

스틸비디오 영상과 자유망 광속조정을 이용한 사면의 변형측량 The Deformation Surveying of a Slope Using Still-Video Imagery and Free-Net Bundle Adjustment

이진덕* · 이호찬**

Lee, Jin-Duk · Lee, Ho-Chan

요 旨

근거리 디지털 영상을 이용하여 도로 사면의 3차원 변형을 효율적으로 측정하고자 하였다. 두 시기에 각각 동일한 다중지점 기하배치 상에서 스틸비디오 영상을 취득하고 종래의 표준적 광속조정과 자유망 광속조에 의하여 각각 사진삼각측량 처리를 행하고 또한 토털스테이션에 의한 측지학적 방법과 비교하였다. 1mm 이내의 표준오차와 1/30,000~1/36,000의 상대정확도로 대상점들의 3차원 좌표 및 변형량을 도출할 수 있었으며, 자유망 광속조정이 표준적 광속조에 비해 13%까지 높은 정확도를 나타내었다. 자유망 광속조정법을 적용한다면 복잡한 산업현장에서 기준점측량을 병행하지 않고 신속하고 정확한 변형측량을 기대할 수 있음을 확인할 수 있었다.

핵심용어 : 근거리 사진측량, 스틸비디오 영상, 변형측량, 자유망 광속조정, 사면측정

Abstract

This study attempts to measure effectively three dimensional deformation in road slopes using digital close-range photographs. After the still video images were acquired respectively on the same multi-station geometric configuration in two epoches, photo-triangulation was carried out respectively by conventional standard bundle adjustment and free-net bundle adjustment and the computed results were compared with those of geodetic method by total station. Three dimensional coordinates and deformation amounts were able to be derived with the RMSE of sub-millimeter and the relative accuracy of 1/30,000~1/35,000. It was shown that free-net bundle adjustment is about 13% higher than standard bundle adjustment in the accuracy of photo-triangulation. It was ascertained that the free-net technique is able to promote fast and accurate deformation surveying without the necessity of geodetic control survey in complicated industrial sites.

Keywords : Close-Range Photogrammetry, Still-Video Imagery, Deformation Surveying, Free-Net Bundle Adjustment, Slope Measurement

1. 서 론

산지가 국토의 70%를 차지하는 협소한 공간에서 사회 기반시설을 확충하기 위한 개발사업이 이루어지면서 도로 및 각종 구조물, 대형 건축물 등의 산업인프라가 산악 지역을 통과하거나 입지하고 있다. 사회적으로 방재·안전에 관한 의식이 고조되면서 산업 전반에 걸쳐 대상물에 대한 모니터링 및 물리적 상황에 대한 정밀변형측량에 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 다

양한 지리정보체계(GIS)의 프레임워크데이터(framework data) 획득을 위한 자료로 활용하고자 하는 연구가 활발히 진행되어 왔다.

수치사진측량은 대상물에 대해 소수의 기준점을 이용하여 짧은 시간에 다수의 측정점에 대한 준자동 또는 자동화된 처리과정에 의해 신속, 정확하게 3차원 측량을 수행할 수 있다는 장점에도 불구하고 기준점측량 등의 번거로운 작업들이 수반되어야 하는 이유 등으로 아직도 많은 산업현장에서 기존의 계측방법에 의존하고 있는 실정이다.

스틸비디오영상을 이용한 사진측량은 산업생산제품의 품질검사, 변형모니터링 등에 효율적으로 활용되어왔다.

2004년 11월 27일 접수, 2005년 3월 21일 채택

* 주저자, 정희원, 금오공과대학교 토목환경공학부 교수 (jdee@kumoh.ac.kr)

** 금오공과대학교 측량 및 지형공간정보연구실, 공학석사 (k7653973@kornet.net)

Fraser & Shortis은 항공기 부품의 품질검사를 위하여 스틸비디오카메라 Kodak DCS200으로 측정된 결과, 종래의 아날로그 시스템인 측정용 카메라 CRC-2에 의한 측정결과에 거의 접근하는 정확도를 얻을 수 있었다.(Fraser, C.S. and Shortis, M.R., 1995) Lee와 Fraser는 콘크리트사일로 구조물의 변형모니터링에 스틸비디오 영상을 이용한 근거리 수치사진측량시스템을 적용하여 1/120,000을 초과하는 높은 정확도 잠재성을 확인하였다(J.-D. Lee 등, 1995). 전통적으로 사진측량에서 절대표정의 과정은 기지의 기준점을 필요로 한다. 그러나 기준점측량은 시간과 비용이 드는데다 어떤 경우에는 기준점을 이용할 수 없거나 아예 측량이 불가능하다. 근거리 사진측량에서 이러한 문제를 해결하기 위하여 기준점 없이 DEM쌍(pairs)들을 표면 형상에 근거하여 정합(matching)하고 변형을 검출한 연구 등이 있었다(George E. Karras and Elli Petsa, 1993).

근거리 수치사진측량기법을 변형측량에 적용함에 있어서 기준점에 포함된 오차가 대상점의 3차원 좌표측정값에 영향을 미치게 되는 일반적인 광속조정법과 달리, 자유망 광속조정법은 기준계(datum)를 설정할 필요가 없는 처리기법(Papo, H.B. and A. Perelmuter, 1982)이라는 점에서 본 연구에서는 사면의 모니터링을 위한 변형측량에 종래의 표준(standard) 광속조정과 자유망(free-net) 광속조정으로 각각 처리하고 결과를 분석함으로써 효율적인 모니터링의 한 기법을 제시하고자 하였다.

2. 변형측량 실험

2.1 Network 디자인

스틸비디오 카메라(Kodak DCS200)와 수치사진측량시스템을 변위모니터링이 요구되는 국도산설구간의 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 표준적 광속조정법과 자유망 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 필름 면적의 약 15%에 불과하며, 화소의 크기는 9 μm×9 μm이다.

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(Fraser, C.S. and Shortis, M.R., 1995).

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

여기서

σ : X, Y, Z 좌표의 평균표준오차

Q : 네트워크의 기하학적 강도를 나타내는 경험적 계수

S : 축척계수

σ : 상 측정 표준오차

D : 촬영거리

σ_a : 상측정 표준오차에 대응하는 각측정표준오차

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 Q는 4 또는 8개의 카메라 지점을 갖는 강도 높은 다중지점 수렴네트워크의 기하학적 계수로서 0.4~0.8의 범위 값을 부여한다. k는 각 촬영지점에서 계획된 취득영상 수이다.

본 연구에서 채용한 네트워크는 기하학적으로 강한 강도이므로 Q=0.6을 적용하고 k=2, $\sigma=0.5\mu\text{m}$, 그리고 D=13~18m(중앙값 15.5m), 초점거리 f=20mm에 의해 산정한 축척계수 S=15500/20=775를 적용하였을 때 대상공간의 X, Y, Z 좌표의 평균표준오차는 약 0.16mm로 추정되어지며, 따라서 본 변형측량의 요구정확도를 만족할 수 있으리라고 보여진다.

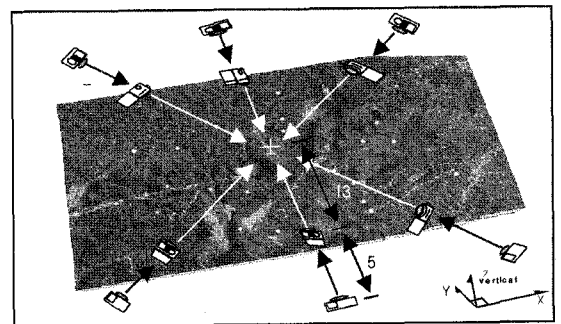


Fig. 1. Multi-station convergent network geometry

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

질리와 기복이 심한 실험사면에 대하여 Epoch 1(5월 25일)과 Epoch 2(6월 27일)의 두 시기에 Fig. 1에 나타낸 다중지점 기하배치 상에서 각각 12매씩의 수치영상을 얻었다. 비록 1개월간의 짧은 기간이지만 이 기간 중 집중호우, 태풍 등으로 인한 변형량을 도출하고자 한 것이다.

촬영시 카메라의 안정된 상태를 유지하게 위해 초점조절링을 고정시켰다. 타겟이미지 좌표의 자동측정시 배경과의 대조효과를 증대시켜 타겟이미지의 적절한 반사각도를 얻을 수 있도록 후레쉬(Nikon SB-26)를 사용하여 야간촬영을 실시하였다.

사면으로부터 20m 후방에 사면길이 방향과 대략 평행한 기선을 설치하고 기선의 좌측단을 원점으로 하여 기선방향을 X축, 기선에 대해 직각방향인 사면측 방향(즉 depth 방향)을 Y축, 사면높이 방향인 연직방향을 Z축으로 하는 3차원 직각좌표계를 설정하였다. 결과를 비교할

목적으로 토털스테이션을 기선양단에 순차 설치하여 28개 대상점들에 대한 3차원 좌표를 관측하였다. 두 시기에 걸쳐 취득한 대상점들 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. 토털스테이션(SET 2BII)의 좌표관측기능을 이용하여 mm 단위까지 측정하였으며, Table 3에 제시한 토털스테이션에 의한 변형량 또한 1mm까지 도출하였다.

2.2 자유망 광속조정론

표준 광속조정은 최소 3점의 고정된 기준점을 외부구속조건으로 하여 대상물 공간의 기준계를 결정하고 미지 대상물의 3차원 위치를 결정할 수 있는 반면, 내부구속에 의한 자유망 광속조정기법에서는 대상점들의 공간좌표의 근사값을 이용하여 기준계를 결정하고, 최소 한 세트의 거리를 이용하여 측척을 결정할 수 있다(J.-D. Lee 등, 1995).

3차원공간에서 좌표들의 해에 대한 선형화된 관측방정식은 식 (3)과 같다(Papo, H. and A. Perelumuter, 1982).

$$V = A \cdot X - L \tag{3}$$

행렬 A의 차수를 R(A)=m-d=r로 표현할 수 있고, d는 3차원 공간에서 네트워크를 결정하기 위해서 필요한 기준계의 수이다. 미지변수벡터 X는 X₁과 X₂로 나눌 수 있고, 식 (4)로 다시 나타낼 수 있다. X₂는 네트워크의 기준계 결정을 보완하는 d의 크기에 대한 매개변수의 행렬이다.

$$V = [A_1 \ A_2] \cdot \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} - L \tag{4}$$

관측방정식의 A행렬이 완전한 차수(d=0)라면 조정거리에서 매개변수의 불면추정이 가능하다. d≠0라면, 불면추정의 해는 단지 r=m-d의 매개변수에 대하여 얻어질 수 있다. 그리고 X₁과 X₂사이의 선형관계를 도입하여 원래의 관측방정식을 변환함으로써 수행될 수 있다.

X₂ = G₁^T · X₁ 로 나타내면 식 (5)와 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I \\ G_1^T \end{bmatrix} \cdot X_1 \tag{5}$$

식 (5)를 식 (4)에 대입하여 정리하면 식 (6)과 같다.

$$V = [A_1 \ A_2] \cdot \begin{bmatrix} I \\ G_1^T \end{bmatrix} \cdot X_1 - L \tag{6}$$

$$V = A^* \cdot X_1 - L$$

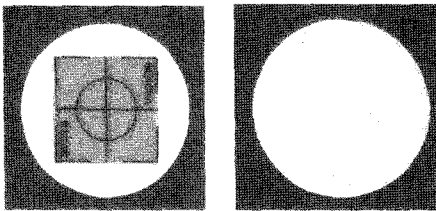


Fig. 2. Target shape



Fig. 3. An image obtained by night flash photographing

여기서 $A^* = A_1 + A_2 \cdot G_1^T$
 $R(A^*) = r$ (완전한 차수)

공분산행렬 X 의 최소 추적조건은 $X^T \cdot X$ 가 최소인 조건과 동일하다. $X^T \cdot X$ 의 최소값은 식 (7)에 나타난 G_1^T 행렬로 결정된다.

$$G_1^T = (A_2^T \cdot A_1) \cdot (A_1^T \cdot A_1)^{-1} \quad (7)$$

여기서 $A_2 = A_1 \cdot G_1$

식 (6)에 식 (7)을 대입하여 식 (8)을 얻을 수 있다.

$$V = \bar{A} \cdot X_1 - L \quad (8)$$

여기서 $\bar{A} = A_1 \cdot (I + G_1 \cdot G_1^T) = A_1 \cdot S$

X_1 의 불편추정과 경중률행렬은 식 (9)와 식 (10)으로 표현할 수 있다.

$$X_1 = (\bar{A}^T \cdot P \cdot \bar{A})^{-1} \cdot (\bar{A}^T \cdot P \cdot L) \quad (9)$$

$$Q_{11} = (\bar{A}^T \cdot P \cdot \bar{A})^{-1} \\ = S^{-1} \cdot (A_1^T \cdot P \cdot A_1) \cdot S^{-1} \quad (10)$$

그리고 X_2 와 경중률행렬은 식 (11), (12)와 같다.

$$X_2 = G_1^T \cdot X_1 \quad (11)$$

$$Q_{22} = G_1^T \cdot Q_{11} \cdot G_1 \quad (12)$$

$X^T \cdot X$ 의 합이 최소라는 조건에서 식 (13)과 같이 적용할 수 있고

$$X_{12} \cdot X_{12}^T + X_2^T \cdot X_2 = \text{minimum} \quad (13)$$

이는 식 (14)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} V \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_2 \\ 0 & G_1^T & -I \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_{11} \\ X_{12} \\ X_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} L \\ 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

Meissl(1969)에 따르면 자유망은 이동변환, 회전변환, 축척변환으로 구성되어 있는 Helmert 변환으로 주어진다

$$C^T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & \dots & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -z_1 & y_1 & 0 & -z_2 & -y_2 & \dots & y_{u-1} & 0 & -z_u & y_u \\ z_1 & 0 & -x_1 & z_2 & 0 & -x_2 & \dots & -x_{u-1} & z_u & 0 & -x_u \\ -y_1 & x_1 & 0 & -y_2 & x_2 & 0 & \dots & z_{u-1} & x_u & y_u & z_u \\ x_1 & y_1 & z_1 & x_2 & y_2 & z_2 & \dots & z_{u-1} & x_u & y_u & z_u \end{bmatrix}$$

네트워크에서 수행될 수 있다(Papo, H. and A. Pereluter, 1980).

위 행렬에서 첫 번째 3열은 x, y, z 축에 따른 이동변환이고, 다음 3열은 x, y, z 축에 대한 회전변환, 마지막 열은 축척변환을 나타낸다. $C^T \cdot X = 0$ 조건을 만족하는 자유망 조정은 관측방정식인 식 (14)에 부가되어 식 (15)와 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{bmatrix} V \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_2 \\ C_{11}^T & C_{12}^{T*} & C_2^T \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_{11} \\ X_{12} \\ X_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} L \\ 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

2.3 상좌표 취득 및 사진삼각측량

수치사진의 모든 타겟이미지 측정은 강도경중률(intensity weights)을 고려한 Centroiding 기법에 의한 digital mono-comparator 프로그램을 이용하여 반자동으로 측정하였다(이진덕, 1996).

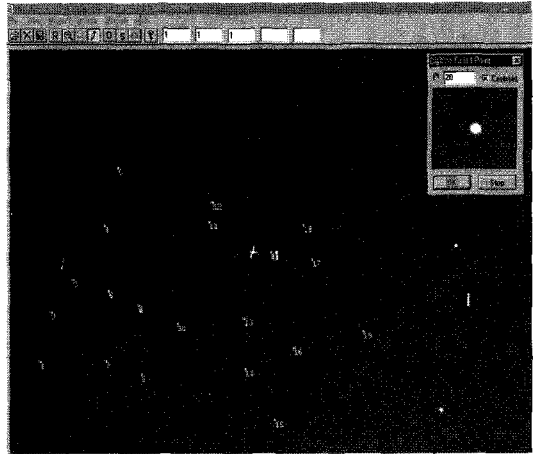


Fig. 4. Image coordinate measurements in the digital mono-comparator

취득한 영상의 정오차 보정을 위하여 Fig. 5와 같이 사진에 자체검정기법(self-calibration)에 의한 실내 캘리브레이션 실험을 통하여 얻어진 카메라의 내부표정요소 (x_p, y_p, c)와 렌즈왜곡계수(K_1, K_2, K_3, P_1, P_2) 등을 입력

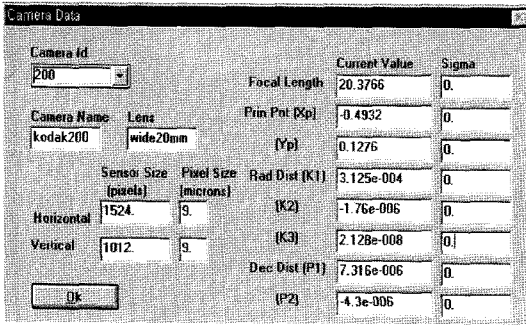


Fig. 5. The calibration parameters of Kodak DCS200

하여 처리하였다.

광속조정의 적용조건으로서 표준적 광속조정의 경우 고르게 배치된 4점의 기준점을 채용하여 기준점측량의 정확도를 0.001m로 설정해 주었고, 자유망 광속조정의 경우 기준점을 사용하지 않는 대신 대상점들의 X, Y, Z 근사좌표, 그리고 스틸테이프로 측정하여 얻은 1세트의 대상점간 길이를 측정결정을 위한 요소로서 입력해 주었다.

3. 3차원 좌표 및 변형량 도출

Epoch 1과 Epoch 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 기준계상에서 비교하기 위하여 대상점들의 3차원 좌표를 표준광속조정 계산에서 채용한 것과 같은 4점의 기준점을 이용하여 3차원 등각상사변환(similarity transformation)을 행하였다. Table 1은 대상점들에 대한 자유망 광속조정 및 표준 광속조정 결과의 차를 평균값과 RMS로 나타낸 것으로서 RMS의 경우 0.21~0.47mm의 범위이다.

결과의 공간정확도(space accuracy)를 확인하기 위하여 Epoch 1 및 Epoch 2에서 표준 광속조정과 자유망 광속조정에 의해 취득한 X, Y, Z 방향들의 표준오차평균 $((\Delta X + \Delta Y + \Delta Z)/3)$ 을 22개의 대상점들 중 대각선방향으로 가장 멀리 떨어져 있는 두 대상점간의 길이로 나누어 계산하였다. Table 2에서 제시한 바와 같이 취득한 22개 대상점의 평균공간정확도는 1/30,000~1/36,000의 범위로 나타났다.

Epoch 1의 경우 자유망 광속조정이 표준 광속정보보다 약 13% 정도 더 높은 정확도를 나타내었고, Epoch

Table 1. Discrepancies between free-net and standard bundle adjustment

Epoch	Epoch 1(25th of May)			Epoch 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
RMS	0.342	0.210	0.128	0.378	0.228	0.470

Table 2. Object space accuracy of results processed by both bundle adjustment techniques

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

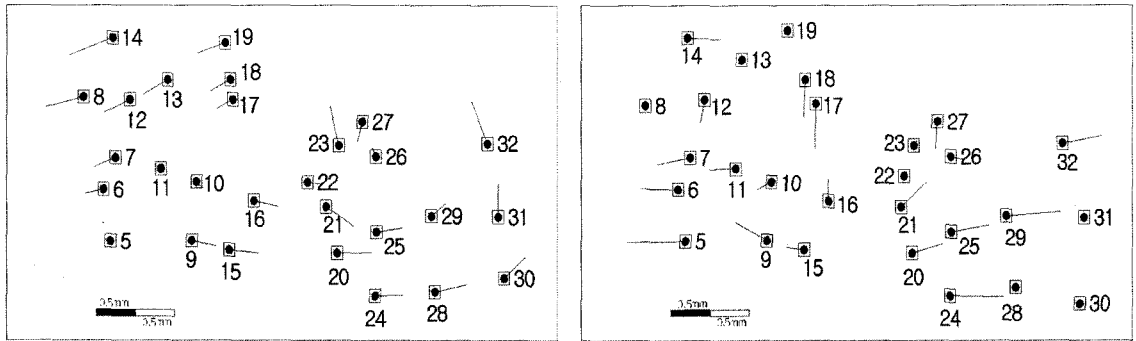
2의 경우 자유망조정이 약간 높지만 거의 유사한 정확도를 나타내었다.

이론적으로 표준광속조정에 사용한 기준점들에 오차가 없다는 가정 하에서는 표준 광속조정의 정확도는 자유망광속조정의 정확도와 동일하여야 할 것이다. 다른 모든 조건이 같다면 각 시기에서 행한 기준점측량의 정확도에 따라 표준 광속조정결과의 정확도가 달라지고 따라서 표준광속조정과 자유망조정에 의한 3차원측정결과의 차가 커지거나 작아질 수 있을 것이다. 따라서 자유망 조정결과의 정확도는 항상 표준광속조정의 결과보다 높을 것이고 그 차이는 기준점측량의 정확도가 지배적인 영향을 미친다고 판단된다.

따라서 Epoch 1보다는 Epoch 2에서 기준점측량의 정확도가 더 높기 때문에 본 연구와 같은 결과가 얻어졌다고 볼 수 있다.

Fig. 6은 Epoch 1과 Epoch 2에서 표준 광속조정을 기준으로 한 자유망 광속조정 결과의 차이를 사면의 길이 방향과 수직방향인 X-Z 평면상에서 단순히 측점별로 도식화하여 나타낸 것으로서 대부분 약 0.5mm이내의 교차를 나타내고 있음을 알 수 있다.

그리고 실제적인 사면의 변형량을 비교하기 위하여 Epoch 1에서 토털스테이션과 표준 광속조정 및 자유망 광속조정으로 취득한 X, Y, Z의 3차원 좌표를 기준으로 Epoch 2에서 각각의 방법으로 취득한 좌표들과 비교하여 차이량을 Table 3과 같이 나타내었고, 시각적인 확인



(a) Epoch 1 : Results of free-net minus standard

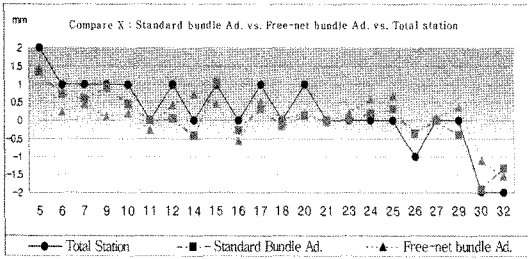
(b) Epoch 2 : Results of free-net minus standard

Fig. 6. Comparison of free-net and standard bundle adjustment in X-Z plane

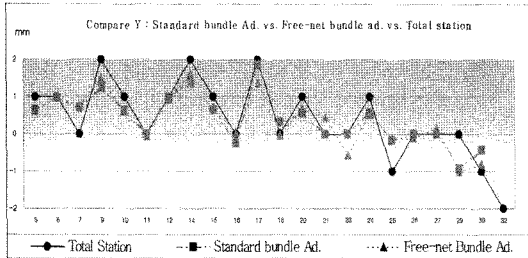
Table 3. The displacements in X, Y, Z directions(Unit : mm)

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

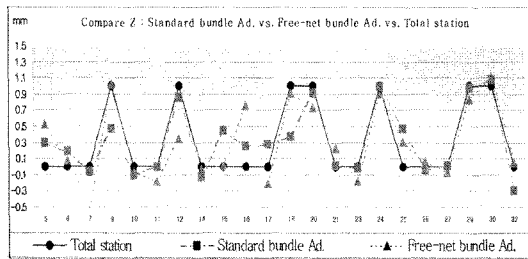
of control points : No.11, 21, 23, 27



(a) Displacement in X



(b) Displacement in Y



(c) Displacement in Z

Fig. 7. The comparison of X, Y, Z displacements derived out by total station, standard and free-net bundle adjustment

을 위하여 Fig. 7과 같이 도시하였다.

28개 대상점 중 두 시기의 상측정값에서 과대오차가 검출된 몇 개점들은 광속조정 처리 중 자동 삭제되고 나머지 22개 점들에 대하여 변형량을 도출하였다.

4. 결 론

스틸비디오카메라로 취득된 수치사진을 이용하여 도로 절개사면에 대한 3차원 변형측량을 시도한 결과, 사진삼각측량에서 1/30,000~1/36000 정도의 정확도로 3차원 측정을 행할 수 있었으며, 자유망(free-net) 광속조

정법을 적용하였을 때 표준광속조정에 비해 13%까지 높은 정확도를 나타내었으며, 이는 등등한 정확도로 변형량을 도출할 수 있음을 시사해 준다.

표준광속조정에 사용한 기준점이 정확하다면 이론적으로 그 처리결과는 자유망 조정과 일치할 것이다. 그러나 실제적으로 기준점측량에 아무리 주의를 기울이더라도 기계자체 및 관측상의 우연오차가 내재하므로 자유망 조정의 필요성이 제기된다고 하겠다.

따라서 자유망 기법을 적용한다면 종래의 일반적인 광속조정방법에서 기준점측량에 수반되는 기준점측량의 정확도 문제 등에서 벗어나 복잡한 현장에서 융통성(flexibility)을 가지고 자료취득시간을 크게 단축할 수 있음은 물론, 개선된 정확도의 3차원 변형측량 성과를 얻을 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 2004년도 금오공과대학교 학술연구비 지원에 의하여 수행되었기에 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Papo, H. and A. Perelumuter, 1982, "Free Net Analysis in Close-Range Photogrammetry", Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 48, No. 4, pp. 571~576.
2. Papo, H. and A. Perelumuter, 1980, "Free Net Analysis of Storage Tank Calibration", Proceedings of the 14th Congress of ISP, Hamburg.
3. George E. Karras and Elli Petsa, 1993, "DEM Matching and Detection of Deformation in Close-Range Photogrammetry without Control", Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 59, No. 9, pp. 1419~1424.
4. Fraser, C.S. and Shortis, M.R., 1995, "Metric Exploitation of Still Video Imagery", Photogrammetric Record, 15(85), pp. 107~128.
5. Fraser, C.S., 1992, "Photogrammetric Measurement to One Part in a Million", Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 58, No. 3, pp. 305~310.
6. J.-D. Lee, Fraser C.S. and Kenneth Edmundson, 1995, "Vision Metrology Applied to Deformation Monitoring of a Silo Support Structure", Proceeding of Symposium on Surveillance and Monitoring, The Melbourne University, pp. 78~84.
7. Obidowski, R. M. and Teskey, W. F., Gaidadjiev, R., 1995, "Integration of Sensors with Videometry for Industrial Machinery Monitoring", ISPRS Commission V Symposium, pp. 295~303.
8. Fraser C. S., 1998, "Some Thoughts on the Emergency of Digital Close-Range Photogrammetry", Photo-grammetric

Record, Vol. 17, No. 91, pp. 37~50.

9. 이진덕, 1998, “고해상도의 스틸비디오 카메라를 이용한 수치근

접사진측량 시스템의 실용성 평가”, 대한토목학회논문집, Vol. 18, No.Ⅲ-2, pp. 183~193.