정할 수 있는 프로그램의 개발과 그에 따른 정확도 분석 및 토조실험에 의한 변위량측정을 위한 해석결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 프로그램의 구성에 있어 변위량을 측정하기 위한 좌측 및 우측사진의 측정점에 대해 자동인식을 할 수 있도록 하였으며, 그에 따른 해석의 불편함을 해소하도록 하였다.

2. 수치사진측량에 의한 방법에 의한 해석에 있어 촬영각도에 따른 오차가 거의 없음을 알 수 있었다.
3. 수치사진측량에 의한 해석결과와 3차원측량결과와 비교해 볼 때 $\pm 1\text{mm}$ 내외의 오차가 발생됨을 알 수 있었다.
4. 토조실험에 의한 변위량측정결과에 있어 시간경과에 따른 구조물의 변화에 대한 측정이 이루어 질 수 있음이 확인 되었다.
5. 디지털카메라를 이용할 경우 접근이 불가능한 사면에 대한 변위계측에 유용하게 이용될 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. K.B.Atkinson, "Developments in Close Range Photogrammetry-1", Applied Science Published LTD, p65~p75
2. Toni Shank, "Digital Photogrammetry", TerraScience
3. Gonzalez & Woods, "Digital Image Processing", Green, 1999.
4. John R. Jensen, "Introductory Digital Image Processing", Prentice Hall, 1995, pp. 257-277
5. 이석균, "CCD 사진기와 객체지향기법을 이용한 근거리 사진 측량에 관한 연구", 연세대학교 박사학위 논문, 1988.
6. 유복모, "디지털사진측량학", 문운당, p247~p248, p212~p216,