

# 극한환경 원격조작을 위한 거리측정시스템 개발

정우태 이재설 박현수

한국원자력연구소 사용후핵연료관리부

## A Noncontact Distance and Dimension Measurement System for Remote Handling in Hostile Environment

Woo-Tae Jeong Jae-Sol Lee Hyun-Soo Park

Spent Fuel Management Div.

Korea Atomic Energy Research Institute

### 1. 서론

#### ABSTRACT

Spent nuclear fuel is very dangerous substance emitting strong ionizing radiation which is harmful to human body. The remote handling of spent nuclear fuel is essential because people cannot access this substance without protecting radiation.

To handle highly radioactive material or nuclear waste, many kinds of teleoperators such as master slave manipulator, electro mechanical manipulator, servo manipulator, mobile robot was developed. The distance and dimension of target object cannot be measured easily when highly radioactive material is handled by teleoperator because one should use lead glass or TV camera and monitor to protect radiation and see target object.

During experiments on the remote handling of spent nuclear fuel by electro mechanical manipulator, we often felt that a distance and dimension measurement system is necessary to handle the objects which is in the highly radioactive environment, so we developed a system which is appropriate for this purpose.

원자력발전소에서 연료로 사용하는 핵연료는 원자로에 장입할 때에는 만저도 될 정도로 약한 방사선 밖에 방출하지 않으나, 원자로에서 핵분열 반응에 의하여 열을 발생시킨 후 수명이 끝난 사용후핵연료의 경우 원자로 내에서의 핵분열 과정에서 핵분열생성물과 악티나이드(원자번호 89의 악티늄에서 103의 로렌슘까지의 방사성원소의 총칭)가 생성되어 매우 강한 전리방사선을 방출한다. 이러한 강한 전리방사선을 방출하는 물질은 인간이 직접 취급할 수 없으므로 원격조작기를 사용하여 원격으로 취급하여야 한다.

원자력시설에서의 원격조작 및 유지보수작업을 위해서 크레인, 매스트슬레이브매니퓰레이터, 서보 매니퓰레이터, 전동매니퓰레이터 등 여러가지 원격조작기가 개발되어 사용되고 있다. 이들 원격조작기를 사용한 작업시에는 비디오카메라 및 모니터를 이용하거나, 납유리(lead glass)등을 통하여 물체를 보아야하므로 깊이(depth) 인식 및 치수 측정이 어렵다. 예를들면 강한 방사선 때문에 사람이 접근할 수 없는 장소에 설치되어 있는 각종 기계 및 장치의 유지보수시 볼트, 너트, 코넥타 등의 규격을 알아야만 공구를 선정하여 작업을 할 수 있는 것이다. 전동 매니퓰레이터를 사용하여 여러가지 원격조작 및 유지보수에 대한 업무를 수행하는 과정에서 이러한 거리 및 치수 측정 장치의 필요성에 직면하여 전동 매니퓰레이터의 시각 장치로

활용 중인 CCD 비디오카메라, 모니터, 화상 처리 장치 등 기존 기기들과 He-Ne 레이저를 활용하여 원하는 거리, 치수 및 각도의 측정이 가능한 장치를 구성하였다.

## 2. 기본 원리

레이저 및 CCD 비디오카메라를 그림1과 같이 배치한 후 카메라로부터 거리가 D만큼 떨어져 있는 물체에 레이저를 비추면 반사광에 의하여 CCD의 한 지점에 다른 부분보다 밝게 빛나는 점이 표시된다. 이 레이저점으로부터 CCD의 중심까지의 거리를 h, 비디오카메라 렌즈로부터 CCD 표면까지의 거리를 f, 레이저와 CCD 비디오카메라 사이의 거리를 H로 두면 다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$\tan \phi = \frac{H}{D} \quad (2.1)$$

$$= \frac{h}{f} \quad (2.2)$$

$$D = \frac{f * H}{h} \quad (2.3)$$

식 (2.3)에서 f와 H는 장치에 따라 정해지는 일정한 값이므로 D는 h에 반비례함을 알 수 있다.

CCD 위에서 CCD의 중심으로부터 레이저점까지의 거리 h는 화면상에서는 일정배율로 증폭되어 나타난다. CCD의 중심으로부터 레이저점 사이의 거리가 화면상에서 N개의 픽셀로 나타날 경우 h와 N사이의 비례상수를  $\alpha$ 로 두면

$$h = \alpha * N \quad (2.4)$$

식(2.4)를 (2.3)에 대입하면

$$D = \frac{f * H}{\alpha * N} \quad (2.5)$$

$$= \frac{K}{N} \quad (2.6)$$

$$\left( \text{여기서 } K = \frac{f * H}{\alpha} \right)$$

거리를 알고자 하는 물체에 레이저를 비추어 그 점을 CCD 비디오카메라로 잡은 다음 화면상에서 화면의

중심으로부터 레이저점까지의 픽셀수 N과 카메라로부터 물체위의 레이저점까지의 거리 D를 구하여 식(2.6)에 대입하면 상수 K를 구할 수 있다. 그러나 실험에 사용한 비디오카메라 CCD의 정확한 위치를 알 수 없어서 렌즈의 중심으로부터  $\Delta$ 만큼 떨어진 위치에서 거리를 측정할 경우의 수식을 유도하였다.

그림1에서와 같이 카메라 렌즈의 중심으로부터  $\Delta$ 만큼 떨어진 지점에서 물체에 비춰진 레이저점까지의 거리  $D'$ 를 측정할 경우 그 관계식은 다음과 같다.

$$D' = D + \Delta \quad (2.7)$$

$$= \frac{K}{N} + \Delta \quad (2.8)$$

임의의 두 지점에서 레이저를 비출 때 실측 거리가  $D_1, D_2$ ,  $D_1', D_2'$ , 그때의 픽셀수를  $N_1, N_2$ 라 하면

$$D_1' = \frac{K}{N_1} + \Delta \quad (2.9)$$

$$D_2' = \frac{K}{N_2} + \Delta \quad \text{가 된다.} \quad (2.10)$$

식(2.9)와 식(2.10)에서

$$D_1' - D_2' = \frac{N_2 * N_1}{N_1 * N_2} * K \quad (2.11)$$

식(2.11)을 K에 대한 관계식으로 고쳐쓰면

$$K = \frac{N_1 * N_2}{N_2 - N_1} * (D_1' - D_2') \quad (2.12)$$

식(2.9)를  $\Delta$ 에 관하여 정리하면

$$\Delta = D_1' - \frac{K}{N_1} \quad (2.13)$$

식(2.12)와 (2.13)을 사용하여 K와  $\Delta$ 를 구한 다음 식(2.8)에 대입하여 거리에 관한 일반식을 구할 수 있으며 한번 일반식이 구해지면 다음부터는 공간상에 있는 임의의 물체에 레이저를 비춘 다음 그 화면을 비디오카메라로 잡은 화면상에서 화면의 중심으로부터 레이저점까지의 픽셀수를 구하여 일반식에 대입하므로써 카메라로부터 물체까지의 거리를 구할 수 있다.

지금까지는 비디오카메라의 렌즈를 이상적인 렌즈로 가정하고 물체상의 한 점은 CCD상의 한 점으로 1:1 대응되며 그 대응점은 물체상의 한 점으로부터 렌즈의 광학적 중심을

통하여 CCD 표면까지 연결하는 직선을 그어서 구할 수 있다고 가정하고 기본 수식들을 유도하였다. 그러나 실제의 경우에 있어서 렌즈는 왜곡이 있어서 이상적인 렌즈로 볼 수 없는 경우가 많으므로 공간상의 모든 점이 광학적인 중심을 공유하며 영상면에 투영되지는 않는다. 렌즈 가장자리 부근으로 들어오는 빛은 렌즈의 광학적 중심을 지나지 않고 렌즈의 중심으로 들어오는 빛 보다도 영상면에서 더 가깝거나 먼 지점에 상을 맺는다. 이러한 현상을 왜곡(distortion)이라고 하는데 렌즈가 축대칭이므로 왜곡도 축대칭이다. 극좌표(r, θ)를 사용하면 설명하면 왜곡은 반경만의 함수이며 각도 θ와는 무관하게 표현된다.

렌즈가 왜곡이 없는 이상적인 경우에 화면상에서 레이저점의 좌표를 (g, h), 실제 CCD에서의 레이저점의 좌표를 (g', h'), 렌즈의 중심으로부터 거리를 r이라고 하면 다음과 같은 관계식이 성립한다[2].

$$g = g' * (1 + G * r^2) \quad (2.14)$$

$$h = h' * (1 + G * r^2) \quad (2.15)$$

여기서 G는 왜곡을 나타내는 상수로서 음수일 경우의 왜곡을 원통왜곡(barrel distortion), 양수일 경우에는 핀쿠션 왜곡(pincushion distortion)이라 한다. 그림3에서 정방형 격자 무늬를 핀쿠션왜곡이 있는 렌즈를 통하여 볼 때의 모양을 보여주고 있다.

앞에서 유도한 식들과 식(2.14) 및 (2.15)를 이용하면 렌즈의 왜곡을 고려한 수식을 유도할 수 있다. 식(2.15)에서 이상적인 렌즈를 사용하였을 때 CCD 위에서 CCD의 중심으로부터 레이저점까지의 거리가 g, 이라면 실제 거리 g'는 다음 식으로 쓸 수 있다.

$$g = g' * (1 + G * g'^2) \quad (2.16)$$

이 식에서 g'를 식(2.3)의 h'에 대입하면

$$D = \frac{f * H}{g' * (1 + G * g'^2)} \quad (2.17)$$

화면의 중심으로부터 화면상에 나타난 레이저점 사이에 N개의 픽셀이 있으며 g'과 N사이의 비례상수를 α라 두면

$$g' = \alpha * N \quad (2.18)$$

식 (2.18)을 (2.17)에 대입하면

$$D = \frac{f * H}{\alpha * N * (1 + G * \alpha^2 * N^2)} \quad (2.19)$$

$$= \frac{K}{N * (1 + G * \alpha^2 * N^2)} \quad (2.20)$$

(여기서  $K = \frac{f * H}{\alpha}$ )

여기서  $G' = \alpha^2 G$ 로 두면

$$D = \frac{K}{N * (1 + G' * N^2)} \quad (2.21)$$

그림1에서와 같이 카메라 렌즈의 중심으로부터 렌즈의 광학적 축 방향으로 Δ만큼 떨어진 지점에서 물체에 비춰진 레이저점까지의 거리 D'를 측정한다면 그 관계식은 다음과 같다.

$$D' = D + \Delta$$

$$= \frac{K}{N * (1 + G' * N^2)} + \Delta \quad (2.22)$$

임의의 두 위치에서 측정한 거리를 D', D'', 그 때의 픽셀수를 N', N''라고 하면

$$D' = \frac{K}{N' * (1 + G' * N'^2)} + \Delta \quad (2.23)$$

$$D'' = \frac{K}{N'' * (1 + G' * N''^2)} + \Delta \quad (2.24)$$

식(2.23)과 (2.24)에서

$$D' - D'' = \frac{N'' * (1 + G' * N'^2) - N' * (1 + G' * N''^2)}{N' * N'' * (1 + G' * N'^2) * (1 + G' * N''^2)} * K \quad (2.25)$$

식 (2.25)를 K에 대한 관계식으로 고쳐쓰면

$$K = \frac{N'' * N' * (1 + G' * N''^2) * (1 + G' * N'^2)}{N' * (1 + G' * N'^2) - N'' * (1 + G' * N''^2)} * (D' - D'') \quad (2.26)$$

식 (2.23)을 Δ에 대한 관계식으로 고쳐쓰면

$$\Delta = D' - \frac{K}{N' * (1 + G' * N'^2)} \quad (2.27)$$

레이저를 물체에 비춘 다음 카메라로부터 물체위의 레이저점까지의 실측거리와 화면상에서 화면의 중심으로부터 화면상에 나타난 레이저점까지의 픽셀수를 임의의 3개소에 대하여 구하여 식(2.26) 및 (2.27)에 대입한 3개의 수식을 연립하여 풀면 K, Δ, G'를 구할 수 있으며 이 값들을

식(2.22)에 대입하면 렌즈의 왜곡을 고려한 거리에 관한 일반식을 구할 수 있다. 한번  $K$ ,  $\Delta$ ,  $G'$ 의 수치값이 대입된 수식을 구하고나면 그 다음부터는 거리를 알고자 하는 물체에 레이저를 비추어 화면의 중심으로부터 레이저점까지의 픽셀수를 구하여 일반식에 대입하므로써 임의의 점에 대한 거리를 구할 수 있다.

카메라와 레이저를 평행하게 설치하면 레이저를 비추는 방향과 카메라의 광학적 축 사이의 수직 거리는 레이저로부터 물체까지의 거리에 무관하게 항상 일정하게 유지되며 이것을 이용하면 물체의 치수도 구할 수 있다. 카메라의 광학적 축과 레이저빔과의 수직 거리를  $H$ , 화면상에서 한개의 픽셀이 점하는 실제 거리를  $S$ , 화면상에서 화면의 중심으로부터 레이저점까지의 픽셀수를  $N$ 이라 두면

$$S = \frac{H}{N} \quad (2.28)$$

레이저빔과 수직인 평면상에 위치하고 있는 물체에서 치수를 알고자 하는 두 점간의 거리가 화면상에서  $M$ 개의 픽셀로 나타났다면 두 점간의 실제거리  $Q$ 는 다음 식과 같이 표현된다.

$$Q = M * S \quad (2.29)$$

$$= \frac{M * H}{N} \quad (2.30)$$

일반적인 원격조작시 대상 물체에서 거리를 알고자 하는 두 점이 카메라의 영상면과 수평한 평면위에 있는지를 알기 힘든 경우가 많다. 이 경우에는 한 지점  $P$ 까지의 거리  $D$ 를 구한 다음  $\tan/\cot$ 를 사용하여 레이저와 CCD 비디오카메라가 다른 지점  $P'$ 를 향하게 하여 거리  $D'$ 를 구한다[그림3]. 이때

$$\gamma = \arctan\left(\frac{Q}{D}\right) \quad (2.31)$$

여기서  $Q$ 는 식(2.29)를 이용하여 계산할 수 있다.  $P'$ 에서  $P$ 까지의 실제 거리  $Q'$ 는 다음식과 같이 표현된다.

$$Q' = \sqrt{(D')^2 + D^2 - 2 * D * D' * \cos \gamma} \quad (2.32)$$

이때 점  $P, P'$ 를 포함하고 있는 평면이 영상면과 이루는 각도  $\theta$ 는 다음 식으로 표현된다.

$$\theta = \arctan\left(\frac{D' * \sin \gamma}{D - D' * \cos \gamma}\right) \quad (2.33)$$

### 3. 시스템 설계

거리 측정 시스템을 구성하기 위해 사용한 장치는 전동메니플레이터의 시각 장치로 활용중인 CCD 비디오카메라, RGB 모니터, 화상 처리 장치 등을 이용하였으며, 화상 데이터의 처리를 위하여 PS/2 컴퓨터를 사용하였고, 측정 대상 물체를 주변 환경보다 밝게 비추기 위하여 헬륨-네온 레이저를 사용하였다. 사진1에서는 본 연구에 사용된 실험 장치를 보여주고 있다.

CCD 비디오카메라를 RGB 모니터에 연결하여 비디오카메라로 물체에 비친 레이저점을 관찰하면 레이저점은 화면의 다른 부분에 비해 아주 밝은 점으로 나타나므로 눈으로 쉽게 그 위치를 파악할 수 있으나, 화면상에서 그 점의 좌표를 정확하게 알기 위해서는 여러가지 화상 처리 기능을 사용하여야 한다. 첫째로서 필요한 기능이 물체에 비친 레이저점을 포함한 화면을 화상 처리 장치의 화상 메모리 (frame memory)에 기억시키는 것이며, 이러한 작업을 샘플링(sampling)이라고 한다. 샘플링을 하면 화면이 512×512개의 점으로 나누어지며, 각 점의 밝기가 0에서 255사이의 256 단계로 수치화되어 화상 메모리에 저장된다. 256 단계의 수치를 기억하기 위해서는 8 비트(bit)를 필요로 하며 따라서 샘플링된 화면 각 점의 밝기 데이터는 1 바이트(byte)를 차지하므로 한 화면의 전체 데이터를 보관하는데는 256 K 바이트가 필요하다(512 × 512 byte = 256 K 바이트). PC(personal computer)를 사용하여 이렇게 많은 량의 데이터를 처리하기 위해서는 많은 시간이 소요되므로 데이터의 처리가 필요한 레이저점 주위틀 윈도우(window)로 설정하여 그 부분만을 처리하게 하므로써 처리 속도를 향상시킬 수 있다. 레이저를 CCD 비디오카메라와 수평하면서 카메라의 왼쪽에 설치하였을 경우에 RGB 모니터에서 레이저점은 화면의 중심에서 왼쪽 가장자리 사이를 횡으로 움직이므로 이 부분만을 처리 영역으로 설정하면 화면 전체를 대상으로 할 때 보다 훨씬 빨리 각종 화상 처리 기능을 수행할 수 있다.

샘플링된 데이터에서 레이저점을 구분하기 위하여 일정한 밝기값을 기준으로하여 기준치(threshold value)보다 밝은 점은 회계, 어두운 점은 검게하여 두 단계의 밝기만을 가지도록 바꾸어야 하는데 이러한 작업을 이치화(binary execution)라고 한다. 적절한 기준치를 정하여 이치화를 하면 레이저점은 다른 부분에 비해 매우 밝으므로 이 점만이 화면상에서 회계 표시되며 나머지 부분은 검게 표시된다.

다음으로 회계 표시된 부분의 좌표를 계산하여야 하는데 이 실험에서 사용한 화상처리장치는 검은 부분을 물체로 감지하므로 어두운 부분을 밝게, 밝은 부분을 어둡게 바꾸는 작업을 하여야 하는데 이것을 반전처리(make reverse image)라고 한다. 반전처리 작업을 한 후의 화면에는 원래 레이저점이 있었던 부분만이 검게 표시되어 있다.

반전처리가 끝난 화면은 화상처리 과정에서 여러가지 잡음(noise)으로 인하여 레이저점이 있었던 부분이 하나의 점 또는 여러개의 점으로 이루어진 한개의 물체로 나타나지 않고 여러개의 점이 조밀하게 모여있는 형태로 나타나는 데 이러한 결함을 보정하기 위하여 각 픽셀의 8근방(좌, 우, 상, 하, 좌상, 우상, 좌하, 우하)의 픽셀도 검게 바꾸는 8근방팽창처리(8 near expansion)를 하였다.

지금까지의 일련의 화상처리 작업은 화면상에 밝게 표시된 레이저점의 좌표를 알기위한 준비 작업이다. 이러한 화상처리 작업후 마지막으로 레이저점의 좌표를 계산한다. 이렇게 계산된 화면상에 나타난 레이저점의 좌표값을 앞에서 유도한 수식에 대입하여 거리 및 지수를 계산한다.

앞에서 설명한 일련의 과정을 자동적으로 수행하기위한 화상 처리 프로그램은 화상 처리 장치에 내장되어 있는 기본 프로그램을 응용하여 터보 베이직으로 작성하였다.

#### 4. 실험 및 고찰

카메라로부터 측정 대상 물체까지의 실측 거리와 그때 화면상에서 화면의 중심으로부터 레이저점까지의 픽셀수를 실험을 통하여 구하였으며 그 결과를 식(2.8)에 대입하여 다음과 같은 실험식을 구하였다.

$$D' = \frac{13139.47}{N} + 2.78 \quad (4.1)$$

거리를 알고자 하는 물체에 레이저를 비춘 다음 그 때 화면의 중심으로부터 레이저점까지의 픽셀수를 구하여 식(4.1)에 대입하면 거리를 구할 수 있으며, 거리 측정 실험 결과를 표1에서 보여주고 있다. 여기서 오차는 실제 거리에서 측정치의 평균값을 뺀 다음 절대치를 취한 후 실제거리로 나눈 값에 100을 곱하여 퍼센트로 나타낸 것이다. 표에서 보는 바와 같이 본 장치는 최대 오차 0.65% 범위 내에서 거리 측정이 가능하였다.

렌즈 왜곡의 영향을 알아보기 위해 3개의 실험치를 대입해서  $G'$ 를 구해본 결과 거의 0에 가까운 값이 나왔다. 따라서 본 실험에서 사용한 비디오카메라 렌즈의 왜곡은 무시할 수 있었다.

3차원 공간상에서 임의의 두 점 간의 거리를 계산하기 위해서는 두 점이 영상면과 수평한 평면 위에 놓여 있을 경우에는 식(2.28)을 사용하여 한개의 픽셀이 점하는 실제거리를 계산한 후 화면에서 두 점을 지정해두면 두 점간의 픽셀수가 자동적으로 입력되어 식(2.30)에 의하여 두 점간의 거리가 계산된다. 표2에서는 임의의 물체를 대상으로 지수를 측정한 결과를 보여주고 있는데 이 표에서 보는 바와 같이 1% 이내의 오차로 지수 측정도 가능함을 알 수 있었다. 두 점이 영상면과 수평한 평면 위에 놓여 있지 않을 경우에는 식(2.31)을 이용하여 거리를 측정해야 하는데 이 경우에도 1% 이내의 오차로 측정이 가능하였다.

장치의 설치 과정에서 레이저와 카메라를 평행을 유지하도록 하여야 정확한 거리 및 지수 측정이 가능하게 된다. 본 연구에서 유도한 식들은 레이저와 카메라가 지향하는 방향이 평행하다고 가정하고 유도하였으므로 레이저와 카메라가 평행하지 않을 경우에는 예측하지 못한 결과가 출력되었다.

#### 5. 결론

본 연구에서는 사람이 접근할 수 없는 지역에 있는 물체를 취급하기 위한 원격 조작식 흔히 필요한 물체의 지수, 거리, 각도 등의 정보를 비접촉식으로 측정할 수 있는 시스템을 구성하여 그 활용 가능성을 살펴보았다.

실험 장치는 레이저, 컴퓨터, 화상 처리 장치, CCD

비디오카메라, RGB 모니터 및 팬틸트(pan tilt)로 구성하였으며 화상 처리를 위한 컴퓨터 프로그램을 작성하여 실험을 한 결과 거리 측정시는 0.65%, 치수 측정시는 1% 이내의 오차로 측정이 가능하였다.

처리 영역 설정 기능을 컴퓨터 프로그램에 삽입하므로써 화상 처리를 이용한 거리 측정 방법의 단점인 처리 속도가 느리다는 문제점을 해결하여 1초 이내에 측정이 가능하게 하므로써 거의 실시간으로 측정이 가능하여 실제 작업에 활용할 수 있었다.

표 1 거리 측정 예  
Table 1 Experimental data on distance measurement

No	실 제 거 리	측정치 1	측정치 2	측정치 3	측정치 평균값	오차
1	244.50	244.09	246.01	246.01	245.37	0.36
2	226.20	226.28	225.48	225.61	225.79	0.18
3	206.40	204.92	205.80	205.39	205.37	0.50
4	191.10	191.22	191.79	191.79	191.60	0.26
5	135.30	134.95	134.95	134.95	134.95	0.26
6	103.60	103.67	103.67	103.67	103.67	0.07
7	84.10	83.38	83.63	83.63	83.55	0.65
8	66.20	65.94	65.95	65.95	65.95	0.38
9	57.10	57.06	57.07	57.07	57.07	0.05

주) 실제거리, 측정치, 측정치 평균값의 단위는 cm, 오차의 단위는 퍼센트 임.

표 2 치수 측정 예  
Table 2 Experimental data on dimension measurement

No	실 제 치 수	측정치 1	측정치 2	측정치 3	측정치 평균값	오차
1	5.20	5.21	5.14	5.15	5.17	0.64
2	6.00	6.02	5.99	6.02	6.01	0.17
3	3.00	2.97	3.01	2.93	2.97	1.00

주) 실제 치수, 측정치, 측정치 평균값의 단위는 cm, 오차의 단위는 퍼센트 임.

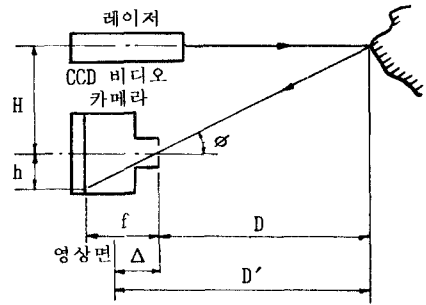


그림 1 레이저 및 CCD 비디오카메라 배치

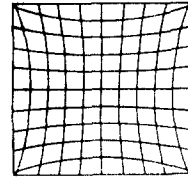


그림 2 핀큐션(pincushion) 왜곡

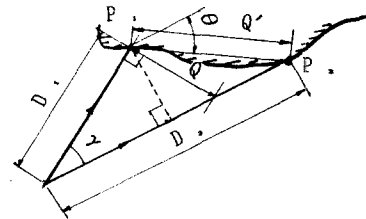


그림 3 두 점간의 거리 측정

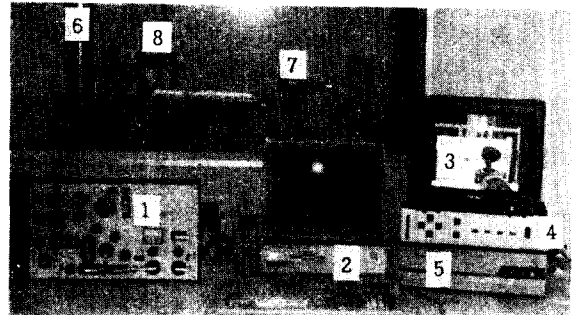


사진 1 실험 장치 (1; 전동 매니플레이터 제어기, 2; 컴퓨터, 3; RGB 모니터, 4; 팬/틸트 제어기, 5; 화상 처리 장치, 6; 전동 매니플레이터, 7; 임팩트 렌치, 8; 레이저 및 CCD 비디오카메라)

## 6. 참고문헌

- [1] R. A. Jarvis, "A perspective on range finding techniques for computer vision," IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., vol. PAMI-5, no.2, pp.122-139, Mar. 1983.