

# 로봇 비전을 이용한 대상물체의 위치 결정에 관한 연구

박 경 택\*

## Determination of Object Position Using Robot Vision

Kyoung Taik Park\*

### ABSTRACT

In robot system, the robot manipulation needs the information of task and objects to be handled in possessing a variety of positions and orientations. In the current industrial robot system, determining position and orientation of objects under industrial environments is one of major problems. In order to pick up an object, the robot needs the information about the position and orientation of object, and between objects and gripper. When sensing is accomplished by pinhole model camera, the mathematical relationship between object points and their images is expressed in terms of perspective, i.e., central projection. In this paper, a new approach to determine the information of the supporting points related to position and orientation of the object using the robot vision system is developed and testified in experimental setup. The result will be useful for the industrial, agricultural, and autonomous robot.

**Key Words** : robot vision(로봇 비전), recognition(인식), position(위치), orientation(자세), perspective(시각 투사), central projection(중앙 투사), supporting plane(지지면), one-to-one correspondence(일대일 대응)

### 1. 서 론

On-shelf 카메라를 사용하는 대부분의 경우, 카메라의 화상면과 대상물의 면이 평행하고 카메라와 대상물 사이의 거리가 비교적 짧고 일정한 것으로 가정하여 화상 해석을 해왔다. 이 경우 시각투사(perspective)효과가 비교적 적게 나타나므로 화상해석에도 오차가 적게 나타난다. 이러한 해석 방법은 1970, 1980 년 대에 화상해석 적용 범위가 비교적 한정된 경우 많이 이용하였다<sup>(1,2,3)</sup>. 그

러나, 비전 시스템의 활용도가 다양해짐에 따라 고정도 화상해석 방법이 요구되고 있다. 로봇에 CCD 카메라를 부착하여 사용할 경우, 즉, on-robot 카메라의 경우는 on-shelf 카메라의 경우보다 비전 시스템의 활용면에서 있어서 작업 환경변화에 유연하게 대처할 수 있는 장점을 갖는다(Fig.1. 참조)<sup>(4)</sup>. 하나의 on-robot 카메라가 여러 대의 on-shelf 카메라를 대신할 수 있는 장점을 갖는다. On-robot 카메라를 이용할 경우, 필요에 따라 카메라의 위치 자세를 자유자재로 바꿀 수 있으므로 장애물 등을

\* 한국기계연구원 자동화 연구부

피하여 필요한 목표를 볼 수 있는 카메라 위치 자세의 유연성을 갖는다. 반면에 화상 해석을 하는데 있어서 로봇 동작에 따른 카메라의 위치 자세를 고려하여야 하는 어려움이 따른다. 특히, 이 경우 시각투사 효과를 반드시 고려하여 화상해석을 하여야 정확한 정보를 얻을 수 있다. On-robot 카메라를 사용할 경우, 실제로 카메라 화상면과 대상물의 면이 평행한 것으로 가정하기 어렵고, 또한 카메라와 대상물 사이의 거리가 일정한 것으로 가정하기 어렵다. 로봇 동작에 따라 변하는 카메라와 대상물 사이의 정확한 위치와 자세에 대한 화상 해석에 따라 비전 정보의 정확성이 달라진다.

지능 로봇 시스템에 있어서 대상물의 위치 자세에 대한 정보가 로봇 작업동작 결정에 꼭 필요하는 경우가 많다. 본 논문에서는 on-robot 카메라를 이용하여 대상물의 위치 자세를 인식할 경우, 기본적으로 필요한 정보, 즉, 목표 지점의 실제 좌표값을 얻는 방법에 대해 기술한다. 제1장에서는 연구 배경과 이론적 도입 배경에 대해 설명하고, 제2장에서는 로봇 비전 시스템, 대상물, 지지면(supporting plane) 등이 이루는 하나의 시스템을 기하학적으로 관찰하여 이에 관련된 이론적 배경에 대해 기술한다. 화상면과 지지면의 관계가 일대일 대응 관계에 있으므로 화상면의 한점을 알면, 이에 대응한 지지면 상의 목표 지점에 대한 실제 위치를 구할 수 있다. 이것은 시각투사를 고려한 로봇 비전 시스템, 로봇 동작에 따른 카메라 좌표계의 변환 등을 고려하여 목표 지점의 실제 좌표값을 구하는 이론적 과정에 대해 기술한다. 제3장에서는 제2장에서 유도한 이론적 배경을 실제 로봇 비전 시스템에 적용하여 실제 목표 지점에 대한 실측하는

실험과정과 실험 결과치에 대한 결과를 보여 준다. 제4장에서는 이론과 실험 결과치에 대한 결론을 보여주고, 앞으로 더욱 연구하여야 할 점들에 대해 기술한다.

## 2. 로봇 비전의 기하학적 해석

아직도 대부분의 산업용 로봇은 실내의 산업현장에서 많이 활용되고 있다. 실내 산업현장과 같이 비교적 정리가 잘되고, 제한된 사용환경에서는 화상해석에 필요한 기하학적 구속 조건을 얻을 수 있다. 본 논문에서는 지지면(supporting plane)을 구속 조건으로 활용하여 화상 해석에서 필요한 정보를 얻을 수 있는 방법을 기술한다. 대부분의 화상 해석에 있어서 핀홀 타입의 카메라좌표계  $(X_c, Y_c, Z_c)$ 의 원점을 관점(station point or viewing point)이라 한다<sup>(2,5)</sup>. 기준좌표계  $(X_w, Y_w, Z_w)$ (혹은, 로봇 좌표계)에서 화상면의 방향각(directional angle)  $(l, m, n)$ 들은 카메라의 파라미터와 로봇 운동량에 의해 결정된다. 즉, 로봇의 동작에 의해 생기는 운동량, 알려진 화상면의 위치와 자세, 렌즈 중심 위치  $O_c(\eta_x, \eta_y, \eta_z)$ 에서 화상점  $P_i(u, v)$ 까지의 직선 방정식 등에 의해서 목표 지점  $P_i(x_i, y_i, z_i)$ 와 알려진 화상점  $P_i(u, v)$ 의 관계가 결정된다. 그러므로, 지지면에 있는 목표점들의 좌표값은 알려진 화상 좌표값과 카메라 파라미터, 로봇 운동량 등의 함수로 표현된다.

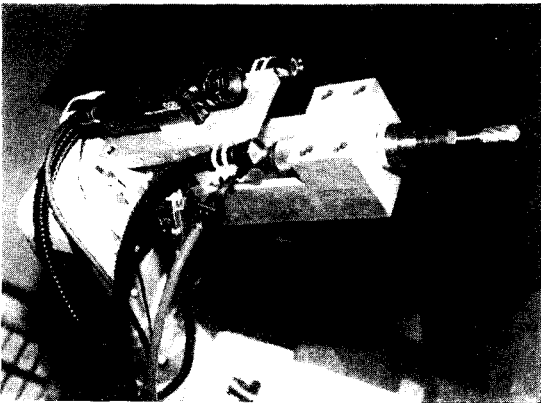


Fig. 1. Example of robot vision system using on-robot camera (KIMM's Robotic Deburring System)

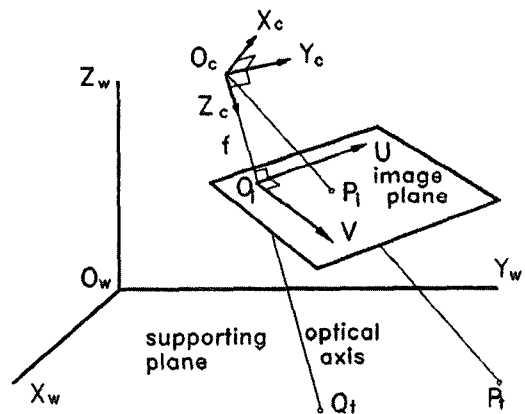


Fig. 2. Geometric relationship between an image and a supporting plane

### 2.1 화상면과 지지면의 일대일 대응관계

On-robot 카메라의 화상면과 지지면의 관계는 로봇,

카메라, 대상물, 지지면을 하나의 시스템으로 생각할 때, 구성되는 폐회로 중 한 부분을 차지한다(Fig. 2. 참조). 로봇의 각 링크들 사이의 좌표 변환 관계는 로봇의 기구학적 구성과 각 링크의 운동량에 대한 관절 좌표값들에 의해 알 수 있다. 그러나, 이 폐회로 가운데 화상면과 대상물 사이의 변환 관계는 복잡한 화상 해석을 요구한다. 이것은 3차원 대상물과 2차원 화상면이 일대일 대응 관계를 갖지 못하기 때문이다. 즉, 2차원 화상으로부터 3차원 대상물로 해석할 때 필요한 정보를 얻을 수가 없기 때문이다. 이 경우 수학적 유도과정에서 역변환이 필요한데 실제로 역변환이 존재하지 않는다. 그러므로, 실제 로봇트가 사용되고 있는 비교적 정리된 산업환경에서 화상면과 지지면의 관계를 고찰함으로써 대상물의 형상인식, 공작물이나 부품들의 위치 자세의 결정, 대상물들 사이의 상대적 관계, 대상물과 그리퍼(gripper)사이의 상대적 위치 결정에 필요한 정보를 얻는 방법을 연구한다. 본 연구에서는 다음과 같은 일반적 가정 하에서 시작을 한다.

1. 카메라의 핀홀타입 렌즈에 의해 생기는 화상 형성의 메카니즘을 일점 시각투사(one point perspective)로 가정한다<sup>(2,3)</sup>
2. 편리상 카메라 화상면을 전면 화상면(front image plane)으로 가정한다<sup>(2,3)</sup>
3. 지지면(supporting plane)을 평면(flat plane)으로 가정한다.

지지면상의 한 점  $P_i$ 는 기준좌표계( $X_w, Y_w, Z_w$ )(world coordinates)에서 좌표점( $x_i, y_i, 0$ )으로 표시된다(Fig. 2. 참조). 화상면 상의 한 점  $P_i$ 는 화상 좌표계( $U, V$ )(image coordinates)에서 좌표값( $u, v$ )로 표시된다. 시각투사(perspective)에서 화상면 상에 있는 점들과 지지면상에 있는 점들은 일대일 대응 관계를 이룬다. 이들 사이의 관계는 식(1.a,b)과 같이 정의된다.

$$u = \frac{a_1 x_i + b_1 y_i + c_1}{a_3 x_i + b_3 y_i + c_3} \quad (1.a)$$

$$v = \frac{a_2 x_i + b_2 y_i + c_2}{a_3 x_i + b_3 y_i + c_3} \quad (1.b)$$

식(1.a,b)의 계수들은 알려진 카메라 파라미터와 로봇트의 운동량에 대한 관절 좌표(joint coordinates)들로 이루어진 함수들이고, 이것을 행렬로 표시하면 식(2)와 같이 된다.

$$G = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서, 행렬  $G$ 는 비특이(non-singular)이다. 식(1.a,b)의 역변환은 식(3.a,b)로 표시된다.

$$x_i = \frac{A_1 u + A_2 v + A_3}{C_1 u + C_2 v + C_3} \quad (3.a)$$

$$y_i = \frac{B_1 u + B_2 v + B_3}{C_1 u + C_2 v + C_3} \quad (3.b)$$

여기서, 계수들은 행렬  $G$ 의 여인수(cofactor)들이다. 식(3.a,b)의 계수들은 식(4)와 같이 역변환 행렬  $G^{-1}$ 로 표시된다.

$$G^{-1} = \begin{bmatrix} A_1 & A_2 & A_3 \\ B_1 & B_2 & B_3 \\ C_1 & C_2 & C_3 \end{bmatrix} \quad (4)$$

역변환 행렬  $G^{-1}$ 을 구하는데 있어서 식(3.a,b)가 갖는 3차원 공간에서 기하학적인 시각투사의 성질을 이용한다. 즉, 기준좌표계에서 지지면 상의 한점( $x_i, y_i, z_i$ )와 화상 좌표계에서 화상면의 한점( $u, v$ )로 변환은 시각 투사이고, 이 변환은 일의적 변환식을 갖는다.

## 2.2 화상 좌표계의 위치와 자세

로봇트 동작에 따라 움직이는 on-robot 카메라 좌표계( $X_c, Y_c, Z_c$ )와 로봇트 베이스(base)에 부착된 기준좌표계( $X_w, Y_w, Z_w$ )의 관계를 알아보고, 다음에 기준좌표계에 대한 화상면의 위치 자세에 대해 알아본다. 카메라 좌표계의 원점  $O_c$ 는 핀홀 모델 카메라의 렌즈 중심에 위치한다. 화상면과 지지면 사이의 관계를 이용하기 위해, 기준 좌표계에 대한 카메라 좌표계의 위치와 자세를 알아야한다. 일반적으로 완전히 자유로운 카메라 동작은 완전 자유도(6 DOF)가 필요하다. 이것은 각축에 대한 이동으로 생기는 세계의 병진운동과 각축에 대한 회전으로 생기는 세계의 회전운동으로 표시된다<sup>(6,7)</sup>. 그러므로, 기준좌표계( $X_w, Y_w, Z_w$ )에 대한 카메라 좌표계( $X_c, Y_c, Z_c$ )의 변환은 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$M_w = T_c M_c \quad (5)$$

여기서, 행렬  $M_c$ 는 행렬  $[x_c, y_c, z_c, 1]$ 의 전치행렬(transpose)이고, 행렬  $M_w$ 는  $[x_w, y_w, z_w, 1]$ 의 전치

행렬이다. 또한, 4x4의 변환행렬  $T_c$ 는 동차 좌표계 (homogeneous coordinates)를 사용한다. 각축에 대한 이동 운동량은  $(\eta_x, \eta_y, \eta_z)$ 이고 각 축에 대한 회전량은  $(\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z)$ 이다. 4x4의 변환 행렬  $T_c$ 의 첫 세개의 행 중의 첫 세개의 열은 좌표계에 대한 카메라 좌표계의 자세를 나타낸다. 그리고, 행렬  $T_c$ 의 첫 셋 행중에서 넷째 열은 카메라 원점의 위치를 나타낸다. 즉,  $O_c = (\eta_x, \eta_y, \eta_z, 1)$ 이다. 사실, 기준좌표계에 대한 카메라 좌표계의 위치와 자세는 로봇트의 동작에 대한 관절 좌표(joint coordinates)들에 의해 결정된다. 식(5)를 역변환함으로써 카메라 좌표계 식(6)을 얻을 수 있다.

$$M_c = T_c^{-1} M_w \quad (6)$$

카메라 좌표계에 대한 화상면의 위치와 자세는 화상면에 수직인 렌즈 축(optical axis)의 방향 변화에 따라 결정된다. 즉, 화상면은 카메라 좌표계의 원점  $O_c$  로 부터 화상면 까지의 거리  $f$ (초점거리)에 위치하고, 렌즈 축의 방향각  $[\gamma_x, \gamma_y, \gamma_z]$ 에 따라 자세가 결정된다. 그러므로, 카메라 좌표계  $(X_c, Y_c, Z_c)$ 에서 화상면의 방정식은 식(7)과 같이 정의된다.

$$x_c \cos \gamma_x + y_c \cos \gamma_y + z_c \cos \gamma_z = f \quad (7)$$

여기서,  $\cos \gamma_x, \cos \gamma_y, \cos \gamma_z$ 는 화상면의 방향여현(direction cosines)들이다. 일반적으로,  $Z_c$  축은 카메라 렌즈축과 동일하게 잡는다. 즉,  $\gamma_x = \gamma_y = 90^\circ, \gamma_z = 0^\circ$ 이다. 카메라 좌표계에서 화상면의 방정식은 식(8)과 같이 된다.

$$z_c = f \quad (8)$$

식(7)과 (8)로 부터, 기준좌표계에서 화상면의 방정식은 식(9)와 같이 얻어진다.

$$k_1 x_w + k_2 y_w + k_3 z_w + k_4 = 0 \quad (9)$$

여기서, 화상면에 대한 방향여현은 식(10.a,b,c,d)과 같이 얻어진다.

$$k_1 = \sin \varphi_y \quad (10.a)$$

$$k_2 = -\sin \varphi_x \cos \varphi_y \quad (10.b)$$

$$k_3 = \cos \varphi_x \cos \varphi_y \quad (10.c)$$

$$k_4 = (\eta_y \sin \varphi_x - \eta_z \cos \varphi_x) \cos \varphi_y - \eta_x \sin \varphi_y - f \quad (10.d)$$

기준 좌표계에 대한 화상 좌표계의 원점  $O_i$ 의 위치를 구하기 위해  $Z_0$ 축을 따라 거리  $f$  만큼 카메라 좌표계의 원점  $O_c$ 를 이동시키면, 이곳이 화상 좌표계의 원점  $O_i$ 가 된다 (Fig. 2. 참조). 즉, 카메라 좌표계에 대한 화상 좌표계의 원점  $O_i$ 의 위치 좌표는  $O_i = (0, 0, f, 1)$ 로 잡는다. 기준 좌표계에 대한 화상 좌표계  $(X_i, Y_i, Z_i)$ 의 변환은 식(11)과 같이 된다.

$$M_w = T_i M_i \quad (11)$$

변환 행렬  $T_i$ 에서 첫 세개의 행 중 첫 세개의 열은 기준 좌표계에 대한 화상좌표계의 자세를 나타낸다. 즉, 3x3 자세 행렬  $R_i$ 는 식(12)와 같이 된다.

$$R_i = [C_1 \ C_2 \ C_3] \quad (12)$$

여기서, 각 열들은 식(13.a,b,c)과 같이 얻어진다.

$$C_1 = \begin{bmatrix} \cos \varphi_y \cos \varphi_z \\ \cos \varphi_x \sin \varphi_z + \sin \varphi_x \sin \varphi_y \cos \varphi_z \\ \sin \varphi_x \cos \varphi_z - \cos \varphi_x \sin \varphi_y \cos \varphi_z \end{bmatrix} \quad (13.a)$$

$$C_2 = \begin{bmatrix} -\cos \varphi_y \sin \varphi_z \\ \cos \varphi_x \cos \varphi_z - \sin \varphi_x \sin \varphi_y \sin \varphi_z \\ \sin \varphi_x \cos \varphi_z + \cos \varphi_x \sin \varphi_y \sin \varphi_z \end{bmatrix} \quad (13.b)$$

$$C_3 = \begin{bmatrix} \sin \varphi_y \\ -\sin \varphi_x \cos \varphi_y \\ \cos \varphi_x \cos \varphi_y \end{bmatrix} \quad (13.c)$$

또한, 변환 행렬  $T_i$ 에서 첫 세개의 행 가운데 넷번째의 열은 기준 좌표계에 대한 화상좌표계의 위치  $O_i(o_x, o_y, o_z)$ , 즉, 원점을 나타내는 3x1의 위치 행렬  $O_i$ 는 식(14)와 같이 얻어진다.

$$O_i = \begin{bmatrix} o_x \\ o_y \\ o_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \eta_x + f \sin \varphi_y \\ \eta_y - f \sin \varphi_x \cos \varphi_y \\ \eta_z + f \cos \varphi_x \cos \varphi_y \end{bmatrix} \quad (14)$$

### 2.3 화상면과 지지면의 관계

Fig. 3에서 지점  $P_i$ 와 이에 대응하는 화상점  $P_i'$ 의 관계

에 대해 알아본다. 지점은 화상점, 카메라의 알려진 파라미터, 그리고 카메라의 위치와 자세의 좌표값으로 표현된다. 카메라 좌표계의 원점  $O_c(o_x, o_y, o_z)$ 에서 화상면 상의 한점  $P_i(u, v)$ 는 지지면상의 목표점  $P_i(x_i, y_i, z_i)$ 에 투사되므로, 이 세점은 일직선을 이룬다. 기본 좌표계에서 지지면의 방정식은

$$z_i = 0 \quad (15.a)$$

혹은

$$z_i = H(\text{상수}) \quad (15.b)$$

로 표현된다. 식(15.a)의 경우 지지면이 로봇 베이스와 같은 높이이고, 식(15.b)의 경우는 작업대 혹은 콘베이어의 높이가 H인 경우이다. 카메라 렌즈의 중심  $O_c$ 와 화상면의 방향여현은 기준좌표계에서 로봇 동작에 대한 관절 좌표와 카메라의 파라미터로 결정된다.

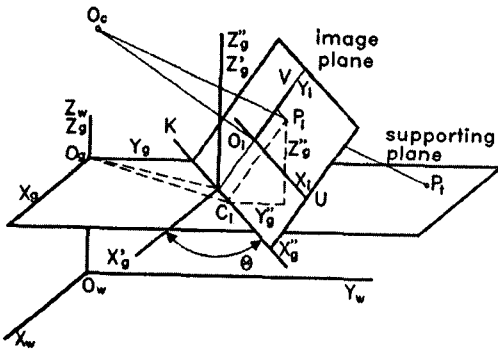


Fig. 3. Relationship between image coordinates and translated/rotated world coordinates

화상면과 작업대 지지면의 관계를 알기 위해 화상면을 연장시켜면 작업대 지지면과 교차하게 된다. 화상면 상에 있는 화상 좌표계의 축도 지지면과 교차하게 되는데 이 교차점까지 기준 좌표계를 먼저 이동시키고, 다음에 회전시킨다. 먼저, 기준좌표계의 이동 변환에 대해 알아본다. 작업대 지지면에 위치한 교차점  $O_s$ 까지 기준 좌표계의 원점  $O_w$ 를 이동시킬 때, 이동 변환은 식(16)과 같이 된다.

$$M_{ws} = Q_s M_w \quad (16)$$

여기서,  $Q_s$ 는 이동 변환을 나타내는 행렬이다. 기준 좌표계의 이동량은 작업대 지지면과 화상 좌표계 축이 만나는 교차점을 구함으로서 얻어진다. 화상 좌표계의 각축

$X_i, Y_i, Z_i$ 축은 화상 좌표계의 원점  $O_i$ 를 통과하며 카메라 좌표계와 동일한 방향각을 갖는다. 그러므로, 기준 좌표계에서  $X_i$ 축의 방향각  $[l_x, m_x, n_x]$ 는 식(17.a,b,c)와 같이 구해진다.

$$l_x = \cos \varphi_y \cos \varphi_z \quad (17.a)$$

$$m_x = \sin \varphi_x \sin \varphi_y \cos \varphi_z + \cos \varphi_x \sin \varphi_z \quad (17.b)$$

$$n_x = \sin \varphi_x \sin \varphi_z - \cos \varphi_x \sin \varphi_y \cos \varphi_z \quad (17.c)$$

$Y_i$  축의 방향각  $[l_y, m_y, n_y]$ 는 식(18.a,b,c)와 같다.

$$l_y = -\cos \varphi_y \sin \varphi_z \quad (18.a)$$

$$m_y = -\sin \varphi_x \sin \varphi_y \sin \varphi_z + \cos \varphi_x \cos \varphi_z \quad (18.b)$$

$$n_y = \sin \varphi_x \cos \varphi_z - \cos \varphi_x \sin \varphi_y \sin \varphi_z \quad (18.c)$$

$Z_i$  축의 방향각  $[l_z, m_z, n_z]$ 는 식(19.a,b,c)와 같다.

$$l_z = \sin \varphi_y \quad (19.a)$$

$$m_z = -\sin \varphi_x \cos \varphi_y \quad (19.b)$$

$$n_z = \cos \varphi_x \cos \varphi_y \quad (19.c)$$

먼저,  $Y_i$  축과 작업대 지면이 교차한다고 가정할 때 교차점을 구한다. 만약  $S \equiv (x, y, z)$ 인  $Y_i$  축 상에 놓여 있는 한 점 S를 잡고  $O_i S = t$ 라 하면, 파라미터 t의 함으로 표시되는 식들은

$$x = o_x + l_y t \quad (20.a)$$

$$y = o_y + m_y t \quad (20.b)$$

$$z = o_z + n_y t \quad (20.c)$$

이고, 좌표  $(o_x, o_y, o_z)$ 는 화상 좌표계의 원점이다. 일반적으로 평면 방정식은

$$\lambda_1 x + \lambda_2 y + \lambda_3 z + \lambda_4 = 0 \quad (21)$$

로 주어지고, 식(20.a,b,c)를 식(21)에 대입하면

$$(\lambda_1 l_y + \lambda_2 m_y + \lambda_3 n_y)t + \lambda_1 o_x + \lambda_2 o_y + \lambda_3 o_z + \lambda_4 = 0 \quad (22)$$

이 된다. 만약,  $\lambda_1 l_y + \lambda_2 m_y + \lambda_3 n_y$  이라면,  $\lambda_1 o_x + \lambda_2 o_y$

+ $\lambda_3 o_z + \lambda_4 = 0$  가 아닌 경우는 식(22)를 만족할 수 없다. 이 경우,  $Y_i$  축은 작업대 지지면과 평행하고, 그리고 지지면과 공통점 ( $o_x, o_y, o_z$ )를 갖는다. 즉, 교차점은 지지면 상의 어떤 곳에도 위치할 수 있다. 화상면과 작업대 지지면이 겹치는 경우이다. 만약,  $\lambda_1 l_y + \lambda_2 m_y + \lambda_3 n_y = 0$  이고,  $\lambda_1 o_x + \lambda_2 o_y + \lambda_3 o_z + \lambda_4 \neq 0$  이면,  $Y_i$  축은 지지면과 평행하고 교차점을 갖지 않는다. 이 경우는 화상면과 지지면이 평행하고 만나지 않는다. 그리고, 기준 좌표계에서 지지면에 대한 식이  $z = H$ 로 주어졌으므로 파라미터  $t$ 에 대한 식을 구하면, 식(20.c)로부터

$$t = \frac{H - o_z}{n_y} \quad (23)$$

이 된다. 여기서,  $n_y \neq 0$  이라고 가정한다. 즉,  $Y_i$  축과 지지면의 교차점  $C_i(x_{iy}, y_{iy}, z_{iy})$ 는 식(24.a, b, c)와 같이 된다.

$$x_{iy} = o_x + l_y \frac{H - o_z}{n_y} \quad (24.a)$$

$$y_{iy} = o_y + m_y \frac{H - o_z}{n_y} \quad (24.b)$$

$$z_{iy} = H \quad (24.c)$$

같은 방법으로,  $X_i$ 축과  $Z_i$ 축에 대해서도 교차점을 구할 수 있다. 편리상, 지지면 좌표계의 원점  $O_w$ 를 교차점까지 이동시킨 기준 좌표계의 원점을  $O_s$ 라 할 때, 이동 변환은 식(16)과 같고, 지지면 좌표계의 이동량 ( $\delta_x, \delta_y, \delta_z$ )는 식(25.a, b, c)와 같이 주어진다(Fig.3. 참조).

$$\delta_x = \eta_x + f \sin \varphi_y - \cos \varphi_y \sin \varphi_z$$

$$\left\{ \frac{H - (\eta_z + f \cos \varphi_x \cos \varphi_y)}{\sin \varphi_x \cos \varphi_z + \cos \varphi_x \sin \varphi_y \sin \varphi_z} \right\} \quad (25.a)$$

$$\delta_y = \eta_y - f \sin \varphi_x \cos \varphi_y$$

$$+ (-\sin \varphi_x \sin \varphi_y \sin \varphi_z + \cos \varphi_x \cos \varphi_z)$$

$$\left\{ \frac{H - (\eta_z + f \cos \varphi_x \cos \varphi_y)}{\sin \varphi_x \cos \varphi_z + \cos \varphi_x \sin \varphi_y \sin \varphi_z} \right\} \quad (25.a)$$

$$\delta_z = H \quad (25.c)$$

전개 과정을 간단히 하기 위해, 카메라의 동작이 렌즈 축에 대한 회전이 없는 것으로 가정하고, 화상 좌표계의 한축이 지지면과 평행한 경우를 생각한다. 화상좌표계의  $Y_i$ 축과  $Z_i$ 축이 지지면과 교차하고  $X_i$ 축은 지지면에 평행한 경우에 대해 알아 본다. 먼저, 이동된 기준좌표계 ( $X_s, X_r, Z_s$ )를  $\theta$  만큼 회전시킴으로써 이동 회전된 지지면 좌표계 ( $X_r, X_r, Z_r$ )를 얻을 수 있다. 즉,  $X_r$  축은 직선 $K$ 와 일치된다. 직선 $K$ 는 직선 $U$ 와 평행하고, 연장된 화상면과 지지면의 교차점들로 구성된 직선이다. 즉, 화상 좌표계의  $U$ 축과 이동 회전된 기준좌표계의  $X_r$ 축은 평행하다. 기준 좌표계에서 이동 회전된 좌표계의  $X_r$ 축과 직선  $K$ 사이의 회전각  $\theta$ 는 식(26)과 같이 된다(Fig.3 참조).

$$\theta = \cos^{-1} \left\{ \frac{\phi_x \xi_x + \phi_y \xi_y + \phi_z \xi_z}{\sqrt{\phi_x^2 + \phi_y^2 + \phi_z^2} \sqrt{\xi_x^2 + \xi_y^2 + \xi_z^2}} \right\} \quad (26)$$

여기서, 방향각 ( $\phi_x, \phi_y, \phi_z$ )는 기준좌표계에 대한 화상 좌표계  $X_i$  축의 방향각이다. 즉, 이것은 직선 ( $\xi_x, \xi_y, \xi_z$ )의 방향각과 같다. 방향각  $K$ 는 기준 좌표계에 대한 이동 기준 좌표계의  $X_r$  축의 방향각이고, 기준 좌표계의  $X_w$  축의 방향각과 동일하다. 즉, 여기서 ( $\xi_x, \xi_y, \xi_z$ ) = (1, 0, 0)이다. 그러므로, 2축 사이의 회전각  $\theta$ 는 식(17.a, b, c)과 식(26)으로부터 식(27)을 얻는다.

$$\theta = \cos^{-1}(\cos \phi_y \cos \phi_z) \quad (27)$$

기준 좌표계로부터 이동 회전된 기준 좌표계까지의 변환은

$$M_{wrs} = Q_r Q_s M_w \quad (28)$$

이다. 이동 회전된 지지면 좌표계로부터 기준 좌표계까지 역변환은

$$M_w = Q_s^{-1} Q_r^{-1} M_{wrs} \quad (29)$$

이다.

## 2.4 시각투사하의 목표점 결정

지금부터, 기준 좌표계에서 목표점과 화상점 사이의 관계에 대해 알아본다. 화상점  $P_i$ , 목표점  $P_i$ 와 카메라 좌표계의

원점  $O_c$  는 일직선을 이루며, 이것들은 기하학적으로 시각투사하에 있다. 이동 회전된 기준 좌표계에서 카메라 좌표계의 위치, 즉, 카메라 좌표계의 원점  $O_{crs}(\eta_{xrs}, \eta_{yrs}, \eta_{zrs})$  의 좌표는 식(30)에 대입하여 얻어진다.

$$M_{crs} = Q_r Q_s M_c \quad (30)$$

이동 회전된 좌표계에서 작업대 위에 놓여 있는 목표점  $P_{irs}(x_{irs}, y_{irs}, z_{irs})$  는 식(31)에 대입하여 얻어진다.

$$M_{irs} = Q_r Q_s M_i \quad (31)$$

이동 회전된 기준 좌표계에서 화상점  $P_{irs}(x_{irs}, y_{irs}, z_{irs})$  의 변환은 식(32)에 대입하여 얻어진다.

$$M_{irs} = Q_r Q_s M_i \quad (32)$$

이다. 이동 회전된 기준 좌표계에서 시각투사의 기하학적 해석을 이용하여 화상점  $P_{irs}(x_{irs}, y_{irs}, z_{irs})$  과 목표점  $P_{irs}(x_{irs}, y_{irs}, z_{irs})$  사이의 일대일 대응관계를 이용한다. 직선  $O_{crs}P_{irs}$  (i.e., 시각 광속)는 식(33)과 같은 직선 방정식을 갖는다.

$$\frac{x_{rs} - x_{irs}}{\eta_{xrs} - x_{irs}} = \frac{y_{rs} - y_{irs}}{\eta_{yrs} - y_{irs}} = \frac{z_{rs} - z_{irs}}{\eta_{zrs} - z_{irs}} \quad (33)$$

이 직선  $O_{crs}P_{irs}$  는 화상면상의 지점  $P_{irs}(x_{irs}, y_{irs}, z_{irs})$  에서 교차한다. 화상점  $P_{irs}$  를 식(33)에 대입하여 식(34)를 얻는다.

$$\frac{x_{irs} - x_{irs}}{\eta_{xrs} - x_{irs}} = \frac{y_{irs} - y_{irs}}{\eta_{yrs} - y_{irs}} = \frac{z_{irs}}{\eta_{zrs}} \quad (34)$$

이동 회전된 기준 좌표계에서 지지면의 방정식은  $z_{irs} = 0$  이다. 식(34)로부터, 목표점의 좌표는

$$x_{irs} = \frac{-\eta_{zrs}x_{irs} + \eta_{xrs}z_{irs}}{z_{irs} - \eta_{zrs}} \quad (35.a)$$

$$y_{irs} = \frac{-\eta_{zrs}y_{irs} + \eta_{yrs}z_{irs}}{z_{irs} - \eta_{zrs}} \quad (35.b)$$

$$z_{irs} = 0 \quad (35.c)$$

이다.

$P_{irs}(x_{irs}, y_{irs}, z_{irs})$  에서 구한 값들을 식(35.a,b,c)에 대입하여 목표점  $P_{irs}$  의 좌표  $(x_{irs}, y_{irs})$  는 화상 좌표계에서  $u = x_i, v = y_i, z_i = 0$  이기 때문에 화상점 좌표  $(u, v)$  를 얻을 수 있다. 목표점  $P_{irs}$  의 좌표  $(X_{irs}, Y_{irs}, Z_{irs})$  는 기준 좌표계에 대한 화상점 좌표  $(u, v)$  로 변환시킬 수 있다. 이동 회전된 좌표계로부터 기준 좌표계로 역변환은

$$M_i = Q_s^{-1} Q_r^{-1} M_{irs} \quad (36)$$

이다. 그러므로, 기준 좌표계에서 목표점  $P_i(x_i, y_i, z_i)$  는

$$x_i = \cos\theta x_{irs} + \sin\theta y_{irs} + \delta_x \quad (37.a)$$

$$y_i = -\sin\theta x_{irs} + \cos\theta y_{irs} + \delta_y \quad (37.b)$$

$$z_i = \delta_z = H \quad (37.c)$$

이다. 식(35.a,b,c)과 식(37.a,b,c)로부터, 작업대 상의 목표점  $P_i$  의 좌표  $(x_i, y_i)$  는 화상점 좌표  $(u, v)$  의 형태로 표현될 수 있다.

$$x_i = \frac{A_1 u + A_2 v + A_3}{C_1 u + C_2 v + C_3} \quad (38.a)$$

$$y_i = \frac{B_1 u + B_2 v + B_3}{C_1 u + C_2 v + C_3} \quad (38.b)$$

$$z_i = H \quad (38.c)$$

식(38.a,b,c)의 계수들은 알려진 카메라 파라미터와 로봇 운동량에 대한 관절 좌표값들로 결정된다. 그러므로, 화상점  $P_i(x_i, y_i)$  와 목표점  $P_i(u, v)$  의 일대일 대응관계를 나타내는 역변환  $G^{-1}$  를 얻을 수 있다.

$$G^{-1} = \begin{bmatrix} A_1 & A_2 & A_3 \\ B_1 & B_2 & B_3 \\ C_1 & C_2 & C_3 \end{bmatrix} \quad (39)$$

식(39)의 행렬요소들은 식(40)와 같은 관련 변수들로 구성된 함수이다.

$$o_x = \eta_x + f \sin \varphi_y \quad (40.a)$$

$$o_y = \eta_y - f \sin \varphi_x \cos \varphi_y \quad (40.b)$$

$$o_z = \eta_z + f \cos \varphi_x \cos \varphi_y \quad (40.c)$$

$$\delta_x = (\eta_x + f \sin \varphi_y) + \{-\cos \varphi_y \sin \varphi_z\}$$

$$\left\{ \frac{H - \eta_z - f \cos \varphi_x \cos \varphi_y}{\sin \varphi_x \cos \varphi_z + \cos \varphi_x \sin \varphi_y \sin \varphi_z} \right\}$$

$$\delta_y = (\eta_y - f \sin \varphi_x \cos \varphi_y) + \{-\sin \varphi_x \sin \varphi_y \sin \varphi_z + \cos \varphi_x \cos \varphi_z\}$$

$$\left\{ \frac{H - \eta_z - f \cos \varphi_x \cos \varphi_y}{\sin \varphi_x \cos \varphi_y + \cos \varphi_x \sin \varphi_y \sin \varphi_z} \right\} \quad (40.e)$$

$$\delta_z = 0 \quad (40.f)$$

$$\theta = \cos^{-1}(\cos \varphi_x \cos \varphi_z) \quad (40.g)$$

$$\eta_{xrs} = \eta_x \cos \theta - \eta_y \sin \theta - \delta_x \cos \theta + \delta_y \sin \theta \quad (40.h)$$

$$\eta_{yrs} = \eta_x \sin \theta + \eta_y \cos \theta - \delta_x \sin \theta - \delta_y \cos \theta \quad (40.i)$$

$$\eta_{zrs} = \eta_z - H \quad (40.j)$$

역변환  $G^{-1}$ 의 요소들은 모두 알려진 변수들의 함수들이다. 역변환  $G^{-1}$ 를 구함으로써, 화상점 좌표  $(u, v)$ 에 대한 실제의 목표점  $P_i$ 의 좌표  $(x_i, y_i)$ 를 구할 수 있다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

제2장에서 해석적으로 유도한 이론에 대한 실험을 하기 위해 실제 실험장치를 구성하였다(Fig.4. 참조). 카메라 부착 장치를 설계 제작하여 로봇(PUMA-760)의 엔드 이펙터(end-effector)에 CCD 카메라(Sony, XC-77 B/W,  $f=12\text{mm}$ )를 부착하였고, 비전 시스템의 화상 보드로는 Dipix(P360DF-4MB)를 IBM PC에 장착하여 사용하였다. 목표점들을 표시한 보드판을 작업대 상에 놓아 고정시켰으며, 이 점들은 로봇을 동작시켜서 로봇 좌표계와 일치되게 정확한 위치에 놓았다(Fig. 5 참조). 카메라의 정확한 부착 위치 자세가 측정 오차를 줄여주는 데 있어서 중요하다. 부착 장치의 정확한 제작 치수, 카메라 치수 사양, 로봇 치수 사양, 로봇의 관절 좌표, 카메라 초점 거리, 작업대의 높이 등이 중요한 함수들이다.

제2장에서 유도된 이론을 근거로 하여 로봇(Puma-

760)에 부착된 카메라를 고려한 정방향 기구학(forward kinematics)에 대한 수식을 구하였다. 즉, 이 수식은 식(38.a,b,c)를 구하는 방법으로 유도되며, 이 수식에 필요한 화상 좌표값과 관절 좌표값 및 기타 상수를 대입하므로서 목표 지점에 대한 측정 좌표값들을 얻을 수 있다. 이러한 실험 측정을 위해 로봇을 동작시킬 때, 카메라의 위치는 로봇 작업공간 내의 임의 위치에 있게 되지만 목표점의 위치는 로봇 작업 공간내에 한정되는 것이 아니고 작업 공간을 벗어나도 작업대 상에 있거나 하면 상관없다. 카메라의 자세는 목표 지점을 볼 수 있는 방향이면 모든 자세에서도 가능하다. 카메라 위치와 목표점 위치에 따라 두 점 사이의 거리는 달라진다. 카메라 자세와 카메라와 목표점 사이의 거리에 관계없이 목표점의 비교적 정확한 위치 좌표값을 얻을 수 있다.

작업대 지지면상의 실제 지점 좌표값들에 대해 측정된 값들의 결과는 Table 1과 같이 얻었다. 목표점 위치가 로봇 작업 공간 내에 있을 경우에는 비교적 작은 오차 범위를 나타내고, 작업 공간을 벗어 날 때는 비교적 큰 오차를 보여 주고 있다. 실제값과 측정값들의 비교 그래프는 Fig.5과 같고, 작업대 상에 있는 목표점들에 대해 대각선 방향으로 선택하여 측정된 값들을 비교하였을 때도 동일한 경향을 나타내고 있다(Fig.6, Fig.7 참조). 이러한 실험 측정 결과로 측정값들은  $\pm 10\text{mm}$  이내의 오차값을 갖는 비교적 정확한 결과를 얻었다.

목표점이 작업 공간 내에 있을 경우, 카메라 자세에 따른 화상면이 지지면과 이루는 각이 비교적 적고, 두 점 사이의 거리가 작은 경우이다. 화상면과 지지면이 거의 평행에 가깝고, 거리가 짧을 수록 시각효과가 비교적 적은 경우이므로 오차도 비교적 작게 나타났다. 목표점이 작업 공간을 벗어날 경우, 카메라가 목표점을 보기 위해 카메라 자세를 바꾸어서 보기 때문에 이 경우는 화상면과 지지면이 이루는 각이 비교적 크고, 두 점 사이의 거리가 큰 경우이므로 시각 효과도 비교적 크므로 오차도 비교적 크게 나타났다. 그러므로, 시각 효과에 의한 측정 오차에 대한 문제점을 해결하기 위해 시각투사의 기하학적 영향에 대한 심도있는 연구가 필요하다. 측정 오차의 범위를 줄이기 위해 기계적 원인 요소인 로봇 본체의 정밀도 및 카메라 부착 장치에 대한 정밀도를 높여야 하고, 카메라의 렌즈의 중심 위치에 의한 오차(화상 중심 위치에 의한 오차), 화상의 디지털화에 의한 노이즈 오차 등을 줄여야 한다. 대부분의 대상물들은 지지하는 면이 있어야 그 대상물의 위치와 자세를 갖는다. 대상물은 지지면과 접촉한



점들을 반드시 갖게 되므로 이 접촉한 점들을 앞으로서 그 물체의 위치와 자세를 결정할 수 있다. 그러므로, 지점의 결정은 대상물의 위치와 자세 결정에 중요한 역할을 한다. 본 연구 결과로 얻은 정보는 제한적이거나 3차원 형상인식 및 위치자세 결정에도 중요한 역할을 할 것이다 (8.9,10,11). 로봇트 비전 시스템으로 부터 보다 충분한 정보를 얻기위해 주변 환경과 제한조건을 적절히 잘 활용할 필요가 있다.

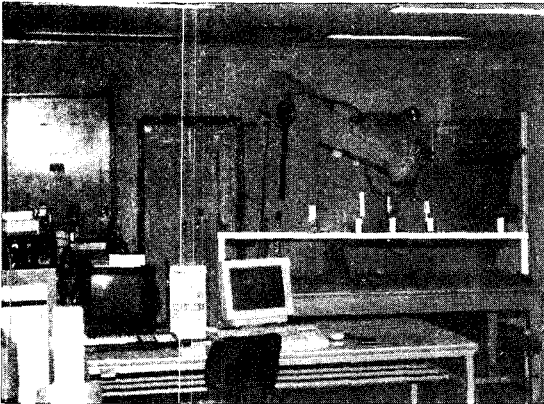


Fig. 4. Experimental setup for measuring system of the target points on the supporting plane

Table 1. Measured data of the target points on the supporting plane

(단위: mm)

| 위치 번호 | 실제 좌표값        | 측정 좌표값        |
|-------|---------------|---------------|
| 1     | (-1980, -210) | (-1983, -219) |
| 2     | (-1730, -210) | (-1737, -219) |
| 3     | (-1430, -210) | (-1432, -214) |
| 4     | (-1180, -210) | (-1177, -214) |
| 5     | (-1980, 0)    | (-1981, 0)    |
| 6     | (-1730, 0)    | (-1733, -5)   |
| 7     | (-1430, 0)    | (-1430, -1)   |
| 8     | (-1180, 0)    | (-1177, -4)   |
| 9     | (-1980, 190)  | (-1976, 182)  |
| 10    | (-1730, 190)  | (-1736, 184)  |
| 11    | (-1430, 190)  | (-1431, 184)  |
| 12    | (-1180, 190)  | (-1183, 185)  |
| 13    | (-1980, 690)  | (-1979, 685)  |
| 14    | (-1730, 690)  | (-1725, 682)  |
| 15    | (-1430, 690)  | (-1433, 687)  |
| 16    | (-1180, 690)  | (-1181, 688)  |
| 17    | (-1980, 1190) | (-1978, 1181) |
| 18    | (-1730, 1190) | (-1730, 1186) |
| 19    | (-1430, 1190) | (-1425, 1183) |
| 21    | (-1980, 1390) | (-1973, 1382) |
| 22    | (-1730, 1390) | (-1727, 1383) |
| 23    | (-1430, 1390) | (-1426, 1386) |
| 24    | (-1180, 1390) | (-1182, 1385) |

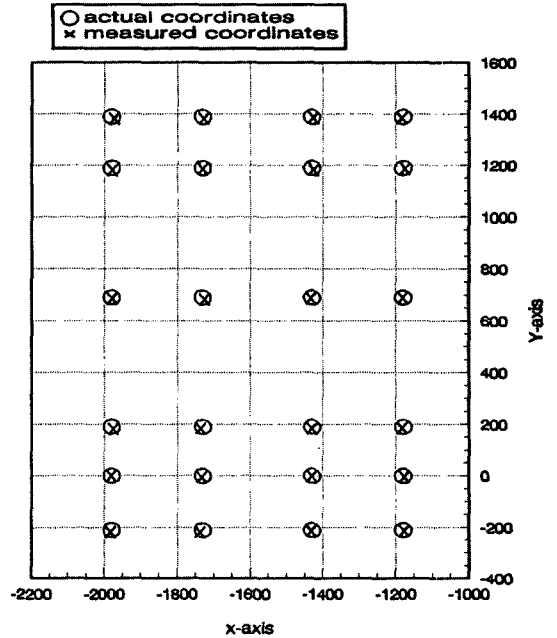


Fig. 5. Comparison of actual and measured coordinates

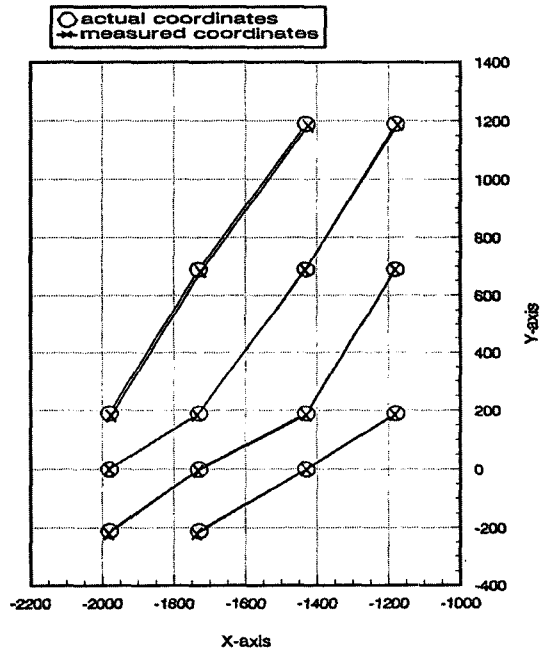


Fig. 6. Comparison of actual and measured coordinates

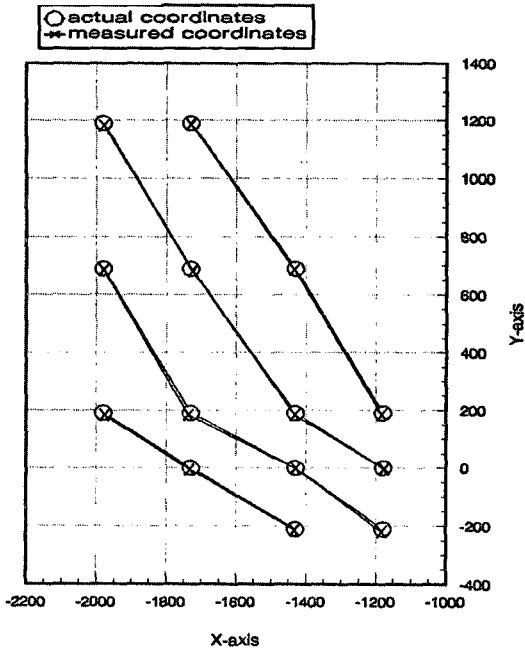


Fig. 7. Comparison of actual and measured coordinates

### 5. 결론

본 논문에서는 로봇트 비전을 이용한 로봇트 시스템을 기하학적으로 관찰하여 대상물의 위치 결정에 필요한 목표 지점의 좌표값을 구하는 방법에 대해 연구를 하였다. 기하학적으로 화상면과 지면의 일대일 대응 관계, 카메라 화상 형성 메카니즘을 일점 시각투사의 가정을 근거로하여 지지점(supporting point) 결정에 대한 이론적 관계식을 유도하였고, 이 이론적 관계식들을 실제 로봇트 시스템에 적용한 실험을 통해서 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 로봇트 비전을 이용하여 대상물에 대한 위치 자세를 결정하는 방법에 대한 이론적 관계식을 얻었다.

(2) 이론적 관계식에 대한 실험 결과는 이론적 타당성과 현장 응용성을 부여하였다.

(3) 이 연구 결과는 제한된 산업 현장에서 대상물의 위치를 결정하거나 형상인식을 할 경우에 유용하게 사용될 수 있다.

특히, 건설용 로봇트, 농업용 로봇트, 의료용(장애자용) 로봇트, 군사용 로봇트 등과 같은 자율 주행기능이 필요한 로봇트 시스템에서 광범위한 활용 범위를 갖게 될 것이다. 또한, 이 결과는 하나의 화상으로 부터 3차원 정

보를 추출할 때 유용한 이론적 배경을 제공함으로, 앞으로 이 분야에 대해 심도 있는 연구가 필요하다.

### 참고 문헌

- Ernest L. Hall and Bettie C. Hall, "Robotics : A User-Friendly Introduction," Saunders College Publishing, pp. 123-134, 1985.
- E. L. Hall, "Computer Image Processing and Recognition," Academic Press, pp. 76-82, 1979.
- B. K. Paul Horn, "Robot Vision," The MIT Press, pp. 299-315, 1986.
- Roger Y. Tsai, "A Versatile Camera Calibration Technique for High-Accuracy 3D Machine Vision Metrology Using Off-Shelf TV Camera and Lenses," IEEE J. of Robotics and Automation, Vol. RA-3, No. 4, August 1987.
- Michael A. Penna and Richard R. Patterson, "Projective Geometry and Its Applications to Computer Graphics," Prentice-Hall, pp. 39-53, 1986.
- John J. Craig, "Introduction to Robotics," Addison Wesley, pp. 86-102, 1989.
- Richard P. Paul, "Robot Manipulators," The MIT Press, pp. 35-39, 1982.
- W. K. Gu, J. Y. Yang and Thomas S. Huang, "Matching Perspective Views of A Polyhedron Using Circuits," IEEE Trans. on Patt. Anal. and Mach. Int., Vol. PAMI-9, No. 3, pp. 390-400, May 1987.
- Radu Horaud, "New Methods for Matching 3D Object with Single Perspective View," IEEE Trans. on Patt. Anal. and Mach. Int., Vol. PAMI-9, No. 3, pp. 400-412, May 1987.
- W. K. Gu and Thomas S. Huang, "Connected Line Drawing Extraction from A Perspective View of A Polyhedron," IEEE Trans. on Patt. Anal. and Mach. Int., Vol. PAMI-7, No. 4, pp. 422-430, July 1985.
- Robert N. Nelson and Tzay K. Young, "Determining Three-Dimensional Object Shape and Orientation from A Single Perspective View," Opt. Eng., Vol. 25, No. 3, pp. 294-401, March 1986.