

암반 불연속면의 원격 영상측량 기법

A Remote Measurement Technique for Rock Discontinuity

황 상 기 (SangGi, Hwang)

배재대학교 토목환경공학과

요약 / ABSTRACT

암반 절취면에 분포하는 면과 선구조를 원격으로 측정하는 단순 장치를 소개한다. 지질구조의 배열은 구조면이나 선분상에 존재하는 3개 이상의 점에 대한 3차원 좌표를 이용하여 계산된다. 좌표들은 두 폐쇄회로 카메라의 영상에서 계산되며, 계산에 활용되는 변수들은 (1) 영상에서의 동일지점에 대한 좌표 (2) 카메라의 초점거리 (3) 두 카메라의 기선거리 이다.

영상측량을 위하여 영상 획득을 위한 장치와 Visual Basic 언어와 GIS 컴퍼넌트를 이용한 전산 프로그램이 개발되었다. 개발된 방법을 이용한 측정결과 179cm의 거리에서 원격으로 측정된자료가 1cm 이하의 오차를 보이고 있다. 원격측정법을 이용하여 배재대학 교내의 암반 절취면에 분포하는 면구조를 측정한 결과 수작업으로 측정한 면의 배열방향과 허용 오차범위 이내에서 일치하는 결과를 보이고 있다.

주요어 : 영상측량, 원격측량, 지질구조, 암반절취면, 암반공학

A simple automated measuring method for planar or linear features on the rock excavation surface is presented. Attitude of the planar and linear feature is calculated from 3D coordinates of points on the structures. Spatial coordinates are calculated from overlapped stereo images. Factors used in the calculation are (1) local coordinates of the left and right images, (2) the focal length of cameras, and (3) the distance between two cameras.

A simple image capturing device and an image treatment routine coded by Visual Basic and GIS components are constructed for the remote measurements. The methodology shows less than 1 cm error when a point is measured from 179 cm in distance. The methodology is tested at the excavation site in PaiChai University. Remotely measured result matches well with the manual measurement within the reasonable error range.

Key Words : photogrammetry, remote measurement, geological structure, rock excavation surface, rock engineering

서론

사면안정과 터널공학 분야에서 절리, 단층, 엽리와 같은 불연속면(discontinuity)의 배열을 자세히 파악하는 것은 매우 중요하다. 불연속면의 배열은 토목공사의 설계에 활용될 뿐 아니라 시공단계에서도 안정성과 설계변경의 필요를 입증할 수 있는 중요한 자료이다. 특히 시공단계에서는 암반의 절취면이 노출되어 있어서 불연속면의 구체적인 배열을 측정할 수 있는 충분한 환경이 마련된다. 그러나 이들의 분포를 신속하고 정확하게 측정할 수 있는 방안이 없어, 설계단계의 기초조사에서 한정된 노동과 시추공 정보를 활용하여 불연속면의 통계적인 분포 방향을 고려하고 있는 실정이며, 시공단계에서는 불연속면 배열이 전혀 고려되지 않고 있는 실정이다. 그러므로 적절한 자동 측정방법의 개발이 시급한 실정이다.

유복모 외(1983)는 측량된 3차원 좌표를 이용하여 암반 불연속면의 주향과 경사를 원격으로 측정하는데 필요한 기초적인 원리를 제시하였다. 한편 Garde(1992)는 연속사진의 측점을 디지털화 하여 연결함으로써 불연속면의 3차원 배열을 측량한 결과를 제시한 바 있다. 그러나 전자의 경우는 측량 결과의 계산방법을 제시한 것이고 후자의 경우는 측량에 소요되는 시간이 너무 오래 걸려 모두 현장에 활용할 수 있는 효과적인 방법을 제시하고 있지는

않다.

최근 디지털 이미지를 활용한 근거리 사진측량 기법에 관한 다양한 연구결과(한승희와 강준목, 1995; 한승희, 1999; Mikhail et al, 1984; 유한희 외, 1997; 이재기 외, 1997; 조규전과 심중헌, 1997; 강준목 외, 1997; 안기원 외 1997)들이 발표되고 있어서 원격 사진측량에 의한 3차원 형상의 재현이 가능해 지고 있다. 이러한 연구의 발전은 암반의 불연속면을 원격으로 측정하는 도구의 개발을 가능하게 하여주고 있다.

기존에 연구된 자동 측정장치들은 물체의 3차원 형상을 모델화 하기 위한 다양한 시도로서 부분적으로 가능성들이 입증되어 있으나 완전 자동화된 측정장치가 실용화되지는 못하였다. 그러므로 본 연구에서는 두 대의 폐쇄회로 카메라로 획득된 입체 영상을 이용하여 수동으로 불연속면의 배열을 측정하는 방법과, 이 방법이 적용된 사례를 소개하고자 한다.

영상처리 장치

사면의 영상을 획득하기 위해서 두 대의 폐쇄회로 카메라를 광축에 수직으로 이동하도록 장착할 수 있는 Figure 1과 같은 알루미늄 판을 제작하였다. 폐쇄회로 카메라는 삼성이 제작한 것으로 영상이 맺히는 소자의 크기는 4.88×3.66mm이며 이 영

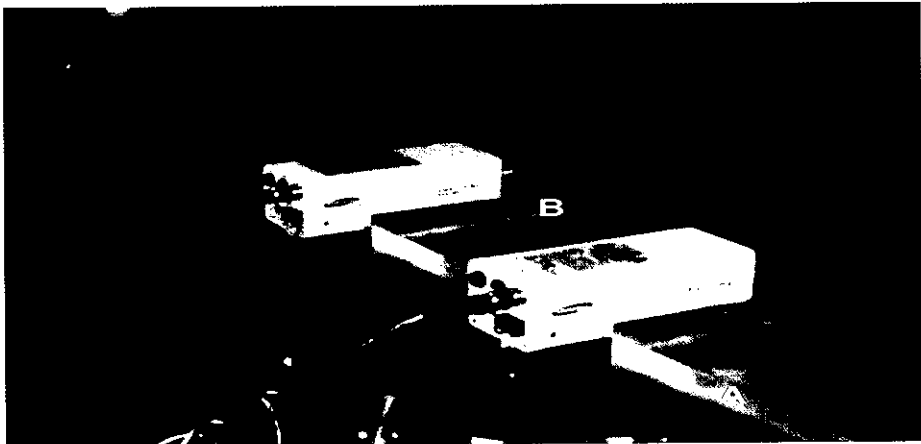


Fig. 1. 카메라 장착장치

- A. 카메라를 수평으로 이동하도록 제작된 알루미늄 판.
- B. 카메라의 광축이 알루미늄 판과 수직이 되도록 제작된 카메라 받침.

역은 640×480 개의 소자로 나뉘어져 있다. 카메라의 영상은 영상처리 보드(Matrox Meteor-II Standard 보드)를 통하여 실시간으로 영상화 되도록 설계되어 있으며 이 영상화의 과정 역시 S/W에 의해 제어되도록 설계되어 있다.

측 정 원 리

암반에는 불연속면이 존재하므로 절취면의 표면은 불연속면의 일부가 노출되어 있다. 또한 불연속

면과 절취면의 교선이 3차원으로 굴곡을 이루는 절취면의 표면에 굴곡선의 형태로 노출된다. 이러한 굴곡지점의 좌표를 이용하면 노출되지 않은 불연속면의 배열 역시 측정할 수 있다. 그러므로 절취면의 3차원 형상을 정확히 모델화 할 수 있다면 이로부터 면의 배열을 추정할 수 있다. 그러므로 불연속면의 영상측량은 영상을 이용한 절취면의 3차원 형상의 구축과 구축된 3차원 형상을 지구좌표계로 변환한 과정을 거쳐 이뤄진다.

영상을 이용한 거리측량 방법은 기존의 사진측

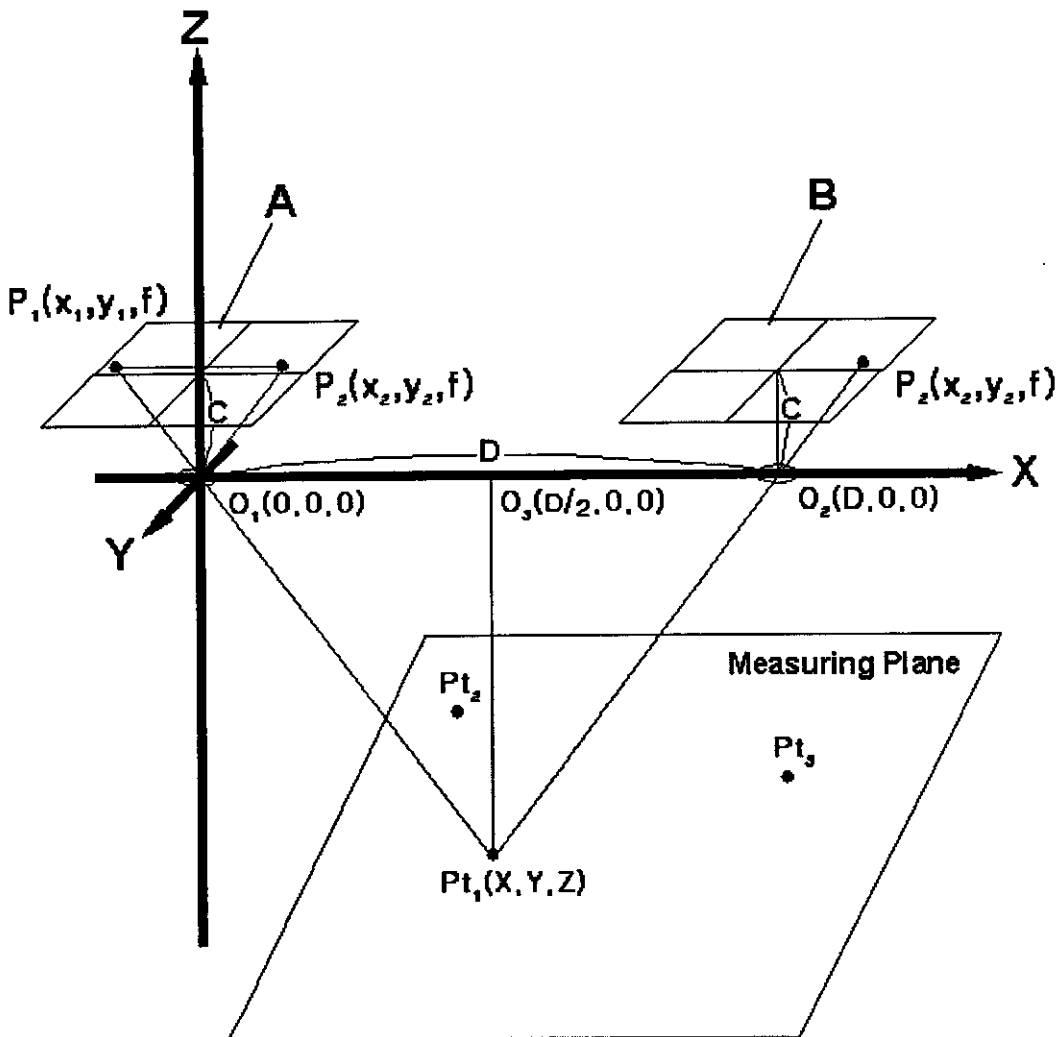


Fig. 2. 영상측량의 원리 모식도.

량 분야에서 활용되어온 기본 원리를 활용하였다. Figure 2에서와 같이 하나의 타겟점 P_t 은 두 카메라의 렌즈(O_1, O_2)를 투과하여 두 영상(A_1, B_2)에 P_1 과 P_2 로 반영된다. 사진과 렌즈사이의 거리 C 는 카메라의 초점거리이며, D 는 두 카메라 사이의 거리이다.

우측 카메라에서 렌즈(O_2)와 CCD에 맺힌 영상(P_2)과 사진의 중심점 사이에 형성된 삼각형을 좌측의 사진으로 평행이동하면, 삼각형 $P_1-P_2-O_1$ 과 삼각형 $O_1-O_2-P_t$ 이 닮은꼴이 됨을 알 수 있다. 그러므로 다음과 같은 관계가 성립된다.

$$\overrightarrow{P_1 - P_2} : \overrightarrow{C} = \overrightarrow{D} : \overrightarrow{O_3 - P_t}$$

여기에서 $\overrightarrow{P_1 - P_2}$ 는 CCD의 중심점에서 맺힌 영상의 위치까지의 거리를 의미하므로 이는 CCD에서 화소로 측정된 두 영상에 맺힌 타겟점의 거리를 의미한다. 한편 C 는 카메라의 초점거리이며 D 는 두 카메라의 거리이므로 모두 알고있는 변수들이다. 그러므로 CCD에 맺힌 타겟점 영상의 거리만 측정하면 카메라로부터 실 타겟점까지의 거리 $\overrightarrow{O_3 - P_t}$ 을 측정할 수 있는 것이다. 이와 같은 원리로 모델공간에서 타겟의 3차원 좌표는 아래의 공식을 이용해 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} X &= \frac{x_1}{x_1 - x_2} D, \\ Y &= \frac{y_1}{x_1 - x_2} D = \frac{y_2}{x_1 - x_2} D, \\ Z &= \frac{C}{(x_1 - x_2) \times k} D \dots\dots\dots (\text{Eq. 1}) \end{aligned}$$

- x_1 = 왼쪽이미지에서서의 x좌표값,
- x_2 = 오른쪽이미지에서서의 x좌표값
- y_1 = 왼쪽이미지에서서의 y좌표값,
- y_2 = 오른쪽이미지에서서의 y좌표값
- D = 두사진 사이의 거리,
- C = 초점거리
- k = 영상의 크기와 소자의 크기를 비교하여 측정된 보정계수

면의 배열측정

사진측량에 의해 획득된 좌표계는 기선의 방향에 따라 임의로 설정된 모델공간의 좌표계이다. 그러므로 면들의 주향과 경사를 구하기 위해서는 모델 좌표계를 지구좌표계로 변환하는 과정이 필요하다. 토목의 측량 분야에서는 이러한 좌표의 변환을 위해서 지형의 일정 기준점을 정하여 측량 성과를 이에 맞추는 방법을 사용하고 있다(유복모 외, 1983). 그러나 지구과학의 최종 목표는 불연속면의 배열을 측정하는 것으로 암사면의 3차원 모델을 실 좌표계로 변환할 필요는 없다. 이러한 관점에서 본 연구에서는 다음과 같은 회전 방법에 의한 모델평면의 배열을 실 좌표계의 배열로 변환하는 방법을 제안하는 바이다.

면의 배열변화를 위해서는 모델 좌표계에서 하나의 기준면과 하나의 기준선에 대한 주향과 경사가 측정되어야 하고, 암반의 절취면에서 이에 대응하는 면과 선의 주향과 경사가 측정되어야 한다. 모델 좌표계에서 측정된 기준면과 기준선이 지구좌표계와 동일한 주향과 경사를 갖게 하기 위해서는 이들이 서로 평행한 관계를 갖도록 회전 시켜야 한다. 본 연구에서 제안하는 방법은 기준면과 기준선의 주향과 경사를 일치시키기 위하여 아래와 같은 단계적인 회전을 수행하고 각 회전에 필요한 행렬식을 적립하여 최종 회전식을 구한 후, 이를 모델 좌표계의 모든 면 요소에 적용하는 것이다.

첫째, 모델과 지형 기준면의 주향을 일치시킨다. 회전에 사용되는 방법은 특정 축을 기준으로 회전하는데 효율적인 Quaternion Representation (Hearn and Baker, 1994)을 사용하며, 회전행렬은 아래와 같다.

$$Q(\theta) = \begin{bmatrix} 1-2m^2-2n^2 & 2lm-2sn & 2ln+2sm \\ 2lm+2sn & 1-2l^2-2n^2 & 2mn-2sl \\ 2ln-2sm & 2mn+2sl & 1-2l^2-2m^2 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (\text{Eq. 2})$$

위에서 θ 는 회전각이며 (l,m,n)은 회전축이며 s는 회전각(θ_1)에 의해 계산되는 상수이다. 첫 번째

의 회전은 지형공간과 모델공간의 기준면의 주향값을 위의 회전공식에 의해 회전하는 과정이다. 회전축은 모델 좌표계의 연직벡터이다.

둘째, 기준면의 경사값을 일치시킨다.

두 번째 회전은 1차 회전에 의해 회전된 모델공간의 기준면의 경사값과 지형공간 기준면의 경사값의 차이(θ_2)만큼 주향방향을 기준축으로 하여 회전하여 두 기준면의 주향과 경사를 일치시키는 과정이다.

셋째, 기준면의 배열을 지형공간의 배열로 일치시킨다.

위의 회전에 의해 모델의 기준면은 지형공간의 기준면과 평행을 이루게 된다. 그러나 면이 평행함으로 3차원 공간의 배열이 일치하는 것은 아니다. 세 번째 회전은 두 공간의 기준선을 이용하여 기준면에 수직인 벡터를 축으로 하여 회전함으로써 3차원 공간 배열의 일치를 도모하는 것이다. 이를 위하여 기준선의 벡터들을 기준면으로 투영하여 회전각(θ_3)을 구하고 이를 기준하여 3차 회전을 수행하게 된다. 기준선을 기준면으로 투영하는 과정은 측량오차를 감안하여 모델 좌표계와 실 좌표계를 최적의 상태로 일치시키기 위한 절차이다.

넷째, 모델 데이터를 위와 동일한 회전과정으로 모두 회전시켜 지형공간과 일치시킨다.

세 단계의 회전을 종합한 회전 행렬은 아래와 같이 구할 수 있다.

$$Q=Q(\theta_1)*Q(\theta_2)*Q(\theta_3) \dots\dots\dots (Eq. 3)$$

위 공식에서의 각 함수 $Q(\theta)$ 는 Quaternion Representation의 회전행렬을 의미하며 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 는 각기 위의 3단계 회전에 필요한 회전각을 의미한다.

다섯째, 위의 종합된 회전행렬(Q)을 모델에서 측정된 모든 면구조의 수직벡터에 곱하여 실 지구좌표계의 수직벡터로 전환한 후 이를 다시 주향과 경사로 변환하는 과정이다.

전산 프로그램

위성자료나 항공사진을 이용한 영상측량은 위성과 항공기의 위치와 편차를 수정하기 위해서 두 입

체사진의 위치에 대한 표정이라는 과정을 수행하여야 한다(유복모, 1994). 표정이란 촬영시 항공기가 기울어지는 등의 이유로 파생되는 관측 위치의 변화에 의해 투영면에 생기는 물체의 위치 변위를 보정하는 과정으로서, 항공측량에서는 필수적인 과정이다. 그러나 본 연구를 위해 제작된 카메라의 받침대를 이용하여 카메라의 위치를 수평으로 고정하고 영상의 중앙점을 적절히 배치하였을 경우는 표정을 수행할 필요가 없다. 그러므로 절취면의 3차원 좌표를 취득하기 위해서는 두 영상에서 동일한 위치를 인식하고, 인식된 위치와 사진의 중심까지의 거리를 측정하여, Eq. (1)에 의해 계산을 수행하면 된다.

측정된 절취면의 3차원 측정 좌표가 파악되면, 면 위에 위치한 3개 이상의 측정좌표를 이용하여 최소자승법으로 면의 공식을 계산하고, 이에 의해 모델공간에서의 주향과 경사가 계산된다. 또한 모델공간에서의 주향과 경사값은 하나의 기준면과 하나의 기준선을 바탕으로 실 지형의 주향과 경사값으로 변환되게 된다. 이러한 과정을 자동화 하기 위하여 전산 프로그램이 작성되었다. 프로그램은 Visual Basic과 ESRI사의 MapObject 콤포넌트 및 Matrox사의 ActiveMill OCX를 이용하여 제작되었으며, Figure 3은 프로그램의 대화창이다.

측 량 오 차

본 연구에서 제시한 측량방법의 오차를 시험하기 위하여 Figure 4와 같이 십자형 레이저빔을 유리판에 장착된 모눈종이에 주사하고 레이저빔을 모터로 이동하여 수평으로 30개와 수직으로 5선에 걸쳐 측정점을 형성하고 그 측정점의 좌표를 측량하였다. 각 측정점에서는 영상처리 과정을 통해 Figure 4 우측 상단의 창들과 같이 레이저빔의 수직과 수평선분 및 이들의 교점이 추출되어 표시된다. 측량에 활용된 카메라의 초점거리는 16mm, 카메라 사이의 기선거리는 200mm, 측량거리는 170cm이다. 측량의 결과는 Figure 5와 같다.

측량에 의해 계산된 거리는 $178.9 \pm 0.7\text{cm}$ 로서 실 거리와는 약 8.9cm의 차이를 보였다. 이는 카메라 CCD 영역의 크기($4.88 \times 3.66\text{mm}$)나 기선거리의 미세한 오차로서 Eq.(1)의 보정계수 k에 의해 보정될

황상기

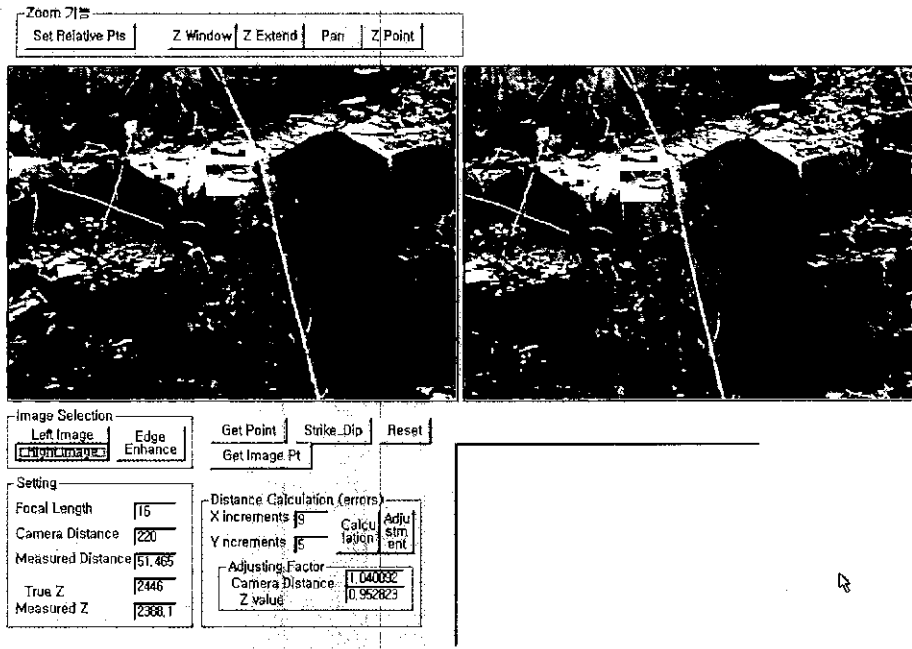


Fig. 3. 수동영상측량을 위한 소프트웨어의 대화창. 두 사진은 각기 좌측과 우측 카메라에서 획득된 입체영상이며, 사진에서의 점들은 지형에서의 동일 위치를 점기 한 것이다.

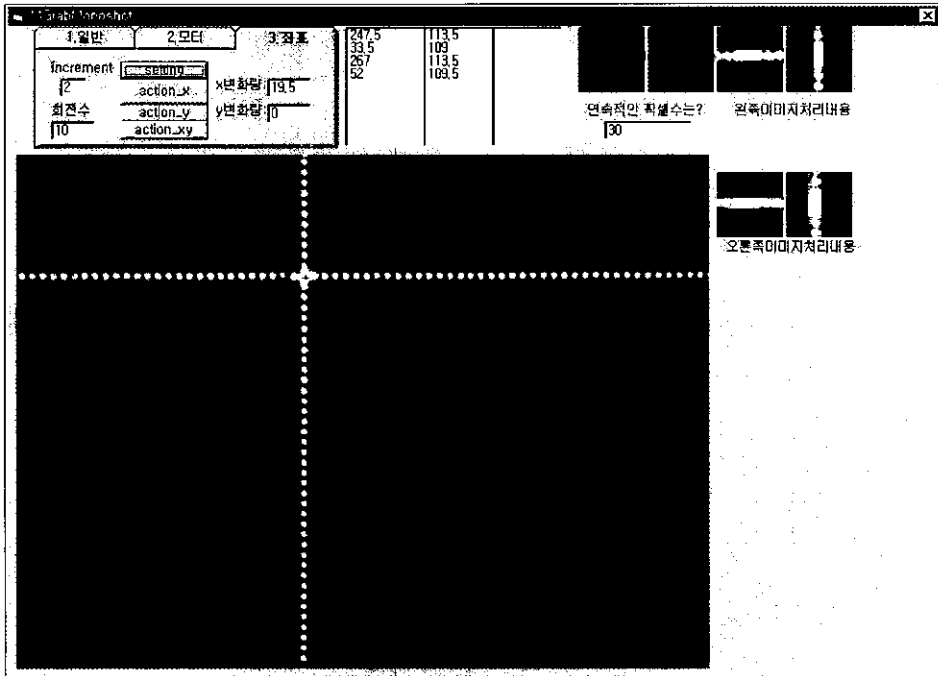
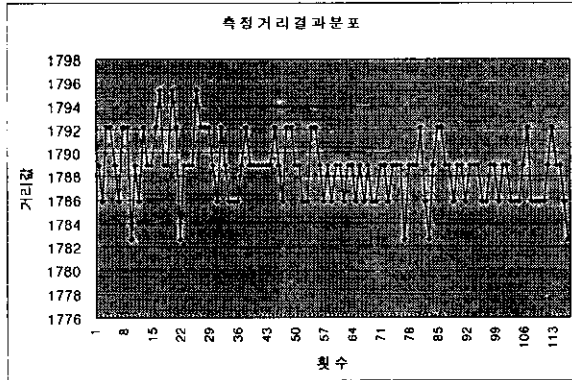
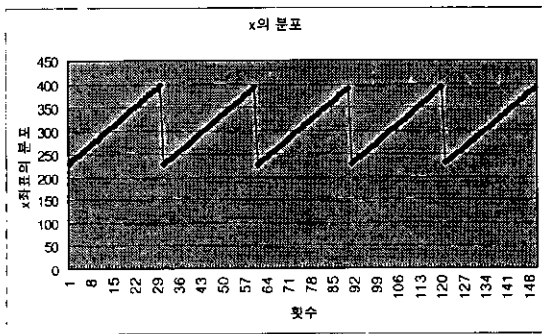


Fig. 4. 오차측정 실험 소프트웨어의 대화창.

A.



B.



C.

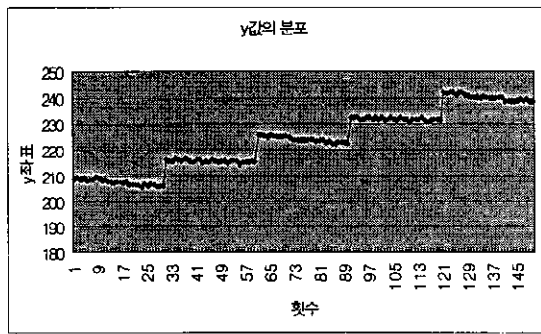


Fig. 5. 측량오차의 실험을 위한 십자타겟의 거리측량 결과.

A. 거리의 측량결과

B. x좌표의 측량결과

C. y좌표의 측량결과

수 있는 오차이다. 그러나 약 7mm의 오차는 영상 처리과정에서 좌우 영상의 정확한 픽셀좌표를 판독하지 못하여 발생하는 측량오차이다. 시험에 사용된 소자는 640×480 개의 화소를 갖고 있으며, 소자 영역의 크기는 4.88×3.66 mm이므로, Eq.(1)에 의한 계산결과, 실험환경에서 1화소의 측량오차는 약 6.5mm의 거리측량오차를 유발시킨다. 그러므로 영상처리과정에서 적어도 1픽셀 정도의 측량오차를 유발시킨다는 것이 조사되었다. 한편 Figure 5B-C에서와 같이 수평과 수직방향의 좌표(x, y좌표)는 상대적으로 미세한 오차를 보이고 있다.

적 용 사 례

제작된 측량기와 전산프로그램을 이용하여 대전 배재대학 교내의 암사면에 분포하는 절리면의 측량

을 시도하였다. Figure 6은 측량을 수행한 암사면의 전경으로 콤파스로 측정된 절리면의 주향과 경사가 기재되어 있다. 측량에 사용된 삼성의 폐쇄회로 CCD 카메라에는 16mm c-mount 렌즈를 사용하였으며, 두 카메라의 기선거리는 220mm이며, 카메라는 사면으로부터 약 514cm 위치에서 측정하였다.

토의 및 결론

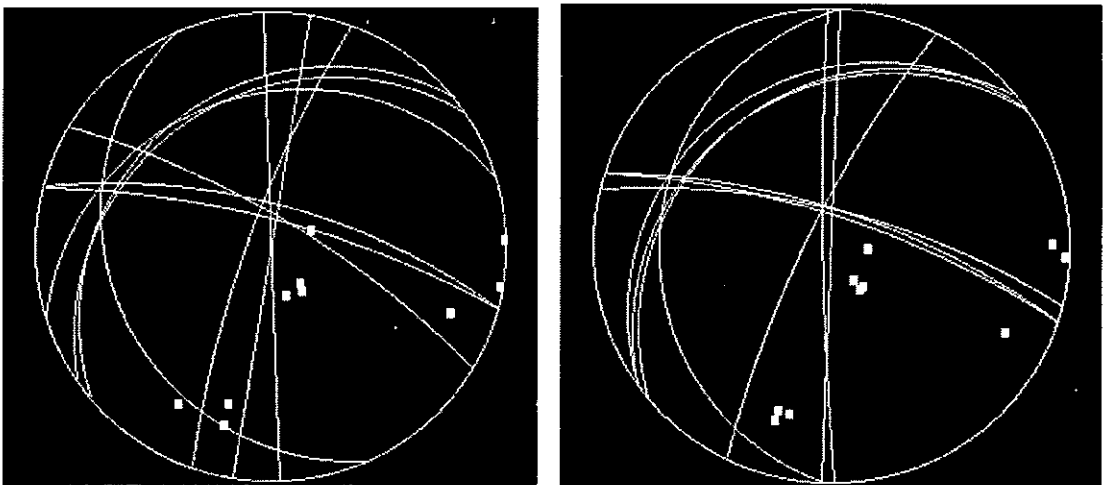
암반사면을 원격으로 측량하려는 시도는 흔치않다. 그러나 물체의 3차원 형상을 사진으로 측량하는 것은 오래 전부터 시도되어 왔으며, 특히 항공 측량 분야에서 사진을 이용해 지형도를 제작하는 과정은 실무에 적용된지 오래이다. 또한 전자기관의 불순물을 찾는 등 미세구조의 사진측량 역시 실

황상기

Strike and Dip was measured by compass.



Fig. 6. 배재대학교 수학과 뒷면에 위치한 암반 절개면, 콤파스로 측정된 절리의 배열이 경사/경사방향으로 표기됨.



(A)

(B)

Fig. 7. 사면의 절리를 투영망에 표시한 결과.
(A). 영상측량기의 측량자료 (B). 콤파스의 측정자료

용화 단계에 있다. 그러나 암사면과 같이 중간 크기의 물체를 측량하는 기술은 현재 개발단계이고, 차량의 외곽을 측량하는 단편적인 분야에서만 실용화 단계에 있다. 최근 로봇 비전과 같이 중간크기의 물체를 3차원으로 모델화 하는 연구들이 활발히 진행되고 있기 때문에, 이 분야 역시 조만간 실용적인 방법이 개발되리라 예상되나 아직 완벽한 해결방안은 제시되고 있지 않다. 이 분야의 문제점은 두 입체영상에서 동일위치를 자동으로 추출하는 방법의 완벽한 해결법이 개발되지 않았고, 또한 영상의 화소 크기에 따른 오차의 한계가 극복되지 않았기 때문에 (한승희와 강준목, 1995; 강준목외(1997); 한승희, 1999; 이재기외, 1997) 발생된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 모델을 하기위한 물체에 원형 혹은 십자형의 소형 기준타겟을 부착하여 그 위치를 이미지에서 자동으로 추출하는 기법들이 연구되고 있다(Mikhail et al, 1984; Trinder, 1989; Trinder et al, 1995). 황상기(2000)는 레이저빔을 타겟으로 하여 그 위치를 자동으로 추출하는 다양한 방법을 시도한 바 있다. 그러나 완벽한 자동화 기법은 아직 소개되지 않았으며 자동화 기법에 의한 오차와 측량시간의 문제가 아직 남아있다. 그러므로 본 연구에서는 수동기법에 의한 영상측량의 가능성을 타진하는데 중점을 두었다.

사진측량 자체에서 발생할 수 있는 오차의 문제성은 현존하나, 측량의 결과가 콤팩스로 측량된 자료와 유사하여(Figure 7) 측량 방법의 적합성은 충분히 인정되었다. 기존의 사진측량에서는 수 μ m의 정확도를 감안한 모델결과를 도출해 내고 있다. 이에 반해 영상측량에서는 측량의 최소오차가 화소의 크기에 좌우되는 관계로 상대적으로 오차를 많이 발생시키며 영상처리방법에 따른 측정결과에도 큰 차이를 보이고 있다. 그러나 최근에 화상도가 높은 카메라들이 개발되고 있으므로 영상처리 기법을 최적화 할 경우, 측량의 오차를 획기적으로 줄일 수 있고 실용성 있는 측정기를 개발할 수 있음을 확인하여 주었다.

사 사

본 연구는 과기부 출연연 한국원자력 안전기술원의 지진 안전성 평가 기반기술개발과제의 부분적

인 지원으로 수행되었다.

참 고 문 헌

- 강준목, 오원진, 배연성, 주영은, 1997, 인체형상 모니터링을 위한 수치근접사진측량의 정확도 분석, 1997년도 대한토목학회 학술발표회 논문집(III), 135-138.
- 안기원, 이효성, 서두천, 신석효, 1997, 수치영상처리 기법에 의한 비측정용 디지털 카메라의 3차원 측정정확도 파악, 1997년도 대한토목학회 학술발표회 논문집(III), 167-170.
- 유복모, 1994, 사진측정학 개론, 회중당, 363p.
- 유복모, 박운영, 양인태, 1983, 사진측정기법을 이용한 사면의 경사와 주향결정에 관한 이론적 고찰, 대한토목학회논문집, 3(3), 129-135.
- 유환희, 조해용, 김성우, 1997, 지상기준점 자료가 필요없는 Camera-Theodolite 기법, 1997년도 대한토목학회 학술발표회 논문집(III), 23-26.
- 이재기, 이현직, 이재동, 박경식, 1997, 색상분리기법을 이용한 영상의 공백점 추출, 1997년도 대한토목학회 학술발표회 논문집(III), 77-80.
- 조규전, 심중현, 1997, 근접사진측량에 의한 교각변형측정에 관한 연구, 1997년도 대한토목학회 학술발표회 논문집(III), 127-130.
- 한승희, 강준목, 1995, 3차원 측량을 위한 Digital Image의 영상좌표 획득에 관한 연구, 대한토목학회논문집, 제15권, 제6호, 1721-1730.
- 한승희, 1999, 디지털 타겟의 중심측정을 위한 도심 측정방법과 외곽선 추출·타원 피팅방법의 정확도분석, 대한토목학회논문집, 제19권, 제III-3호, 433-444.
- 황상기, 2000, 암반의 불연속면 배열을 측량하는 원격 영상측량기, 한국지반공학회 2000 가을학술발표회논문집, 697-704.
- Grade, A.A., 1992, Close-range geological photogrammetry studies: field and laboratory procedures with examples from prograde granulite facies, Rapp. Grønlands geol. Unders. 156, 53-62
- Hearn, D. and Baker, M., 1994, Computer Graphics, Prentice-Hall International, INC,

652p.

- Kam W.Wong. Wei-Hsin Ho., 1986, Close-Range Mapping with a Solid State Camera, P.E. & R.S., 67-74.
- Mikhail, E. M., M. L., Akey and O. R., Mitchell, 1984, Detection and Sub-pixel Location of Photogrammetric Target in Digital Image Photogrammetria, 39, 63-83.
- Priest, S. D 1993, Discontinuity Analysis for Rock Engineering, Chapman and Hall, 473p.
- Trinder, J. C., 1989, Precision of digital target location, P.E., & R.S., 55(6), 67-74.
- Trinder J. C.. J. Jansa. Y.huang., 1995, An Assessment of the Precision and Accuracy of Methods of Digital Target Location, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 20(2), 12-20.

황상기 (SanGi Hwang)

배재대학교 토목환경공학과 조교수

대전시 서구 도마2동 439-6

Tel : 042-520-5628

Fax : 042-525-7486

e-mail : sghmap@mail.pcu.ac.kr