

Free-Net 광속조정법을 이용한 사면의 변형측정

Deformation Measurement of the Slope Using Free-Net Bundle Adjustment

이진덕* · 이호찬** · 소재경***

Jin-Duk Lee · Ho-Chan Lee · Jae-Kyoung So

* 금오공과대학교 토목환경공학부 교수(jdlee@kumoh.ac.kr)

** 금오공과대학교 측량및지형공간정보연구실 공학석사(k7653973@kornet.net)

*** 금오공과대학교 대학원 토목공학과 석사과정(sojk0070@hanmail.net)

요 약

근거리 디지털 영상을 이용하여 도로 사면의 3차원 변형을 효율적으로 측정하고자 하였다. 광속조정법(bundle adjustment)에 근거한 사진삼각측량 방법을 적용함에 있어서 종래의 표준적인 기법과 Free-net 기법으로 각각 처리하여 사면의 약 1/35000의 정확도로 3차원 측정과 변형량을 도출하였으며, 토털스테이션에 의해 측정한 결과와 비교하였다. 연구를 통하여 Free-net 기법을 적용함으로써 복잡한 산업현장에서 기존의 측지학적 기준점측량을 행하지 않고도 신속하고 정확한 측정을 기대할 수 있음을 확인할 수 있었다.

1. 서론

산지가 국토의 70%를 차지하는 협소한 공간에서 사회기반시설을 확충하기 위한 개발사업이 이루어지면서 도로 및 각종 구조물, 대형 건축물 등의 산업인프라가 산악지역에 입지하고 있다. 사회적으로 안전에 관한 관심이 증대되면서 산업 전반에 걸쳐 대상물에 대한 모니터링 및 물리적 상황에 대한 정밀변형측정에 관한 성과들이 국내외에서 꾸준히 개발되고 있다.

이와 더불어 수치사진측량의 결과물을 기본자료로 활용하여 사면의 형태와 특성을 쉽게 파악하고 분석하여 각종 정보를 추출함은 물론 사면의 모니터링을 위한 다양한 지리정보체계(GIS)의 framework 데이터의 획득을 위한 자료로 활용하고자 하는 연구가 활발히 진행되어 왔다. 수치사진측량은 대상물에 대해 소수의 기준점을 이용하여 짧은 시간에 다수의 측정점에 대한 3차원 위치를 획득할 수 있다는 장점이 있으나 이

러한 장점에도 불구하고 대부분의 현장에서는 아직도 기존의 계측방법에 의존하고 있는 실정이다.

본 연구에서는 근거리 수치사진측량 기법을 사면의 3차원 변형측정에 적용하여 정확하고 효율적인 변형 모니터링을 하고자 한다.

2. 변형측정 실험

2.1 네트워크 디자인

스틸비디오 카메라(Kodak DCS200)와 수치사진측량시스템을 변위모니터링이 요구되는 국도신설구간의 절개사면 120m(L)×15m(H) 중 절리와 기복이 심한 33m(L)×6m(H) 부분에 적용하였다. 대상 절개사면에 대하여 사진측량 네트워크를 구성하고 시간간격을 두고 수치사진을 획득하고 처리함으로써 변위를 도출하고자 하였다. 또한 동일한 대상점들에 대하여 표준(standard) 광속조정법과 자유망(free-net) 광속조정법,

그리고 토털스테이션에 의해 취득되어진 3차원 좌표를 동일한 좌표계상에서 비교함으로써 수치사진측량시스템의 정밀측정 수행성을 평가하고 효율적인 네트워크 디자인을 검토하고자 하였다.

스틸비디오 카메라 Kodak DCS200의 CCD센서 해상도는 1524×1012 화소이고 칩의 크기는 13.8mm×9.2mm로서 35mm 필름면적의 약 15%에 불과하며, 화소의 크기는 9μm×9μm이다.

암반사면의 변형이 예상되는 부분에 정확한 모니터링을 위하여 경사수렴촬영 네트워크(convergent network)를 계획하였다. 이러한 유형의 네트워크는 시간의 경과에 따른 사면의 변위를 정확히 측정함에 있어서 모니터링 대상지역에 대하여 높은 기하학적 강도 및 많은 잉여관측수를 얻을 수 있다. 이러한 네트워크에서 도달될 수 있는 측정 정확도는 다음과 같은 식에 의해 근사될 수 있다.

$$\sigma' = Q \cdot S \cdot \sigma = Q \cdot D \cdot \sigma_a \quad (1)$$

여기서

σ' : X, Y, Z 좌표의 평균표준오차

Q : 네트워크의 기하학적 강도를 나타내는 경험적 계수

S : 축척계수

σ : 상좌표 측정 표준오차

d : 촬영거리

σ_a : 상좌표측정오차에 대응하는 각측정 표준오차

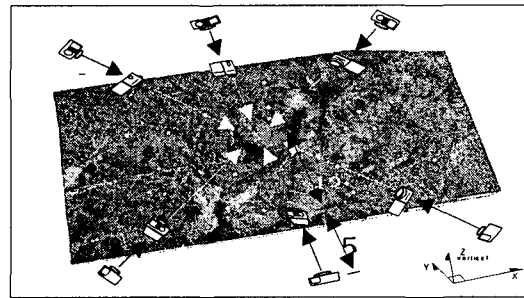
동일 대상물에 대한 다중촬영방법을 이용할 경우 (1)식은 다시 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma' = \frac{Q \cdot S}{\sqrt{k}} \sigma \quad (2)$$

여기서 k는 각 촬영지점에서 계획된 취득영상 수이다.

본 연구에서 채용한 네트워크는 기하학적으로 강한 강도이므로 Q=0.5를 적용하고 k=2를 적용하였을 때 대상공간의 X, Y, Z 좌표의 평균표준오차는 약 0.14mm로 추정

될 수 있다.



타겟의 크기는 네트워크상 13m~18m의 촬영거리로부터 수치사진을 취득하였을 때 원형 타겟이미지의 직경이 7~15 화소(pixel)의 크기로 나타나도록 반사테이프(retro-reflective tape)를 재료로 하여 직경 50mm의 타겟을 Fig. 2와 같이 제작하였다. 특히 토털스테이션에 의한 타겟의 3차원 측량을 겸용할 수 있도록 원형타겟 내부 중앙에 토털스테이션 전용 반사타겟을 부착하여 제작하였다.

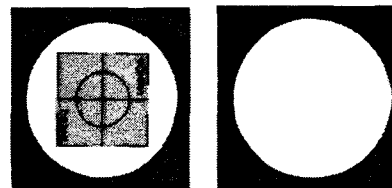


Fig. 2 Target shape

절리와 기복이 심한 실험사면에 대하여 Step 1(5월25일)과 Step 2(6월 27일)의 두 시기에 각각 12매씩의 수치화상을 얻었다.

카메라의 안정된 상태를 유지하게 위해 초점조절링을 고정시켰다. 타겟이미지의 배경과의 자동측정시 대조효과를 높이고 타겟의 적절한 반사강도를 얻을 수 있도록 후레쉬 Nikon SB-26을 사용하여 야간촬영을 실시하였다.

사면으로부터 20m 후방에 사면과 대략 평행한 기선을 설치하고 기선의 좌측단을 원점으로 하여 기선방향을 X축, 대상물측 방향을 Y축, 연직방향을 Z축으로 하는 3차원 직각좌표계를 설정하였다. 결과를 비교할 목적으로 기선양단에 설치한 토털스테이션 및 정밀레벨을 사용하여 26개 대상점들

에 대한 3차원 좌표를 대상지역에 대하여 두 시기에 걸쳐 취득한 기준점 중에서 측정된 좌표의 변화가 없는 점(No. 11, No.22, No.23, No.27)은 변형과 무관한 고정된 점으로 간주하여 사진삼각측량(광속조정법)을 위한 기준점으로 채택하였다.

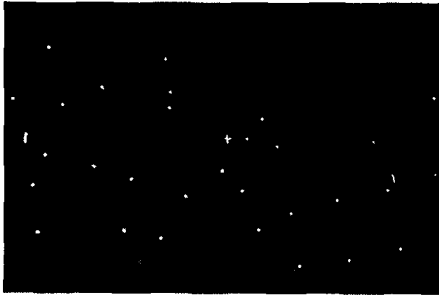


Fig. 3 An Image Obtained by Night Photographing

2.2 상좌표 취득 및 사진삼각측량

수치사진의 모든 타겟이미지 측정은 강도 경중률(intensity weights)을 고려한 Centroiding기법에 의한 digital mono-comparator 프로그램을 이용하여 반자동으로 측정하였다.

취득한 영상의 정오차 보정을 위하여 Fig. 5와 같이 사전에 자체검정기법(self-calibration technique)에 의한 실내 캘리브레이션실험을 통하여 얻어진 카메라의 내부표정요소(x_p , y_p , c)와 렌즈왜곡 계수(K_1 , K_2 , K_3 , P_1 , P_2) 등을 입력하여 처리하였다.

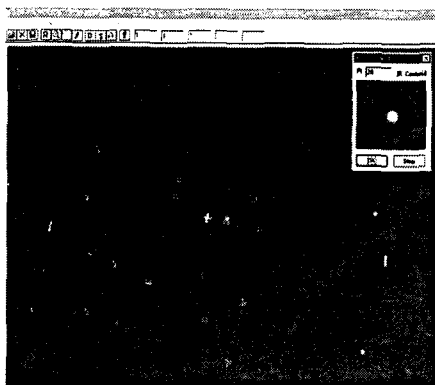


Fig. 4 Image coordinate measurements in the digital mono-comparator

Camera Id	Current Value	Sigma
DCS200	Focal Length 20.3766	0.
Camera Name	Pin Dist (Pp) -0.4932	0.
Kodak200	(Yp) 0.1276	0.
Sensor Size (pixels)	Rad Dist (K1) 3.125e-004	0.
Pixel Size (microns)	(K2) -1.76e-006	0.
Horizontal 1524	(K3) 2.128e-008	0.
Vertical 1012	Dec Dist (P1) 7.316e-006	0.
	(P2) -4.3e-006	0.

Fig. 5 The calibration parameters of Kodak DCS200

3. 3차원 좌표 및 변형량 도출

Step 1과 Step 2의 자료로부터 표준 광속조정과 자유망 광속조정으로 각각 처리하여 취득한 3차원 좌표의 결과를 상호 비교함으로써 변위량을 도출해 내고자 하였다. 아울러 토털스테이션에 의한 측량결과와 비교를 통하여 사진삼각측량의 정확도와 효용성을 확인하고자 하였다. 자유망 광속조정의 결과를 표준 광속조정의 결과와 동일한 좌표계상에서 비교하기 위하여 25개 대상점들의 3차원 좌표를 몇개의 기준점을 이용하여 좌표변환을 행하였다. 광속조정에 의해 처리된 타겟들의 평균제곱근오차(RMSE)는 0.21~0.47mm의 범위에서 나타났다.(Table 1)

사진삼각측량 결과의 공간정확도(space accuracy)를 확인하기 위하여 Step 1 및 Step 2에서 표준 광속조정과 자유망 광속조정에 의해 취득한 X, Y, Z 방향들의 표준오차평균($(\Delta X + \Delta Y + \Delta Z)/3$)을 22개의 대상점들 중 거리가 가장 멀리 떨어져 있는 두 대상점간의 길이로 나누어 계산하였다. Table 2에서 알 수 있듯이 취득한 25개 대상점의 평균 공간정확도는 약 1/35,000 전후로 나타났다.

Step 1의 경우 자유망 광속조정법이 표준 광속조정법보다 약 13% 정도 더 높은 정확도를 나타내었고, Step 2의 경우 거의 유사한 정확도를 나타내었다.

Table 1 Comparison of results processed with free-net bundle adjustment and standard bundle adjustment

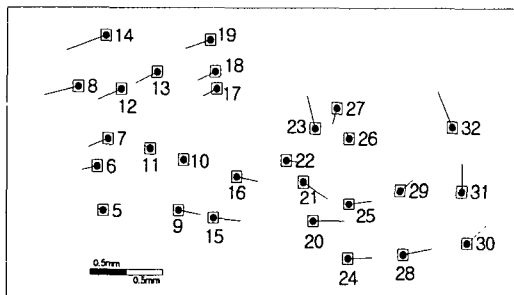
Step	Step 1(25th of May)			Step 2(27th of June)		
	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)
Average	-0.011	-0.003	0.038	0.153	-0.079	0.007
RMSE	0.342	0.210	0.128	0.378	0.228	0.470

Table 2 Object space accuracy of bundle adjustment results

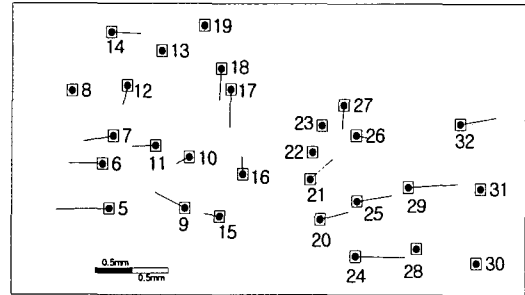
Step	bundle adjustment method	object space accuracy
Step 1	standard	1 : 30,757
	free-net	1 : 34,993
Step 2	standard	1 : 35,529
	free-net	1 : 35,583

Fig. 6은 표준 광속조정을 기준으로 하여 자유망 광속조정과 표준광속조정 결과의 차이를 Step 1과 Step 2 별로 X, Y 값의 오차를 도식화하여 나타낸 것으로서 대부분 약 0.5mm이내의 편차를 나타내고 있음을 알 수 있다.

그리고 실제적인 사면의 변형량을 비교하기 위하여 Step 1에서 토털스테이션과 표준 광속조정 및 자유망 광속조정으로 취득한 X, Y, Z의 3차원 좌표를 기준으로 Step 2에서 각각의 방법으로 취득한 좌표들과 비교하여 변위량을 Table 3과 같이 나타내었고, 시각적인 확인을 위하여 Fig. 7과 같이 도식화하였다.



a) Step 1 : Results of free-net minus standard



b) Step 2 : Results of free-net minus standard

Fig. 6 Comparison of free-net and standard bundle adjustment

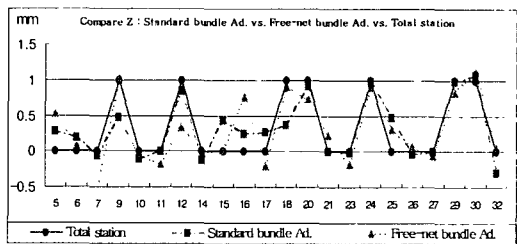
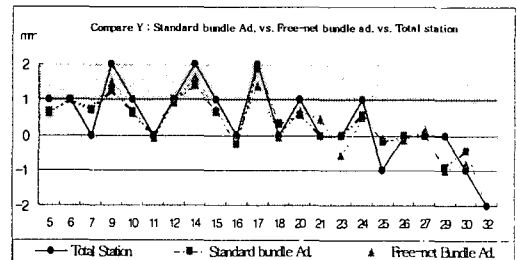
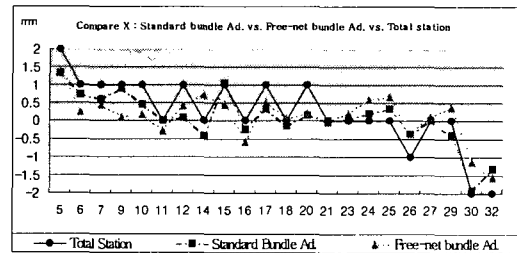


Fig. 7 The comparison of displacements by total station, standard bundle adjustment and free-net bundle adjustment

Table 3. 3D movement amount (Step 2 minus Step 1)

Coord No	X			Y			Z		
	Total Station	Standard Bundle	Free-Net Bundle	Total Station	Standard Bundle	Free-Net Bundle	Total Station	Standard Bundle	Free-Net Bundle
5	2	-1.322	-1.409	1	-0.659	-0.615	0	-0.291	-0.528
6	1	-0.724	-0.252	1	-0.967	-1.004	0	-0.192	-0.078
7	1	-0.600	-0.459	0	-0.715	-0.750	0	0.066	0.507
9	1	-0.898	-0.094	2	-1.232	-1.496	1	-0.478	-1.024
10	1	-0.447	-0.180	1	-0.644	-0.634	0	0.103	0.063
11	0	0.003	0.264	0	-0.000	0.041	0	-0.000	0.178
12	1	-0.066	-0.417	1	-0.990	-0.928	1	-0.858	-0.341
14	1	-0.434	-0.733	2	-1.390	-1.630	0	0.126	0.020
15	1	-1.042	-0.442	1	-0.642	-0.705	0	-0.447	-0.013
16	0	0.254	0.569	0	0.257	-0.029	0	-0.252	-0.760
17	1	-0.330	-0.519	2	-1.857	-1.372	0	-0.277	0.201
18	0	0.153	-0.062	0	-0.327	0.040	1	-0.371	-0.908
20	0	-0.144	-0.190	-1	-0.555	-0.674	1	-0.914	-0.735
21	0	0.004	0.034	0	-0.004	-0.464	0	-0.008	-0.226
23	0	-0.018	-0.205	0	0.006	0.572	0	0.014	0.182
24	0	-0.199	-0.591	1	-0.555	-0.517	1	-0.983	-0.905
25	0	-0.328	-0.676	-1	0.162	0.087	0	-0.478	-1.309
26	-1	0.364	0.358	0	-0.007	0.116	0	0.034	-0.065
27	0	0.011	-0.093	0	-0.002	-0.149	0	-0.007	0.066
29	0	0.391	-0.377	0	0.919	0.998	1	-0.979	-0.835
30	-2	1.916	1.133	-1	0.437	0.822	1	-1.071	-1.110
32	-2	1.329	1.556	-2	2.048	2.391	0	0.300	-0.052
# of control points : No.11, 21, 23, 27 (unit : mm)									

4. 결론

스틸비디오카메라로 취득된 수치사진을 이용하여 도로 절개사면에 대한 3차원 변형 측정을 시도한 결과, Free-net 기법을 이용한 사진삼각측량에서 약 1/35000의 정확도로 3차원 측정과 변형량을 도출할 수 있었다. 광속조정법(bundle method)에 의한 자료처리과정에서 free-net 기법을 적용함으로써 종래의 표준적 방법에서 기준점측량에 수반되었던 문제에서 벗어나 효율적인 결과를 취득할 수 있었다.

참고문헌

1. Fraser, C.S. and Shortis, M.R., "Metric Exploitation of Still Video Imagery", Photogrammetric Record, 15(85), pp.107~128, 1995.
2. Obidowski, R. M. and Teskey, W. F., Gaidadjiev, R., "Integration of Sensors with Videometry for Industrial Machinery Monitoring", ISPRS Commission V Symposium, pp.295~303, 1995.
3. Nutto, M., and Ringle, K., "Photogram metric Documentation of the Historical Castle of Heidelberg and Results of Deformation

- Measurement s", ISPRS, Vol. XXXIII, Part B5, Proc. ISPRS Congress, Amsterdam, pp.664-668, 2000.
4. Markus, M., Mass, Hans-Gred., "Automatic Deformation Measurement with a Digital Still Videl Camera", Institute of Geodesy and Photogrammetry" Swiss Federal Insitute of Technology ETH Hoenggerberg Ch-8093, 1998.
 5. Fraser C. S., "Some Thoughts on the Emergency of Digital Close-Range Photogrammetry", Photogrammetr Record. Vol. 17 No. 91 pp.37~50, 1998.
 6. 이진덕, "고해상도의 스틸비디오카메라를 이용한 수치근접사진측량 시스템의 실용성 평가", 대한토목학회논문집, Vol. 18, No.Ⅲ-2, pp.183~193, 1998.
 7. 강준목, 이진덕, 김위현, 최준석, "수치사진측량에 의한 암반사면의 불연속 선구조 추출", 대한토목학회학술 발표회 논문집, 2001