

# Hand-Eye Robot에 의한 형상계측 시스템의 개발

정재문 김선일 양윤모

한국기계연구소 자동화연구부 자동제어실

## Development of a Shape Measuring System by Hand-Eye Robot

Jae-Moon Chung Seon-Il Kim Yoon-Mo Yang

Automatic Control lab.

K I M M

### Abstract

In this paper we describe the shape measuring technique and system with a non-contactive sensor, composed of slit-ray projector and solid-state camera. For improving the accuracy and preventing measuring dead point, this sensor part is attached to the end of robot, and each sensing is executed after one step moving. By patching these sensing data, whole measuring data is constructed.

The calibration between sensor and world coordinate is implmented through the specific calibration block by transformation matrix method.

The result of experiment was satisfactory.

### 1. 서론

최근 반도체와 컴퓨터 그리고 영상처리 기술의 발달에 힘입어 영상처리 신호의 고속화가 가능해 짐에 따라 시각 장치를 이용한 3차원 물체의 계측 및 인식에 관한 연구가 활발 해지고 있다. 일반적으로 영상계측에 있어서 센서구 설 방법에는 카메라 2대를 이용하는 방법과 카메라와 평면 광 발생장치를 한조로 구성하는 방법이 많이 쓰이는데, 전 자의 경우 한쪽 카메라에서 잡힌 어떤 한점이 다른 카메라 의 어느점에 해당하는가의 연관관계를 구성하는데 어려움 이 있다.

본 연구에서는 카메라와 평면광 발생장치로 레이저와 원 통형렌즈를 이용하여 센서를 구성 하였다.

이러한 방식의 영상계측에 있어서 계측정밀도에 영향을 미치는 요소의 하나로 카메라의 분해능의 한계를 생각 할 수 있다.

이의 개선을 위해서 본 시스템의 구성은, 센서부를 로보 트의 끝에 부착하여 적절히 움직이면서 각 위치에서 계측 을 하고 최종적으로 전체적인 영상접합을 통하여 계측정밀 도를 높이면서 한번의 센싱(Sensing)에 의해 생기는 사 각(死角)의 발생을 획기적으로 감소시켰다. 그리고 센서계 와 실제계 사이의 일치를 위한 교정(Calibration)은 교정 블럭을 구성하여 해결하였다. 끝으로 시스템 좌표계 내에 서의 기준점의 정확한 측정의 원칙적인 불가능에서 생기는

계측결과의 불량을 극복하기 위하여 보정작업을 추가하고 이를 위한 보정(Compensation)블럭을 구성하였다.

### 2. 시스템구성

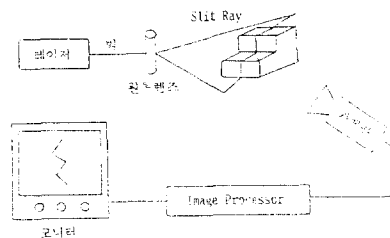
본 연구에서의 3차원 계측 원리는 <그림1> 과 같고 여기 서의 화상을 카메라를 거쳐 컴퓨터로 잡아서 조도측을 중 심으로 그려 본 것이 <그림2>이다.

평면광 발생장치를 위한 레이저로는 He-Ne 로 파장이 632.8 nm의 가시광선으로 출력이 0.6mw 이다.

전체시스템 구성도는 <그림3>과 같다.

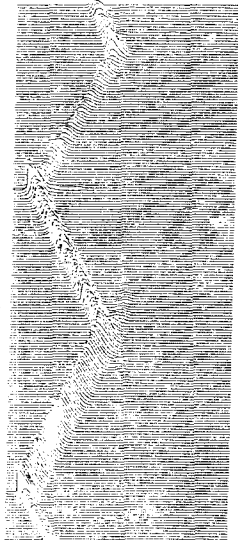
센서부의 카메라와 평면광 발생장치는 서로일정한 관계 를 가지게 고정 배치되어 로봇손에 부착되어 필요에 파 라 이동및 회전되게 되어있다.

이미지 그래버(Image Grabber)를 통한 영상계측 데이터 의 처리 및 로봇트 제어등 전체시스템 제어가 단일의 컴퓨 터 상에서 이루어진다. 계측과정은 아래와 같은 과정을통 하여 이루어지며 전체흐름도는 <그림4>와 같다.



<그림1> 3차원 계측원리

Fig 1 Principle of 3-D Measuring



<그림2> 카메라로 얻어진 그레이 레벨 영상  
Fig 2 Gray Level Image Data

2.1 교정

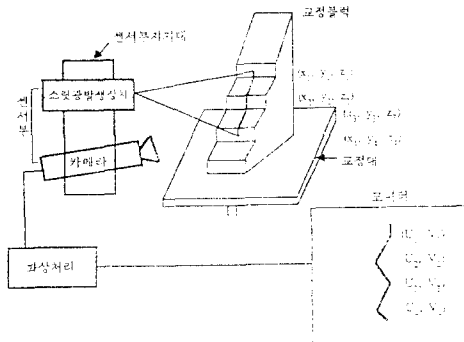
<그림 5>에서와 같이 공간상의 한점 P(x,y,z)가 카메라의 영상면에 맺힐 때 그영상좌표가 P'(U,V)로 나타난다면 P'를 동차 좌표계로 표현 했을때 (u,v,h)로 표현되고

$$U = u/h \quad \text{-----(1)}$$

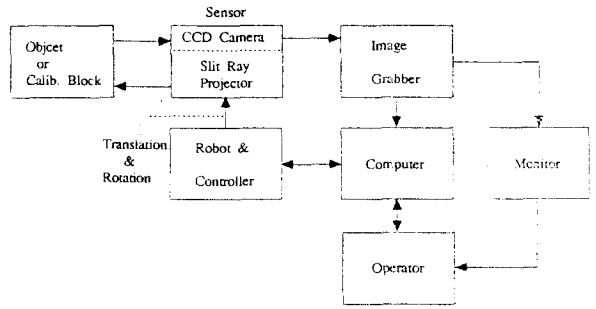
$$V = v/h$$

P와 P'는

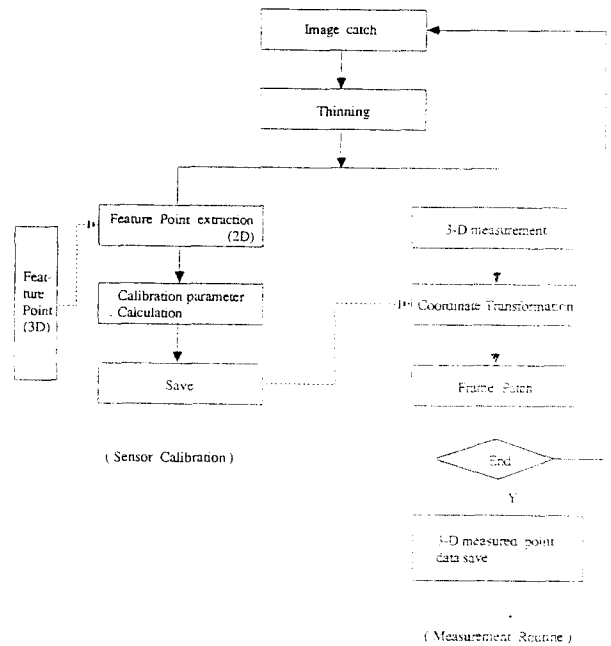
$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} T = \begin{bmatrix} u \\ v \\ h \end{bmatrix} \quad \text{-----(2)}$$



<그림5> 센서부 교정시 교정블럭과 센서  
Fig 5 Calibration Block and Sensor while Calibration



<그림3> 전체 시스템 구성도  
Fig 3 The Block Diagram of the System



<그림4> 계속의 흐름도  
Fig 4 The Flow of Measurement

여기서

$$T = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} \end{bmatrix}$$

로 관계지어진다.

그리고 평면광은 공간상에서 2차원공간을 가지므로 평면의 방정식으로 나타내면

$$[x \ y \ z \ 1] \begin{bmatrix} C_{14} \\ C_{24} \\ C_{34} \\ C_{44} \end{bmatrix} = 0 \quad \text{-----(3)}$$

로 된다.

카메라와 평면광을 동시에 사용하여 3차원측정을 하게 되므로 (2), (3)식을 하나로 표현하면

$$[x \ y \ z \ 1] \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} \end{bmatrix} = [u \ v \ 0 \ h] \quad (4)$$

$$[x \ y \ z \ 1] T_1 = [u \ v \ 0 \ h]$$

식 (4)로부터

$$[X \ Y \ Z \ H] = [U \ V \ 0 \ 1] T_1^{-1} \\ = [U \ V \ 1] \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \end{bmatrix} \quad \text{-----(5)}$$

(5)식을 전개하면

$$m_{11}U + m_{21}V + m_{31} - x(m_{14}U + m_{24}V + m_{34}) = 0 \quad \text{---(6)}$$

$$m_{12}U + m_{22}V + m_{32} - y(m_{14}U + m_{24}V + m_{34}) = 0$$

$$m_{13}U + m_{23}V + m_{33} - z(m_{14}U + m_{24}V + m_{34}) = 0$$

를 얻을 수 있다.

식(6)으로 부터  $m$ 을 구하는데 미지수가 12개 이고 식은3개 이므로 최소한 4점에 대한 공간상의 좌표값과 영상좌표값을 알 필요가있다.

이것을 행렬로 표현하면

$$\begin{bmatrix} m_{11} & m_{21} & m_{31} & -x_1 m_{14} & -x_1 m_{24} & -x_1 m_{34} \\ m_{12} & m_{22} & m_{32} & -y_1 m_{14} & -y_1 m_{24} & -y_1 m_{34} \\ m_{13} & m_{23} & m_{33} & -z_1 m_{14} & -z_1 m_{24} & -z_1 m_{34} \\ m_{14} & m_{24} & m_{34} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U \\ V \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{-----(7)}$$

식(7)을  $T_m = W$  로 표현하면 Pseudo-Inverse에 의해  $m = (T'T)^{-1}T'W$  로 계산되어 진다.

## 2.2 영상획득및 처리

교정이나 계측시 평면광과 대상 물체사이 만나는 부위에 그 형상에 따라 영상이 나타나게 되는데 이것을 카메라를 통해 그레이(gray)값으로 받아들인다.

본 시스템에서의 광원(光源)인 레이저로 특별히 TE00 모드를 선택하였다.

이 모드의 특징은 레이저 광속(光束)의 세기 분포가 가우시안(Gaussian)형태를 가짐으로서 영상처리 과정중 대상 영역내의 최대값을 단순 추출함에 의해 세선화(細線化)가 간편히 이루어 진다.

물론 이방식이 외란(Noise)에 대한 약점이 있지만 레이저 광선의 특성상 이런점에서의 어려움이 실제 나타나지 않았다.

이상의 세선화 단계를 통하여 얻어진 한 점을 그 라인선 상에서의 UV 값으로 저장하는 동작을 전체 라인을 통하여 실시하면서 전체를 저장하는 단계를 거친다.

## 2.3 형상 계측을 위한 계산

일단교정을 통하여 센서파라미터  $m$  이 정해지면 영상 좌표계에 나타나는 계측하고자하는 임의의 한점의 영상좌표값 U,V를 알면 그에 해당하는 3차원 공간상의 한점의 위치값 x,y,z를 알 수 있다.

즉 식 (6)에서  $m_{34} = 1$ 로 정했을 경우

$$x = (m_{11}U + m_{21}V + m_{31}) / (m_{14}U + m_{24}V + 1) \quad \text{----(8)}$$

$$y = (m_{12}U + m_{22}V + m_{32}) / (m_{14}U + m_{24}V + 1)$$

$$z = (m_{13}U + m_{23}V + m_{33}) / (m_{14}U + m_{24}V + 1)$$

그런데 본 연구에서는 특징적으로 카메라 분해능의 한계에서 오는 계측정밀도의 한계를 극복하고 계측시 사각의 배제를 위하여 센서부를 이동 시켜가면서 각위치에서 계측을 실시하고 여러 위치에서 계측한 값을 최종적으로 합성하는 영상데이터 접합을 이루었다. 즉 한 점에서의 측정치가  $(x_1, y_1, z_1)$ 이고 이때의 각 축에 대한 센서부의 이동량이  $(p, q, r)$ 이고 회전량이 일때 로봇의 위치 변화량을 고려한 실제의 측정 산정치  $(x_2, y_2, z_2)$ 는 아래와 같다.

$$[x_2 \ y_2 \ z_2] = [x_1 \ y_1 \ z_1] R + T \quad \text{-----(9)}$$

$T = [p \ q \ r]$  : x,y,z 축의 평행 이동량

식 (9)에서 R은 회전을 나타내는 행렬로서  $\theta$ 값은 각축에 평행한 회전량에 대응된다.

$$R = ABC$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\sin\theta \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \quad ; X\text{축 평행}$$

$$B = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \quad \text{:Y축 평행}$$

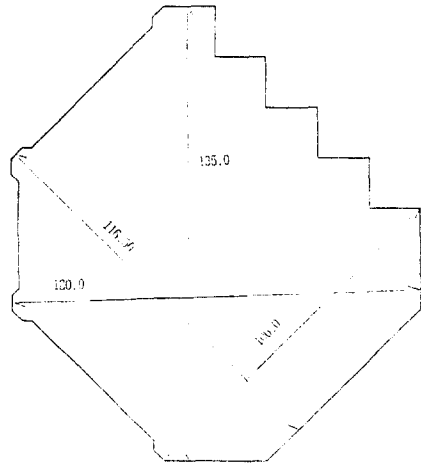
$$C = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{:Z축 평행}$$



## 2.4 보정

교정을 거쳐서 계측을 하면 여러가지 원인으로 오차가 발생하게 된다.

이 보정과정은 이러한 여러가지 오차발생 원인 중에서, 시스템 좌표계 설정 단계에서 교정블럭을 위치 시키는 점의 좌표계 내에서의 정확한 좌표값의 실측의 어려움을 극복하기 위하여 마련 되었다. 여기에서의 오차는 결과적으로 센서부의 회전에 대한 접합시 특히 두드러지게 나타나는 성격의 오차로써 보정을 위한 <그림7>의보정블럭을 구성하였는데 보는바와 같이 보정블럭은 우리가 이미 그사양을 정확하게 알고 있고 특징점을 쉽게 유도해 낼 수 있는 형태로 이것을 계측 대상으로 삼아서 계측을 실시한 후 실제값과 그 결과를 비교해 가면서 오차를 없애주는 방향으로 원인이 되는 관련요소를 변경 시켜나감으로써 최종적으로 정확한 요소값을 유도해 낼 수 있다.



교정블럭의 세로방향 실제길이 (단위:mm)

## 3. 실험결과

실험은 카메라와 평면광 발생장치를 약30도 되게 고정하고 교정 및 계측을 실시 하였다.

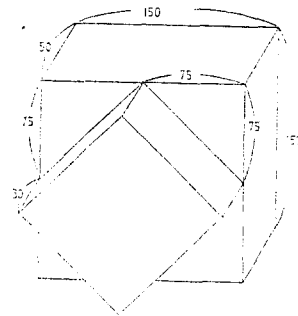
그리고 500x500정도의 분해능을 가진 카메라가 한번에 잡을 수 있는 한 변의 실제길이를 50m/m 내외로 유지하고 교정은 화면의 중심을 기준으로 좌우로 약20m/m 간격으로 12번 움직여서 약 50개의 특징점에 대해서 실시하여 얻은 변 환행렬의값은 아래와 같다.

$$m = \begin{bmatrix} 0.433552 & 0.174613 & -0.013240 & -0.001895 \\ -0.011796 & -0.006704 & 0.105696 & 0.000052 \\ -228.750 & -167.155692 & -19.047828 & 1.0 \end{bmatrix}$$

3차원물체 계측시스템의 정밀도 검증은 여러가지 방법이 있겠지만, 교정블럭의 바깥테두리를 계측하여 특징점 간의 길이를 시스템 계측을 통하여 알아내고 이것을 실제값과 비교하여 그차이를 알아보는 방식으로 실시하였다.<그림8>

<그림6> 교정 블럭

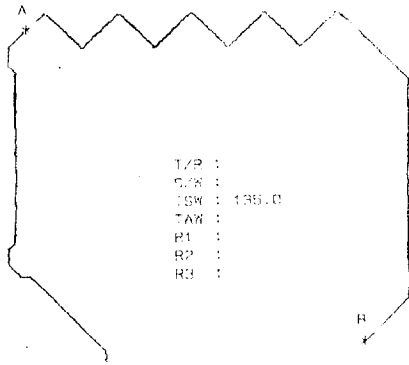
Fig 6 Calibration Block



<그림7> 보정 블럭

Fig 7 Compensation Block

<그림6>는 교정블럭의 모양및 특징점간의 길이를 나타낸 것이고 <표1>은 이들점간의 길이를 실제 계측해서 얻은 결과이다. 최대 계측오차가 0.1m/m로 카메라 해상도의 한계로 인한 오차의 2배 정도였다.



<그림8> 교정블럭 테두리 계측결과 그림(축소)

측정부위	실제값	측정된값	측정오차
1	106.0	106.1	+0.1
2	120.0	120.0	0
3	135.0	135.0	0
5	135.0	135.0	0
4	115.50	116.60	+0.1

[단위 : mm]

<표1> 정밀도 검증을 위한 계측결과

Table1 Measuring Result

#### 4. 검토

실험에서와 같은 카메라-평면광 발생장치에 의한 계측 장치는 두장치 사이의 각도, 센서와 계측 대상간의 거리, 계측 및 교정 시 사용된 영상면 부위의 균일성 등에 따라 많은 변수를 가진다.

카메라 또는 디지털라이저의 해상도등에 따라서도 계측능력이 영향을 받는다.

더 높은 계측 정밀도가 요구된다면 계측대상과 센서사이의 거리를 좁혀서 한 화면이

좁은 영역의 계측대상이 잡히게 하면 될것이다.

그리고 카메라 렌즈의 수차도 엄밀한 의미에서 고려되어야 하겠지만 교정단계에서 주로 카메라렌즈의 중심에 가까운 부분에 대해서 교정을 반복 실시하고, 계측시에도 가능한 이 부분을 이용 하는 방법을 취하므로써 오차를 줄이려하였다.

그러나 센서부의 해상도가 시스템 계측정밀도를 근본적으로 지배하고 있으므로 근본적으로 정밀도를 향상 시키려면 서브픽셀(sub-pixel)기법 등의 연구를 통한 해상도향상이 요망된다.

#### 5. 결론

본 고에서는 카메라-레이저 장치를 로봇의 끝에 부착하여 형상을 계측하는 방법및장치에 대해서 말하였다. 비접촉식 계측이라 접촉에 의한 계측의 어려움이 있는 물체의 계측에 장점이 있으며 센서 이동에 의한 영상접합 개념 도입에 의한 계측으로 일반적으로 한번의 계측에 의한 사각의 발생을 배제함은 물론 카메라 해상도의 한계를 상당히 극복할수있는 장점이 입증 되었다. 그리고 본 시스템이 원리상 발휘할 수 있는 최상의 정밀도를 낼 수 있음을 보았다. 더욱 높은 정밀도를 위해서는 카메라의 해상도 향상이 관건 이라고 여겨지므로 이에대한 많은 연구가 요망된다.

#### \*참고문헌

- <1> Dana H.Ballard등, "Computer Vision." Prentice-Hall inc, 1982
- <2> Seiji Ishikawa등, "Measuring the Volume of Powder by Vision," '87 KACC논문집, pp776-779,1987.
- <3> 양운모등, "Tire profile Measuring System개발,"KIMM 보고서, "1989.11