

# 스테레오 비전에 기반한 6축 로봇의 위치 결정에 관한 연구

조한진\*(전남대 대학원), 박광호(전남대 대학원), 기창두(전남대 기계공학과)

## Position Control of Robot Manipulator based on stereo vision system

H. J. Cho(Mecha. Dept., CNU), K. H. Park(Mech. Eng. Dept., CNU) , C. D. Kee(Mech. Eng. Dept., CNU)

### ABSTRACT

In this paper we describe the 6-axes robot's position determination using a stereo vision and an image based control method. When use a stereo vision, it need a additional time to compare with mono vision system. So to reduce the time required, we use the stereo vision not image Jacobian matrix estimation but depth estimation. Image based control is not needed the high-precision of camera calibration by using a image Jacobian. The experiment is excuted as devided by two part. The first is depth estimation by stereo vision and the second is robot manipulator's positioning.

**Key Words :** Stereo vision, Image-based control, Image Jacobian, Hand-in-eye, Camera modeling

### 1. 서론

로봇 제어를 위한 비전 시스템에서 카메라의 수에 따라 양안시(binocular) 방식과 단안시(mono) 방식이 많이 사용되고 있다. 하지만 단안시의 경우 3차원의 공간을 2차원의 카메라에 투영함으로써 정보의 손실이 발생하므로, 로봇 제어에 필요한 정보를 영상으로부터 복원하기 위해 2대의 카메라를 이용한 스테레오 비전이 많이 사용되고 있다. 스테레오 비전은 기하학적으로 명료하여 정확성을 요구하는 비접촉식 3차원 계측[1][2] 및 무인자동차 등을 포함한 다양한 분야에 응용되고 있다. 이러한 장점에도 불구하고 스테레오 비전은 영상처리 소요시간의 문제로 응용분야가 제한되어왔다.

비전 시스템으로부터 정보를 받아 로봇의 매니퓰레이터의 자세를 제어하는 방법으로 크게 위치 기반 제어(Position-based control)와 영상 기반 제어(Image-based control)로 나눌 수 있다. 위치 기반 제어에서 제어법칙을 생성하기위해 영상으로부터 특징을 추출한 후 영상 내 물체의 위치가 결정된다. 그러나 영상 기반 제어에서는 물체의 모델링과 영상해석에 의한 계산지연을 줄이기 위해 영상 특징을 사용하며 물체의 카메라 이미지 상의 변화와 카메라 자세사이의 관계인 이미지 자코비안을 가지고

로봇을 제어하는 방법이다.

본 논문에서는 스테레오 비전을 대상물체로의 깊이추정에 사용함으로써 로봇 동작 속도의 향상을 목적으로 하였고, hand-in-eye 카메라 구성 방식과 영상 기반 제어를 사용하여 로봇의 위치 정렬를 수행하였다. 논문의 구성은 제 2장에서 스테레오 비전을 이용한 깊이 추정 및 카메라 모델, 3장에서 영상 기반 제어, 그리고 실험 및 결론 순으로 기술한다.

### 2. 스테레오 비전

#### 2.1 깊이 추정

본 논문에서는 카메라 렌즈 왜곡을 무시한 핀홀(Pin-Hole) 카메라 모델[3]을 가정한다. 좌우 영상의 정합을 위해 한 점에 대한 정합 후보는 이 점에 대한 다른 쪽 영상에서의 에피플라 선 위에만 존재한다[4]는 에피플라 구속조건과 스테레오 비전의 평행 카메라 조건을 이용한다. 두 대 카메라의 초점거리  $f$  가 서로 같고, 좌측 우측 각각의 영상 좌표를  $p^l(x_l, y_l, z_l)$  과  $p^r(x_r, y_r, z_r)$  라 할 때, 두 카메라의 광축을 각각  $z_l, z_r$  로 하여 서로 평행하게 되도록 한다

좌측과 우측 렌즈의 중심 사이의 거리를  $d$  라 하고, 이 두 중심위치를 연결하는 선분을 베이스 라인이라고 한다. 삼차원 공간에서 좌측 영상의  $Z_1$  축과 공간 좌표계의  $Z$  축을 서로 일치 시킨다. 에피플라 구속조건을 가정하면 아래 그림 1 와 같은 구조가 된다.

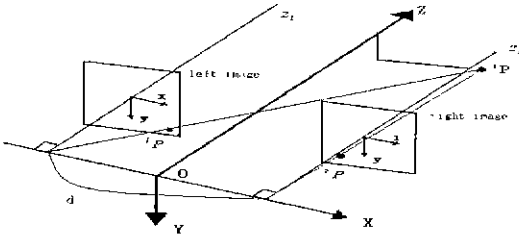


Fig. 1 Stereo camera

3 차원 공간상의 한 점 'P'가 좌, 우 영상면에 투영되었다고 가정하면 삼각형의 비례관계를 이용하여 식(1-a)와 식(1-b)로 구해진다.

$$x_l = f\left(X + \frac{d}{2}\right), \quad y_l = f \frac{Y}{Z} \quad (1-a)$$

$$x_r = f\left(X - \frac{d}{2}\right), \quad y_r = f \frac{Y}{Z} \quad (1-b)$$

위의 식으로부터 거리  $Z$ 는 식(2)과 같이 구해진다.

$$Z = \frac{df}{x_l - x_r} = \frac{df}{b} \quad (2)$$

## 2.2 카메라 모델링

물체의 영상면에 투영은 식(1-a,b)을 간단하게 한 식(3)로 표현된다.

$$x_c = f \frac{X}{Z}, \quad y_c = f \frac{Y}{Z} \quad (3)$$

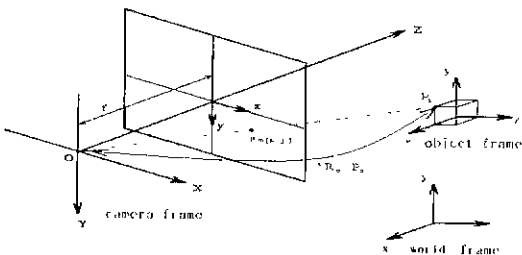


Fig. 2 Camera model

로봇의 기저 좌표계에 대한 카메라 좌표계의 위치벡터를  ${}^w p_c$  라 하자. 또한  $({}^w x_c, {}^w y_c, {}^w z_c)$ 는 카메라 좌표의 단위벡터를 나타낸다. 물체의 기준 좌표계에 대한 상대적 변환행렬을 위치  ${}^w P_0$  와 방향  ${}^w R_0$  로써 기술하면 식(4)와 같다.

$${}^c T_0 = \begin{bmatrix} {}^c R_0 & {}^c P_0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^c R_w {}^w R_0 & {}^c R_w ({}^w P_0 - {}^w P_c) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서  ${}^c T_0$  는 카메라의 좌표계에 대한 물체 좌표계로의 변환이다. 위의 변환은 아래 식(5)과 같은 형식으로 표현된다.

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^o X_1 \\ {}^o Y_1 \\ {}^o Z_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (5)$$

(3)식을 (5)식에 대입한 후 정리하고, 식의 간략화를 위해 점  $P_1$ 는 물체 좌표계의  $XY$  면에 놓여있다 고 가정하면 다음식 (6.a)와 (6.b)를 얻는다.

$$f {}^o X_1 \frac{R_{11}}{Z} + f {}^o Y_1 \frac{R_{12}}{Z} + f \frac{X}{Z} - x_l {}^o X_1 \frac{R_{31}}{Z} - y_l {}^o Y_1 \frac{R_{32}}{Z} = x_l \quad (6.a)$$

$$f {}^o X_1 \frac{R_{11}}{Z} + f {}^o Y_1 \frac{R_{12}}{Z} + f \frac{Y}{Z} - y_r {}^o X_1 \frac{R_{31}}{Z} - y_l {}^o Y_1 \frac{R_{32}}{Z} = y_l \quad (6.b)$$

$N$  개의 특징점에 대한  ${}^o P_i$  를 알고 있다면 카메라 파라미터의 추정은 최소자승 오차법(minimum least square method)을 이용하여 얻을 수 있으며,  $R$  은 회전행렬의 직교성에 의해 구할 수 있다.

## 3. 영상 기반 제어

영상 기반 제어에서는 로봇 매니퓰레이터의 피드백 명령은 영상 내에서 특징점의 속도에 기반하여 구해지며, 매니퓰레이터 위치의 미소 변화에 대한 영상 특징의 미소 변화 관계를 나타내는 이미지 자코비안[5]을 결정해야 한다. 자코비안 식을 얻기 위해 식(3)의 양변을 미분하면 식(7)과 같다

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{f}{Z} & 0 & -\frac{fX}{Z^2} \\ 0 & \frac{f}{Z} & -\frac{fY}{Z^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{Z} \end{bmatrix} \quad (7)$$

${}^w v_c$  과  ${}^w \omega_c$  을 카메라의 선속도와 각속도를 나타내고 물체가 정지해 있다고 하면 식(7)은 다시

좌표계 간의 관계식인 식(8)과 같이 정리된다

#### 4. 실험

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = {}^l R_w \{ -{}^w v_c + ({}^w P_o - {}^w P_c) {}^w \omega_c \} \quad (8)$$

(8)식을 영상 특징치의 속도로 나타내면 식(9)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} {}^c v_c \\ {}^c \omega_c \end{bmatrix} \quad (9)$$

${}^c v_c, {}^c \omega_c$  는 각각 카메라 좌표계에 대한 카메라의 선속도와 각속도이다. 이 때 이미지 자코비안 행렬  $J$  는 식(10)과 같다.

$$J = \begin{bmatrix} -\frac{f}{Z} & 0 & \frac{x}{Z} & \frac{xy}{f} & -\frac{(x^2+f^2)}{f^2} & y \\ 0 & -\frac{f}{Z} & \frac{y}{Z} & 1+\frac{f^2}{Z} & -\frac{xy}{f} & -x \end{bmatrix} \quad (10)$$

영상의 목표좌표를  $v^l$  라 하고 초기 영상좌표를  $u^l$  라 하면 선형보간법을 이용하여 가상의 영상 목표 벡터  $x$  를 제어의 상태벡터로써, 제어입력  $u$  와 함께 식(11)으로써 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} x(s) &= (1-s)u^l + sv^l \\ &= [(1-s)u_0^l + sv_0^l, (1-s)u_1^l + sv_1^l, \dots, (1-s)u_n^l + sv_n^l] \end{aligned} \quad (11)$$

위 식의 영상벡터  $x$  와 속도 벡터  $v$  는 식(12-a)와 식(12-b)가 된다.

$$x = [x_1 \quad y_1 \quad \dots \quad x_n \quad y_n]^T \quad (12-a)$$

$$u = [{}^c v_c \quad {}^c \omega_c]^T \quad (12-b)$$

속도벡터  $u$  는 식(13)과 같이 얻을 수 있다.

$$u = (J^T J)^{-1} J^T \dot{x} \quad (13)$$

여기서  $N$  개의 특징점을 사용한다면, 이미지 자코비안  $J$  는 식(14)처럼 쓸 수 있다.

$$J = [J(x_1, y_1, Z_1) \quad \dots \quad J(x_n, y_n, Z_n)]^T \quad (14)$$

위에서 로봇을 목표로 보내기 위해 영상면에서 로봇 매니퓰레이터와 목표물과의 오차를 최소화 하는 비선형 자승 오차 최소화를 사용한다[6].

본 논문에서는 스테레오 비전의 사용을 이미지 자코비안 추정이 아닌 거리 추출에만 적용함으로써 전체적인 작업시간을 줄이는 방법을 제시하고, 제안된 시스템을 목표로의 위치정렬 실험을 통해 검증하고자 한다.

실험에 사용된 장비는 영상처리 보드(Matrox Meteor II Image Processing Board)를 사용해 영상 취득 및 영상처리를 수행하였고, 스테레오 비전에 사용된 카메라는 사양이 동일한 PULNIX CCD 카메라를 사용했으며, 기본 해상도는 640 X 480 이다. 로봇은 삼성 FARAMAN-AS1 6 축 로봇이며, 로봇의 제어기는 MMC 보드를 사용했다.

실험은 hand-in-eye 방식을 이용하여 광축은 서로 수직이 되게 하고, baseline 에 수직이 되게 평행 스테레오 카메라의 표준모델을 사용하였다. 그림 3 에 실험 구성도를 나타내었다.

입력영상에 대해 전기적인 잡음을 제거하고, 영상을 이진화하는 이미지 전처리 과정 후 추출된 특징점들로부터 스테레오 비전을 통해 물체까지의 거리를 추출해 낸다. 로봇의 기저 좌표계에 대한 카메라의 보정은 Tsai 알고리즘[7]을 이용하였다. 로봇의 제어는 목표 영상위치와 초기 영상위치 간의 가상 목표 영상을 만들어 영상의 오차기 작아지도록 로봇의 각 관절각을 추정, 추정된 관절각은 로봇 매니퓰레이터에 전달하고, 목표치와 비교하여 실제 목표 영상 위치까지의 허용오차 내까지 반복하는 시험을 수행하였다.

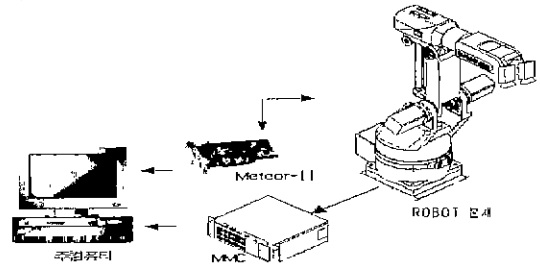


Fig. 3 Experimental Setup

영상의 특징치는 목표물에 서로 다른 크기를 갖는 4 점을 부착시켜 변적에 관하여 스테레오 일치점을 찾고, 목표물의 회전 성분도 구할 수 있도록 하였다.

실험은 스테레오 비전을 이용한 물체의 거리 검출과 대상 물체를  $x$  축으로 200mm (338 pixel),  $y$  축으로 150mm (207 pixel)을 이동하여 로봇의 매니퓰레이터를 목표 물체로 정렬하는 실험을 실시하였다.

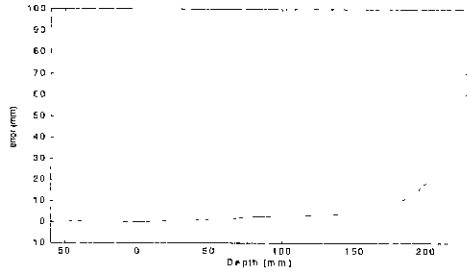


Fig. 4 Depth detection error

그림 4는 로봇 매니퓰레이터의 깊이 변화에 따른 error를 나타낸다. 실험 결과에서 물체 방향으로 150mm가 넘어서 깊이를 검출하게 되면 카메라의 블러링 효과에 의한 오차가 커지는 현상이 발생한다.

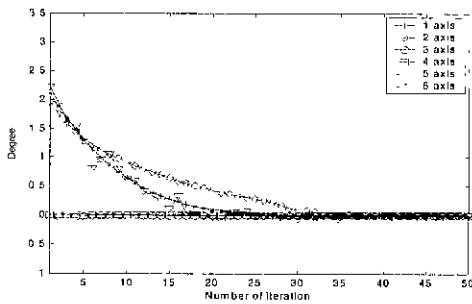


Fig. 5 Joint Angle

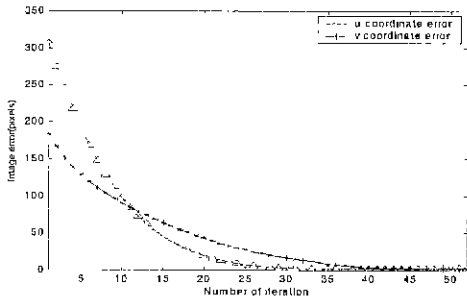


Fig. 6 Experimental result of image error

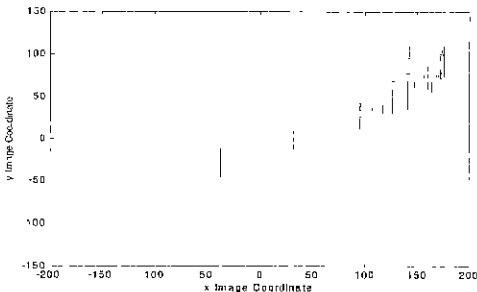


Fig. 7 Object movement on image plane

그림 5는 목표 물체로 이동할 때 로봇의 각 관

절값을 나타내며, 그림 6은 영상에서 초기 영상과 목표 영상의 오차를 나타내었으며, 그림 7은 카메라에 나타난 영상면에서의 물체의 움직임을 나타내었으며, 단계가 반복됨에 따라 목표물에 수렴하는 것을 알 수 있다.

## 5. 결론

한 대의 카메라를 사용할 경우 특징치 자코비안에 들어가는 거리 정보를 로봇의 기구학에 의존하지 않고는 구할 수 없다는 문제점이 있다. 하지만 이를 극복하기 위해 스테레오 비전을 이용하면, 전체적인 소요시간의 증가를 피할 수 없다.

본 연구에서는 위의 문제점을 개선하기 위해 스테레오 비전을 깊이정보 추정에만 적용하는 방법을 이용함으로써 전체적인 처리 속도 증가를 얻어내고, 로봇 매니퓰레이터를 목표에 2 픽셀 이내로 위치 정렬시킴으로써 제안된 방법을 검증했다.

그림 4에서 깊이 추정의 오차는 자동 초점 카메라의 사용으로 극복될 수 있고, 목표에 보다 정확히 위치 정렬 시키기 위해서는 견고한 특징점을 추출하는 연구가 필요할 것으로 생각된다.

## 참고문헌

1. 大森降司, "視覚系をモデルとした兩眼視立體視の試作", 計測自動制御學會論文集 Vol. 23, NO 5, 1987
2. 大森降司, "立體視", 計測と制御, Vol. 26, No 4, 1987.
3. G. Xu and Z. Zhang, "Epipolar Geometry in Stereo, Motion and Object Recognition", Kluwer Academic Publishers, 1996.
4. 권혁민, "에피폴라 기하를 이용한 특징점 정합", 한국정보과학회, Vol. 25, pp. 446-448, 1998.
5. A.C. Sanderson, L.E. Weiss and C.P. Neuman, "Dynamic sensorbased control of robots with visual feedback", IEEE Trans. Robot. Automat., vol. RA-3, pp.404-417, Oct. 1987.
6. J. A. Piepmeier, G. V. Mc Murray and H. Lipkin, "Tracking a Moving Target with Model Independent Visual Servoing A Predictive Estimation Approach", Papers Robotics 98, Albuquerque, NM, 26-30, April 1998.
7. R. Y. Tsai, "A versatile camera calibration technique for high accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses", IEEE Journal of Robotics and Automation, vol. 3, no 4, Aug 1987.