

論文96-33B-1-3

# 동적 물체에 대한 로봇 매니플레이터의 Visual Servoing<sup>1)</sup>

## (Visual Servoing of Robotic Manipulators for Moving Objects)

沈 貴 寶 \*, 吳 承 旭 \*\*

(Kwee-Bo Sim and Seung-Wook Oh)

## 요 약

본 논문은 로봇 매니플레이터의 엔드 이펙터(end-effector)에 부착된 스테레오 카메라를 사용하여 움직이는 물체의 초기자세나 이동에 관한 정보가 미지인 3차원 물체의 파지(grasping)를 위해서, 로봇 매니플레이터의 자세(위치 및 방위)제어에 관한 새로운 비주얼 서보잉(visual servoing)을 제안한다. 로봇 매니플레이터의 현재의 자세를 목표자세에 잘 추적하기 위해서 본 논문에서는 카메라 자세에 대한 대상물체의 자세변화와 이미지 상의 특징점 변화를 기술하는 관계식인 이미지 Jacobian을 미분변환을 이용하여 구했으며, 로봇 매니플레이터의 제어를 위해서는 간단한 PD제어기를 사용하였다. 마지막으로 다양한 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 제안한 수법의 유효성을 확인했다.

## Abstract

This paper presents a new method for visual servoing to control the pose(position and orientation) of the robotic manipulators for grasping the 3-D moving object whose initial pose and moving informations are unknown by using the stereo camera. The stereo camera is mounted on the end-effector of robotic manipulator. In order to track the current pose of robotic manipulator to the desired pose, we use the image Jacobian, which is described by the differential transform, relating the change in image feature point to the change in the object's pose with respect to the camera. In this paper the simple PD controller is adopted for the robotic manipulator to track the desired pose. Finally, the effectiveness of the proposed method is confirmed by some computer simulations.

## I. 서 론

로봇 매니플레이터의 엔드 이펙터가 작업 대상물인 물체를 안정하게 파지 하는 것(grasping)은 조립작업을 비롯하여 외부환경과 상호작용을 일으키는 대부분

의 작업에서 매우 중요한 문제로 현재 많은 연구가 진행되고 있다. 로봇 매니플레이터의 엔드 이펙터가 물체를 안정하게 파지하기 위해서는 대상으로 하는 물체의 정확한 위치와 방향으로 로봇 매니플레이터의 자세를 이동해야 한다. 만일 물체의 위치와 형상 그리고 방향에 대한 정확한 정보가 없다면 물체를 안정하게 파지할 수가 없다. 특히 대상으로 하는 물체가 이동하는 경우에는 로봇 매니플레이터 자체의 내부 센서만 가지고는 대상 물체를 파지 하는 것은 불가능하다.

이러한 문제를 해결하는데 있어서 인간은 눈을 사용하여 외부 정보를 받아들인다. 마찬가지로 로봇에 있어서 인간의 눈의 역할을 대신하여 주는 것이 비전 시스

\* 正會員, 中央大學校 工科大学 制御計測工學科

\*\* 正會員, 中央大學校 工科大学 電氣工學科

(Department of Control and Instrumentation Engineering Chung-Ang University)

※ 본 논문은 1995년 한국과학재단 핵심전문연구과제 지원에 의한 것임

接受日字: 1995年9月1日, 수정완료일: 1995年12月28日

템(vision system)이다. 비전 시스템을 가지고 로봇을 제어하는 것을 비주얼 피드백(visual feedback)이라 하는데, 비주얼 피드백의 방법은 크게 look-and-move와 비주얼 서보잉(visual servoing)으로 구별된다<sup>[1][2]</sup>. 전자인 look-and-move는 물체의 카메라에 대한 상대적인 자세를 결정한 후 다시 기준 좌표계에 대한 자세를 결정하여 원하는 자세로 로봇을 이동시키는 방법으로, 계산이 복잡하고 또한 물체의 정확한 초기자세를 모른다면 사용하기 힘들다는 단점을 가지고 있다. 한편 후자인 비주얼 서보잉은 물체의 이미지상의 변화와 카메라 자세 변화 사이의 관계인 이미지 Jacobian을 가지고 로봇을 제어하는 방법이다. 이 방법은 이미지상의 변화로부터 카메라 자세의 변화를 구할 수 있는 특징을 가지고 있기 때문에 물체가 어떠한 자세에 놓여 있더라도 엔드 이펙터의 자세를 제어할 수 있다. 특히 카메라가 매니플레이터의 엔드 이펙터위에 장착되어진 eye-in-hand 시스템에서는 이미지 변화에서 엔드 이펙터의 자세변화를 바로 구할 수 있으므로 매우 유용하다.

이미지 Jacobian은 카메라의 물체에 대한 자세로부터 얻어질 수 있는데, 지금까지는 주로 각 좌표계간의 관계식과 카메라와 대상물체 위치간의 관계식을 직접 미분해서 이미지 Jacobian을 구하였는데 이러한 방법은 물체가 이동할 경우에는 적용하기가 곤란하다<sup>[3]</sup>. 왜냐하면 물체의 이동에서 생기는 미분변화와 엔드 이펙터의 이동에서 생기는 미분변화가 서로 영향을 미쳐 관계식을 유도하기가 거의 불가능하고 회전에 따른 계산상의 어려움이 존재하기 때문이다. 한편 하나의 카메라를 이용하면 시스템은 간단하게 되지만, 물체의 3차원 좌표를 구하기 위하여 또 다른 외부 센서나 복잡한 이미지 처리과정을 요구하므로 경우에 따라서는 실시간 제어가 곤란할 수 있으며, 특히 이동물체인 경우 더 많은 어려움이 수반된다<sup>[4]-[8]</sup>.

따라서 본 논문에서는 기존의 비주얼 서보잉에서 수반되는 문제들을 해결하기 위하여 그림 1과 같이 스테레오 카메라가 매니플레이터의 엔드 이펙터 위에 장착된 스테레오 eye-in-hand 구조로 비주얼 피드백 시스템을 구성하고, 미분 변환(differential transform)을 이용한 이미지 Jacobian을 도입하여, 움직이는 물체에 대한 로봇 매니플레이터의 위치 및 자세를 제어하는 방법을 제안한다. 이 방법을 사용하면 대상물체의 회전이동에 따른 변화가 선형적으로 표현되어 지기때

문에 물체의 이동여부에 관계없이 정확한 이미지 Jacobian을 구할 수 있는 특징을 가지고 있다<sup>[9]</sup>.

본 논문은 전부 5장으로 구성되어 있으며, 2장에서 스테레오 비전시스템을 구성하여 물체의 카메라에 대한 상대적 좌표를 구하고, 이들의 상관관계를 기술하였다. 3장에서는 2장의 결과를 이용하여 이미지상의 특징점의 변화와 카메라 자세변화 사이의 관계식인 이미지 Jacobian을 미분변환을 사용하여 구하는 방법을 제안하였으며, 이 이미지 Jacobian을 이용하여 비주얼 피드백 제어계를 구성하였다. 4장에서는 컴퓨터 모의실험을 통하여 그 적용 가능성을 확인하였으며, 마지막으로 5장에서 결론과 앞으로의 연구방향을 제시하였다.

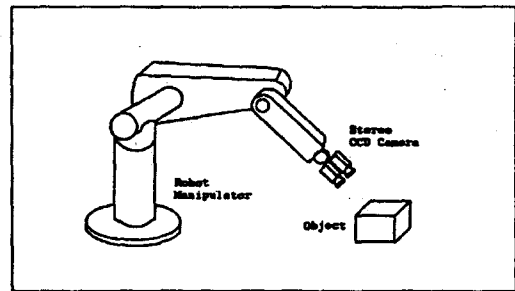


그림 1. 스테레오 eye-in-hand 시스템  
Fig. 1. Stereo eye-in-hand system.

## II. Stereo Eye-in-Hand 시스템

비전 시스템은 일반적으로 CCD카메라를 이용하여 구현한다. 만약 한 개의 카메라를 사용하여 비전 시스템을 구성하면 비전 시스템의 시야가 좁아지는 것은 물론이고, 대상물체의 3차원 정보를 얻기 위해 많은 계산이 필요하므로 실시간 제어가 불가능해진다. 또한 대상 물체의 3차원 좌표를 구하기 위해서는 또 다른 외부 센서를 사용해야 한다는 단점이 있다. 따라서 본 논문에서는 이러한 문제점을 두대의 카메라를 로봇 매니플레이터의 엔드 이펙터위에 장착한 스테레오 eye-in-hand구조로 비전 시스템을 구성하여 해결하였다.

### 1. Stereo Vision의 모델링

두대의 카메라를 가진 스테레오 비전 시스템은 그림 2와 같이 카메라를 로봇 매니플레이터의 엔드 이펙터에 부착시키고 엔드 이펙터의 방향과 카메라의 방향을 일치하도록 한다<sup>[3]</sup>. 각 카메라의 광학 축은 카메라

좌표계의 Z축과 평행하게 하고, X축 및 Y축은 이미 지 좌표계의 X축 및 Y축과 평행하도록 카메라 좌표 계를 설정한다. 카메라 좌표계는 두 카메라의 중심에 위치하고 카메라 좌표계에서 각 카메라 사이의 거리는 X축 방향으로  $b/2$ 만큼 떨어져서 위치한다. 여기서  $f$ 는 카메라로부터 이미지 평면까지의 거리, 즉 카메라 의 초점거리를 나타내고  $\Sigma_w$ 는 기준 좌표계,  $\Sigma_l$ 는 물 체의 좌표계,  $\Sigma_c$ 는 카메라 좌표계,  $\Sigma_r$ 는 좌측 이미지 좌표계,  $\Sigma_r$ 는 우측 이미지 좌표계를 각각 나타낸다.

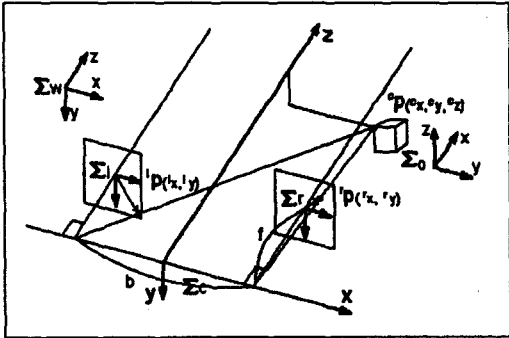


그림 2. 스테레오 카메라의 모델  
Fig. 2. Model of the stereo camera.

2. 이미지 좌표와 물체 좌표간의 관계

스테레오 카메라의 이미지 좌표에 관한 대상물체의 3차원 좌표는 아래와 같은 방법으로 구할 수 있다. 그림 2에 나타낸 카메라 좌표계에 관한 대상 물체의 특 징점 좌표를  ${}^c p = ({}^c x, {}^c y, {}^c z)$ 라고 하면, 그에 대한 좌 우 이미지 평면상의 점  ${}^l p = ({}^l x, {}^l y)$ ,  ${}^r p = ({}^r x, {}^r y)$ 의 좌표는 다음과 같이 된다.

$${}^l x = a_x f \frac{{}^c x + \frac{b}{2}}{{}^c z} \tag{1}$$

$${}^r x = a_x f \frac{{}^c x - \frac{b}{2}}{{}^c z} \tag{2}$$

$${}^l y = a_y f \frac{{}^c y}{{}^c z} \tag{3}$$

$${}^r y = a_y f \frac{{}^c y}{{}^c z} \tag{4}$$

여기서,  $a_x$ 는 X 스케일 팩터(scale factor),  $a_y$ 는 Y 스케일 팩터,  $f$ 는 초점 거리(focus length)를 각각 나타낸다. 그리고 이미지 좌표로부터 카메라 좌표를 구 하는 식은 (1)식으로부터 다음과 같이 쓸 수 있다.

$${}^c x = \frac{b}{2} \frac{{}^l x + {}^r x}{{}^l x - {}^r x} \tag{5}$$

$${}^c y = {}^l y \frac{a_x}{a_y} \frac{b}{{}^l x - {}^r x} = {}^r y \frac{a_x}{a_y} \frac{b}{{}^l x - {}^r x} \tag{6}$$

$${}^c z = a_x f \frac{b}{{}^l x - {}^r x} \tag{7}$$

3. 좌표계간의 상관관계

그림 3은 eye-in-hand 시스템에서의 각 좌표계의 관계를 나타내고 있으며,  $\Sigma_w$ 는 기준 좌표계,  $\Sigma_l$ 는 물체 좌표계,  $\Sigma_c$ 는 카메라 좌표계를 각각 나타낸다. 먼저 엔드 이펙터좌표계는 카메라 좌표계와 방향이 일 치하고 단지 Z축 방향으로  $z$ 만큼 평행이동된 것이므 로, 엔드 이펙터좌표계와 카메라 좌표계간의 변환행렬 은

$${}^c T_e = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{8}$$

이다. 그리고 기준 좌표계와 엔드 이펙터좌표계간의 관  ${}^w T_e$ 는 forward kinematics로부터 구해질 수 있 으며, 이 행렬과 식 (8)을 곱하면 기준 좌표계와 카메라 좌표계간의 변환행렬 (9)식이 얻어진다.

$${}^w T_c = {}^w T_e {}^e T_c \tag{9}$$

한편 카메라 좌표계와 물체 좌표계간의 변환 행렬은

$${}^c T_o = ({}^w T_c)^{-1} {}^w T_o = {}^c T_w {}^w T_o \tag{10}$$

이며, 이 식을 이용해서 카메라 좌표계에 관한 대상물 체의 좌표를 다음식 같이 나타낼 수 있다.

$${}^c P = {}^c T_o {}^o P \tag{11}$$

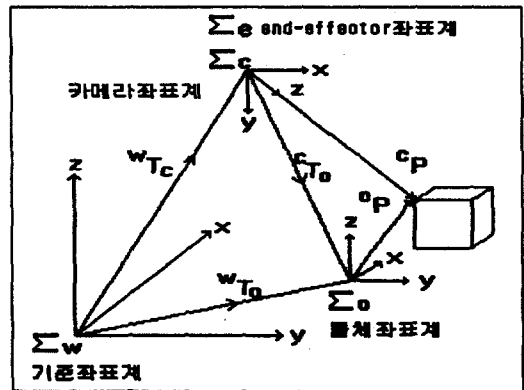


그림 3. Eye-in-hand 시스템의 좌표계  
Fig. 3. Frame of eye-in-hand system.

### III. Visual Feedback 제어계의 구성

1장에서 언급한 바와 같이 Look-and-Move 방법은 기준 좌표계에 관한 물체의 자세를 결정하기 위하여 로봇 매니퓰레이터의 inverse kinematics를 풀어야 하고 물체의 초기 자세를 정확하게 알아야 하는 등의 단점이 있고, 특히 이동 물체를 대상으로 하는 경우는 더욱 많은 어려움이 있다. 따라서 본 논문에서는 이미지의 변화로부터 대상물체의 자세변화를 직접 구할 수 있는 Jacobian을 사용한 Image-based 비주얼 서보잉법을 제안한다. 이 방법은 물체의 초기위치와 이동 여부에 관계없이 대상물체를 파악 할 수 있는 위치와 방향으로 엔드 이펙터의 자세를 제어할 수 있다는 장점이 있다.

#### 1. Image Jacobian의 유도

이미지상의 특징점의 미소 변화와 카메라에 관한 물체자세의 미소 변화간의 관계식인 이미지 Jacobian을 이용하면, 이미지상의 원하는 이미지와 현재 이미지와의 차이로부터 엔드 이펙터가 움직여야 할 위치와 방향을 결정할 수 있다. 지금까지 주로 사용되어 왔던 방법은 각 좌표계간의 관계식과 카메라-대상물체 위치간의 관계식을 직접 미분해서 이미지 Jacobian을 구하였는데, 그러한 방법은 물체가 이동할 경우에는 적용하기가 곤란하다. 왜냐하면 물체의 이동에서 생기는 미분 변화와 엔드 이펙터의 이동에서 생기는 미분변화가 서로 영향을 미쳐 관계식을 유도하기가 거의 불가능하고 회전에 따른 계산상의 어려움이 존재하기 때문이다. 따라서 본 논문에서는 미분 변환 테크닉을 사용하여 이미지 Jacobian을 구하였다. 이 방법을 사용하면 회전 이동에 따른 변화가 선형적으로 표현되어 지기 때문에 물체의 이동여부에 관계없이 이미지 Jacobian을 구할 수 있다. 그 이미지 Jacobian을 구하는 과정은 다음과 같다.

먼저 스케일 팩터  $w (= c_z)$ 를 도입하여 (1) - (4) 식을 행렬 벡터형식으로 쓴다.

$$\begin{bmatrix} x \\ x' \\ y \\ y' \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_x f & 0 & 0 & -a_x f b / 2 \\ a_x f & 0 & 0 & a_x f b / 2 \\ 0 & a_y f & 0 & 0 \\ 0 & a_y f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_x \\ c_y \\ c_z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

단,  $[x' \ x \ y' \ y \ w]^T = {}^i p$ ,  $[c_x \ c_y \ c_z \ 1]^T = {}^c p$

그리고

$$A = \begin{bmatrix} a_x f & 0 & 0 & -a_x f b / 2 \\ a_x f & 0 & 0 & a_x f b / 2 \\ 0 & a_y f & 0 & 0 \\ 0 & a_y f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

만약 카메라좌표에 관한 대상물체의 자세가  $(d_x, d_y, d_z, \delta_x, \delta_y, \delta_z)$ 만큼 변했을 때 그에 대한 이미지 좌표는

$${}^i p + d^i p = A \text{trans}(d_x, d_y, d_z) \text{rot}(x, \delta_x) \text{rot}(y, \delta_y) \text{rot}(z, \delta_z) {}^c p \quad (13)$$

와 같이되며, 여기서  $\text{trans}(\dots)$ 와  $\text{rot}(\dots)$ 는 각각 이동 및 회전 행렬이다.

식 (13)에서 식(12)를 빼면, 이미지 좌표의 변화량에 대한 식을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} d^i p &= A \Delta {}^c p \\ \Delta &= \text{trans}(d_x, d_y, d_z) \text{rot}(x, \delta_x) \text{rot}(y, \delta_y) \text{rot}(z, \delta_z) - I \\ &\cong \begin{bmatrix} 0 & -\delta_z & \delta_y & d_x \\ \delta_z & 0 & -\delta_x & d_y \\ -\delta_y & \delta_x & 0 & d_z \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ A \Delta &= \begin{bmatrix} 0 & -a_x f \delta_z & a_x f \delta_y & a_x f d_x \\ 0 & -a_x f \delta_z & a_x f \delta_y & a_x f d_x \\ a_y f \delta_z & 0 & -a_x f \delta_x & a_x f d_y \\ a_y f \delta_z & 0 & -a_x f \delta_x & a_x f d_y \\ -\delta_y & \delta_x & 0 & d_z \end{bmatrix} \quad (14) \end{aligned}$$

이 식을 대상물체의 미소한 자세변화량  $(d_x, d_y, d_z, \delta_x, \delta_y, \delta_z)$ 에 관한 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} d^i p &= \begin{bmatrix} (d^i x)w + {}^i x dw \\ (d^i x)w + {}^i x dw \\ (d^i y)w + {}^i y dw \\ (d^i y)w + {}^i y dw \\ dw \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} a_x f & 0 & 0 & 0 & a_x f c_z & -a_x f c_y \\ a_x f & 0 & 0 & 0 & a_x f c_z & -a_x f c_y \\ 0 & a_x f & 0 & -a_y f c_z & 0 & a_y f c_x \\ 0 & a_x f & 0 & -a_y f c_z & 0 & a_y f c_x \\ 0 & 0 & 1 & c_y & -c_x & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_x \\ d_y \\ d_z \\ \delta_x \\ \delta_y \\ \delta_z \end{bmatrix} \quad (15) \end{aligned}$$

식 (15)와 식 (12)로부터 이미지좌표의 변화량과 물체자세의 변화량간의 관계식을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$w = c_z, \quad dw = d_z + c_y \delta_z - c_x \delta_y \quad (16)$$

$$\begin{bmatrix} d^i x \\ d^i x' \\ d^i y \\ d^i y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} & J_{13} & J_{14} & J_{15} & J_{16} \\ J_{21} & J_{22} & J_{23} & J_{24} & J_{25} & J_{26} \\ J_{31} & J_{32} & J_{33} & J_{34} & J_{35} & J_{36} \\ J_{41} & J_{42} & J_{43} & J_{44} & J_{45} & J_{46} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_x \\ d_y \\ d_z \\ \delta_x \\ \delta_y \\ \delta_z \end{bmatrix} \quad (17)$$

단, 식 (17)의 Jacobian term은 각각 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 J_{11} &= \frac{a_x f}{c_z} & J_{12} &= 0 \\
 J_{13} &= -\frac{a_x f \left( x - \frac{b}{2} \right)}{c_z^2} & J_{14} &= -\frac{a_x f \left( c_x - \frac{b}{2} \right) c_y}{c_z^2} \\
 J_{15} &= \frac{a_x f}{c_z} \left[ c_z + \frac{a_x f \left( c_x - \frac{b}{2} \right) c_x}{c_z} \right] & J_{16} &= -\frac{a_x f c_y}{c_z} \\
 J_{21} &= \frac{a_x f}{c_z} & J_{22} &= 0 \\
 J_{23} &= -\frac{a_x f \left( x + \frac{b}{2} \right)}{c_z^2} & J_{24} &= -\frac{a_x f \left( c_x + \frac{b}{2} \right) c_y}{c_z^2} \\
 J_{25} &= \frac{a_x f}{c_z} \left[ c_z + \frac{a_x f \left( c_x + \frac{b}{2} \right) c_x}{c_z} \right] & J_{26} &= -\frac{a_x f c_y}{c_z} \\
 J_{31} &= 0 & J_{32} &= \frac{a_y f}{c_z} \\
 J_{33} &= -\frac{a_y f c_y}{c_z^2} & J_{34} &= -\frac{a_y f}{c_z} \left( c_z + \frac{a_y f c_y^2}{c_z} \right) \\
 J_{35} &= \frac{a_y f c_x}{c_z^2} & J_{36} &= \frac{a_y f c_x}{c_z} \\
 J_{41} &= 0 & J_{42} &= \frac{a_y f}{c_z} \\
 J_{43} &= -\frac{a_y f c_y}{c_z^2} & J_{44} &= -\frac{a_y f}{c_z} \left( c_z + \frac{a_y f c_y^2}{c_z} \right) \\
 J_{45} &= \frac{a_y f c_x}{c_z^2} & J_{46} &= \frac{a_y f c_x}{c_z}
 \end{aligned}$$

식 (17)을 n개의 특징점에 대해서 한 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$d^i p = J_{imag} u \tag{18}$$

단,

$$\begin{aligned}
 d^i p &= [ \ r_{x_1} \ l_{x_1} \ r_{y_1} \ l_{y_1} \ \dots \ r_{x_{4n}} \ l_{x_{4n}} \ r_{y_{4n}} \ l_{y_{4n}} \ ]^T \\
 J_{imag} &= \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} & J_{13} & J_{14} & J_{15} & J_{16} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ J_{4n1} & J_{4n2} & J_{4n3} & J_{4n4} & J_{4n5} & J_{4n6} \end{bmatrix} \\
 u &= [ \ d_x \ d_y \ d_z \ \delta_x \ \delta_y \ \delta_z \ ]^T
 \end{aligned}$$

2. 제어계 구성

로봇 매니퓰레이터의 엔드 이펙터가 대상물체를 파악할 수 있는 위치에 있을 때 얻어질 이미지좌표를 알고 있다면, 현재의 이미지와의 차이, 즉 이미지 오차를 감소시키는 방향으로 카메라 좌표계에 관한 물체자

세를 얼마만큼 변화시켜야 하는가를 알아야 하며, 그것은 바로 엔드 이펙터가 바람직한 자세를 취하기 위해 필요한 움직임이 된다. 따라서 이 움직임을 만들어 내기 위해 본 논문에서는 pseudo-inverse를 이용해서 식 (18)로부터 u를 구하면 다음과 같다.

$$u = \lambda J_{imag}^+ e = \lambda J_{imag}^+ (l^i p_d - l^i p) \tag{19}$$

단,  $e = l^i p_d - l^i p$ 는 이미지 오차,  $\lambda > 0$ 는 step size,  $J_{imag}^+ = (J_{imag}^T J_{imag})^{-1} J_{imag}^T$ 를 각각 나타낸다.

결국 이 식이 엔드 이펙터의 바람직한 변화량이 되며, 식 (19)에 로봇 매니퓰레이터의 inverse kinematics Jacobian행렬을 곱해서 각 조인트 각의 변화량을 구하고, 이 값을 각 조인트의 제어기에 입력함으로써 매니퓰레이터를 이동시킨다. 이러한 제어계의 구성은 그림 4와 같다.

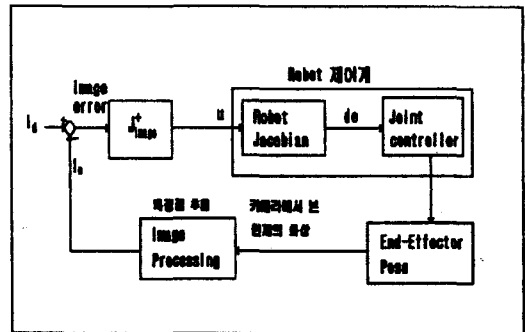


그림 4. 비주얼 서보잉 계의 구성도

Fig. 4. Block diagram of visual servoing system.

IV. 컴퓨터 모의실험

1. 컴퓨터 모의실험을 위한 시스템의 환경 설정

- a) 대상 물체의 크기와 형태에 대한 정보는 미리 알고 있다고 가정한다. 왜냐하면 대상물에 대한 사전 정보가 없다면 목표 이미지를 구할 수 없기 때문이다.
- b) 대상 물체는 로봇 매니퓰레이터의 작업공간 내에 위치하며 모든 특징점이 현재의 카메라에 포착되어져 있다.
- c) 물체의 이동속도와 이동방향은 임의로 정할 수 있다. 그러나 작업범위를 벗어날 수는 없다.

상기의 세 가지 가정에 의하여 대상물체는 정육면체로 설정하였으며, 한 변의 길이는 100 mm로 하였다. 물체의 속도와 방향은 임의로 정할 수 있으며, 이미지

Jacobian을 구하기 위한 특징점은 4개로 설정하였다. 로봇 매니플레이터는 PUMA560을 대상으로 하였으며<sup>[12]</sup>, 각 조인트 제어계는 PD제어기로 구성하였고 로봇의 동역학(dynamics)까지를 포함하여 제어계를 설계하였다<sup>[13]</sup>.

이미지 샘플링 시간은 0.01 sec로 설정하였고, 이미지 Jacobian은 오차율을 줄이기 위하여 매 샘플링 때마다 갱신한다. 본 논문에서 사용한 컴퓨터 모의실험에 대한 시스템 사양을 표 1에 나타낸다.

표 1. 컴퓨터 시뮬레이션을 위한 시스템의 사양

Table 1. System Configuration for Computer Simulations.

대상 물체	정육면체 : 한 변의 길이 100 (mm) 이동방향 : 임의로 설정 초기위치 : 임의로 설정 이동속도 : $v_x, v_y, v_z$
매니플레이터	PUMA560 조인트 제어계 : PD controller
이미지 Jacobian	특징점의 갯수 : 4개 갱신 시간 : 0.01(sec)
샘플링 시간	0.01 (sec)

일반적으로 샘플링 시간이 짧아질수록 더욱 정확한 이미지 Jacobian을 구할 수 있다. 그러나 샘플링 시간은 이미지 프로세싱(image processing)시간에 의하여 결정되는데, 대상물체가 특징점을 가지고 있다면 이미지 처리시간을 줄일 수 있다. 예를 들면 두 직선의 교점이나 원의 중심점등은 그 물체의 특징점이라 할 수 있다. 본 논문에서는 시뮬레이션 과정에서 이미지 처리시간을 고려하여 샘플링 시간을 0.01초로 설정하였다.

2. 시뮬레이션 수행 과정

- a) 카메라에 대한 물체의 원하는 자세를 설정하고 이를 가지고 N개의 특징점에 대한 좌우 이미지 좌표를 구한다.
- b) 현재의 물체 자세와 카메라의 자세로부터 카메라 좌표계에서의 대상 물체의 좌표를 구한다.
- c) Step b의 결과를 가지고 현재의 N개의 특징점에 대한 좌우 이미지좌표를 구한다.
- d) Step c의 결과를 가지고 이미지 Jacobian을 갱신한다.

- e) 이미지 오차와 이미지 Jacobian을 가지고 (19)식에 따라서 엔드 이펙터의 변화량을 구한다.
  - f) 로봇 매니플레이터를 변화량에 따라 이동시킨다.
  - g) 대상 물체를 설정한 이동방향과 속도로 움직인다.
  - h) 단계 (b~g)의 과정을 이미지 오차가 없어질 때까지 계속해서 수행한다.
- 이상을 흐름도로 표현하면 그림 5와 같이 표현된다.

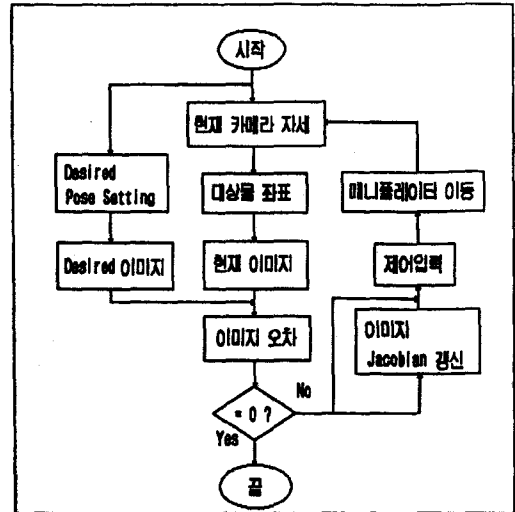


그림 5. 시뮬레이션 흐름도  
Fig. 5. Flow chart of the simulation.

3. 시뮬레이션 결과 및 검토

이동물체에 대한 로봇 매니플레이터의 추종성을 확인하기 위하여 본 논문에서는 다음의 두가지 경우에 대해서 컴퓨터 시뮬레이션을 실시한다.

첫 번째 시뮬레이션은 대상물체의 초기위치 및 자세는 동일하고 이동속도만 다르게 한 경우에 로봇 매니플레이터의 추종에 대한 결과를 비교·검토하였고, 두 번째 시뮬레이션은 대상물체의 초기위치 및 자세 그리고 이동속도를 임의로 설정한 경우에 로봇 매니플레이터의 추종에 대한 결과를 비교·검토하였다. 이상의 두 가지 경우에 대해서 상술하면 다음과 같다.

먼저 첫 번째 시뮬레이션에 대해서 대상물체를 안정하게 파지하기 위한 로봇 매니플레이터의 엔드 이펙터의 자세 ( $\alpha, \beta, \gamma, x, y, z$ )를 (160, -25, -45, 0, 0, 200)으로 정하고, 물체의 이동속도는 각각  $(v_{x1}, v_{y1}, v_{z1}) = (20, -20, 0)$  mm/sec,  $(v_{x2}, v_{y2}, v_{z2}) = (9, -9, 0)$  mm/sec로 X-Y평면에서 등속도 운동을 한다고 가정한다. 그리고 대상물체의 추종은 6초 동안 시뮬레이션

을 실행하여 그 결과를 각각 그림 6 ~ 그림 13에 나타낸다.

그림 6은 경우 1인 경우에 초기상태에서의 두 이미지(desired image 및 current image)와 6초 후의 두 이미지를 비교해서 나타낸 것이고, 그림 7은 경우 2인 경우에 두 이미지를 비교해서 나타낸 것이다. 이 두 그림을 통해서 알 수 있는 바와 같이, 대상물체의 이동속도에 관계없이 6초 후에는 추종이미지가 완전히 일치함을 알 수 있다. 이것은 본 논문에서 제안한 수법이 대상물체의 이동속도와는 관계없이 목표자세로 잘 추종해 감을 보여준 것이라 할 수 있다.

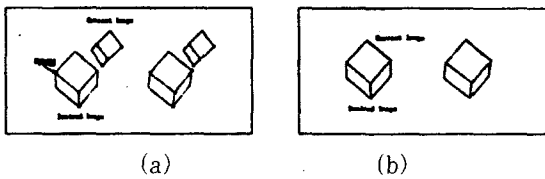


그림 6.  $v_x = 20 \text{ mm/sec}$ ,  $v_y = -20 \text{ mm/sec}$  일 때의 이미지  
 (a) 초기 이미지 (b) 최종 이미지  
 Fig. 6. Images at  $v_x = 20 \text{ mm/sec}$ ,  $v_y = -20 \text{ mm/sec}$   
 (a) Initial image (b) Final image

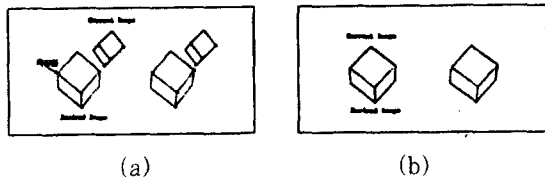
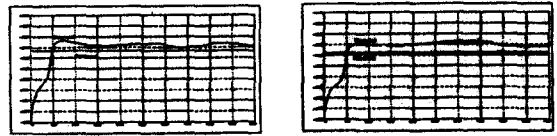


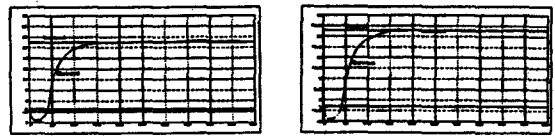
그림 7.  $v_x = 9 \text{ mm/sec}$ ,  $v_y = -9 \text{ mm/sec}$  일 때의 이미지  
 (a) 초기 이미지 (b) 최종 이미지  
 Fig. 7. Images at  $v_x = 9 \text{ mm/sec}$ ,  $v_y = -9 \text{ mm/sec}$   
 (a) Initial image (b) Final image

한편 그림 8~13은 카메라 즉 로봇 매니플레이터의 상대적 자세(위치 및 방위)추종 응답특성을 자세히 나타낸 그림이다. 실제로 시뮬레이션 시작 후 약 4초 이내 목표값에 거의 추종해 감을 알 수 있다. 그러나 추종의 초기상태에서 아주 민감한 변화가 존재하는 것을 볼 수 있는데, 이것은 이미지 Jacobian이 대상물체와의 거리에 상당히 민감하다는 것을 나타낸다. 이 부분은 앞으로 계속 연구가 진행되어야 할 것으로 생각한다.



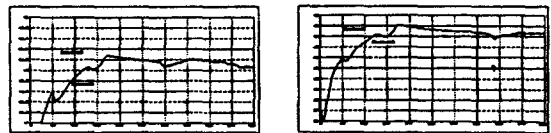
(a)  $v_x = 20 \text{ mm/sec}$ ,  $v_y = -20 \text{ mm/sec}$   
 (b)  $v_x = 9 \text{ mm/sec}$ ,  $v_y = -9 \text{ mm/sec}$

그림 8. 로봇 매니플레이터 엔드 이펙터의 Roll의 추종 응답특성  
 Fig. 8. Tracking response of the roll of the end-effector.



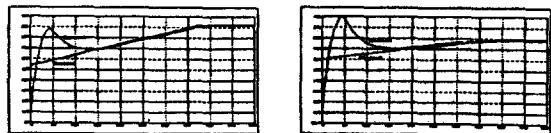
(a)  $v_x = 20 \text{ mm/sec}$ ,  $v_y = -20 \text{ mm/sec}$   
 (b)  $v_x = 9 \text{ mm/sec}$ ,  $v_y = -9 \text{ mm/sec}$

그림 9. 로봇 매니플레이터 엔드 이펙터의 Pitch의 추종 응답특성  
 Fig. 9. Tracking response of the pitch of the end-effector.



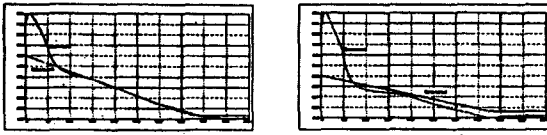
(a)  $v_x = 20 \text{ mm/sec}$ ,  $v_y = -20 \text{ mm/sec}$   
 (b)  $v_x = 9 \text{ mm/sec}$ ,  $v_y = -9 \text{ mm/sec}$

그림 10. 로봇 매니플레이터 엔드 이펙터의 Yaw의 추종 응답특성  
 Fig. 10. Tracking response of the yaw of the end-effector.



(a)  $v_x = 20 \text{ mm/sec}$ ,  $v_y = -20 \text{ mm/sec}$   
 (b)  $v_x = 9 \text{ mm/sec}$ ,  $v_y = -9 \text{ mm/sec}$

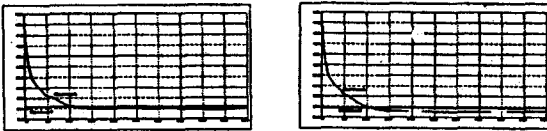
그림 11. 로봇 매니플레이터의 엔드 이펙터의 X축 위치의 추종 응답특성  
 Fig. 11. Tracking response of the X-axis position of the end-effector.



(a)  $v_x = 20 \text{ mm/sec}$ ,  $v_y = -20 \text{ mm/sec}$   
 (b)  $v_x = 9 \text{ mm/sec}$ ,  $v_y = -9 \text{ mm/sec}$

그림 12. 로봇 매니플레이터의 엔드 이펙터의 Y축 위치의 추종 응답특성

Fig. 12. Tracking response of the Y-axis position of the end-effector.

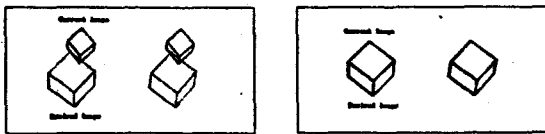


(a)  $v_x = 20 \text{ mm/sec}$ ,  $v_y = -20 \text{ mm/sec}$   
 (b)  $v_x = 9 \text{ mm/sec}$ ,  $v_y = -9 \text{ mm/sec}$

그림 13. 로봇 매니플레이터의 엔드 이펙터의 Z축 위치의 추종 응답특성

Fig. 13. Tracking response of the Z-axis position of the end-effector.

두 번째 시뮬레이션에서는 대상물체의 초기위치 및 자세 그리고 이동속도를 임의로 설정한 경우이다. 이 경우에는 대상물체의 이동속도가 X-Y평면에서  $15 \pm 10 \text{ mm/sec}$ 의 속도로 계속 랜덤하게 변화하며, 시뮬레이션 시간은 25초 동안 실시하였다. 그림 14~20에 그 결과를 나타낸다. 그림 14는 초기상태에서의 두 이미지(desired image 및 current image)와 25초 후의 두 이미지를 비교해서 나타낸 것이고, 그림 15~20는 로봇 매니플레이터의 상대적 자세(위치 및 방위)추종 응답특성을 자세히 나타낸 그림이다.



(a) (b)

그림 14. 랜덤하게 X-Y평면에서  $15 \pm 10 \text{ mm/sec}$  일 때의 이미지

(a) 초기 이미지 (b) 최종 이미지

Fig. 14. Images at  $15 \pm 10 \text{ mm/sec}$  in X-Y plane at random.

(a) Initial image (b) Final image



그림 15. 로봇 매니플레이터 엔드 이펙터의 Roll의 추종 응답특성

Fig. 15. Tracking response of the roll of the end-effector.

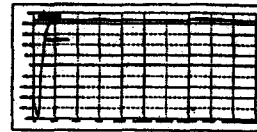


그림 16. 로봇 매니플레이터 엔드 이펙터의 Pitch의 추종 응답특성

Fig. 16. Tracking response of the pitch of the end-effector.



그림 17. 로봇 매니플레이터 엔드 이펙터의 Yaw의 추종 응답특성

Fig. 17. Tracking response of the yaw of the end-effector.



그림 18. 로봇 매니플레이터 엔드 이펙터의 X축 위치의 추종 응답특성

Fig. 18. Tracking response of the X-axis of the end-effector.



그림 19. 로봇 매니플레이터 엔드 이펙터의 Y축 위치의 추종 응답특성

Fig. 19. Tracking response of the Y-axis of the end-effector.



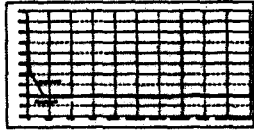


그림 20. 로봇 매니플레이터 엔드 이펙터의 Z축 위치의 추종 응답특성  
Fig. 20. Tracking response of the Z-axis of the end-effector.

그림 14의 결과는 그림 6과 7의 결과와 그의 일치함을 알 수 있다. 그리고 그림 15~20의 결과도 목표값에 잘 추종함을 알 수 있어, 본 논문에서 제안한 방법이 대상물체의 이동방향과 속도 그리고 초기위치에 관계없이 로봇 매니플레이터의 엔드 이펙터를 원하는 자세로 잘 제어할 수 있음을 보여 주고 있다.

## V. 결 론

본 논문은 이미지 Jacobian을 이용한 비주얼 서보잉으로 동적 물체의 궤적을 위한 로봇의 엔드 이펙터의 자세(위치 및 방향)제어에 관한 것이다. 기존의 비주얼 서보잉은 대상 물체가 이동하는 경우에는 사용하기가 힘들었지만, 본 논문에서 적용한 이미지 Jacobian을 이용한 스테레오 eye-in-hand 시스템은 시뮬레이션 결과에서 이동하는 물체의 속도와 위치에 관계없이, 로봇 매니플레이터의 엔드 이펙터의 자세가 이동물체에 대한 목표 자세로 추종해 감을 확인하였다. 결과적으로 충분한 적용 가능성을 보여 주었다고 할 수 있다. 그러나 추종의 초기상태에서 아주 민감한 변화가 존재하는 것을 볼 수 있는데 이것은 초기 이미지 오차가 너무 큰 경우에 발생하는 현상으로 이 부분은 앞으로 계속 연구가 진행되어야 할 과제라고 생각한다.

## 참 고 문 헌

- [1] R.L. Anderson, "Real Time Intelligent Visual Control of a Robot," Proc. of IEEE Int. Workshop on Intelligent Control, pp.89-94, 1985.
- [2] L.E. Weiss, A.C. Sanderson, and C.F. Neuman., "Dynamic sensor based control of robot with visual feedback," IEEE Journal of Robotics and Automation, RA-3(5), pp. 404-417, 1987.
- [3] N. Maru, H. Kase, S. Yamada, A. Nishikawa, F. Miyazaki, "MANIPULATOR CONTROL BY VISUAL SERVOING WITH STEREO VISION," Proceeding of 1993 IEEE/RSJ Inter. Conference on Intelligent Robot and Systems, pp. 1866-1870, 1993.
- [4] John T. Feddema, C.S. George Lee, and Owen Robot Mithcell, "Weighted Selection of Image Features for Resolved Rate Visual Feedback Control," IEEE Trans. Robotics and Automations, pp. 30-47, 1991.
- [5] P.K. Allen, B. Yoshimi, A. Timcenko, "REAL-TIME VISUAL SERVOING," Proceedings of 1991 Inter. Conference Robotics and Automation, pp. 851-855, 1991.
- [6] W.T. Miller, "Real-Time Applications of Neural Networks for Sensor Based Control of Robots with Vision," IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 19, No. 4, 1989.
- [7] H.H. Chen "Pose Determination from Line-to-Plane Correspondences: Existence Condition and Closed-Form Solution," IEEE Trans. on PAMI vol 13, pp. 530-541, 1991.
- [8] R.C. Luo, M.H. Back, H. Hashimoto, F. Harashima, "Visual Feedback Control for Tracking and Intercepting 3D Moving Object," Proc. of IEEE IECON'93, pp. 1707-1711, 1993.
- [9] 심귀보, 오승욱, "움직이는 물체의 궤적을 위하여 스테레오 카메라를 사용한 로봇 매니플레이터의 위치 및 자세 제어," 제어계측연구회 논문집, pp. 102-105, 1994
- [10] T. Oya, H. Hashimoto, F. Harashima, "Active Eye Sensing System," IECON'93, pp. 1718-1723, 1993.
- [11] R. Tasi and T. Huang, "Uniqueness and Estimation of Three Dimensional Motion Parameters of Rigid Object with Curved Surfaced," IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell., Vol. PAMI-6, pp. 13-

17, 1984.

[12] B. Armstrong, O.Khatib, J.Burdic, "The Explicit Dynamic Model and Inertial Parameters of the PUMA 560 Arm," Proceedings of 1986 IEEE Inter. Conference Robotics and Automations, pp. 510-518, 1986.

[13] R.P. Paul Robot "Manipulators: Mathematics, Programming, and Control," Cambridge, MA, MIT press, 1981.

---

저 자 소 개

---

沈 貴 寶(正會員) 第31卷 第 4號 參照  
 현재 중앙대학교 제어계측공학과 부  
 교수



북비전 분야임

吳 承 旭(正會員)  
 1993년 중앙대학교 제어계측공학  
 과 졸업(공학사). 1995년 중앙대  
 학교 대학원 전기공학과(공학석  
 사). 1995년 9월 ~ 현재, 다중  
 채널 주식회사 부설연구소 연구  
 원. 주관심분야는 로보틱스와 로