

## 지능 로봇 시스템에 있어서 지면의 이용에 관한 연구

박 경 태

한국 기계연구소 자동화부 자동제어실

### Supporting Plane for Intelligent Robot System

Kyoung Taik Park  
Automatic Control Lab.  
Korea Institute of Machinery & metals

#### ABSTRACT

The integration of intelligent robots into manufacturing systems should positively impact the product quality and productivity. A new theory of object location and recognition using the supporting plane is presented. The unknown supporting points are determined by image coordinates, known camera parameters, and joint coordinates of the robot manipulators. This is developed by using the geometrical interpretation of perspective projection and the geometrical constraints of industrial environments. This can be applied to solve typical robot vision problems such as determination of position, orientation, and recognition of objects.

#### 1. 서론

지능 로봇 시스템에 있어서 로봇의 감지 기능은 필수적이며 고도의 기능을 발휘하기 위해서는 주위 환경과 대상 물체에 관한 3차원 정보를 필요로 한다. 또한 로봇의 매니퓰레이터는 다양한 위치와 자세를 갖는 물체들을 다룰 수 있는 유연한 동작 기능이 있어야 한다. 현재의 산업 로봇을 지능화 하는 것이 산업 현장에서 시급한 문제로 대두 되고 있다. 이것은 로봇에 감지 장치를 부착함으로써 생산 조립 라인에 필요로 하는 대상 물체의 형상 인식(recognition) 과 위치(position)와 자세(orientation)에 관한 정보를 얻는 것이 로봇 응용기술, 즉, 로봇의 지능화에 있어서 중요한 문제들 중 하나이다. 예를 들면, 어떤 물체를 집기 위해서는 대상 물체의 형상 인식, 위치와 자세에 관한 정보, 대상 물체와 그리퍼(gripper)의 관계 등에 관한 정보등을 필요로 한다 [1,2]. 시각 감지 기능 장치로 핀홀 모델 카메라를 사용할 경우, 대상 물체의 점들과 영상점들의 관계는 수학적으로 시각 투사(perspective projection or central projection)으로 표현된다 [3,4]. 인간은 2차원 단일 영상으로 부터 3차원 정보를 쉽게 추론 할 수 있지만, 핀홀 모델 카메라에 의해 얻어진 2차원 단일 영상으로 부터 3차원 정보를 직접 얻는 것이 수학적으로 불가능 하다. 그러

나, 지능 로봇은 2차원 단일 영상으로 부터 3차원 정보를 추론할 수 있는 기능을 갖는 것이 필요하다. 그러므로, 본 연구에서는 시각 투사에 어떤 기하학적 구속 조건을 가함으로써 3차원 정보를 얻는 방법을 모색한다. 즉, 지면(ground plane or supporting plane)을 기하학적 구속 조건으로 사용함으로써 2차원 단일 영상으로 부터 대상 물체의 형상인식과 위치 자세 결정에 필요로 하는 3차원 정보를 얻을 수 있는 방법을 제시한다. 기하학적 구속 조건으로 지면을 사용하면 지극히 당연하다. 왜냐하면, 날아 가는 비행기나 새들을 제외하고는 어떤 물체는 지지하는 것 없이는 어떤 위치나 자세를 가질 수 없기 때문이다. 로봇을 사용하고 있는 산업 환경에서는 작업대나 컨베이어 등이 좋은 기하학적 구속 조건이 될 수 있다.

#### 2. 영상면과 지면의 일대일 대응 관계

로봇에 카메라를 부착하였을 경우, 카메라의 영상면과 지면의 관계는 그림 1.과 같다. 이것은 로봇 전체 시스템의 변환 관계를 고려할 때 하나의 폐회로의 구성을 갖는다 [1]. 로봇의 각 링크들 사이의 변환 관계는 로봇의 기구학적 구성과 각 링크들의 동작에 대한 관절 좌표들에 의해 알 수 있지만, 이 폐회로 가운데 영상과 대상 물체 사이의 관계는 아주 복잡하다. 이것은 3 차원의 대상 물체와 2 차원의 영상이 일대일 대응 관계를 갖지 못 하기 때문이다. 즉, 2차원 영상으로 부터 3 차원 물체로의 해석이 필요 하기 때문이다. 이 경우 수학적으로 역변환이 필요한데 실제로 역변환이 존재하지 않는다. 그러므로, 로봇이 사용되고 있는 비교적 정리된 산업 환경 하에서 영상면과 지면의 관계를 고찰함으로써 대상 물체의 형상 인식, 공작물나 부품들의 위치 자세의 결정, 물체들 사이의 상대적 위치, 물체와 그리퍼 사이의 상대적 위치 결정에 필요한 정보를 얻는 방법을 제시한다.

본 논문에서 지면을 평면으로 가정한다. 그림 2.1 에서와 같이 지면상의 한 점  $P_t$ 는 기준 좌표계(world coordinate system)  $(X_w, Y_w, Z_w)$  하에서 좌표점  $(X_w, Y_w, 0)$ 으로 표시 한다. 영상면 상의 한 점  $P_i$ 는 영상좌표계(image coordinate system)  $(U, V)$ 에서 좌표점  $(u, v)$ 으로 표시한다. 시각 투사

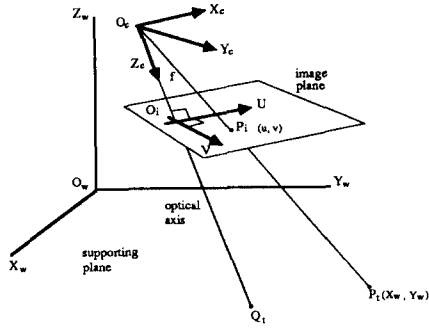


그림 2.1 로봇 시스템에서 영상면과 지면의 관계

하에서 영상면과 지면은 일대일 대응 관계에 있다. 영상면과 지면 사이의 점들의 관계는 식 (2.1-a,b)과 같이 정의된다.

$$u = \frac{a_1 X_w + b_1 Y_w + c_1}{a_3 X_w + b_3 Y_w + c_3} \quad (2.1-a)$$

$$v = \frac{a_2 X_w + b_2 Y_w + c_2}{a_3 X_w + b_3 Y_w + c_3} \quad (2.1-b)$$

식 (2.1-a,b)의 계수들은 알려진 카메라 파라미터들과 로봇의 동작에 대한 관절 좌표(joint coordinates)들로 이루어진 함수들이고, 이것을 행렬로 표시하면 식 (2.2)와 같다.

$$[G] = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

여기서, 행렬  $[G]$ 은 비특이(non-singular)이다. 식 (2.1-a,b)의 역변환 관계는 아래와 같은 식 (2.3-a,b)으로 표시된다.

$$X_w = \frac{A_1 u + A_2 v + A_3}{C_1 u + C_2 v + C_3} \quad (2.3-a)$$

$$Y_w = \frac{B_1 u + B_2 v + B_3}{C_1 u + C_2 v + C_3} \quad (2.3-b)$$

여기서, 계수들은 행렬  $[G]$ 의 여인수(cofactor)들이다. 식 (2.3-a,b)의 계수들은 식 (2.4)와 같이 역변환 행렬  $[G]^{-1}$ 으로 표시된다.

$$[G]^{-1} = \begin{bmatrix} A_1 & A_2 & A_3 \\ B_1 & B_2 & B_3 \\ C_1 & C_2 & C_3 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

역변환 행렬  $[G]^{-1}$ 을 구하는 것이 본 논문의 초점이다. 식 (2.1-a,b)과 (2.3-a,b)는 3차원 공간에서 시각 투사의 의미를 갖는다. 즉, 기준 좌표계하에서 지면상의 한 점  $(X_w, Y_w)$ 과 영상 좌표계하에서 영상면의 한 점  $(u, v)$ 으로의 변환은 시각 투사이다. 이 변환은 유일한 변환식을 갖는다. 만약, 어떤 물체의 지면과 접촉한 점에 대응한 영상 좌표점  $(u, v)$ 를 안다면, 식 (2.3-a,b)에 의해서, 실제 그 점의 위치를 알 수 있다. 그리고, 이것은 대상 물체의 위치 자세의 결정, 그리고 물체의 형상 인식에 필요한 결정적인 정보가 될 수 있다.

### 3. 영상면의 위치와 자세

로봇에 부착된 카메라를 이용할 때 로봇 동작에 따라 움직이는 카메라 좌표계  $(X_c, Y_c, Z_c)$ 와 로봇 베이스에 부착된 기준좌표계  $(X_w, Y_w, Z_w)$ 의 관계는 대상 물체의 형상 인식과 위치 자세의 결정에 뿐만 아니라 로봇 동작 제어에 있어서 중요하다 [5]. 먼저, 기준 좌표계에 대한 영상면의 위치 자세에 대해 알아 본다. 카메라 좌표계의 원점  $O_c$ 은 핀홀 모델 카메라의 렌즈 중심에 위치한다. 영상면과 지면 사이의 관계를 이용하기 위해 기준 좌표계에 대한 카메라 좌표계의 위치와 자세를 알아야 한다. 일반적으로, 완전히 자유로운 카메라의 동작은 완전 자유도의 조건을 요구한다. 이것은 각 축에 대한 이동, 즉, 세 개의 병진 운동과 각 축에 대한 회전, 즉, 세 개의 회전 운동으로 표시된다. 그러므로, 기준 좌표계  $(X_w, Y_w, Z_w)$ 에 대한 카메라 좌표계  $(X_c, Y_c, Z_c)$ 의 변환은

$$[X_w] = [T_c][X_c] \quad (3.1)$$

으로 나타낼 수 있다. 여기서, 4x4의 변환 행렬  $[T_c]$ 은 동차 좌표계(homogeneous coordinate system)를 사용한다 [3]. 각 축에 대한 병진 운동량은  $(e_x, e_y, e_z)$ 이고, 각 축에 대한 회전량은  $(\phi_x, \phi_y, \phi_z)$ 이다. 4x4의 변환행렬  $[T_c]$ 의 첫 세 개의 행 중의 첫 세 개의 열은 좌표계에 대한 카메라 좌표계의 자세를 나타낸다. 그리고, 행렬  $[T_c]$ 의 첫 셋 행중에서 넷째 열은 카메라 좌표계의 원점의 위치를 나타낸다. 즉,  $O_c = (e_x, e_y, e_z, 1)$ 이다. 사실, 기준 좌표계에 대한 카메라 좌표계의 위치와 자세는 로봇의 동작에 대한 관절 좌표(joint coordinate)들에 의해 결정된다. 식 (3.1)을 역변환함으로써 카메라 좌표계를 얻을 수 있다.

$$[X_c] = [T_c]^{-1}[X_w] \quad (3.2)$$

카메라 좌표계에 대한 영상면의 위치와 자세는 영상면에 수직인 렌즈 축(optical axis)의 방향에 따라 결정된다. 영상면은 카메라 좌표계의 원점  $O_c$ 로부터 영상면까지의 거리  $f$ (초점거리)와 그의 방향각  $[\gamma_x, \gamma_y, \gamma_z]$ (direction angle)에 의해 결정된다. 그러므로, 카메라 좌표계  $(X_c, Y_c, Z_c)$ 에서 영상면의 방정식은 식 (3.3)와 같이 정의된다.

$$X_c \cos \gamma_x + Y_c \cos \gamma_y + Z_c \cos \gamma_z = f \quad (3.3)$$

여기서,  $\cos \gamma_x$ ,  $\cos \gamma_y$ ,  $\cos \gamma_z$ 는 영상면의 방향 여현 (direction cosines)들이다.  $X_c$ ,  $Y_c$ ,  $Z_c$ 의 계수들의 제곱의 합은 1이다.  $Z_c$ 축은 카메라 렌즈 축과 동일하게 잡는다. 즉,  $\gamma_x = \gamma_y = 90^\circ$ ,  $\gamma_z = 0^\circ$ 이다. 카메라 좌표계에서 영상면의 방정식은 식 (3.4)와 같이 정의된다.

$$Z_c = f \quad (3.4)$$

식 (3.2)과 (3.4)로부터, 기준 좌표계에서 영상면의 방정식은 아래와 같다.

$$\eta_1 X_w + \eta_2 Y_w + \eta_3 Z_w + \eta_4 = 0 \quad (3.5)$$

여기서, 영상면에 대한 방향 여현은

$$\eta_1 = \sin \phi_y \quad (3.6-a)$$

$$\eta_2 = -\sin \phi_x \cos \phi_y \quad (3.6-b)$$

$$\eta_3 = \cos \phi_x \sin \phi_y \quad (3.6-c)$$

$$\eta_4 = (e_y \sin \phi_x - e_z \cos \phi_x) \cos \phi_y - e_x \sin \phi_y - f \quad (3.6-d)$$

이다. 기준 좌표계에 대한 영상 좌표계의 원점  $O_i$ 의 위치를 구하기 위해  $Z_c$ 축을 따라 거리  $f$ 만큼 카메라 좌표계의 원점  $O_c$ 를 이동시키면 이곳이 영상 좌표계의 원점  $O_i$ 가 된다. 즉, 카메라 좌표계에 대한 영상 좌표계의 원점  $O_i$ 의 위치 좌표는  $O_i = (0, 0, f, 1)$ 로 잡는다. 기준 좌표계에 대한 영상 좌표계  $(X_i, Y_i, Z_i)$ 의 변환은

$$[X_w] = [T_i][X_i] \quad (3.7)$$

이다. 변환행렬  $[T_i]$ 에서 첫 세 개의 행 가운데 첫 세 개의 열은 기준 좌표계에 대한 영상 좌표계의 자세를 나타낸다. 즉, 3x3의 자세 행렬  $[R_i]$ 는 식 (3.8)과 같다.

$$[R_i] = \begin{bmatrix} \cos \phi_y \cos \phi_z & & & \\ \cos \phi_x \sin \phi_z + \sin \phi_x \sin \phi_y \cos \phi_z & & & \\ \sin \phi_x \sin \phi_z - \cos \phi_x \sin \phi_y \cos \phi_z & & & \\ & -\cos \phi_y \sin \phi_z & \sin \phi_y & \\ \cos \phi_x \cos \phi_z - \sin \phi_x \sin \phi_y \sin \phi_z & & -\sin \phi_x \cos \phi_y & \\ \sin \phi_x \cos \phi_z + \cos \phi_x \sin \phi_y \sin \phi_z & & \cos \phi_x \cos \phi_y & \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

또한, 변환행렬  $[T_i]$ 에서 첫 세 개의 행 가운데 넷 번째의 열은 기준 좌표계에 대한 영상 좌표계의 위치  $O_i(x_o, y_o, z_o)$ 를 나타낸다. 즉, 3x1의 위치 행렬  $[O_i]$ 는 식 (3.9)와 같다.

$$[O_i] = [e_x + f \sin \phi_y, e_y - f \sin \phi_x \cos \phi_y, e_z + f \cos \phi_x \cos \phi_y]^T \quad (3.9)$$

이다.

#### 4. 지점의 결정

그림 4.1에서 지점과 그의 영상점의 관계에 대해 알아본다. 지점은 영상점, 카메라의 알려진 파라미터, 그리고 카메라의 위치와 자세의 좌표점으로 표현된다. 카메라 좌표계의 원점  $O_c(x_c, y_c, z_c)$ 으로부터, 영상면 상의 한 점  $P_i(u, v)$ 는 지면상의 지점  $P_e(X_w, Y_w, Z_w)$ 에 투사되므로, 이 세 점들은 일직선을 이룬다. 기준 좌표계하에서 지면의 방정식은

$$Z_w = 0 \quad (4.1-a)$$

$$\text{혹은, } Z_w = H \text{ (상수)} \quad (4.1-b)$$

이다. 식 (4.1-a)의 경우 지면이 로봇트 베이스와 같은 수준이고, 식 (4.1-b)의 경우는 작업대(혹은 콘베이어)의 높이가  $H$ 인 경우이다. 카메라의 렌즈 중심  $O_c$ 와 영상면의 방향 여현은 기준 좌표계에서 로봇트의 동작에 대한 관절 좌표와 카메라의 파라미터들로 결정된다 [5]. 즉, 역변환 행렬  $[G]^{-1}$ 은 렌즈 중심  $O_c(e_x, e_y, e_z)$ 와 한 점  $P_i(u, v)$ 를 잇는 직선 식과 알려진 영상면에 의해 결정된다. 그러므로, 지면 상에 놓여 있는 대상 물체의 점들의 위치는 알려진 영상 좌표, 카메라 파라미터, 알려진 관절 좌표들에 의해 유일하게 결정된다.

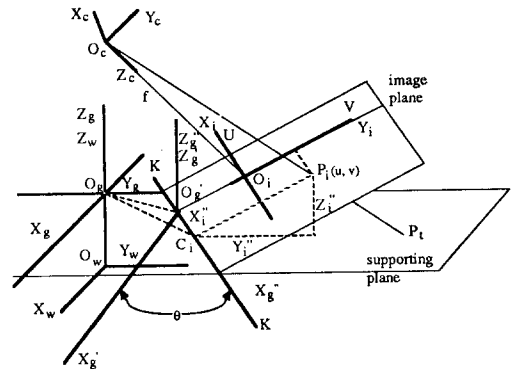


그림 4.1 이동 회전된 지면 좌표계 하에서 영상면과 지면의 관계

#### 4.1 지면 좌표계의 이동과 회전

기준 좌표계와 지면 좌표계의 관계에 대해 알아 본다. 먼저, 작업대 상에 위치한 지면 좌표계의 원점  $O_g$ 까지 기준 좌표계를 이동시킨다 (그림 4.1). 즉, 이동 변환은

$$[X_g] = [G_w][X_w] \quad (4.1.1)$$

이다.

영상 좌표계의 각  $X_i, Y_i, Z_i$  축은 영상 좌표계의 원점  $O_i$ 를 통과하며 카메라 좌표계와 같은 방향각을 갖는다. 기준 좌표계에서  $X_i$  축의 방향각  $[l_x, m_x, n_x]$ 은 아래와 같다.

$$l_x = \cos\phi_y \cos\phi_z \quad (4.1.2-a)$$

$$m_x = \sin\phi_x \sin\phi_y \cos\phi_z + \cos\phi_x \sin\phi_z \quad (4.1.2-b)$$

$$n_x = \sin\phi_x \sin\phi_z - \cos\phi_x \sin\phi_y \cos\phi_z \quad (4.1.2-c)$$

$Y_i$  축에서 방향각  $[l_y, m_y, n_y]$ 은

$$l_y = -\cos\phi_y \cos\phi_z \quad (4.1.3-a)$$

$$m_y = -\sin\phi_x \sin\phi_y \sin\phi_z + \cos\phi_x \cos\phi_z \quad (4.1.3-b)$$

$$n_y = \sin\phi_x \cos\phi_z + \cos\phi_x \sin\phi_y \sin\phi_z \quad (4.1.3-c)$$

이다.  $Z_i$  축에서 방향각  $[l_z, m_z, n_z]$ 은

$$l_z = \sin\phi_y \quad (4.1.4-a)$$

$$m_z = -\sin\phi_x \cos\phi_y \quad (4.1.4-b)$$

$$n_z = \cos\phi_x \cos\phi_y \quad (4.1.4-c)$$

이다. 먼저,  $X_i$  축과 지면의 교차점을 구한다. 만약  $S = (x, y, z)$ 인  $X_i$  축 상에 놓여 있는 한 점을 잡고  $O_i S = t$  이라면, 파라미터  $t$  의 함으로 표시 되는 식들은

$$x = O_x + l_x t \quad (4.1.5-a)$$

$$y = O_y + m_x t \quad (4.1.5-b)$$

$$z = O_z + n_x t \quad (4.1.5-c)$$

이고, 좌표  $(O_x, O_y, O_z)$ 는 영상 좌표계의 원점이다. 일반적으로, 평면 방정식은

$$\lambda_1 x + \lambda_2 y + \lambda_3 z + \lambda_4 = 0 \quad (4.1.6)$$

로 주어지고, 식 (4.1.5-a,b,c)을 식 (4.1.6)에 대입 하면

$$(\lambda_1 l_x + \lambda_2 m_x + \lambda_3 n_x)t + \lambda_1 O_x + \lambda_2 O_y + \lambda_3 O_z + \lambda_4 = 0 \quad (4.1.7)$$

이다. 만약  $\lambda_1 l_x + \lambda_2 m_x + \lambda_3 n_x + \lambda_4 = 0$  이라면,  $\lambda_1 O_x + \lambda_2 O_y + \lambda_3 O_z + \lambda_4 = 0$  가 아닌한 식 (4.1.7)은 만족 할 수 없다. 이 경우,  $X_i$  축은 지면과 평행하고, 그리고 지면과 공통점  $(O_x, O_y, O_z)$ 을 갖는다. 즉, 교차점은 전지면상에 위치 할 수 있다. 만약  $\lambda_1 l_x + \lambda_2 m_x + \lambda_3 n_x = 0$  이고  $\lambda_1 O_x + \lambda_2 O_y + \lambda_3 O_z + \lambda_4 \neq 0$  이면,  $X_i$  축은 지면과 평행하고 교차점을 갖지 않는다. 그리고, 기준 좌표계에서 지면에 대한 식이  $Z_w = H$  으로 주어졌으므로 파라미터  $t$  에 대한 식을 구하면

$$t = \frac{H - O_z}{n_x} \quad (4.1.8)$$

이 된다. 여기서,  $n_x \neq 0$  이라고 가정한다. 즉,  $X_i$  축이 지면과 직교 하지 않는 경우만 고려한다. 식 (4.1.8)을 식 (4.1.5-a,b,c)에 대입하여 교차점을 구할 수 있다. 지면과  $X_i$  축의 교차점  $(X_{ix}, Y_{ix}, Z_{ix})$ 은 아래와 같다.

$$X_{ix} = O_x + l_x \left[ \frac{H - O_z}{n_x} \right] \quad (4.1.9-a)$$

$$Y_{ix} = O_y + m_x \left[ \frac{H - O_z}{n_x} \right] \quad (4.1.9-b)$$

$$Z_{ix} = H \quad (4.1.9-c)$$

같은 방법으로,  $Y_i$  축과  $Z_i$  축에 대해서도 교차점을 구할 수 있다. 여기서,  $Y_i$  축이 지면과 교차한다고 가정한다. 지면 좌표계의 원점  $O_g$ 을 교차점까지 이동시켜 이동된 지면 좌표계의 원점  $O_g'$ 과 교차점을 일치시킨다 (그림 4.1). 즉, 이동 변환식은

$$[X_g'] = [Q_i][X_g] \quad (4.1.10)$$

이다. 이동량  $(\delta_x, \delta_y, 0)$ 은 아래와 같이 주어진다.

$$\delta_x = e_x + f \sin\phi_y$$

$$+ (-\cos\phi_y \sin\phi_z) \left( \frac{H - (e_z + f \cos\phi_x \cos\phi_y)}{\sin\phi_x \cos\phi_z + \cos\phi_x \sin\phi_y \sin\phi_z} \right)$$

$$(4.1.11-a)$$

$$\delta_y = e_y - f \sin\phi_x \cos\phi_y + (-\sin\phi_x \sin\phi_y \sin\phi_z$$

$$+ \cos\phi_x \cos\phi_z) \left( \frac{H - (e_z + f \cos\phi_x \cos\phi_y)}{\sin\phi_x \cos\phi_z + \cos\phi_x \sin\phi_y \sin\phi_z} \right)$$

$$(4.1.11-b)$$

카메라의 동작이 렌즈 축에 대해 회전이 없는 것으로 가정한다. 먼저,  $Z_g'$  축에 관해 이동된 지면 좌표계 ( $X_g', Y_g', Z_g'$ )를 각  $\theta$  만큼 회전시킴으로서 이동 회전된 지면 좌표계 ( $X_g'', Y_g'', Z_g''$ )을 얻을 수 있다. 즉,  $Y_g''$ 축은 직선 K와 일치 된다. 이 직선 K는 U 축과 평행하고 연장된 영상면과 지면의 교차점들로 구성된다. 즉, 영상 좌표계의 U축과 이동된 지면 좌표계의  $X_g''$ 축은 평행한다. 기준 좌표계에서 이동 회전된 지면 좌표계의  $X_g''$ 축과 직선 K 사이의 회전각  $\theta$ 는 아래와 같이 주어진다.

$$\theta = \cos^{-1} \left\{ \frac{\phi_x \zeta_x + \phi_y \zeta_y + \phi_z \zeta_z}{((\phi_x^2 + \phi_y^2 + \phi_z^2)^{1/2} (\zeta_x^2 + \zeta_y^2 + \zeta_z^2)^{1/2})} \right\} \quad (4.1.12)$$

여기서, 방향각  $[\phi_x, \phi_y, \phi_z]$ 은 기준 좌표계에 대한 영상 좌표계의  $X_i$  축의 방향각이다. 즉, 이것은 직선 K의 방향각과 같다. 방향각  $[\zeta_x, \zeta_y, \zeta_z]$ 는 기준 좌표계에 대한 이동 좌표계의  $X_g'$  축의 방향각이다. 즉, 여기서  $[\zeta_x, \zeta_y, \zeta_z] = [1, 0, 0]$ 이다. 그러므로, 2 축 사이의 회전각  $\theta$ 는

$$\theta = \cos^{-1}(\cos \phi_y \cos \phi_z) \quad (4.1.13)$$

이다. 지면 좌표계로 부터 이동 회전된 지면 좌표계까지의 변환은

$$[X_g''] = [Q_2][Q_1][X_g] \quad (4.1.14)$$

이다. 식 (4.1.1)와 (4.1.14)로 부터, 기준 좌표계로 부터 이동 회전된 지면 좌표계까지의 변환은

$$[X_w''] = [Q_2][Q_1][G_w][X_w] \quad (4.1.15)$$

이다. 지금 부터, 기준 좌표계하에서 지점과 영상점 사이의 관계에 대해 알아본다. 영상점  $P_i$ , 지점  $P_t$ 과 카메라 좌표계의 원점  $O_c$ 는 일직선을 이루며, 이것들은 시각 투사 하에 있다. 이동 회전된 지면 좌표계 하에서는 영상점  $P_i''$  ( $X_i'', Y_i'', Z_i''$ ) 과 지점  $P_t''$  ( $X_w'', Y_w'', Z_w''$ ) 이고, 카메라 좌표계의 원점  $O_c''$  ( $e_x'', e_y'', e_z''$ )는 식 (4.1.16)와 같이 변환된다.

$$[O_c''] = [Q_2][Q_1][G_w][O_c] \quad (4.1.16)$$

작업대 위에 놓여 있는 지점  $P_t$  ( $X_w, Y_w, Z_w$ )는 식 (4.1.17)과 같다.

$$[P_t''] = [Q_2][Q_1][G_w][P_t] \quad (4.1.17)$$

이동 회전된 지면 좌표계 하에서의 영상점  $P_i$ 의 변환은

$$[P_i''] = [Q_2][Q_1][G_w][T_i][P_i] \quad (4.1.18)$$

이다.

## 4.2 역행렬 $[G]^{-1}$ 의 결정

이동 회전된 지면 좌표계 하에서, 시각 투사의 기하적 해석을 이용하여 영상점  $P_i''$  ( $X_i'', Y_i'', Z_i''$ )과 지점  $P_t''$  ( $X_w'', Y_w'', 0$ ) 사이의 일대일 대응 관계를 유도한다. 직선  $O_c''P_t''$  (i.e. visual ray)는 아래와 같은 방정식들을 갖는다.

$$\frac{X_g'' - X_w''}{e_x'' - X_w''} = \frac{Y_g'' - Y_w''}{e_y'' - Y_w''} = \frac{Z_g'' - 0}{e_z'' - 0} \quad (4.2.1)$$

이 직선  $O_c''P_t''$ 는 영상면 상의 지점  $P_i''$  ( $X_i'', Y_i'', Z_i''$ )에서 교차한다. 영상점  $P_i''$ 을 식 (4.2.1)에 대입하여 아래와 같은 식들을 얻는다.

$$\frac{X_i'' - X_w''}{e_x'' - X_w''} = \frac{Y_i'' - Y_w''}{e_y'' - Y_w''} = \frac{Z_i''}{e_z''} \quad (4.2.2)$$

이동 회전된 좌표계 하에서는 지면의 방정식은  $Z_w'' = 0$ 이다. 식 (4.2.2)로 부터, 지점의 좌표는

$$X_w'' = \frac{-e_z'' X_i'' + e_x'' Z_i''}{Z_i'' - e_z''} \quad (4.2.3-a)$$

$$Y_w'' = \frac{-e_z'' Y_i'' + e_y'' Z_i''}{Z_i'' - e_z''} \quad (4.2.3-b)$$

$$Z_w'' = 0 \quad (4.2.3-c)$$

이다. 식 (4.1.18)에서 구한 값들을 식 (4.2.3-a, b, c)에 대입하므로써, 지점  $P_t''$ 의 좌표 ( $X_w'', Y_w''$ )는 영상 좌표계에서  $u = X_i, v = Y_i, Z_i = 0$  이기 때문에 영상좌표 ( $u, v$ )를 얻을 수 있다. 지점  $P_t$ 의 좌표 ( $X_w, Y_w, Z_w$ )는 기준 좌표계 ( $X_w, Y_w, Z_w$ )에 대한 영상 좌표 ( $u, v$ )으로 변환 시킬 수 있다. 이동 회전된 좌표계로 부터 기준 좌표계로 역변환은

$$[X_w] = [G_w]^{-1}[Q_1]^{-1}[Q_2]^{-1}[X_w''] \quad (4.2.4)$$

이다. 그러므로, 기준 좌표계에서 지점  $P_t$  ( $X_w, Y_w, Z_w$ )는

$$X_w = \cos\theta X_w'' + \sin\theta Y_w'' + \delta_x \quad (4.2.5-a)$$

$$Y_w = -\sin\theta X_w'' + \cos\theta Y_w'' + \delta_y \quad (4.2.5-b)$$

$$Z_w = H \quad (4.2.5-c)$$

이다. 식 (4.2.3-a,b,c)와 (4.2.5-a,b,c)로부터, 작업대상 지점  $P_t$ 의 좌표  $(X_w, Y_w)$ 는 영상점 좌표  $(u, v)$ 의 항들로 표현 될 수 있다.

$$X_w = \frac{A_1u + A_2v + A_3}{C_1u + C_2v + C_3} \quad (4.2.6-a)$$

$$Y_w = \frac{B_1u + B_2v + B_3}{C_1u + C_2v + C_3} \quad (4.2.6-b)$$

$$Z_w = H \quad (4.2.6-c)$$

식 (4.2.6-a,b)들의 계수들은 알려진 카메라 파라미터들과 로봇트 동작에 대한 관절 좌표들로 결정된다. 그러므로, 영상점  $P_t(u, v)$ 와 지점  $P_t(X_w, Y_w)$ 의 일대일 대응 관계를 나타내는 역행렬  $[G]^{-1}$ 을 얻을 수 있다.

$$[G]^{-1} = \begin{bmatrix} A_1 & A_2 & A_3 \\ B_1 & B_2 & B_3 \\ C_1 & C_2 & C_3 \end{bmatrix} \quad (4.2.7)$$

역행렬  $[G]^{-1}$ 의 요소들은 모두 알려진 변수들의 함수이다. 역행렬  $[G]^{-1}$ 을 구하므로써 영상점  $(u, v)$ 에 대한 실제의 지점  $P_t$ 의 좌표  $(X_w, Y_w)$ 를 구할 수 있다.

## 5. 결론

지능 로봇트 시스템에 로봇트 카메라를 이용할 때 가장 필요로 하는 것은 대상 물체의 형상 인식, 위치 자세의 결정에 대한 접근 방법이다. 본 논문에서 새로운 방법인 지면 이용법을 제시 하였다. 이 방법은 기하학적으로 시각투사 하에 놓여 있는 영상면과 지면의 관계가 일대일 대응인 것을 이용하였다. 지면상의 지점의 좌표들은 알려진 영상점들, 카메라 파라미터들, 로봇트 동작에 대한 관절 좌표들로부터 결정되므로, 이것은 대상 물체의 형상 인식, 위치 자세의 결정 등과 같은 로봇트 비이전 문제들을 해결하는데 사용 할 수 있다. 지점의 좌표를 앞으로서 2 차원 단일 영상으로부터 3 차원 정보를 추론할 수 있는 계기를 부여한다. 또한, 이 접근 방법은 ALV(autonomous land vehicle)와 같은 응용에 이론적 배경을 제공하고 있다.

## 6. 참고 문헌

- [1] Richard P. Paul, Robot Manipulators, The MIT Press Cambridge, Massachusetts and London, England 1981.
- [2] E. L. Hall and B. C. Hall, Robotics, A User-Friendly Introduction, Holt, Rinehart and Winston, 1985.
- [3] C. R. Wylie, Jr., Introduction to Projective Geometry, McGraw-Hill, 1970
- [4] E. L. Hall, Computer Image Processing and Recognition, Academic Press, 1979.
- [5] Kyoung I. Park, "Intelligent Robot System Using Ground Plane and Perspective Moment Invariants," Ph.D. Dissertation, University of Cincinnati, 1989.