

## 입체사진을 이용한 원거리 면구조 측정

황상기\*  
배재대학교 토목환경공학과

### Remote Measurements of the Geological Structures, Using Photogrammetric Method

Sang-Gi Hwang\*  
Pai Chai Univ. Department of Civil & Geotechnical Engineering

입체사진을 이용하여 암반절취면의 지질구조를 측정하기 위하여, 계획된 입체사진을 획득할 수 있는 사진기 시스템과 사진을 분석할 수 있는 s/w가 제작되었다. 제작된 시스템의 효율성을 검증하기 위하여 단일 건설사면에서 컴퍼스과 사진으로 측정된 25개의 자료를 비교한 결과, 2배의 표준편차 범위에서 주향은  $5.25 \pm 4.53$ , 경사는  $3.18 \pm 3.17$ 의 오차로 서로 일치하였다. 동일 구조면을 사진으로 20회 반복 측정한 결과는 동일 오차범위에서  $8.2 \pm 3.4$ , 경사가  $6.6 \pm 3.4$ 의 오차를 보였다. 이 결과는 암반구조의 측정에서 일반적으로 허용되는 10도 이내의 오차 범위 이므로 제작된 시스템의 현장적용 가능성을 입증하고 있다.

제작된 시스템을 현재 도로공사가 진행중인 5개의 사면에 적용하여 컴퍼스와 사진측정 기법의 결과를 투영망에 접기하여 비교한 결과, 두 방법에 의한 측정결과가 매우 유사함이 입증되었다. 사진측정의 경우는 접근이 용이하지 못한 절취면의 지질구조를 측정할 수 있으므로 지질조사의 신뢰도를 높일 수 있으며 조사의 시간을 단축할 수 있는 효과를 기대할 수 있다.

**주요어:** 원격측정, 사진측량, 주향/경사, 사면조사, 지질정보

A photogrammetric camera system and a software have been built for capturing planned stereo images. To evaluate the system, 25 planar data from a constructed rock slope were measured using both geological compass and photo system. Comparison of the data groups from both system showed matching relationship that falls within the error range of  $5.25 \pm 4.53$  in strike and  $3.18 \pm 3.17$  in dip angles, when the 2 standard deviation error distributions were considered. To evaluate the errors of the photo matching and non planarity of the surface, orientations of the same plane were repeatedly measured 20 times. These measurements showed error ranges of  $8.2 \pm 3.4$  in strike and  $6.6 \pm 3.4$  in dip angle, considering the same error distributions.

Measured strikes and dips were compared with the corresponding compass measurements in 5 constructed slopes to test the system. Stereonet plots showed that the photo system measured data coincided well with the compass measurements. With these evaluations, the photo system can measure the planar structure in inaccessible locations with reliable accuracy at the same time reducing the data gathering period therefore resulting to an efficient geological survey.

\* Corresponding author : sghmap@pcu.ac.kr

**Key words:** remote measurement, photogrammetry, strike/dip, slope survey, geo-information

## 서 론

암반이 관련된 건설공사에서는 정밀 지질조사를 피할 수 없다. 특히 사면과 터널의 경우는 암반의 지질구조가 설계와 시공 및 유지보수과정에서 중요한 요인이다. 일반적으로 기존의 구조지질조사 과정에서는 육안관측에 의한 기재와 조사용 컴퓨터를 이용한 측정이 주를 이루었다. 그러나 공학을 위한 정밀 지질조사의 수요가 증가하고 있으며 공법의 발달로 암반의 굴착면이 커짐으로 접근성이 어려울 뿐 아니라 짧은 시간에 지질조사를 수행하여야 하는 등, 지질조사를 위한 새로운 방향의 제시를 요구하고 있다. 특히 대형 사면이나 단기간의 지질조사를 요하는 터널의 경우 굴착면에 노출된 면구조를 원격으로 측정할 수 있는 방안이 요구되고 있다.

지질구조를 원격으로 측정하고자 하는 시도는 크게 사진측량을 이용하는 방법(유복모 등, 1983; 황상기와 박석록, 2000; 황상기, 2001; Hwang, 2001; Kemeny and Post, 2003; Manh and Hwang, 2004; Gaich et al, 2004)과 레이저 스캐너를 이용하는 방법(이승호, 2005)으로 분류될 수 있겠다. 두 방법 공히 암반의 절취면을 3차원으로 모델 하여, 노출된 불연속면의 배열을 측정하는 것을 원리로 한다. 후자의 경우는 상용화된 측량기를 이용해 암사면에 대한 비교적 정밀한 3차원 모델을 수행할 수 있으며 현재 국내에서도 널리 사용되는 기법이다. 그러나 측량기가 고가 이어서 일반화되기 어렵다는 문제가 있다. 전자의 경우는 고밀도 필름의 입체사진을 도화기나 사진영상3차원 좌표분석프로그램으로 분석하는 기존의 사진측량 공정을 응용하면(한준근과 송영식, 2003) 매우 정밀한 3차원 영상을 얻을 수 있어서 기법 자체의 문제는 없으나 측량용 카메라와  $s/w$ 가 고가인 어려움을 갖고 있으며 전문적인 사진측량의 원리를 이해하여야 하는 등의 문제를 갖고 있다. 그러므로 토탈스테이션과 같은 전통적인 측량기기를 이용한 면구조의 측정도 시도되고 있으나(Linkwitz, 1963; Rengers, 1967; Feng et al, 2001), 이 역시 작업의 과정이 복잡하고 느린 단점을 갖고 있다. 이러한 문제의 해결을 위해, 최근 디지털/CCD 카메라를 이용해 영상을 획득하고 이를 전산으로 자동 분

석할 수 있는 시스템의 개발이 활발히 진행되고 있다(황상기와 박석록, 2000; 황상기, 2001; Hwang, 2001; Manh and Hwang, 2004; Gaich et al, 2004).

자동화 시스템의 문제는 크게 해상도가 높은 디지털 영상의 획득과 영상매치를 위한 알고리즘의 개발에 있다. 전자의 경우는 지속적으로 저렴한 고해상도의 디지털 카메라가 개발되고 있어서 조만간 해결이 될 것으로 예상된다. 그러나 후자의 경우는 컴퓨터비전 분야의 부단한 노력에도 불구하고 모든 경우에 적용할 수 있는 완벽한 해법이 제시되지 못하고 있다. 이러한 전문적인 시도는 모두 입체영상을 이용하여 완벽한 3차원 모델을 구현하기 위한 것으로, mm 단위의 오차를 고려한 연구들이다. 지질구조의 조사에서는 면의 형태가 완전한 평면이 아니며, 일반적으로 사용되는 크리노메터의 측정 역시 10도 내외의 오차는 허용되는 점을 감안하면 매우 정밀한 알고리즘이 필요로 하지는 않다. 본 연구는 입체사진을 이용하여 대형 사면에 대한 지질구조의 측정에 실용적으로 적용하기 위해 개발된 자동화 시스템과 그 적용사례를 소개함을 목적으로 한다.

## 영상측량의 원리

두 입체사진을 이용하여 3차원 좌표를 획득하는 원리는 Fig.1과 같다. 두 영상 A와 B가 D의 간격으로 이격된 카메라에 의해 획득되었으며 카메라의 위치가 Fig.1과 같이 평행한 관계를 갖고 있을 경우, 지형의 한 점 Pt1이 두 영상에 각기 P<sub>1</sub>과 P<sub>2</sub> 위치에 투영되었을 경우를 가정한다. 우측 사진의 투영점 P<sub>2</sub>를 좌측으로 옮겨 형성되는 삼각형 P<sub>1</sub>-P<sub>2</sub>-O<sub>1</sub>는 카메라 렌즈와 지형의 한 점을 연결하는 삼각형 O<sub>1</sub>-O<sub>2</sub>-P<sub>1</sub>과 닮은꼴이라는 것에 근거해 지형상의 점 Pt1의 3차원 좌표는 식1과 같이 정의된다(황상기, 2001). 그러므로 두 영상에 존재하는 지형지물의 동일 위치를 영상의 좌표로 확인할 수만 있으면 지형의 3차원 좌표가 정의되는 것이다. 자동화 시스템의 문제는 두 영상에서 이와 같은 정합점(matching point)을 영상처리 알고리즘을 이용하여 전산으로 찾아야 하는 것이다.

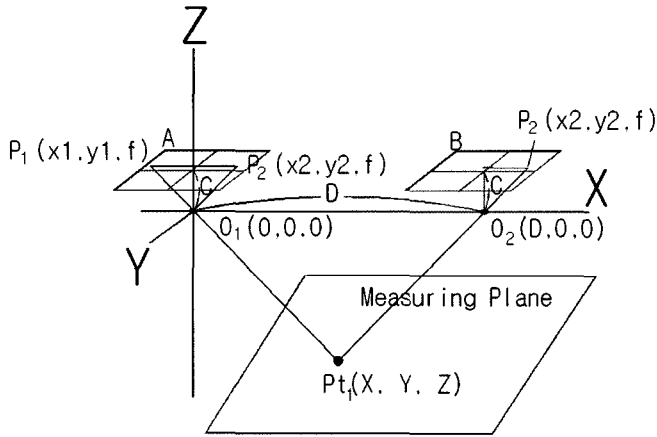


Fig. 1. Schematic diagram for the stereoscopic image analyses.

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

항공측량에서는 카메라를 항공기에 탑재하여야 하므로 사진의 위치가 항상 지표면에 수직이 되질 않으며, Fig.1과 같이 두 영상이 항상 평행이동된 상태도 아니다. 그러므로 표정이라는 과정을 통해 사진의 자세를 교정한 후 위의 기법으로 지형의 3차원 좌표를 획득하게 된다. 표정을 위해서는 정확하게 측량된 지형의 기준좌표들과 입체 사진에서의 해당 화소를 일치시키는 작업이 필수적이다. 지형도의 경우는 지도가 발간되어 있어서 기준점의 좌표를 획득하기가 어렵지 않다. 그러나 암사면의 경우는 기준점을 삼각측량 등으로 구해야 하는 번거로움이 있다. 그러므로 본 연구는 사진기의 위치를 Fig. 1과 같은 수평과 표적에 수직인 위치로 고정하며, 사진기의 간격 역시 입체영상을 이용해 획득할 수 있는 기기를 개발하고, 이를 이용해 연구조의 배열을 측정할 수 있는 시스템을 고안하였다.

정합점을 탐색하는 방법은 비교되는 화소의 차이값을 이용하는 방법(differences)과 비교영역의 상관계수

(correlation)를 이용하는 방법으로 나뉘는데 Table 1과 같이 다양한 방법이 개발되어 있다. 이러한 방법 중 전자적 계산의 속도가 빠르며 알고리즘 자체가 단순한 장점이 있으며 후자는 계산은 다소 느리나 정확도가 높은 장점이 있다. 본 연구는 이 방법 중 기존의 연구에서 신뢰도가 가장 높은 것으로 추천된 ZNCC 방법(Wu et al., 1995; Aschwanden et al., 1992)을 활용하였다. 상관계수의 계산과정은 평균값과 분산값을 반복적으로 구해야 하므로 계산의 중복이 심하여 계산과정에는 Box Filtering 기법(McDonnell, 1981)을 적용하였다.

사면의 3차원 영상을 구하는 방법은 정합점을 등간격으로 구하여 보간에 의해 DEM을 제작하고 사진의 RGB 화소값을 고도자료와 중첩하는 기법을 활용하였다. 이 과정에서 등간격의 접합점을 구하는 방법은 단계별 영상의 피라미드 구조와 Rectangular Subregioning 기법(Sun, 2002), 빠른 상관계수 계산법(Faugeras et al, 1993), Box Filtering 기법(McDonnell, 1981)을 조합한 알고리즘을 활용하였다.

## 면의 배열측정

암반 절취면에 노출된 연구조의 배열은 연구조에서 측량된 3차원 좌표를 이용하여 면의 방정식을 유도하여 측정하게 된다. 면의 방정식은 식2와 같이 3개의 상

수로 정의되며, 이 상수로 정의된 벡터 (a,b,c)는 면의 수직벡터이다. 이론적으로는 평면 위에 존재하는 3점의 3차원 좌표를 획득하면, 3개의 미지수인 상수들을 계산할 수 있다. 그러나 일반적인 지질구조는 완전한 평면을 이루고 있지 않고 본 연구에서 제안하는 측량방법 역시 다소의 오차를 발생시키므로 측량된 정합점의 좌표가 정확히 하나의 면에 포함된다고 할 수 없다. 그러므로 굴곡이 있는 자연의 구조면을 평면화하기 위하여, 면에서 사진으로 측정된 3개 이상의 3차원 좌표 값을 보간하여 평면의 방정식을 유도하였다. 보간 방법은 식3과 같은 최소자승법 (Richard, 1994)을 활용하였다. 식3에서 (Xi, Yi, Zi)는 면 위에서 측정된 좌표값이며, N은 측정 좌표의 개수이다. 세 상수로 정의된 면의 수직벡터 (a,b,c)를 이용해 주향과 경사를 계산하는 방법은 잘 알려져 있다(Priest, 1993).

$$Z = a + bX + cY \tag{2}$$

$$\begin{bmatrix} N & \sum_{i=1}^n X_i & \sum_{i=1}^n Y_i \\ \sum_{i=1}^n X_i & \sum_{i=1}^n X_i^2 & \sum_{i=1}^n X_i Y_i \\ \sum_{i=1}^n Y_i & \sum_{i=1}^n X_i Y_i & \sum_{i=1}^n Y_i^2 \end{bmatrix} * \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n Z_i \\ \sum_{i=1}^n X_i Z_i \\ \sum_{i=1}^n Y_i Z_i \end{pmatrix} \tag{3}$$

사진측량으로 획득된 좌표는 정확한 지형좌표가 아니고 카메라의 정면이 북쪽으로 가정된 모델좌표이다. 그러므로 위의 수식으로 획득된 주향과 경사는 실 지형좌표에 맞도록 회전되어야 한다. 만약 카메라의 배열이 수평을 이루지 않을 경우 이 회전은 단순하지 않다. 그러나 영상이 획득될 때 카메라가 정확히 수평을 유지한다면, 지형좌표에 일치하는 면의 배열은 주향을 두 카메라의 배열방위 만큼만 보정해 주면된다. 보정의 방법은 단순 회전으로서 계산된 면의 벡터를 아래의 알고리즘으로 수정하면 된다.

1. 면의 수직벡터를 선분의 주향과 경사로 변환한다.
2. 경사의 값은 90도에서 계산된 경사 값을 빼 주어 구한다.

Table 1. Various calculation methods of the correlation coefficients.

Normalized Cross-Correlation	$NCC(i, j, d, v) = \frac{\sum_{m=i-L}^{i+L} \sum_{n=j-K}^{j+K} F(m, n) * G(m + v, n + d)}{\sqrt{\sum_{m=i-L}^{i+L} \sum_{n=j-K}^{j+K} F^2(m, n)} \sqrt{\sum_{m=i-L}^{i+L} \sum_{n=j-K}^{j+K} G^2(m + v, n + d)}}$
Zero mean Normalized Cross-Correlation	$ZNCC(i, j, d, v) = \frac{\sum_{m=i-L}^{i+L} \sum_{n=j-K}^{j+K} (F(m, n) - \bar{F}) * (G(m + v, n + d) - \bar{G})}{\sqrt{\sum_{m=i-L}^{i+L} \sum_{n=j-K}^{j+K} (F(m, n) - \bar{F})^2} \sqrt{\sum_{m=i-L}^{i+L} \sum_{n=j-K}^{j+K} (G(m + v, n + d) - \bar{G})^2}}$
Sum of Squared Differences	$SSD(i, j, d, v) = \sum_{m=i-L}^{i+L} \sum_{n=j-K}^{j+K} (F(m, n) - G(m + v, n + d))^2$
Sum of Absolute Differences	$SAD(i, j, d, v) = \sum_{m=i-L}^{i+L} \sum_{n=j-K}^{j+K}  F(m, n) - G(m + v, n + d) $
Locally Scaled Sum of Squared Differences	$LSSD(i, j, d, v) = \sum_{m=i-L}^{i+L} \sum_{n=j-K}^{j+K} F(m, n) - \frac{\bar{F}}{\bar{G}} G(m + v, n + d)^2$
Locally Scaled Sum of Absolute Differences	$LSAD(i, j, d, v) = \sum_{m=i-L}^{i+L} \sum_{n=j-K}^{j+K} F(m, n) - \frac{\bar{F}}{\bar{G}} G(m + v, n + d)$

3. 두 카메라는 수평으로 배열되어 있으므로 주향의 방위는 180도를 중심으로 어느 쪽으로 표현을 하여도 상관없이 없다. 그러나 계산의 편의를 위해 카메라의 배열 방향을 180-360도 방위로 설정 한다.

4. 모델에서 계산된 수직벡터의 주향 값에 카메라의 배열을 더한다.

5. 계산 값이 360도를 넘으면 360도를 빼 줌으로 일반 방위로 보정한다.

라의 수평과 회전을 가능하게 하는 마운트 장치로 구성된다. 이 장치를 이용하여 절취면에 분포하는 연구조의 주향과 경사를 측정하는 과정은 아래와 같다.

1. Fig. 2B와 같이 두 셋의 디지털 카메라의 수평을 맞추고 두 카메라의 고도 역시 동일하게 맞춘다. 이는 입체영상을 획득하기 위해 이격시킨 두 카메라의 영상이 수평관계를 가지므로 Fig. 1과 같은 수평이격 영상의 획득을 가능하게 한 것이다.

2. 한쪽 카메라를 90도 회전하여 회전된 카메라가 다른 카메라를 조준하게 한다(Fig. 2C).

3. 슬라이더를 이용하여 회전된 카메라에서 두 입체영상을 획득한다. 슬라이더에서 카메라의 이격거리는 정확히 계산되며 카메라들이 모두 동일 수평면에 위

### 기기개발

고안된 기기장치는 두 카메라의 거리를 측정하기 위하여 단거리의 수평이동이 가능한 슬라이더와 카메라

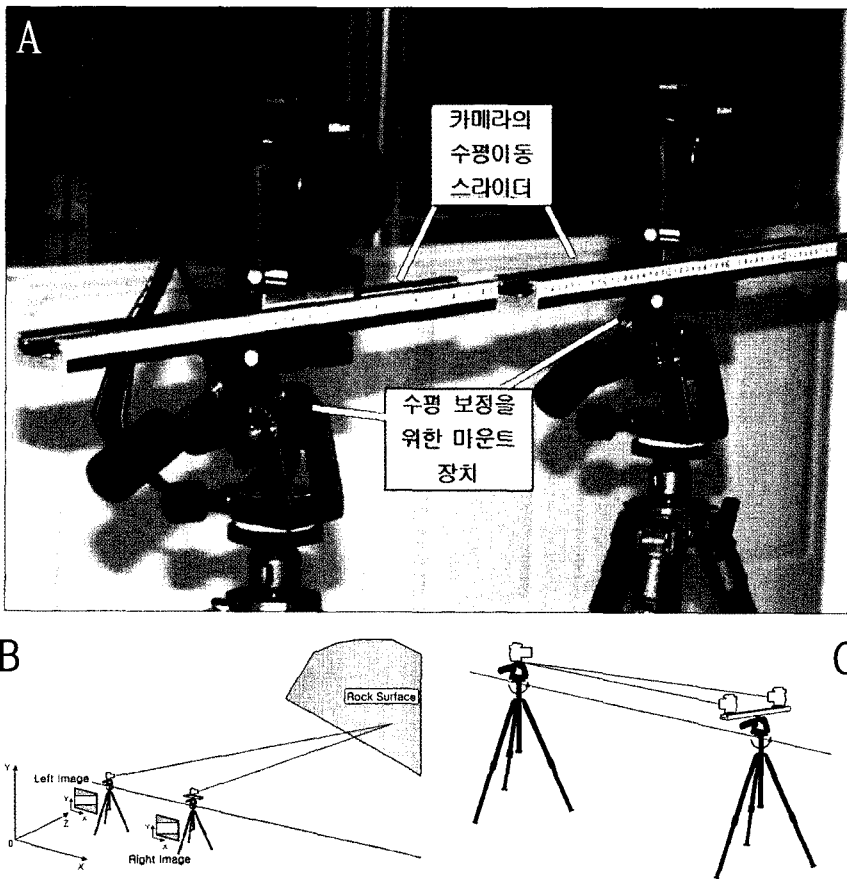


Fig. 2. Camera settings.

A. Equipments developed in this study.

B. Camera setting for capturing stereo image of the rock surface.

C. Camera setting for capturing stereo image of the other camera.

치하므로 Fig.1과 같은 원리로 두 카메라의 거리를 계산할 수 있다.

4. 회전된 카메라 마운트를 다시 원위치로 이동한 후 두 셋의 카메라를 이용해 암반 절취면의 입체영상을 획득한다.

5. 입체 영상을 이용하여 절취면의 3차원 좌표를 계산한다.

6. 3차원 좌표를 이용하여 면구조의 주향과 경사를 측정한다.

3. 설정된 프로젝트를 열어서 영상을 확인하며 필요한 면의 배열을 측정한다.

4. 국부적인 지역의 3차원 모델을 위한 알고리즘이 별도로 제공된다.

영상처리와 측정을 위한 s/w는 Visual Basic 언어와 ESRI의 MapObject 컴포넌트를 이용해 작성되었다. Fig.3은 면의 배열과 3차원 모델을 수행하는 s/w의 폼과 메뉴들이다.

Software

영상에서 정합점을 자동으로 찾기 위하여 전기한 원리를 적용하여 아래의 기능을 수행하는 s/w가 제작되었다.

1. 모델이 시작되기 전에 카메라의 초점거리와 개략적인 사면과 카메라의 거리를 입력하여 적절한 카메라의 이격거리, 모델의 크기 등을 계산하여 현장에서 카메라의 설정과 사면 전체의 모델의 계획 등에 필요한 정보를 획득하도록 돕는다.

2. 카메라의 이격거리를 영상으로 계산함과 동시에 필요한 영상의 종류, 카메라의 초점거리 등을 묶어서 하나의 프로젝트로 저장한다.

적용결과

고안된 시스템을 시험하기 위하여 건설사면을 지질 조사용 컴퍼스를 이용해 측정하고 동일 측정면을 영상측정기로 재 측정해 그 결과를 비교해 보았다. Fig.4는 OO 현장 화강암의 절취사면으로 컴퍼스와 사진으로 측정된 경사/경사방향의 값을 측정지점에 표기한 결과이다. 컴퍼스 측정결과는 상부에, 사진 측정결과는 하부에 표기하였으며, 컴퍼스 측정의 결과는 자료의 우측상단에 별표로 표기하였다. 사진에 표기된 자료 중 컴퍼스와 사진 측정이 동시에 이뤄진 자료가 Table 2에 정리되어 있다.

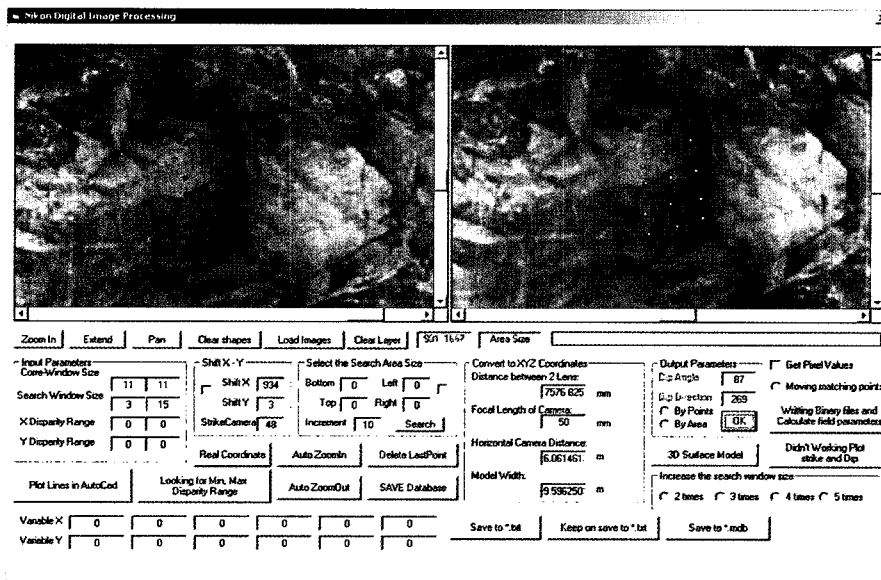


Fig. 3. A frame of the developed software for stereo matching and measurement of the strike and dip from the picture.

사진 측정으로 계산된 면의 배열은 정합점의 탐색 결과와 면의 편평도에 따라서 다소의 오차를 야기시킬 수 있다. 그러므로 이러한 오차의 정도를 파악하기 위하여 사진측정 기법에서는 동일면을 각기 20회 씩 측정하여 측정결과의 평균에 2배의 표준편차 오차를 적용하여, 그 결과를 Table 2에 정리하였다. 각 면에 대한 반복 측정 오차는 2배의 표준편차 범위에서 주향이  $8.2 \pm 3.4$ , 경사가  $6.6 \pm 3.4$  이다. 한편 컴퍼스와 사진의 측정값 차이는 동일 오차범위에서 주향이  $5.25 \pm 4.53$  이

며 경사가  $3.18 \pm 3.17$ 로 계산되었다.

본 연구에서 비교된 면구조는 현장에서 접근성이 용이한 면에 대한 측정 자료를 중심으로 이뤄졌으므로 사면의 하단부와 소단 주변의 자료만 포함되어 있다. 그러나 사진 측정의 경우는 모든 위치의 면구조 측정이 가능하므로 이들을 포함한 측정 결과의 비교를 위하여 측정결과를 투영망에 접기하였다(Fig. 5). 두 측정결과가 매우 유사 하였으며, 사진의 측정은 접근이 용이하지 않은 지역을 포함하므로, 전체적인 자료

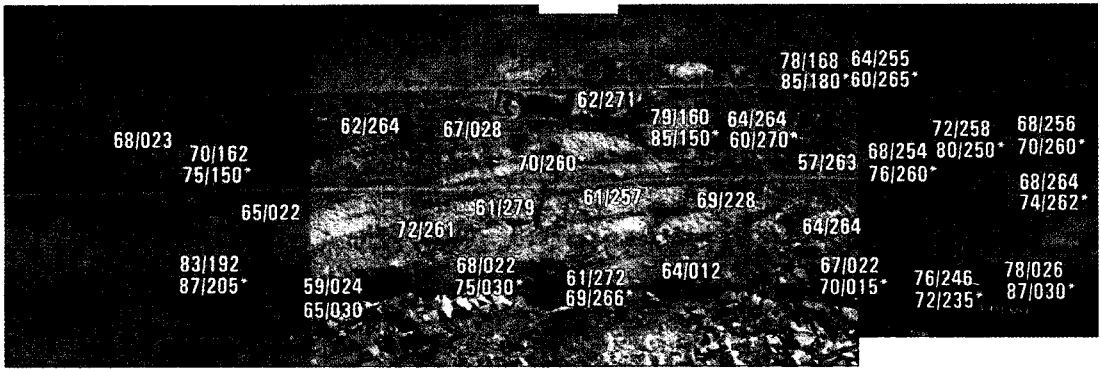


Fig. 4. Comparison between the compass and photo measurements. Data are plotted at the measured positions. The data with asterisk at the end are compass measurements and those without it are the photo measurements. Note that some photo measurements are made at the inaccessible locations.

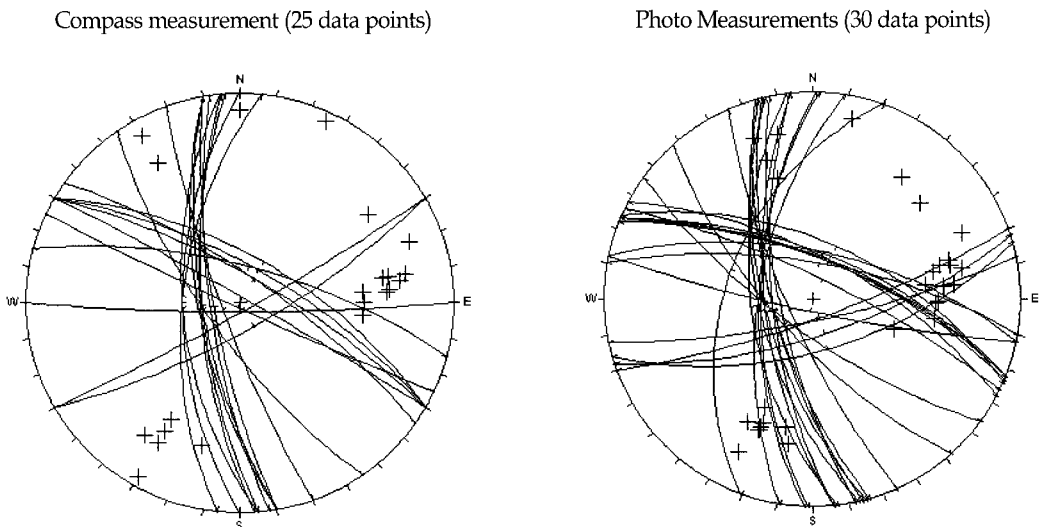


Fig. 5. Stereonet plots for compass and photo data measured at the test slope in Fig. 4. Average values of dip/dip directions are plotted for the photo measurements.

의 분포가 더 명확히 구분됨을 알 수 있다. 현장의 컴퍼스 측정과 사진 측정의 유사성을 비교하기 위하여 OO지역 도로공사 현장의 사면 4개를 추가로 조사하여 그 결과를 Fig. 6에 도식하였다. 도식된 바와 같이

사진에 의한 측정과 컴퍼스의 측정이 유사할 뿐 아니라, 사진 측정은 접근이 용이치 못한 지역을 포함한 다량의 자료를 획득할 수 있어서 절리군의 구분 역시 상대적으로 우수함을 보이고 있다.

**Table 2.** Summary of the measurements of the data in fig. 4. For the photo measurements, dip/dip directions are repeatedly measured 20 times for the same plane to see the variation of the measurements by calculation and matching errors. The error ranges are given by 2 standard deviation values.

	Compass measurement		Photo Measurements		Difference between compass and photo measurements	
	Dip	Dip Direction	Dip	Dip direction	Dip	Dip direction
1	68	23	73.4 ± 4.82	16.8 ± 10.90	5.4	6.2
2	70	162	73.6 ± 8.20	168.8 ± 9.32	3.6	6.8
3	83	192	85.6 ± 6.87	198.4 ± 6.87	2.6	6.4
4	59	24	63.2 ± 5.73	29.4 ± 8.07	4.2	5.4
5	62	264	62.2 ± 7.27	267.6 ± 8.32	0.2	3.6
6	68	22	72.8 ± 5.18	15 ± 8.25	4.8	7
7	67	28	73.6 ± 6.42	32.6 ± 5.59	6.6	4.6
8	61	279	63.2 ± 7.40	271.6 ± 6.10	2.2	7.4
9	62	271	64.6 ± 5.22	273.4 ± 11.80	2.6	2.4
10	70	10	72.4 ± 6.72	17.8 ± 6.69	2.4	7.8
11	61	272	62.6 ± 6.10	271.2 ± 11.52	1.6	0.8
12	79	160	78.4 ± 7.56	168.8 ± 8.53	0.6	8.8
13	79	160	80.2 ± 8.17	169.2 ± 9.10	1.2	9.2
14	45	290	49.6 ± 4.15	291.8 ± 7.13	4.6	1.8
15	64	264	66.6 ± 10.92	266.6 ± 5.02	2.6	2.6
16	78	168	81.4 ± 4.82	172.6 ± 8.90	3.4	4.6
17	64	264	66.6 ± 6.87	268.6 ± 7.69	2.6	4.6
18	67	22	71.2 ± 5.73	18.8 ± 7.40	4.2	3.2
19	64	255	67.2 ± 9.32	259.4 ± 9.76	3.2	4.4
20	68	254	71.6 ± 5.22	257.2 ± 10.04	3.6	3.2
21	76	246	80.8 ± 5.55	251.8 ± 7.27	4.8	5.8
22	72	258	75.8 ± 8.76	263 ± 7.21	3.8	5
23	68	256	71.6 ± 7.56	263 ± 6.78	3.6	7
24	68	264	72.6 ± 3.90	268 ± 8.00	4.6	4
25	78	26	78.6 ± 7.16	17.4 ± 7.95	0.6	8.6
Average					3.18	5.25
2 Standard Deviation					3.17	4.53



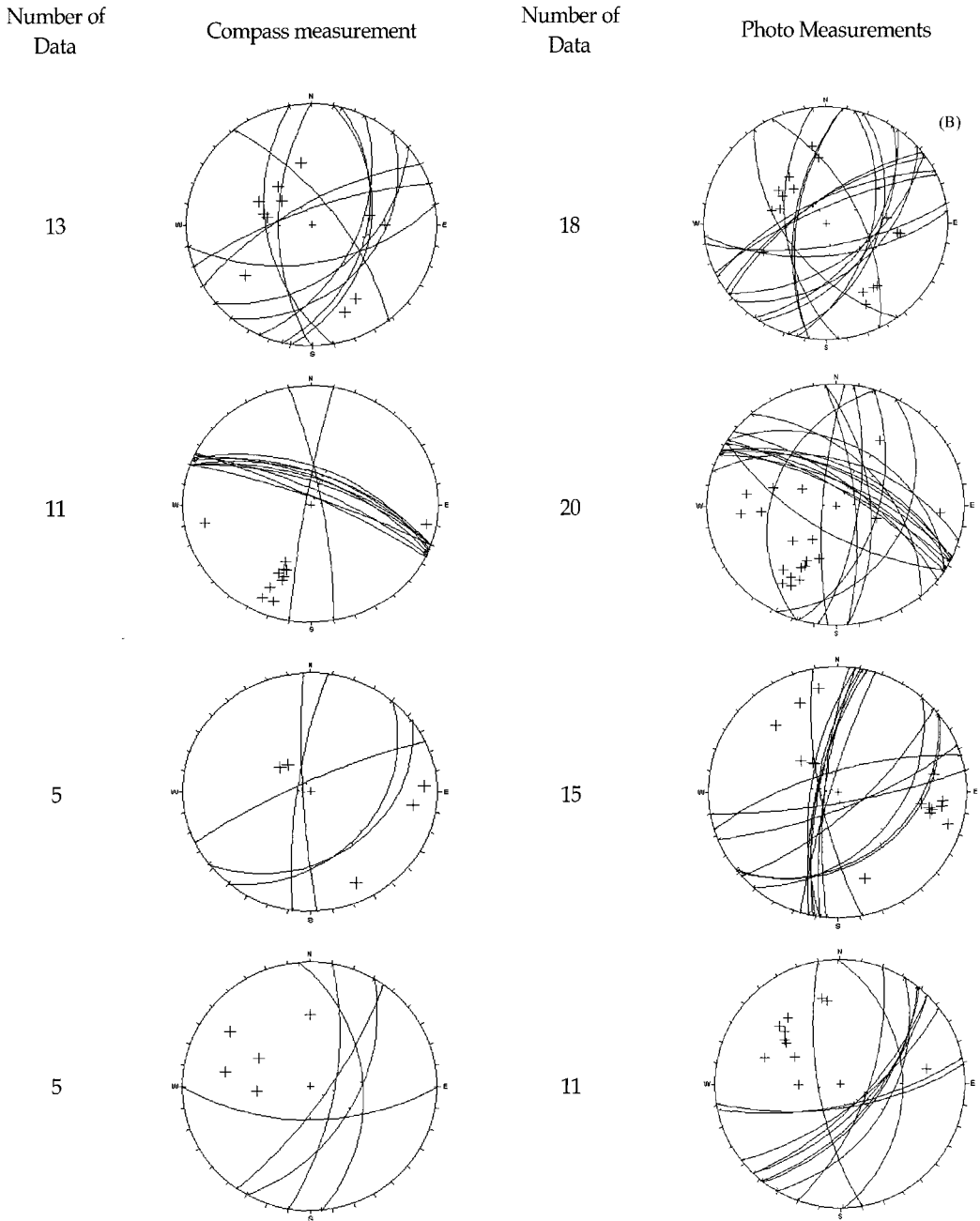


Fig. 6. Examples from 5 different constructed slopes. For each slope, orientation of fractures are measured by clinometer and photo system, and the measurements are plotted in the stereonet for comparison. Number of measurements in each slope are given at the left side of the diagrams.

## 토의 및 결론

입체사진을 이용한 3차원 모델링은 항공측량 분야에서 널리 활용되고 있으며, Intergraph의 Imagine이나 Lica의 LPS와 같은 상용 s/w를 활용하면 매우 정확한 모델을 형성할 수 있다. 이 경우는 항공기의 유동이 심하며 측선이 일정치 않아서, 취득된 사진이나 영상을 입체시 하기 위해서는 지표의 정확한 좌표를 여러 개 이용하여 영상의 이격거리와 영상의 회전 각도를 역산하는 표정의 단계를 수행하여야 한다. 또한 두 영상이 Fig.1과 같이 평행한 관계를 유지할 수가 없으므로 epipolar 영상을 얻기 위한 추가 보정을 필요로 한다. 근접사진의 경우도 동일한 상용 s/w를 이용하여 매우 정교한 모델을 수행할 수 있다. 암반 절취면에 이와 같은 기법을 활용하기 위해서는, 절취면에 기준점을 설정하고, 기준점의 지형좌표를 정확히 측량하여야 한다. 대절취 사면의 경우는 현장에 측점을 설치하고 이들의 3차원 좌표를 정확히 측량하기가 용이하지 않거나 많은 시간을 필요로 하므로, 사진 측정이 현장 조사 보다 불편할 수 있다. 이러한 문제점을 보완하기 위해서, 본 연구는 입체영상을 Fig.1과 같은 기초적인 구조로 획득하고, 두 영상의 이격거리와 절취면의 3차원 좌표를 취득할 수 있는 촬영기기를 제작하였다.

정밀한 사진측량에서는 사진기 렌즈의 왜곡을 보정하여야 하며, 동일 기종의 사진기라도 렌즈가 다를 경우 각기 다른 왜곡을 초래하므로 각 렌즈에 대한 왜곡의 보정을 필요로 한다. 본 연구는 이와 같은 정밀 보정을 생략한 결과이다. 오차의 한계가 mm 단위로 정밀해야 하는 경우는 이와 같은 정밀 보정이 필수적인 것이다. 그러나 암사면의 지질구조는 이와 같은 정밀도를 요구하지 않는다. 암반의 구조면은 그 자체가 완전한 평면이 경우가 극히 드물며, 컴퍼스에 의한 측정 역시 10도 내외의 오차는 수용할 수 있는 것이므로 본 연구에서는 미세한 오차를 초래하는 렌즈왜곡에 대한 보정은 생략하였다.

본 연구에서는 사진기의 수평배열과 화소의 상관관계 수 계산법에 의한 영상의 자동매칭 기법을 활용하였다. 이 역시 매우 다양한 기법이 개발되어 있으며, 기법의 차이에 따라 미세하나마 계산의 속도와 매칭의 오류가 차이를 보인다. 황상기(2001)는 본 연구와 유사한 기법으로 실험실에서 관측한 자동 매칭의 경우, 간

혹 화소 1개 정도의 매칭 오차가 관찰됨을 보고한 바 있다. 본 연구에서 활용된 디지털 카메라는 화소가 3007x2000이며 23.7x15.6mm 크기의 CCD를 사용하고 있다. 이 경우 50mm 초점거리 렌즈를 사용하고 카메라의 이격 거리를 7m로 가정했을 때, 정합점이 1 화소의 이격을 보이면 식 4와 같은 측정거리의 오차를 파생시킨다(Fig. 7).

$$y = 0.2241x^2 + 0.9024x + 0.8976 \quad (4)$$

식 4에서 x는 카메라와 절취면의 이격 거리(meter 단위)를 의미하며, y는 측정된 거리의 오차(cm 단위)를 의미한다. 오차는 측정거리가 멀어질수록 많아지며, 약 70m 거리에서 측정하였을 경우는 10cm 이상의 거리오차를 유발한다(Fig. 7). 이와 같은 오차는 사진을 이용해 동일 면을 반복적으로 측정하면서 파생되는 오차의 일부라 할 수 있다. 즉 동일면을 반복적으로 측정하면, 면의 방정식 계산을 위해 입력될 측정점의 거리좌표가 이 정도의 오차를 갖고 있다는 것이다. 측정점의 좌표 중, 최대의 오차는 카메라와 측정점의 거리와 평행한 방향으로 파생되며 카메라의 광축방향과 수직인 평면의 좌표는 이보다는 적은 오차를 보이므로, Fig. 7에서 고려되는 오차가 최대의 오차로 이해하면 되겠다. 실 좌표계에서 이와 같은 이격거리 오차는 결코 적은 수치라 할 수 없으며, 정밀한 측량을 위해서는 극복하여야 할 문제점이라 할 수 있다.

이와 같은 오차의 요인에도 불구하고 측정된 면구조의 주향과 경사는 10도 내외의 오차 한계에서 컴퍼스의 측정 결과와 일치하고 있으며, 투영면에 점기된 자료군의 분리 형태와 분포 형태 역시 큰 차이를 보이지 않는다. 동일한 기법을 다른 4개의 사면에 적용한 결과 역시, 동일 오차한계에서 주향과 경사를 인지하고 있어서 (Fig. 6) 현재의 시스템으로 지질구조의 배열을 측정하여 활용하는 데는 큰 문제가 없음을 알 수 있었다.

지속적으로 연구되어야 할 사안은 당연히 매칭의 오차를 줄일 수 있는 방법이다. 현재 오차를 줄이고자 하는 지속적인 연구가 진행되고 있으며, 그 결과는 별도로 발표될 예정이다. 본 연구의 목적은, 이와 같은 다양한 오차의 요인에도 불구하고 가장 단순한 사진측량의 기법과 렌즈의 보정을 고려하지 않은 일반 디지털 카메라의 영상으로 원거리 면구조의 측량이 가

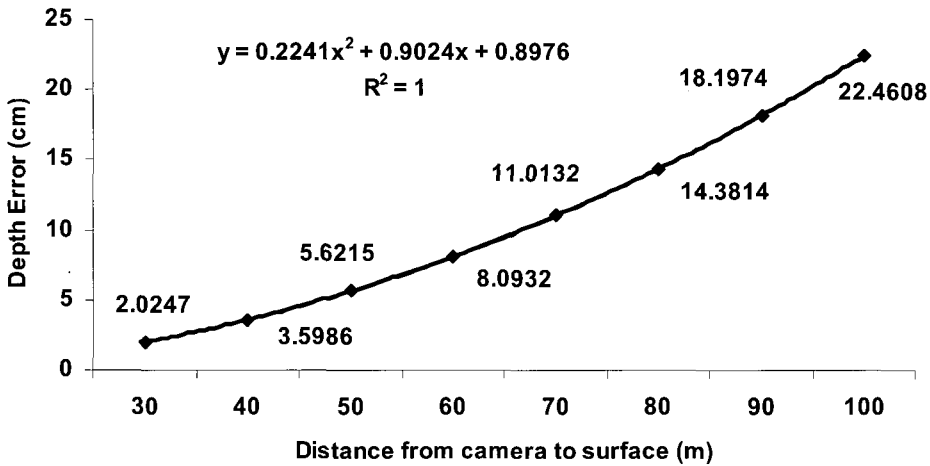


Fig. 7. Expected errors by one pixel miscalculation of the matching point. The error increases as the distance from the camera to the surface increases, and the relation between the distance and the error are defined by the equation within the diagram.

능하다는 것을 보고함에 있다. 현재 응용이 시도되고 있는 레이저 스캐너는 사진보다는 우수한 결과를 보인다(이승호, 2005). 그러나 레이저 스캐너는 매우 고가이며 조작 방법도 암반 구조측량을 위해 보완하여야 하는 단점을 갖고 있다. 본 연구에서 제시하는 기기는 저가로 제작될 수 있으며 (예상 제작가는 레이저 스캐너의 1/15 이하임), 휴대와 사용이 간편하므로 다소의 오차를 감안하면 레이저 스캐너의 대안이 될 수 있다. 원거리 지질구조 측정 방법은 작업의 시간을 단축할 수 있을 뿐 아니라 측정할 구조면에 접근이 어려운 경우에도 활용되어 암반 절취면 전체의 구조를 조사할 수 있으므로 자료의 객관성을 확보할 수 있다. 이러한 관점에서 사진을 이용한 측정 시스템은 매우 효율적인 방법임을 알 수 있다.

### 결 론

암반의 절취면에 분포하는 지질구조면의 배열을 원격으로 측정하기 위하여 카메라 시스템과 s/w가 제작되었다. 제작된 시스템의 현장적용 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 시범적으로 적용된 사면에서는 현장에서 측정된

25개의 면구조 배열을 사진으로 측정된 배열의 값과 비교한 결과, 2배의 표준편차 범위에서 주향이  $5.25 \pm 4.53$ , 경사가  $3.18 \pm 3.17$ 로 계산되었다.

2. 동일 구조면을 사진으로 20회 반복 측정한 결과 동일 오차범위에서  $8.2 \pm 3.4$ , 경사가  $6.6 \pm 3.4$ 의 오차를 보였다.

3. 위의 결과는 일반적인 현장 측정오차 10도 이내로서 현장의 활용 가능성을 입증하였다.

4. 도로공사가 진행중인 5개의 사면을 선택하여 각기 컴퓨터와 사진측정 기법을 이용하여 면구조를 측정하고, 이를 투영망에 점기하여 비교한 결과 두 방법에 의한 측정결과가 매우 유사함이 입증되었다.

5. 사진측정의 경우 현장접근이 용이하지 못한 부분의 자료를 쉽게 측정할 수 있을 뿐 아니라 단기간의 시간에 다량의 면구조를 측정할 수 있어서 새로운 조사 기법의 가능성을 보여 주었다.

### 참고문헌

유복모, 박운영, 양인태, 1983, 사진측정기법을 이용한 사면의 경사와 주향결정에관한 이론적 고찰, 대한토목학회논문집, 제3권, 제3호, pp.129-135.  
 이승호, 2005, 3차원 영상처리를 이용한 암반사면 절리

- 측정 연구, 대한토목학회 논문집, 제25권, 제2호, pp.79-84
- 황상기, 2000, 암반의 불연속면 배열을 측량하는 원격 영상측량기, 한국지반공학회 2000 가을학술발표회 논문집, pp.697-704
- 황상기, 2001, 암반 불연속면의 원격 영상측량 기법, 대한지질공학회지, 제11권,2호, p205-214
- Aschwanden, P., and Guggenb, W.,1992, Experimental results form a comparative study on correlation-type registration algorithms. In Robust Computer Vision, pp. 268-289.
- Faugeras, O., Hotz, B., Mathieu, H., Vieville, T., Zhang, Z., Fua, P., Theron, E., Moll, G., Berry, G., Vuillemin, J., Bertin, and Proy, C, 1993, Real time correlation-based stereo: Algorithm, implementations and applications, Tech. Rep. RR-2013, INRIA
- Feng, Q., Sjgren P., Stephanson, O., Jing L., 2001, Measuring fracture orientation at exposed rock faces by using a non-reflector total station. Engineering Geology 59, pp 133-146
- Gaich, A., Ptsch, M., Fasching, A. and Schubert, W., 2004, Contact-free measurement of rock mass structures using the JointMetriX3D system. International Journal of RockMechanics and Mining Sciences 41, p. 414
- Hagan, T. O., 1980, A case for terrestrial photogrametry in deep-mine rock structure studies. Int. Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 17, pp 191-198.
- Hwang, S.G., 2001, Photogrametric Measurement of the Attitude of Planar and Linear Features, Mathematical Geology Conference (IAMG2001), proceeding CD
- Kemeny, J. and Post, R., 2003, Estimating three-dimensional rock discontinuity orientation from digital images of fracture traces. Computers & Geosciences 29 (1), pp 65-77
- Linkwitz, K., 1963, Terrestrisch-photogrammetrische Kluftrmessung. Rock Mechanics and Engineering Geology I, pp 152-159.
- McDonell, M.J., 1981, Box-filtering techniques, Computer Graphics and Image Processing, vol. 17, pp. 65-70
- Manh, N. V. and Hwang, S. G., 2004, Image processing for the strike and dip measurement for the excavated rock surface. Annual Meeting of the Korean Society of Economic and Environmental Geology, pp 87-91
- Priest, S.D., 1993, Discontinuity analysis for rock engineering. Chapman & Hall, London, pp. 6-8
- Rengers, N., 1967, Terrestrial Photogrametry: A valuable tool for engineering geological purposes. Rock Mechanics and Engineering Geology V, pp 150-154.
- Richard, A.J., 1994, Miller and Freund's probability and statistics for engineers. 5th ed. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- Roberts, G. and Poropat, G., 2000, Highwall mapping in 3-D at the Moura mine using SIROJOINT. In: Beeston J. W. (ed) Bowen Basin Symposium 2000 Proceedings, pp 371-377.
- Sun, C., 2002, Fast stereo matching using rectangular subregioning and 3D maximum-surface techniques. International Journal of Computer Vision. Vol. 47, No. 1/2/3, pp. 99-117
- Wu, Q. X., McNeill, S. J., and Pairman, D., 1995, Fast algorithms for correlation relaxation technique to determine cloud motion fields? In Digital Image Computing : Techniques and Applications, (Brisbane, Australia), pp. 330-335.

투 고 일	2005년 4월 8일
심 사 일	2005년 4월 9일
심사완료일	2005년 6월 7일

---

황상기

배재대학교 토목환경공학과

302-735 대전광역시 서구 연자1길 14번지

Tel: 042-520-5628

Fax: 042-525-7486

E-mail: sghmap@pcu.ac.kr