

# 로봇 OLP 보상을 위한 시각 서보잉 응용에 관한 연구

김진대<sup>#</sup>, 신찬배<sup>\*</sup>, 이재원<sup>\*\*</sup>

## A Study on Visual Servoing Application for Robot OLP Compensation

Jin-Dae Kim<sup>#</sup>, Chan-Bai Shin<sup>\*</sup>, Jeh-Won Lee<sup>\*\*</sup>

### ABSTRACT

It is necessary to improve the exactness and adaptation of the working environment in the intelligent robot system. The vision sensor have been studied for this reason for a long time. However, it is very difficult to perform the camera and robot calibrations because the three dimensional reconstruction and many processes are required for the real usages. This paper suggests the image based visual servoing to solve the problem of old calibration technique and supports OLP(Off-Line-Programming) path compensation. Virtual camera can be modeled from the real factors and virtual images obtained from virtual camera gives more easy perception process. Also, Initial path generated from OLP could be compensated by the pixel level acquired from the real and virtual, respectively. Consequently, the proposed visually assisted OLP teaching remove the calibration and reconstruction process in real working space. With a virtual simulation, the better performance is observed and the robot path error is calibrated by the image differences.

**Key Words** : Intelligent Robot (지능형 로봇), Vision Sensor(시각 센서), Camera and Robot Calibration(카메라와 로봇 보정), Image based visual servoing(영상 기반 시각 서보잉), Path Compensation(경로 보상), Virtual Camera(가상 카메라), Image differences(영상 차)

### 1. 서론

시각 센서 기반 지능형 로봇으로 자동화를 구현할 때 가장 문제가 된 것은 제품 생산의 정밀도 유지, 환경의 변화에 대한 적응력이었다. 이를 위하여 OLP(Off-Line Programming)와 보정 기법들이 필요하였다. 현재 사용되고 있는 OLP는 컴퓨터상에서 모델된 작업 환경과 로봇을 통하여 작업을 수행하

는 것이며 컴퓨터상에서 재구성된 작업 명령들을 시뮬레이션을 통하여 증명하고 실제 작업을 위하여 다운 로딩(Down loading)하게 된다. 실제 상황에서 정확한 작업이 이루어지기 위해서는 컴퓨터상에서 모델된 작업 조건과 실제의 작업 조건이 정확히 일치해야 하는 문제점을 안고 있다. 이를 해결하기 위한 방법이 시각 센서를 사용한 작업 물체의 보정 기법인데 주로 물체의 초기 위치 인식에 사용되었

접수일: 2003년 10월20일; 게재승인일: 2004년2월20일

# 교신저자, 영남대학교 대학원 기계공학과

Email: p9950086@hanmail.net, Tel: (053) 810-3568

\* 울산과학 대학 디지털 기계학부

\*\* 영남 대학교 기계공학부

고 정밀도나 작업 환경에 제한되었다. 또한 카메라 보정 과정과 3차원 복원을 필수적으로 거치므로 작업의 수정이 요구될 때 현장의 작업자가 쉽게 해결할 수 있는 방법을 제공하지는 못하고 있는 실정이다. 이와 관련된 연구를 살펴보면, 1987년 G.V. Puskorius, L.A. Feldkamp<sup>1</sup>는 로봇 /비전 시스템을 이용한 OLP 보상 문제를 시각 시스템의 기학적 오차로부터 수정 D-H(Denavit-Hartenburg)법과 반복적 최소 자승법을 이용하여 구하였는데 90번의 조인트 각도와 시각 데이터가 필요하였다. 2000년 C. K. Ahn과 M. C. Lee<sup>2</sup>는 전자 부품의 조립 작업에서 CCD 카메라의 이미지를 이용한 OLP 교시법을 제안하였다. 이는 이미지를 이용한 측면에서는 기존의 OLP와는 달랐지만 2차원 작업에만 국한되었다. 시각 서보잉의 연구로는, 2002년 J.A. Gangloff와 M. F. de Mathelin<sup>3</sup>는 6자유도 추종을 위치기반 시각 서보잉으로 수행하였다. S.H. Han의 4명<sup>4</sup>은 영상기반 서보잉에서 각각 에피폴라(Epipolar)와 여유자유도 특징(Feature)들을 이용하는 방법을 제시하였다. 2003년 J.D. Kim 외 2명<sup>5</sup>은 비주얼 서보잉을 카메라 내/외부 파라미터 보정에 응용하는 방법을 연구하였다. 이상의 발표 논문들 중에서 원격 작업 로봇에 대한 전체적 보정 메커니즘이나 측정 시스템의 설계 방법과 측정 원리를 가상공간 안에서 실제로 구현하는데 필요한 연구는 그 필요성이 절실함에도 불구하고 거의 연구가 이루어지지 못하고 있는 실정이다.

본 연구는 시각 기반 지능형 로봇 시스템의 보정 문제를 쉽게 해결하고자 하며 가상 환경 안에서 실제 카메라 모델을 그대로 구현하여 가상 영상과 실제 영상의 차이(Difference)만을 이용하여 원격 로봇의 OLP경로 보정을 수행할 수 있는 시각 지원을 제안하고자 한다.

## 2. 가상 카메라 지원 교시

Fig. 1은 기존의 OLP에서 실제 환경과 가상 환경에서의 프로그램 과정을 나타내고 있다. 먼저 가상 환경 안에서 원하는 작업에 맞는 경로를 교시하고 시뮬레이션을 수행한 다음 실제 환경으로 다운로드하게 된다. 하지만 로봇이나 작업 대상 물체를 수치적으로 모델링하여 계산하기 때문에 실제 환경과 비교하여 오차를 수반할 수 있고 이로 인하여 작업 로봇은 경로 오차를 가진다.

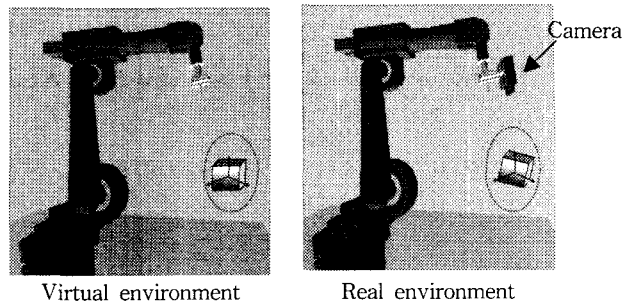


Fig. 1 Object positioning error

이상과 같은 OLP 로봇 교시와 온-라인 경로 보정의 문제점들을 해결 보완하기 위하여 본 연구에서는 기존의 OLP에 가상 카메라의 도입과 작업자의 상호 작용(Interaction)을 도입하고자 한다. Fig. 2는 본 연구에서 제안하는 OLP 보완 로봇 교시 시스템의 개략도를 나타낸다.

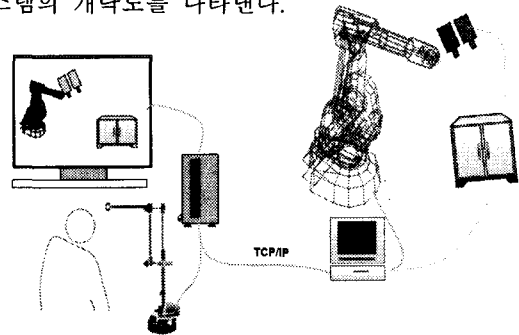


Fig. 2 Virtual camera assisted teaching

이로서 가상환경과 마스터 시스템으로 원격 로봇 OLP교시를 수행할 수 있게 하고자 하며 실제 작업 현장의 물체 위치 및 방향 오차로 인한 로봇 경로 오차를 가상 스테레오 카메라 영상과 실제 스테레오 카메라 영상만을 이용하여 보상할 수 있게 하고자 한다.

### 2.1 가상 카메라 모델링

언급한 바와 같이 가상 시각 지원 OLP를 구현하기 위해서는 스테레오 카메라 모델에 대한 내/외부 파라미터가 선행적으로 얻어져야 한다. 내부 파라미터는 영상 모델에 대한 것이고 외부 파라미터는 실제 환경의 스테레오 핸드-아이 카메라가 로봇의 끝단에 부착되는 원점과 방향 정보를 모델링하

기 위한 것이다.

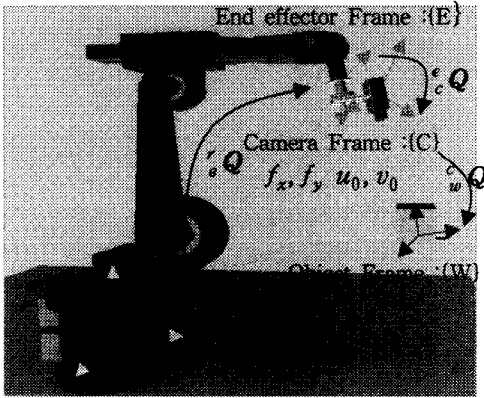


Fig. 3 Defined coordinate and transform

Fig. 3은 이들 내부 파라미터(\$f\_x, f\_y, u\_0, v\_0\$)와 핸드 아이 외부파라미터(\${}^e Q\$)를 구해내기 위해서 표현한 좌표계 시스템과 변환을 나타낸다. 본 논문에서는 위의 파라미터들을 찾기 위해서 DLT(Direct Linear Transform)방법을 활용하였다.<sup>6</sup> 이는 주어진 물체 좌표계 값과 이에 상응하는 이미지 좌표계 값 간의 관계를 나타내는 식을 이용하여 구할 수 있다. 만약 추정된 카메라 투사 행렬을  $P$ 라 하고 3×4 DLT로 표현하면 식(1)을 만족하여야 한다.

$$\begin{bmatrix} \omega_i u_i \\ \omega_i v_i \\ \omega_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^w p_{x,i} \\ {}^w p_{y,i} \\ {}^w p_{z,i} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

복수개의 주어진 점으로부터 SVD하여  $P$ 를 추정할 수 있고 구해진  $P$ 를 분해하여 카메라 내부(\$f\_x, f\_y, u\_0, v\_0\$) 및 외부 파라미터(\${}^c\_w Q\$)를 먼저 구하였다.  ${}^c_w Q$ 와 2번의 로봇 움직임을 이용하여 실제 로봇의 끝단으로부터 장착된 위치를 표현하는  ${}^e Q$ 를 다음의 과정으로 구하였다.  $Q_1$ 을 처음의 위치에서 로봇의 움직임을 나타내고  $Q_2$ 를 두 번째의 움직임으로 표현하여 닫힌 루프(Loop closure) 방정식을 세우면 식(2)와 같다.

$${}^r_e Q_1 \circ {}^e_c Q_1 \circ {}^c_w Q_1 = {}^r_e Q_2 \circ {}^e_c Q_2 \circ {}^c_w Q_2 \quad (2)$$

식(2)에서 로봇 끝단에 부착하는 카메라 지그는

고정이므로  ${}^e_c Q = {}^e_c Q_1 = {}^e_c Q_2$ 는 일정하다는 구속 조건을 줄 수 있고 이를 정리하면 식(3)과 같은 형태가 된다.

$$({}^r_e Q_2)^{-1} \circ {}^r_e Q_1 \circ {}^e_c Q = {}^e_c Q \circ {}^c_w Q_2 \circ ({}^c_w Q_1)^{-1} \quad (3)$$

위의  $({}^r_e Q_2)^{-1} \circ {}^r_e Q_1$ 와  ${}^c_w Q_2 \circ ({}^c_w Q_1)^{-1}$ 를 각각  $A, B$ 로 두고  ${}^e_c Q$ 을  $X$ 로 둔 다음 이를 회전 부분과 병진 부분으로 각각 분할하여 정리하면 식(4)와 식(5)가 된다.

$$R_{A,i} R_X = R_X R_{B,i} \quad (4)$$

$$R_{A,i} P_X + P_{A,i} = R_X P_{B,i} + P_X \quad (5)$$

먼저 위의 식(4)에서 2번의 로봇 움직임에 대해서 나선 인자(Skew factor)를 도입하면 회전 파라미터를 구하기 위한 식(6)으로 결정된다.

$$[X] = \begin{bmatrix} \Omega(S_{A1} + S_{B1}) \\ \Omega(S_{A2} + S_{B2}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} S_{B1} - S_{A1} \\ S_{B2} - S_{A2} \end{bmatrix} \quad (6)$$

식(6)에서  $X$ 는  $\tan(\phi/2)S_X$ 이고  $\Omega(\cdot)$ 는 반대칭행렬이며  $S$ 는 나선 축 벡터를 나타낸다. 회전 인자가 구해지면 병진인자( $P_X$ )는 식(5)로 정리하여 식(7)로부터 구할 수 있다.

$$P_X = \begin{bmatrix} R_{A1} - I \\ R_{A2} - I \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_X P_{B1} - P_{A1} \\ R_X P_{B2} - P_{A2} \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기에서, + : Pseudoinverse

위의 과정으로 구한 외부 파라미터는 로봇 끝단에서부터 구현만 해주면 된다. 내부 파라미터의 경우 소프트웨어적으로 화각( $\theta, \theta'$ )으로 구현되어야 한다.

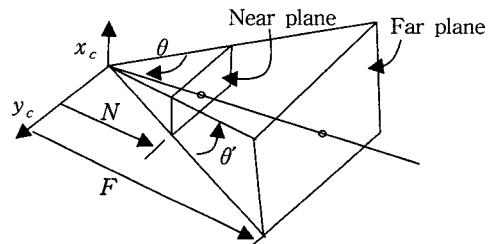


Fig. 4 Graphic view of intrinsic parameters

Fig. 4는 가상환경에서의 시각 영역 결정과 관계된 변수들을 보이고 있는데 이는 식(8)과 같이 카메라 내부 파라미터들로부터 구할 수 있다.

$$\frac{\theta}{2} = \tan^{-1}\left(\frac{0.5H}{f_y}\right), \frac{\theta'}{2} = \tan^{-1}\left(\frac{0.5W}{f_x}\right) \quad (8)$$

여기에서  $W = u_0 \times 2, H = v_0 \times 2$  이며  $\theta$ 는 수평 방향 화각,  $\theta'$ 는 수직 방향 화각을 나타낸다.

### 2.2 시각제어

영상 기반 시각 제어는 Fig. 5에서 보듯이 피드백 되는 데이터가 카메라 보정과정 없이 뽑아낸 스테레오 영상의 픽셀 좌표로 주어진다.

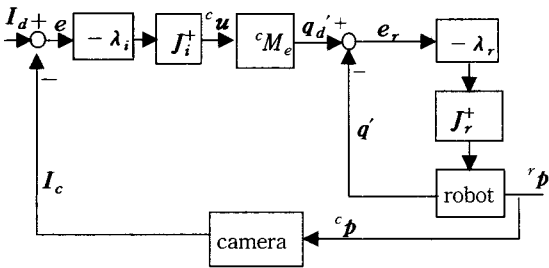


Fig. 5 Image based visual servoing diagram

시각 서보잉은 영상 시스템의 출력이 목표치  $I_d$ 를 추적하도록 하는 것이다. 입력  $u$ 가 시스템에 주었을 때 출력  $r_p$ 가 나왔다면 이를 카메라로 읽고( ${}^c p$ ) 카메라 공간 출력  $I_d$ 로 변환한다. 이로부터 목표치와 출력의 차인 오차  $e$ 를 영(Zero)이 되도록 제어기를 수정해야 한다. 현재 특징 점들의 위치  $I_c$ 와 원하는 특징 점들의 위치  $I_d$ 간의 출력 오차는 안정화하기 위한 행렬  $C$ 를 도입하여 식(9)로 정의할 수 있다.

$$e = C(I_d - I_c) \quad (9)$$

Fig. 5로부터  ${}^c u = \lambda_i e$ ,  $\lambda_i$ 는 게인 대각(Gain Diagonal) 행렬이며 이를 적용한 오차 변화량은

$$\begin{aligned} e' &= \frac{\partial e}{\partial t} = -C \frac{\partial I_c}{\partial t} \\ &= -C I_c' = -C J_i' {}^c u = -\lambda_i C J_i' e \end{aligned} \quad (10)$$

식(10)에서 안정화를 위한  $C$ 를 결정하여야 하는데,  $C J_i' > 0$  조건으로 식(11)과 같이 결정한다.

$$C = J_i' = (J_i^T J_i)^{-1} J_i^T \quad (11)$$

그러므로 제어 명령은 식(12)로 주어진다.

$${}^c u = \lambda_i J_i' (I_d - I_c) \quad (12)$$

식(12)에서  $J_i$ 는 이미지 자코비안(Jacobian)으로 본 논문에서는 Fig. 6과 같이 카메라1에 대하여 카메라2가 평행한 모델로 선정하였다.

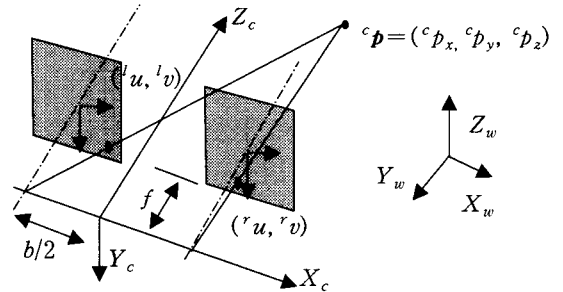


Fig. 6 Stereo model for image base servoing

위의 모델에 대한 이미지 자코비안은 식(13)과 같다.

$$J_i = \begin{pmatrix} -s f_x / b & 0 & {}^l u s / b & {}^l u' v & (-{}^l u ({}^l u + {}^r u) / 2) - 1 & {}^l v f_x \\ -s f_y / b & 0 & {}^r u s / b & {}^r u' v & (-{}^r u ({}^l u + {}^r u) / 2) - 1 & {}^l v f_y \\ 0 & -s f_x / b & {}^l u s / b & {}^l v^2 + 1 & -{}^l v ({}^l u + {}^r u) / 2 & -({}^l u + {}^r u) f_x / 2 \\ 0 & -s f_y / b & {}^l u s / b & {}^l v^2 + 1 & -{}^l v ({}^l u + {}^r u) / 2 & -({}^l u + {}^r u) f_y / 2 \end{pmatrix} \quad (13)$$

여기에서  $s = {}^l u - {}^r u$ 로 특징 점들의 디스패리티(Disparity)이고  $b$ 는 베이스 라인(Base Line) 거리이다. 그리고 블록 선도에서  ${}^c M_e$ 는 카메라에서 로봇 끝단으로의 속도변환(Velocity Transform)을 나타내고 식(14)와 같이 구할 수 있다.

$${}^c M_e = \begin{bmatrix} {}^c R_e & ({}^c t_e)_X & {}^c R_e \\ \mathbf{o}_3 & & {}^c R_e \end{bmatrix} \quad (14)$$

### 2.3 댐프트(Damped) 최소 자승 제어

일반적으로 Fig.5와 같은 룩 앤 무브(Look and Move) 방식의 비주얼 서보잉에서 카메라 속도 제어는 로봇이 액추에이터(Actuator)가 된다. 그러므

로 로봇의 역기구학 제어는 반드시 필요하다. 조인트 변수가  $\theta_i, i=1,2,\dots,n$ 으로 표현되는 n자유도를 직렬형 로봇 고려하고 관심이 되는 작업 변수를  $x_j, j=1,2,\dots,m$  이라 하면,  $x_j$ 와  $\theta_i$ 의 관계는 다음 식(15)로 표현 가능하다.

$$\theta = f^{-1}(x) \quad (15)$$

여기에서  $x = [x_1, x_2, \dots, x_m]^T$ : Work vector  
 $\theta = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n]^T$ : Joint vector.

하지만, 식(15)를 풀 때는 n개의 미지수를 가진 다수의 비선형 방정식이 주어지므로 본 논문에서는 선형 속도 관계식인 자코비안을 이용한 역 기구학 제어를 수행하였다. 정기구학 식을 미분하면,

$$dx/dt = x' = J_r(\theta)d\theta/dt = J_r(\theta)\theta' \quad (16)$$

여기에서,  $J_r(\theta)$ : Robot jacobian

식(16)에서 작업 벡터와 조인트 벡터의 차원이 서로 다르면 정방이 아닌 시스템 방정식이 나타난다. 여기에서 의미있는 해를 구하는 방법으로 의사역 제어(Pseudoinverse controll) 방법이 사용되어왔다.<sup>7,8,9</sup>  $J_r(\theta)$ 를 SVD하면 식(17)이 되고 식(18)과 같이 적을 수 있다.

$$J_r(\theta) = \sum_{i=1}^{\min(m,n)} \sigma_i \widehat{u}_i \widehat{v}_i^T \quad (17)$$

$$\widehat{u}_i^T x' = \sigma_i \widehat{v}_i^T \theta' \quad (18)$$

식(18)로부터 특이치는 입력 공간과 출력 공간의 스케일 비를 나타내며 의사역 제어의 해는 식(19)가 된다.

$$\theta' = J_r(\theta)^+ x' = \sum_{i=1}^r \frac{1}{\sigma_i} \widehat{u}_i \widehat{v}_i^T \quad (19)$$

여기에서,  $r = \text{rank}(J_r(\theta))$ ,

$J_r^+(\theta)$ : Pseudoinverse of  $J_r(\theta)$

위의 식(12)와 (19)로부터 OLP 지원 시각 제어에서 이미지 및 로봇 자코비안에 기반한 최소 자승해는 로봇의 특이 조건이나 이미지 자코비안의 특이 조건으로 인하여 일-컨디션드(III-Conditioned) 발생 할 수 있으므로 댐프트 최소 자승 방법을 사용

한다. 이는  $\|\theta'\|$ 의 값을 최소화하는 조건하에서  $\|x' - J_r \theta'\|$ 를 최소화하는 작업으로 식(20)과 같이 구현할 수 있다.

$$\theta'^{(\lambda)} = (J_r^T J_r + \lambda^2 I)^{-1} J_r^T x' \quad (20)$$

$$= \sum_{i=1}^r \frac{\sigma_i}{\sigma_i^2 + \lambda^2} \widehat{u}_i \widehat{v}_i^T x'$$

여기서  $\lambda$ 는 댐핑 인자(Damping factor)로 조인트 속도의 크기를 제한하는 가중치에 해당한다.

### 3. 시스템 구성

본 실험에 사용된 로봇은 Fig.7의 KUKA GmbH의 KR 15/2 6R이며 보정된 각도만큼 로봇을 움직일 수 있도록 외부 AI/O 인터페이스를 제공한다. 카메라는 Sony의 xc003을 사용하였고 프레임 그라버(Frame Grabber)는 DATA TRANSLATION의 DT3133을 사용하였다. 로봇 컨트롤러 인터페이스 디바이스는 Device Net의 BK5200을 사용하였다. 사용된 로봇의 각 축에 대한 D-H 파라미터는 Table 1에 나타내었다.



Fig. 7 KUKA and master robot configuration

Table 1 D-H parameters of the KUKA robot

| Joint | $\theta$ (radian) | $d$ (mm) | $\alpha$ (radian) | $l$ (mm) |
|-------|-------------------|----------|-------------------|----------|
| 1     | 0                 | -675     | $\pi/2$           | 300      |
| 2     | 0                 | 0        | 0                 | 655      |
| 3     | $-\pi/2$          | 0        | $\pi/2$           | 155      |
| 4     | 0                 | -600     | $-\pi/2$          | 0        |
| 5     | 0                 | 0        | $\pi/2$           | 0        |
| 6     | $\pi$             | -140     | $\pi$             | 0        |

가상 환경을 모델링 하기 위한 소프트웨어로는 WTK(World Tool Kit) 가상 환경 라이브러리와 Open GL 라이브러리를 사용하였다. 카메라의 외부 파라미터는 실험을 단순화하기 위하여 우선적으로 지그 제작 시 수직도를 유지하게 하였으며 실제 장착 시에는 수평계를 이용하여 로봇 끝단에서부터 카메라까지의 변환에서 가능한 회전 성분 변화 없이 병진만 이루어지도록 하였으며 베이스 라인 거리(b)를 100mm로 아래와 같이 구성하였다.

$${}^e_{cr}Q = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & -122 \\ -1 & 0 & 0 & 50 \\ 0 & 0 & 1 & 153 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad {}^e_{cr}Q = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & -122 \\ -1 & 0 & 0 & -50 \\ 0 & 0 & 1 & 153 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

다음으로 가상공간에서의 카메라 모델링을 위한 보정으로부터 구한 내부 카메라 파라미터는 아래의 Table 2와 같았다.

Table 2 Intrinsic parameters

| Joint     | Left camera   | Right camera |
|-----------|---------------|--------------|
| $f_x$     | 3342.977      | 3732.7959    |
| $f_y$     | 3952.525      | 4481.103     |
| $\theta$  | 0.19086 (rad) | 0.1710 (rad) |
| $\theta'$ | 0.12129 (rad) | 0.0535 (ra)  |

작업 대상물은 Fig. 8과 같은 50mm육면체 모델을 이용하였다. Fig. 8에서  $p_1, p_2, p_3, p_4$  4점을 OLP 보상을 위한 영상 기반 서보잉을 위해서 사용하였다.

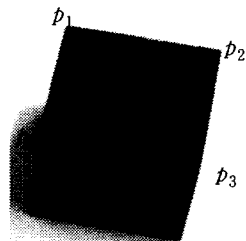


Fig. 8 Object model and reference points

Fig. 9는 위의 실제 모델을 기반으로 하여 가상 공간에 모델링한 결과이다. Fig. 9의 좌/우 카메라 이미지에서 나타나는 영상은 가상 공간 카메라 시

점으로 보는 것으로 Open GL의 깊이 버퍼(Depth Buffer)를 읽는 함수를 사용하여 구현하였다.

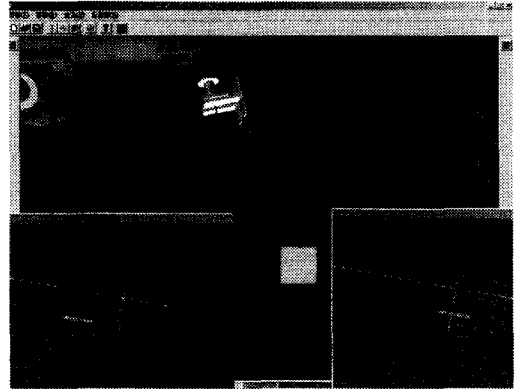


Fig. 9 Virtual camera sensing for OLP

Fig. 10은 로봇 조인트 각도를  $\theta_1=45.015^\circ$ ,  $\theta_2=-0.88^\circ$ ,  $\theta_3=2^\circ$ ,  $\theta_4=-0.03^\circ$ ,  $\theta_5=89.9^\circ$ ,  $\theta_6=180.03^\circ$  에서 육면체 모델을 로봇 원점으로 부터 x,y,z로 1054.6mm, -25.206mm, 47.704mm에 놓고 찍은 실제 영상과 가상 영상을 보이고 있다. 가상 환경 안에서의 카메라 모델은 와이어 모델에 대한 영상을 얻을 수 있으므로 실제 카메라가 가지는 영상 처리에 있어서도 장점이 있음을 확인할 수 있다.

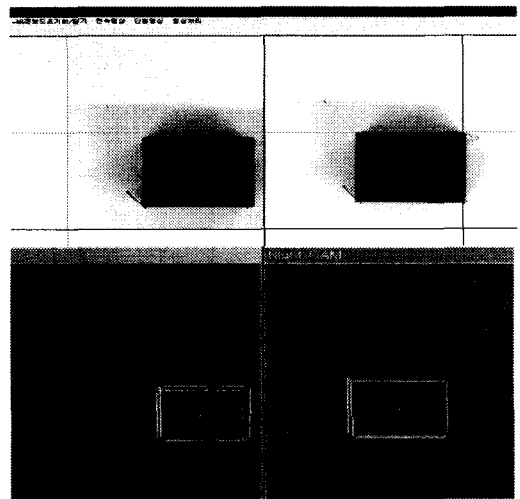


Fig. 10 Comparison real with virtual image

#### 4. 실험 및 검토

전술한 바와 같이 영상 기반 시각 제어는 카메라 보정 없이 픽셀 오차만을 이용하여 이미지 자코비안을 기반으로 시각 제어를 행한다. 픽셀 차이를 이용한 영상 서보잉으로 로봇 OLP 보상을 위한 실험은 다음의 조건으로 이루어졌다. 로봇 초기 자세 각도는  $\theta_1=45^\circ$ ,  $\theta_2=-80^\circ$ ,  $\theta_3=0^\circ$ ,  $\theta_4=-0^\circ$ ,  $\theta_5=80^\circ$ ,  $\theta_6=190^\circ$  로 작업 물체는 초기에  $x=1197.7\text{mm}$ ,  $y=3.23\text{mm}$ ,  $z=656.31\text{mm}$ ,  $\theta_x=-2.3^\circ$ ,  $\theta_y=-1.5^\circ$ ,  $\theta_z=1.64^\circ$  에 두었다. 그리고 실제 물체를 x,y 방향으로 각각10mm씩 병진시켰으며  $\theta_x=1.3^\circ$ ,  $\theta_y=-2.1^\circ$ ,  $\theta_z=0.5^\circ$  회전시켰다. 위의 조건으로 Fig. 5의 이미지 자코비안에 대한 게인값( $\lambda_i$ )과 로봇 자코비안 게인값( $\lambda_r$ )을 변화시켜 가면서 실험을 수행하였다.

Fig. 11은 이미지 자코비안 게인과 로봇 자코비안 게인 값을 0.5로 같게 설정하였을 경우의 결과인데 카메라 보정이 포함되지 않으므로 픽셀 좌표 값으로 나타난다. 그림에서 초기 픽셀 값(Initial value)는 가상 카메라로부터 얻은 영상의 픽셀 값을 나타내며 작업 대상물의 위치 오차로 인한 실제 카메라로부터 얻은 영상에 대한 픽셀값 만큼 서보잉하여 로봇 조인트 각도를 수정하여 주어야 하므로 목표치 픽셀 값(Final Pixel Value)로 정하였다.

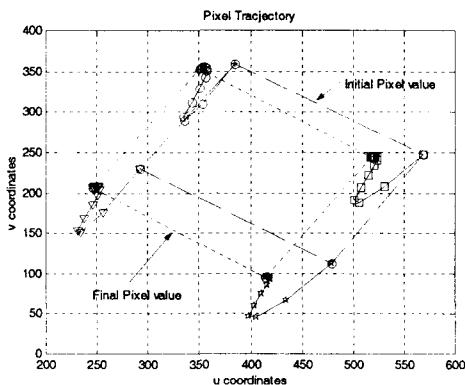


Fig. 11 Pixel tracking for  $\lambda_i = \lambda_r = 0.5$

Fig. 12와 Fig. 13은 위의 Fig.11에 해당하는 픽셀 차 만큼의 로봇 조인트가 업데이트(Update)되는 경로를 나타낸 것인데 수렴 스텝(Step)에 있어서는 15 스텝 정도 수렴함을 확인할 수 있다.

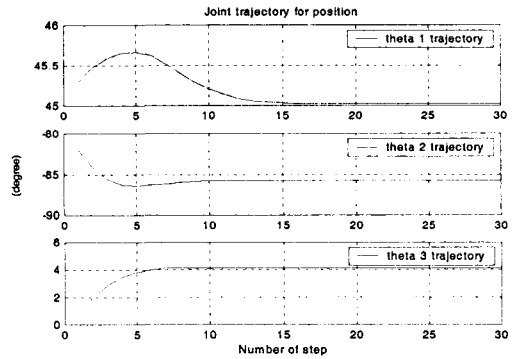


Fig. 12 Position trajectory plot  $\lambda_i = \lambda_r = 0.5$

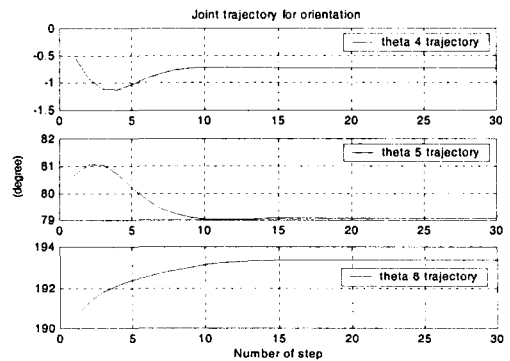


Fig. 13 Orientation trajectory plot  $\lambda_i = \lambda_r = 0.5$

다음의 Fig. 14와 Fig. 15는 각 게인 값에 따른 서보잉 동안의 물체 상의 점  $p_1$ 에 대한 u,v 픽셀의 오차를 나타낸 그래프이다.

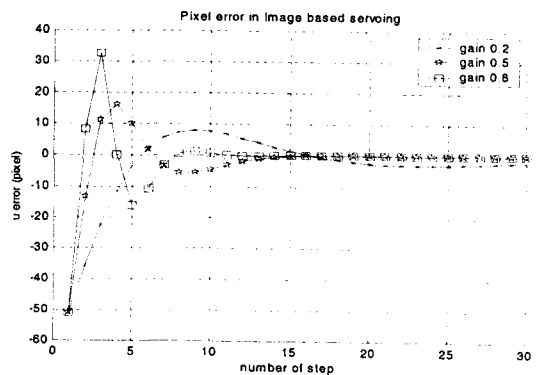


Fig. 14 u-pixel error in image based servoing for gain

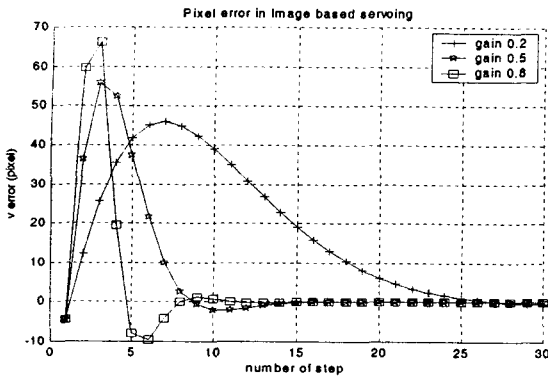


Fig. 15 v-pixel error in image based servoing for gain

위의 세 가지에 대한 결과로는 게인 0.5가 수렴 시간과 정밀도를 함께 고려한 결과로는 가장 좋은 성능을 보인다. 이상의 실험과 같이 영상 차에 의한 로봇 OLP 보상은 서보잉 초기에 오버슈트(Overshoot)의 모습을 보이거나 시간이 지남에 따라 픽셀 오차가 줄어들면서 원하는 로봇 조인트 각도를 안정된 각도로 수렴함을 알 수 있다. 결과적으로 본 논문에서 제시한 영상 차에 의한 OLP 보상을 적용하면 실제 작업 대상물의 위치 및 방향 오차가 발생하여도 안정적으로 OLP 교시를 할 수 있음을 확인할 수 있다.

## 5. 결론

본 논문에서는 비구조적(Unstructured) 작업 환경에 대하여 작업자에게 보다 안전하고 충실한 작업 조건을 지원하기 위해서 기존 OLP교시를 보완하여 가상 카메라 모델을 지원하는 방법을 연구하였다. 그리고 가상 영상 기반 시각 서보잉에 의한 로봇 OLP 경로를 보상하는 방법을 제안하였다.

본 연구의 가상 카메라의 도입은 특별한 하드웨어 없이 기존 로봇 시각 시스템이 가지는 조명이나 노이즈로 인한 영상 처리나 인식문제를 간단히 하는 방법을 제공하기도 한다. 그리고 가상 카메라를 이용한 로봇 OLP 보상은 실제 환경의 작업 물체의 위치 및 방향 오차를 실제 영상 데이터와 가상 영상 데이터의 차이만을 이용하는 방법으로 기존 시각 센서 기반 위치 인식 시스템에서 빈번히 발생하는 카메라 보정이나 3차원 복원 등의 복잡한 문제들을 쉽게 해결하는 방법을 제공할 수 있을 것으로

판단된다.

향후 과제는 움직이는 물체의 속도를 고려하는 것으로 움직이는 물체의 모델에 대한 연구가 남아 있으며 또한 로봇 기구학적 오차와 물체의 위치 오차가 복합된 경우에 대한 가상 카메라 응용에 대한 연구이다.

## 참고문헌

1. Puskorius, G. V., Feldkamp, L. A., "Global calibration of a robot/vision system," IEEE International Conference, Vol. 4, pp.190-195, 1987.
2. Ahn, C. K., Lee, M. C., "An off-line automatic teaching by vision information for robotic assembly task," 26th Annual Conference of the IEEE, Vol. 3, pp.2171-2176, 2000.
3. Gangloff, J. A., Mathelin, M. F., "Visual servoing of a 6-DOF manipulator for unknown 3-d profile following," IEEE Transactions, Vol. 18, pp.511-520, 2002.
4. Han, S. H., Choi, J. W., Lee, M. C., Lee, J. M., "A study on feature-based visual servoing system of intelligent robot system by utilizing redundant feature," Proceedings of the IEEE International Symposium, Vol. 2, pp. 552-558, 2000.
5. Kim, J. D., Cho, Y. S., Lee, J. W., "A stability study on visual servoing using dynamic calibration," Korea Society of Precision Engineering Vol. 20, No. 10, pp. 82-88, 2003.
6. Abdel-Aziz, Y. I., "Direct linear transformation into object space coordinates in close-range photogrammetry," American Society of Photogrammetry, pp.1-18, 1971.
7. Whitney, D. E., "Resolved motion rate control of manipulators and human prostheses," IEEE Trans. Man-Mach. Syst., Vol. MMS-10, pp.47-53, 1969.
8. Nakamura, Y., Hanafusa, H., "Inverse kinematic solutions with singularity robustness for robot manipulator control," J. of Dynamic Sys., Meas., and Control, Vol. 108, pp.163-171, 1986.
9. Chung, W. J., "Kinematic and dynamic control of redundant manipulators," Ph.D. paper, Department of Mechanical engineering Pohang Institute of Science & Technology, 1992.