

論文97-34S-10-7

## 비전 정보를 이용한 이동/작업용 로봇의 정밀제어

### (Precision Control of a Mobile/Task Robot using Visual Information)

韓 萬 龍 \* , 李 章 明 \*\*

(Man Yong Han and Jang Myung Lee)

#### 要 約

본 논문은 작업용 로봇의 핸드에 설치된 카메라의 비전 정보를 활용하여 이동/작업용 로봇의 정밀제어를 실현하는 기법을 기술한다. 이동/작업용 로봇의 제어에 있어서 가장 핵심 부분은 이동 로봇의 정밀제어에 의해 정확하고 안정된 베이스를 작업 로봇에 제공하는 것이다. 이동 로봇은 지표면의 불확정성으로 인하여 외부의 위치 센서를 사용하지 않고는 정확하게 제어하기 어렵다. 본 논문에서는 이동 로봇의 정밀한 제어를 위해 작업 로봇의 핸드에 카메라를 부착하여, 이동 로봇의 위치를 인식하여, 나이가 정밀제어를 할 수 있는 방안을 제시하였다. 작업 로봇이 조립 대상 물체에 접근하는 동안 핸드에 설치된 카메라에서 취득한 영상과 실제 조립대상 물체의 선 대응 관계를 활용하여 카메라의 위치를 인식하고 이를 기구학적 변환을 통하여 이동 로봇의 위치 인식에 활용하였다. 카메라의 위치와 방향을 인식하는 실험과 이동 로봇의 위치 인식을 이용하여 동적제어를 실현한 결과를 본 연구의 타당성을 위하여 보였다.

#### Abstract

This paper introduces a methodology of the precise control of a mobile/task robot using visual information captured by the camera attached at the hand of the task robot. The major problem residing in the precise control of a mobile/task robot is providing an accurate and stable base for the task robot through the precise control of mobile robot. On account of uncertainties on the surface, the precise control of mobile robot is not feasible without using external position sensors. In this paper, the methodology for the precise control of mobile robot is proposed, which recognizes the position of mobile robot using the camera attached at the hand of the task robot. While the task robot is approaching to an assembly part, the position of mobile robot is measured using the line correspondence between the image captured by the camera and the real assembly part, and using the kinematic transformation from the hand of the task robot to the mobile robot. To verify the solidness of this method, experimental data for the measurement of camera position/orientation and for the precise control of mobile robot using this measurement are shown.

\* 正會員, 釜山交通工團 機電處

(Div. of Mech. & Elec., Pusan Urban Transit Authority)

\*\* 正會員, 釜山大學校 電子工學科

(Dept. of Elec. Eng., Pusan Univ.)

※ 이 논문은 1995년도 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었음.

接受日字: 1996年8月26日, 수정완료일: 1997年9月26日

#### I. 서 론

종래의 자동화 기술의 진보는 동일종류의 대량생산을 위한 부품의 가공정밀도의 향상을 추구하면서 이루 어졌지만 최근의 제품생산은 단일 종류의 대량생산보다는 소비자의 기호에 따른 다양한 제품의 소량생산 체계로 변화되고 있어, 생산시스템에 유연성과 생산성을 향상시킬 수 있는 자동화 시스템이 요구되어지고

있으며, 이로 인해 다양한 일을 수행할 수 있는 고기능의 로봇을 요구하게 되었다. 이동/작업용 로봇은 이동로봇과 작업로봇을 직렬로 결합하여 임여디파질로봇을 구성한 것으로<sup>[1]</sup> 이러한 고기능 로봇의 한 실현 예이다. 이동/작업용 로봇의 고속/고정도 제어를 위하여 정확한 모델링에 의한 다이나믹제어를 수행하는 연구가 진행되고 있다<sup>[4,5,8]</sup>. 그러나, 이동로봇은 바퀴의 구동에 의해 이동되므로 바퀴가 지표면과의 마찰에 의하여 미끄림이 발생하며 이것으로 인해 실제 바퀴의 회전량과 이동로봇의 이동량 사이에는 상당한 오차가 존재하여 정밀한 제어의 난점이 되고 있다. 이러한 이동로봇의 제어오차는 작업로봇의 베이스오류(base error)를 유발하여 작업로봇의 정밀한 작업을 기대할 수 없게 한다. 따라서, 최근에는 이동로봇이 환경을 인식하여 유연하고 지능적인 작업을 수행하기 위해서 레이저, 초음파, 시각센서 등을 이용하는 연구와 비전정보를 이용한 위치제어가 활발히 진행되고 있다<sup>[11-13]</sup>.

본 논문에서는 작업로봇에 비전시스템을 부착하여 이동로봇의 자세(위치 및 방향)를 측정하고 이를 통하여 이동로봇의 정밀제어를 실현하여 작업로봇에 인정되고 정확한 베이스를 제공하는 방안을 제시한다.

카메라의 자세를 측정하는 방법에는 일반적으로 핀홀(Pin-Hole) 모델<sup>[2,3,6,7]</sup>과 Two-Plane 모델<sup>[9,10]</sup>을 사용하는 방법이 있다. 핀홀 모델을 사용하는 방법은 카메라의 파라메타에 대한 정보를 알아야 하므로 구현하는데 다소 복잡하고 Two-Plane 모델의 방법은 카메라 파라메타의 정보를 구할 필요가 없으므로 구현은 간단하나 로봇/카메라 좌표계 변환 시에 직접 이용하기는 어렵다. 본 논문에서는 카메라 자세측정을 위해 선 대응관계를 이용하여 효율적인 계산을 수행할 수 있는 Yuncuai Lui의 방법<sup>[3]</sup>을 사용하며, 카메라 모델은 파라메타들을 선형적으로 해석할 수 있는 핀홀 모델로 구성하였다.

카메라의 자세를 측정한 후 카메라의 좌표계를 로봇의 좌표계로 나타내기 위해서는 핸드/카메라(hand/camera) 좌표계변환의 동차행렬(homogeneous matrix)을 사용한다. 로봇/카메라의 좌표계 변환관계는 핸드의 이동에 따라 변하지 않으므로 작업로봇의 베이스 즉 이동로봇의 자세 측정에 이용된다. 측정된 카메라의 자세, 로봇과 카메라 간의 좌표계 변환과 작업로봇의 각 관절에서 판독된 회전각에 따른 기구학을 이용하여 이동로봇의 자세를 측정하고 측정

된 자세 값을 이용하여 이동로봇의 동적제어를 실현하였다.

본 논문은 II절에서 로봇/비전 제어 시스템에 대하여 설명하고 III절에서는 카메라의 자세를 측정하기 위하여 필요한 카메라 모델을 구성하여 카메라 내부 파라메타들과 더불어 회전 및 위치 파라메타를 추정하는 방법을 설명하며, IV절에서는 카메라의 자세를 구하는 실험과 이 측정된 자세값을 이용하여 이동로봇을 동력학으로 제어한 결과를 보여주며, 마지막으로 V절에서는 결론을 기술하였다.

## II. 로봇/비전 제어 시스템

### 1. 전체 시스템 구성

이동/작업용 로봇은 이동로봇의 상단에 작업로봇을 직렬로 결합한 임여로봇 시스템이다. 작업로봇은 5자유도에 그립퍼(gripper)를 갖는 구조이고, 이동로봇은 3자유도를 갖고 있으며 작업로봇을 X-Y-Z 공간상의 임의의 점으로 이동 가능한 구조이다. 그림 1은 이동/작업로봇 시스템의 링크 좌표계를 나타낸다.

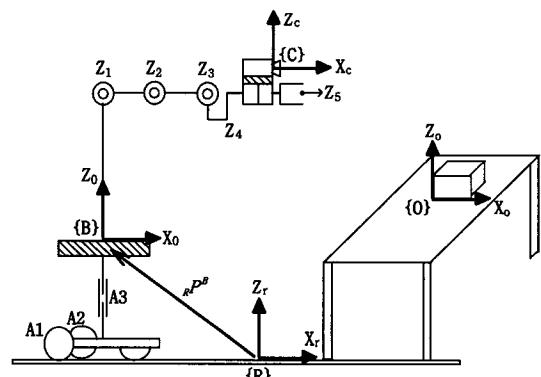


그림 1. 이동/작업로봇의 링크 좌표계

Fig. 1. Link coordinates of a mobile/task robot.

여기서 기준 좌표계, (R)에 관련하여 이동로봇의 상단의 위치를 나타내는 좌표계, (B)는 작업로봇의 베이스좌표계와 일치하게 설정하였으며, 기준 좌표계에 대한 이동로봇의 위치를  $R_P^B$ 로 두었다. 그림의 A1, A2, A3는 이동로봇의 구동축을 나타낸다.

작업로봇의 각 조인트의 값들이 주어지면 링크파라메타 값들에 따라 직교좌표 공간상에서 카메라의 자세는 기준 좌표계를 기준으로 링크좌표계의 변환을 통해 식 (1)과 같이 동차변환 행렬로 표시된다.

$${}_R H^C = \begin{pmatrix} r_1 & r_2 & r_3 & | & T_x \\ r_4 & r_5 & r_6 & | & T_y \\ r_7 & r_8 & r_9 & | & T_z \\ 0 & 0 & 0 & | & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

위 식(1)에서 동차 행렬로 표시된 자세를 Z-Y-Z 오일러 각을 사용하여 벡터로 나타내면  $X = [T_x \ T_y \ T_z \ \alpha \ \beta \ \gamma]^T$ 로 표시되며,  $\alpha = \text{Atan}2(r_6, r_3)$ ,  $\beta = \text{Atan}2(\sqrt{r_7^2 + r_8^2}, r_9)$ , 및  $\gamma = \text{Atan}2(r_8, -r_7)$ 로 정의되어 진다. 즉, 회전 행렬 ( $R^{3 \times 3}$ )을 나타내는  $r_1$ 에서  $r_9$ 까지의 9개의 변수는 3 자유도를 갖고 있다. 또한  $R^B = [T_x \ T_y \ T_z]^T$ 이다.

## 2. 기구학 변환

동력학 제어를 위하여 필요되는 바퀴 구동용 모터의 원하는 순간 변위량은 카메라의 위하여 구해진 이동로봇의 실제 위치와 이동 로봇의 원하는 경로 사이의 오차를 보정할 수 있도록 각 모터의 원하는 회전량을 계산하기 위하여 사용된다. 그림 2는 카메라를 부착한 이동/작업로봇 시스템의 각 좌표계의 변환관계를 나타낸 것이다. 그림 2에서  $\{R\}$ 은 전체 시스템의 기준좌표계,  $\{O\}$ 는 고정된 작업대상 물체의 좌표계,  $\{C\}$ 는 카메라좌표계,  $\{H\}$ 는 카메라가 부착되어 있는 핸드좌표계,  $\{B\}$ 는 작업로봇의 베이스좌표계,  $\{M\}$ 은 이동로봇의 중심좌표계로 좌표계들을 정의한다. 그림에서 보듯이 좌표계  $\{B\}$ 와 좌표계  $\{M\}$ 은 실제로 동일한 것으로 설정한다.

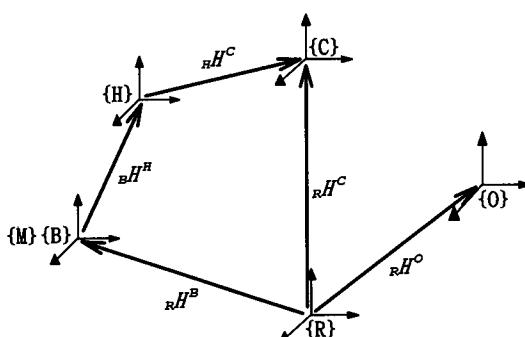


그림 2. 로봇/비전 시스템의 좌표계 변환

Fig. 2. Coordinates Transformation of Robot/Vision System.

본 논문에서는 이미 주어진 위치에 있는 고정된 물체의 영상을 사용하여 카메라의 상대적인 위치와 방향의 측정을 통해 이동로봇의 절대적 자세를 측정하는

것이다. 이를 수행하기 위해서는 먼저 고정된 물체의 화상정보를 사용하여 카메라의 자세,  $RH^C$ 를 측정한다.

다음은 로봇/카메라 좌표계 변환으로서, 측정된 카메라의 자세를 나타내는 동차행렬,  $RH^C$ , 작업로봇의 기구학에 의해 주어지는 동차행렬,  $BH^B$  및 로봇 핸드와 카메라 사이의 동차행렬,  $RH^C$ 로 부터 구하고자 하는 이동로봇의 끝판, 즉, 작업로봇의 베이스의 위치를 나타내는 동차행렬,  $RH^B$ 는 다음과 같이 구해진다.

$$RH^B = RH^C \cdot BH^C^{-1} \quad (2)$$

$$BH^C = BH^B \cdot RH^C \quad (3)$$

실제로, 작업로봇은 구조적으로 정밀제어에 적합하게 되어 있으므로 순 기구학(forward kinematics)에 의해  $BH^C$ 의 값은 정확히 구해지므로 카메라의 자세,  $RH^C$ 만 구해지면 이동로봇의 자세,  $RH^B$ 는 (2)식에 의해 구해진다.

## III. 카메라 자세측정

카메라 자세측정(위치와 방향)은 카메라 모델링에 의해 공간상의 기준좌표계로 부터 컴퓨터 화상좌표계로의 변환관계를 이용하여 카메라의 내부 파라메터들과 함께 구해진다.

### 1. 카메라 투사모델

카메라 투사모델(Perspective Model)은 화상평면에서의 화상위치와 실제물체의 위치간의 관계를 나타낸다. 그림 3은 카메라의 기하학적 투사모델을 나타낸 것이다. 카메라 좌표계,  $\{C\}$ 는 광축의 중심에 설정하며,  $Z_c$ 축은 광축과 일치한다. 공간상에 존재하는 물체의 한점의 기준좌표계에 대한 좌표는  $P_r = (x_r, y_r, z_r)$ 로 카메라좌표계에 대한 좌표는  $P_c = (x_c, y_c, z_c)$ 로 둔다. 좌표계  $\{I\}$ 는 카메라의 화상좌표계이며 카메라좌표계로 부터 초점거리만큼 떨어진 화상평면위에 설정한다. 또한, 좌표계  $\{F\}$ 는 컴퓨터 메모리 좌표계로 설정한다.  $f$ 는 카메라의 유효초점거리를 나타낸다.

물체의 한점  $P_r$ 에 대한 화상 평면에서의 대응점  $P_i = (x_i, y_i)$ 는 카메라 좌표계에서의  $P_c$ 에 대응하는 화상좌표계의 값이며, 이는 다시 컴퓨터 메모리상의 좌

표값  $(x_f, y_f)$ 로 대응된다.

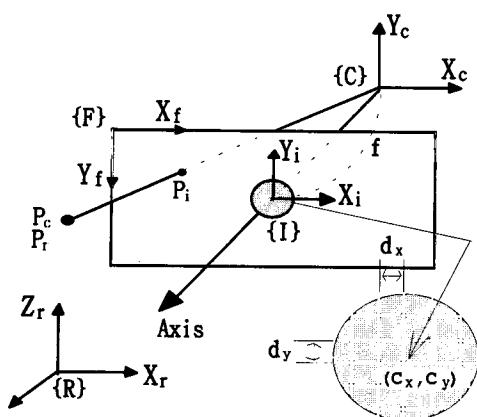


그림 3. 카메라 투사모델

Fig. 3. Perspective model of camera.

그림 3에서  $d_x$ ,  $d_y$ 는 x축 및 y축의 픽셀 간의 간격을 나타내며 카메라의 화소수와 활상면적의 크기에 의해 구해지며 활상좌표값을 컴퓨터 메모리 좌표값으로 변환할 때 사용된다.  $(c_x, c_y)$ 는 컴퓨터 메모리 좌표계에서 활상의 중심좌표를 나타낸 것이며, R.Y.Tsai<sup>[14]</sup>의 연구에 의하면 중심좌표  $(c_x, c_y)$ 가 10개 픽셀 이내에서 변경될 경우에는 3차원 측정의 정확도에 크게 영향을 미치지 않으므로 본 논문에서는 활상좌표계의 원점을 컴퓨터 메모리의 중심에 두고 카메라의 자세측정을 수행하는데 필요한 파라메타에 포함시키지 않는다. 카메라 투사모델로 부터 카메라 자세측정에 필요 한 기본적인 수식과 추정되어야 할 파라메타들은 기준좌표계로 부터 컴퓨터 메모리 좌표계로의 변환관계를 이용하여 구할 수 있다.

로봇/비전 시스템의 좌표계 변환에서 알 수 있듯이 고정된 물체에 대하여 카메라 좌표계로 표시된  $P_c$  값은 기준좌표계를 기준으로 표시된  $P_r$ 로 다음과 같이 변환된다.

$$P_L = R P_c + T \quad (4)$$

여기서 R과 T는 각각 두 좌표계간의 회전행렬과 위치벡터이다

카메라좌표계에서 표현되는 3차원 물체의 좌표  $P_c$   
 $= (x_c, y_c, z_c)$ 를 2차원 화상좌표  $P_i = (x_i, y_i)$ 로 투사  
 변화하는 식은 다음과 같다.

$$x_i = f \frac{x_c}{z} \quad (5)$$

$$y_i = f \frac{y_c}{z_c} \quad (6)$$

여기서  $f$ 는 카메라의 유효 초점거리이며, 화상좌표는 선형적인 편홀모델에 의한 값이며, 렌즈의 왜곡은 무시하였다.

화상좌표계에서의 X축과 Y축이 서로 다른 스케일을 가지나, Y축 방향의 주사선 수와 컴퓨터 메모리의 행의 수를 일치시키면, 화상평면에서의 실제 화상좌표값  $(x_i, y_i)$ 은 컴퓨터 메모리에서의 화소 좌표값  $(x_f, y_f)$ 으로 다음과 같이 표시된다.

$$y_i = d_v(y_f - c_v) \quad (7)$$

$$x_i = S^{-1} d_x (x_f - c_v) \quad (8)$$

여기서  $S$ 는  $x$ 축의 카메라 스케일계수(scale factor)를 나타내며,  $d_x$ ,  $d_y$ ,  $c_x$ ,  $c_y$ 의 값은 카메라의 사양으로 지정된 값이다. 역으로, 컴퓨터의 영상처리에 의해 구해지는 화소의 값인  $(x_f, y_f)$ 를 식(7) 및 식(8)에 대입하면 실제 회상좌표의 값을 구하게 된다.

## 2. 카메라 자세측정

카메라 자세측정은 일반적으로 카메라의 외부 파라메타로 불리는 회전행렬, R과 위치벡터, T를 구하는 것이다. 카메라의 내부 파라메타는 카메라 및 렌즈의 사양인 초점거리,  $f$ 와 화상스케일계수,  $S$ 이다. 카메라 파라메타들을 구할 경우 먼저 직선 대응관계를 이용하여 회전 행렬, R과 내부파라메타를 구하고, 그 다음에 각 점들의 독립적인 대응관계를 이용하여 위치벡터, T를 구할 수 있다<sup>[3]</sup>.

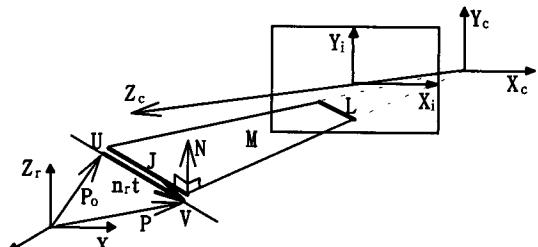


그림 4. 3차원 직선과 2차원 직선의 통사평면

Fig. 4. Projecting plane of a 3D line and a 2D line

그림 4에서 보듯이, 3차원 공간의 한점  $U=(x_0, y_0, z_0)$ 을 지나고  $0^\circ$  아닌 방향벡터  $n_r = [i \ j \ k]^T$ 에 평행한 직선을  $J$ 라 하고 이 직선 위의 점을  $V=(x, y, z)$

2)라 하면 기준좌표계에 대한 이 직선의 방정식은 다음과 같이 표시된다.

$$J : P = n_r t + P_0 \quad (9)$$

여기서  $n_r$ 는 직선의 단위방향벡터(directional vector),  $t$ 는 상수,  $P_0$ 와  $P$ 는 기준좌표계에 대한 점  $U$ 와  $V$ 의 위치벡터이다.

이 3차원 직선  $J$ 에 대응하는 화상좌표계에서의 2차원 직선을  $L$ 이라 하면 이 직선의 방정식은 다음과 같이 표시된다.

$$L : Ax_i + By_i + C = 0 \quad (10)$$

여기서  $A, B, C$ 는  $A^2 + B^2 + C^2 = 1$ 의 관계를 만족하는 상수들이다.

식(5)과 식(6)을 이용하여 카메라좌표계, {C}에 대한 좌표값  $(x_c, y_c, z_c)$ 으로 나타내면 다음과 같다.

$$M : A x_c + B y_c + f^{-1} C z_c = 0 \quad (11)$$

$M$ 은 3차원 공간의 직선  $J$ 와 이 직선이 화상좌표계에 투사된 직선  $L$ 을 포함하는 평면의 방정식이 된다. 투사평면  $M$ 의 법선벡터(normal vector)를  $N$ 이라하면  $N$ 은 투사평면  $M$ 과 직교하고 다음과 같이 표시된다.

$$N = [A \ B \ f^{-1}C]^T \quad (12)$$

3차원 직선  $J$ 의 방향벡터,  $n_r$ 를 카메라좌표계에서의 방향벡터,  $n_c$ 로 변환하면

$$n_c = R^T n_r \quad (13)$$

로 되며,  $R$ 은 기준 좌표계와 카메라 좌표계 사이의 회전행렬을 나타낸다.

3차원 공간의 직선  $J$ 는 투사평면  $M$ 상의 직선이고, 직선  $J$ 의 방향벡터  $n_c$ 는 투사평면  $M$ 의 법선벡터  $N$ 과 항상 직교하므로

$$n_c^T R N = 0 \quad (14)$$

가 된다.

3차원 공간상의 두 개의 점  $U, V$ 에 대응하는 화상평면상의 두개의 점  $P_i(x_i, y_i), P_j(x_j, y_j)$ 가 주어지면, 화상평면상의 점  $P_i$ 와  $P_j$ 의 좌표값을 식(10)에 대입하여 두개의 점으로 구성되는 화상평면상의 직선식에 의

해  $A, B, C$ 와 법선벡터  $N$ 은 다음과 같이 구해진다.

$$A = (y_j - y_i), \ B = (x_j - x_i), \ C = (x_j y_i - x_i y_j) \quad (15)$$

$$N = [A \ B \ f^{-1}C]^T \quad (16)$$

또한, 공간상의 두점  $U, V$ 를 연결하는 직선의 방향벡터  $n_r$ 은 다음과 같다.

$$n_r = (P_0 - P) / \|P_0 - P\| \quad (17)$$

여기서  $\|P\|$ 는  $P$ 의 유크리디언 노름(Euclidean norm)을 나타낸다.

실제 화상평면좌표값  $(x_i, y_i)$ 는 식(7) 및 (8)에서 보듯이 스케일계수  $S$ 를 포함하고 있으므로  $S$ 를 파라메타로 분리하기 위해서  $(x_f, y_f)$ 의 값으로 대치하면,  $A_f = (y_{f,i} - y_{f,i}), B_f = (x_{f,i} - x_{f,i}), C_f = (x_{f,i} y_{f,i} - x_{f,i} y_{f,i})$  고 법선벡터  $N$ 은 다음과 같이 표시된다.

$$N = [A_f \ S^{-1}B_f \ S^{-1}f^{-1}C_f]^T \quad (18)$$

식(7) 및 (8)에서  $d_x, d_y, c_x, c_y$ 는 정해진 값으로  $d_x = d_y = 1, c_x = c_y = 0$ 로 가정한다. 식(17), (18)을 식(14)에 대입하면 다음과 같이 표시된다.

$$[i \ j \ k] \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \\ r_4 & r_5 & r_6 \\ r_7 & r_8 & r_9 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_f \\ S^{-1}B_f \\ S^{-1}f^{-1}C_f \end{bmatrix} = 0 \quad (19)$$

여기서  $n_r = [i \ j \ k]^T$ 는 (17)식에 의해 구해진 벡터를 의미한다. 식(19)를 미지의 파라메타들을 포함하는 항들로 구성된 벡터식으로 정리하면 다음과 같다.

$$G \cdot x = b \quad (20)$$

여기서  $G = [iA \ iB \ iC \ jA \ jC \ kA \ kB \ kC], b = -jB$ 이며 미지의 항으로 구성된 벡터  $x$ 는  $x = [S \cdot r_1 \cdot r_5^{-1} \ r_2 \cdot r_5^{-1} \ f^{-1} \cdot r_3 \cdot r_5^{-1} \ S \cdot r_4 \cdot r_5^{-1} \ f^{-1} \cdot r_6 \cdot r_5^{-1} \ S \cdot r_7 \cdot r_5^{-1} \ r_8 \cdot r_5^{-1} \ f^{-1} \cdot r_9 \cdot r_5^{-1}]^T$ 이다. 회전행렬  $R$ 은 9개의 요소들을 가지나 내부의 구속조건들로 인하여 독립변수의 개수는 3개 밖에 없으므로 (20)식을 5개 얻을 수 있다면 회전 행렬,  $R$ 은 카메라 내부 파라미터 값  $f$  및  $S$ 와 함께 구해진다.

실제 자세측정 시에는 계수행렬의 값이 특이(Singular)한 경우가 많이 발생하므로 행렬을 특이값 분해(Singular Value Decomposition)에 의해 최소

자승법을 이용하여 구한다. 즉, 5개 이상 일례로, 계산의 편의를 위해 8개 직선대응 관계로 식(20)을 중첩하여 행렬식으로 구한 후 행렬 G의 특이값 분해에 의해  $G = UDV^T$  를 구하고 식(20)의 해를 다음과 같이 구한다.

$$x = (V \cdot D^{-1}) \cdot (U^T \cdot b) \quad (21)$$

여기서 D는 행렬의 크기가  $8 \times 8$ 이며 양의 값을 가지는 대각행렬(diagonal matrix)이고 U와 V는 행렬의 크기가 각각  $10 \times 8$ ,  $8 \times 8$ 인 직교행렬(orthogonal matrix)이다.

식 (21)에서 카메라의 자세를 위한 회전 행렬, R을 구하였다. 다음은 카메라 자세의 위치벡터 T를 계산하기 위해서 특징점들의 대응관계를 이용한다. 식(4)를 식(22)와 같이 변형하여 식(5)과 식(6)에 대입하면 화상좌표는 식(23), (24)와 같이 구해진다.

$$P_c = R^{-1} P_r - R^{-1} T = P_r' - T' \quad (22)$$

$$x_i = f \frac{x_r' - T_x'}{z_r' - T_z'} \quad (23)$$

$$y_i = f \frac{y_r' - T_y'}{z_r' - T_z'} \quad (24)$$

여기서,  $P_r' = (x_r', y_r', z_r')^T$ 는  $P_r$ 의 기준좌표계에 대하여  $R^{-1}$  만큼 회전된 벡터를 나타내고  $T' = [T_x' \ T_y' \ T_z']^T$ 는 카메라가 이동한 위치벡터 T에 대하여  $R^{-1}$  만큼 회전된 벡터를 나타낸다. 식 (23) 및 (24)로부터 최소자승법을 사용하여 위치벡터 T를 구하기 위해 선형방정식으로 변환하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} f & 0 & -x_i \\ 0 & f & -y_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_x' \\ T_y' \\ T_z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f \cdot x_r' - x_i \cdot z_r' \\ f \cdot y_r' - y_i \cdot z_r' \end{bmatrix} \quad (25)$$

식 (25)는 3개의 미지수 ( $T_x'$ ,  $T_y'$ ,  $T_z'$ )를 갖는 선형방정식이며, 하나의 대응점에 의해 두개의 식이 주어진다. 즉 두개 이상의 대응점이 주어지면 (25)식의 중첩에 의해 과결정계가 되어 최소자승법을 이용하여  $T_x'$ ,  $T_y'$  및  $T_z'$ 의 값들이 구해진다. 이들과 앞에서 구한 R 값으로부터  $T_x$ ,  $T_y$  및  $T_z$ 의 값들이 구해진다.

이상과 같이 식(19)와 식(25)를 이용하면 기준좌표계로 부터 카메라좌표계 사이의 동차행렬을 구할 수

있으므로 기준좌표계로부터 알고있는 물체의 위치를 사용하여 기준좌표계로부터 카메라의 이동위치 및 방향, 즉,  $RH^C$  를 알 수 있다. 따라서, (2)식에  $RH^C$  의 값을 대입하면 이동로봇의 끝판의 자세를 나타내는 동차행렬  $RH^B$  를 계산할 수 있다.

#### IV. 자세 측정 및 제어 실험

##### 1. 카메라 자세 측정 실험

카메라를 부착한 이동/작업용 로봇 시스템이 크기가 다양한 육각볼트와 너트의 조립작업을 수행하는데 필요한 시뮬레이션을 행하였다. 실험에 사용된 CCD 카메라는 삼성 SFA-410ED 카메라로 카메라의 화소수는 768x494, 활상면적은 6.54mmx4.89mm,  $d_x$ 와  $d_y$ 는 각각 0.0085mm, 0.0098mm이고 초점거리가 16mm인 렌즈를 사용하였으며, 화상처리는 고속의 32bit DSP 칩(TMS320C30)을 내장하고 해상도가 640x480인 삼성전자 FARA MVB-02 화상처리 전용 보드를 이용하였다. 물체의 특징점들의 X, Y, Z 좌표는 각각 (0, 4, 0.42), (-4, 3, 0.42), (-5, -2, 0.32), (-1, -4, 0.4), (3, -3, 0.4), (4, 2, 0.25)로 정하였다. 카메라의 내부파라메터를 추정하기 위해서 기준좌표계에 카메라 좌표계를 일치시킨 상태에서 X축을 중심으로  $150^\circ$  회전하여 X, Y, Z 방향으로 [0, -18, 33.6] 만큼 카메라좌표계를 이동하여 물체가 카메라의 화면내에 있도록 카메라의 자세를 선택하였다. 표 1은 카메라가 위의 자세에서 구한 초점거리(f), 스케일 계수(S), 회전각도(XYZ), 위치벡터(T)를 나타낸 것이다.

표 2는 카메라의 위치와 방향을 변경하면서 계산한 카메라 파라메타 f와 S의 측정값과 오차를 나타낸 것이다. 측정값은 각각의 자세에서 10회의 값을 평균하여 구하였고, 파라메타의 평균값은 측정값들을 평균하였으며 오차는 평균값에 대한 상대오차를 나타낸 것이다. 오차가 적은 값들은 카메라 파라메타의 설정에 있어서 보다 안정하다는 것을 알 수 있으며 오차가 큰값들은 전체 파라메타들에 대해서도 크게 영향을 미친다.

표 3은 카메라를 X방향을 기준으로 여러 각도로 회전하면서 각각의 회전방향에 대하여 카메라의 위치를 이동하여 자세를 측정한 후 계산한 값에 대한 카메라 위치의 오차를 나타낸 것이다. 오차는 기준좌표계와

표 1. 카메라의 파라메타 추정

Table 1. Estimation of camera parameters.

f(mm)	S	위치벡터		회전각	
		Tx	-0.1567	X	149.5
		Ty	-17.9703	Y	3.4
		Tz	33.6506	Z	0.0

카메라 좌표계간의 거리에 대한 상대오차를 나타낸 것이다. 표 3에서의 오차율은 일반적인 이동로봇의 오차 값보다 적은 값이므로 이동로봇의 정밀제어에 활용된다.

표 2. 카메라 파라메타의 측정값과 상대 오차

Table 2. Measured values and % Error of camera parameter.

횟수	f(mm)	오차(%)	S	오차(%)
1	17.542	0.22	0.9989	0.65
2	17.227	1.57	0.9931	1.22
3	17.450	0.29	1.0061	0.07
4	17.302	1.14	1.0002	0.52
5	17.989	2.78	1.0290	2.35
평균	17.502	1.20	1.0054	0.96

표 3. 카메라 위치의 측정값과 상대오차

Table 3. Measured values and % error of camera position.

회전각(°)	측정(cm) (x,y,z)	계산(cm) (x,y,z)	오차(%)
155	0, -17.4, 40.5	0.02, -17.35, 40.51	0.02
150	0, -18.0, 33.6	0.15, -17.97, 33.65	0.07
145	0, -17.0, 33.0	0.12, -16.98, 32.26	1.79
144	0, -20.6, 30.4	0.23, -20.54, 30.65	0.47
140	0, -19.3, 24.2	0.34, -19.12, 22.84	3.76

## 2. 이동 로봇의 동력학 제어실험

이동 로봇의 정밀한 제어를 위하여 고정된 자세를 갖는 작업 로봇의 핸드에 카메라를 부착하여 이동 로봇으로 작업 로봇을 적합한 위치로 옮겨주는 실험을 행하였다. 실험을 간략화하기 위하여 이동 로봇이 기준좌표계로 (0, 0, 600)(mm)의 위치로부터 (300, 0, 600)(mm)의 위치로 이동하는 동안 고정된 위치 (400, 0, 710)(mm)에 있는 육각 볼트의 영상을 사용하여 이동 로봇의 자세를 측정하고 이 측정된 값을 기준으로 원하는 순시 명령제작값(위치, 속도 및 가속도 명령값)들을 보정하여 각 바퀴 구동 모터에 전달하도록

하였다. 사진 1은 본 실험에 사용된 카메라를 부착한 이동/작업용 로봇을 보여준다.

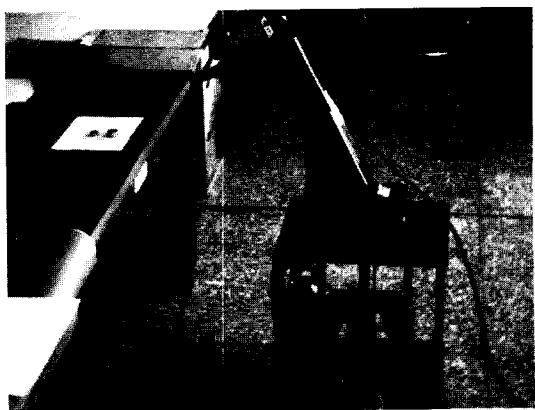
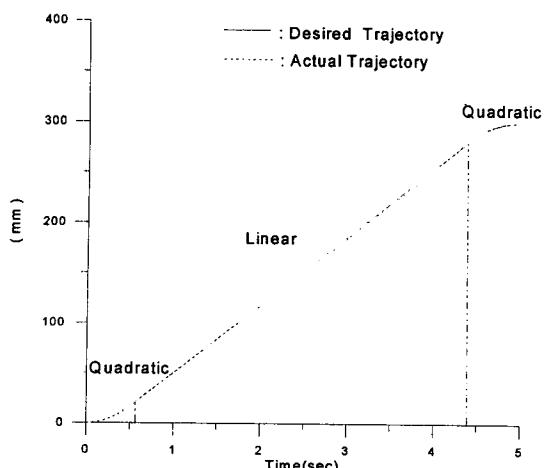


사진 1. 카메라를 부착한 이동/작업용 로봇

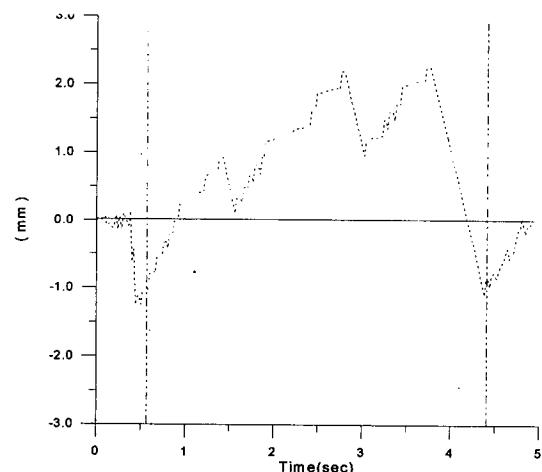
Pic. 1. Mobile/task robot with a camera.

비전정보를 이용하여 이동 로봇의 동력학 제어를 실현한 결과를 그림 5에 보여준다. 그림 5(a)에서 4.42초 이후에 이동 로봇은 일정하게 감속을 하며, 이때부터 카메라에서 취득한 영상의 처리에 의하여 이동로봇을 제어한다. 감속으로 전환되기 이전까지는 카메라가 육각볼트의 영상을 취득할 수 없으므로 각 바퀴에 요구되는 순시 명령제작값들을 이동 로봇의 원하는 이동 경로에 대응하여 계산해서 이 값을 매 50msec 마다 주제어기(PC 586)로 부터 각 모터 제어기로 전송되어지며, 각 모터 제어기(80C196kc 사용)는 20msec의 제어 주기를 갖고 동력학 제어를 수행한다.

이동 로봇이 감속 구간에 도달하면 비전 정보에 의해 이동 로봇의 위치를 측정한 후 요구되는 순시 명령 제작값을 매 100msec 마다 보정하여 각 모터 제어기로 전송하였다. 비전 시스템 (DSP보드 및 PC 586)에서 카메라로 취득한 영상을 처리하여 이동 로봇의 위치를 계산하는 시간이 약 70msec였기에 순시 명령 제작값을 두 번에 한번씩 보정하여 주었다. 그림 5(b)에서 보듯이 제어오차가 점진적으로 감소함을 알 수 있다. 실험결과 비전을 이용하여 이동 로봇의 자세측정을 하고 이 값을 사용하여 순시 명령제작을 보정해 준 것이 바퀴에 부착된 엔코더(Encoder)의 값을 실제 값으로 처리하여 실험한 결과<sup>[8]</sup>에 비하여 위치제어의 정도가 향상됨을 확인하였다.



(a) 위치 궤적  
(a) Position trajectory



(b) 제어 오차  
(b) Control error

그림 5. 위치 궤적과 제어오차

Fig. 5. Position trajectory and control error.

## V. 결론

본 논문에서는 작업로봇의 핸드에 카메라를 부착하여 이동로봇의 자세를 인식함으로써 이동/작업용 로봇을 정밀하고 효율적으로 제어할 수 있는 방법을 제안하였다. 한대의 카메라로 고정된 물체의 화상을 취득한 후 실제 물체와 화상간의 선 대응관계를 이용하여 카메라의 내부 파라미터와 카메라의 자세를 측정하고 카메라/로봇의 좌표계변환을 통해 이동로봇의 자세를 측정하였다. 측정된 이동 로봇의 자세는 이동로봇의

이동에서 표면의 불확실성으로 인해 생기는 오차를 보정하기 위해 순시 궤적계획을 수정하는데 사용되었다. 비전 정보의 활용에 의한 이동 로봇의 동적 제어는 이동 로봇의 정밀한 제어를 통해 작업 로봇에 안정된 베이스를 제공하는 기법으로 타당함을 실험을 통해 확인하였다. 비전 처리의 시간 때문에 이동 로봇의 자세 측정값을 제어 루프에 직접 사용하지 않았으나, 고 성능 DSP의 개발과 더불어 가능하게 될 것이다.

카메라 자세측정에서 발생되는 오차를 감소시킬 수 있는 카메라 파라미터 보정기법과 이동/작업용 로봇의 자세오차를 효율적으로 보정하여 고기능 이동/작업용 로봇을 실현하는 것이 본 연구의 향후 과제이다.

## 참고 문헌

- [1] 주진화, 명지태, 박의열, 이장명, “마크로-마이크로 로보트의 제어에 관한 연구”, 대한전자공학회 논문지, vol. 31 no. 9, pp. 47-55, 1994
- [2] R.Y.Tsai, “A versatile camera calibration technique for high accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses,” *IEEE Trans. on Robo. and Auto.*, vol. 3, pp. 323-344, Aug. 1987.
- [3] Yuncui Lui, Thomas S. Huang, Olivier D. Faugeras, “Determination of Camera Location from 2-D to 3-D Line and Point Correspondences,” *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 12, no. 1, pp. 28-37, 1990.
- [4] P. Rocco, “Stability of PID Control for Industrial Robot Arms,” *IEEE Trans. Robo. and Auto.*, vol. 12, no. 4, Aug. 1996.
- [5] R. Kelly and R. Salgado, “PD Control with Computed Feedforward of Robot Manipulators: A Design Procedure,” *IEEE Trans. Robo. and Auto.*, vol. 10, no. 4, Aug. 1994.
- [6] C. C. Wang, “Extrinsic Calibration of a Vision Sensor Mounted on a Robot,” *IEEE Trans. on Robo. and Auto.*, pp. 161-175, 1992.
- [7] 조세진, 이기동, 이범희, “핸드-아이 로봇 시스템의 카메라 캘리브레이션 및 물체의 삼차원 위치측정”, 한국자동제어학술회의 논문집, pp. 1252-1257, 1994.

- [8] 이장명, 김용태, “이동 로보트의 동적제어 구현”, 대한전자공학회 논문집, vol. 34 no. 1, pp. 54-64, 1997.
- [9] K.D.Gremban, C.E.Thorpe, and T.Kanade, “Geometric Camera Calibration using System of Linear Equations,” *Proc. IEEE Conference on Robo. and Auto.*, pp. 562-567, 1988.
- [10] Chichyang Chen and Yuan F. Zheng, “A New Robotic Hand/Eye Calibration Method by Active Viewing of a Checkerboard Pattern,” *Proc. IEEE Int. Conf. on Robo. and Auto.*, pp. 770-775, 1993.
- [11] Roger Pissard-Gibollet and Patrick Rives, “Applying Visual Servoing Techniques to Control a Mobile Hand-Eye System,” *Proc. IEEE Int. Conf. on Robo. and Auto.*, pp. 166-171, 1995.
- [12] M. A. Turk, D. G. Morgenthaler, K.k.Gremlin, and M. Marra, “Video Road-
- Following for the Autonomous Land Vehicle,” *Proc. IEEE Int. Conf. on Robo. and Auto.*, pp. 273-280, 1987.
- [13] David J. Bennett, Davi Geiger, John M.Hollerbach, “Autonomous Robot Calibration for Hand-Eye Coordination,” *Int. Journal of Robotics Research*, vol. 10, no. 5, pp. 550-559, 1991.
- [14] Reimar K. Lenz, R.Y.Tsai, “Techniques for calibration of the scale factor and image center for high accuracy 3-D machine vision metrology,” *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 68-75, 1987.
- [15] Reimar K. Lenz, R.Y.Tsai, “Calibrating a Cartesian Robot with Eye-on-Hand Configuration Independent of Eye-to-Hand Relationship,” *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 11, no. 9, pp. 916-928, 1989.

## 저자 소개



韓萬龍(正會員)  
1986년 2월 부산공업대학교 전자  
공학과 학사. 1989년 2월 동아대  
학교 대학원 전자공학과 석사.  
1994년 3월 ~ 현재 부산대학교  
대학원 전자공학과 박사과정. 1994  
년 11월 ~ 현재 부산교통공단  
기전처 신호통신부 주관심 분야는 로봇/카메라 시스템  
설계 및 제어, Ticket & IC card 제어

李章明(正會員) 第34卷 S編 第1號 參照  
현재 부산대학교 공과대학 전자공  
학과 부교수  
부산대학교 컴퓨터 및 정보통신  
연구소 전자기술부장