

가상 환경에서의 영상 기반 시각 서보잉을 통한 로봇 OLP 보상

A Study on Robot OLP Compensation Based on Image Based Visual Servoing in the Virtual Environment

김진대*, 신찬배, 이재원
(Jin-Dae Kim, Chan-Bai Shin, and Jeh-Woon Lee)

Abstract : It is necessary to improve the exactness and adaptation of the working environment for the intelligent robot system. The vision sensor have been studied for a long time at this points. However, it has many processes and difficulties for the real usages. This paper proposes a visual servoing in the virtual environment to support OLP(Off-Line-Programming) path compensation and supplement the problem of complexity of the old kinematical calibration. Initial robot path could be compensated by pixel differences between real and virtual image. This method removes the varies calibrations and 3D reconstruction process in real working space. To show the validity of the proposed approach, virtual space servoing with stereo camera is carried out with WTK and openGL library for a KUKA-6R manipulator and updated real robot path.

Keywords : OLP compensation, pixel differences, real and virtual image, virtual space servoing

I 서론

현재 산업 현장에서 널리 사용되고 있는 OLP는 컴퓨터 상에서 모델 된 작업 환경과 로봇을 통하여 가상 작업을 수행하는 것이며, 시뮬레이션 상에서 구성된 일련의 작업 명령들을 가상 환경을 통하여 검증하고 실제 작업을 위하여 다운 로딩(down loading)하게 된다. 하지만 실제 작업 환경에서 정확한 로봇 운용이 이루어지기 위해서는 컴퓨터 상에서 모델 된 가상의 작업 조건과 실제 작업 조건이 정확히 일치해야만 한다. 로봇 자체의 기구학적 오차나 작업 대상물의 포지셔닝(positioning)오차로 인한 OLP는 실제 현장에서 로봇 경로 오차를 유발하며 심각한 손실을 초래할 수도 있다.

이를 해결하기 위하여 많은 연구들이 진행되어 왔는데 주로 시각 센서를 이용하여 물체의 초기 위치를 인식하고 OLP 로봇 경로를 보상하는 방법이었다. 이는 제한된 형상이나 구속된 작업 환경 속에서 이루어지고 있으며 또한 빈번한 카메라 보정(camera calibration)과정과 3차원 복원을 필수적으로 거치므로 작업의 수정이 요구될 때 현장의 작업자가 쉽게 해결 할 수 있는 방법을 제공하지는 못하고 있는 실정이다.

Puskorius와 Feldkamp[1]는 로봇-시각 시스템을 이용한 로봇 작업 보정에서 시각 시스템의 기하학적 오차로부터 수정 D-H법과 반복적 최소 자승법을 이용하여 로봇 조인트를 업데이트(update) 하였다. 하지만 이는 90번 조인트 각도와

각각의 상황에서의 시각 데이터가 필요했다.

Ahn과 Lee[2]는 전자 부품의 조립 작업에서 CCD 카메라의 영상을 이용한 OLP교시(teaching) 및 보상법을 제안하였지만 2차원 작업에만 국한되었다.

한편, 시각 서보잉(image based visual servoing)은 로봇의 움직임에 대한 영상 특징의 변화량을 나타내는 자코비안(jacobian)을 이용하는 방법으로 시각 궤환(visual feedback)으로 로봇 조인트의 직접 제어가 가능한 방법이다. 이는 3차원 정보의 재구성이 필요 없으며 카메라 보정 및 로봇 기구학적 오차로 인한 작업의 부정확성을 줄일 수 있는 장점을 가지므로 많은 연구가 진행되어 오고 있다[3].

Gangloff와 Mathelin[4]은 6자유도 추종을 위치 기반 시각 서보잉(position based visual servoing)으로 수행하였다. 위치 기반 시각 서보잉 방식은 주로 카메라 보정 오차를 줄이기 위한 목적으로 사용되는 방법으로 Kim 등[5]은 정확히 보정되지 않은 카메라를 시각 서보잉으로 보정의 정밀도와 안정성을 향상 시키는 방법을 연구하였다. Lee 등[6]은 영상 기반 서보잉(image based visual servoing)에서 영상 자코비안의 성능지수를 향상 시키는 방법으로 QR분해(QR decomposition)와 외란 관측기를 이용한 시각 구동 방법을 제안 하였다. Han 등[7]은 영상 기반 서보잉에서 에피폴라(Epipolar)와 여유 자유도 특징들을 이용하는 방법을 제시하였다. 위와 같은 발표 논문들은 시각 서보잉 차체의 방법론적 접근이나 영상 자코비안에 대한 내용을 주 논제로 한다.

영상 기반 시각 서보잉은 픽셀(pixel)단계에서 로봇 제어가 가능하다. 기존에 카메라나 로봇에 대한 기구학적 보정 관점에서 주로 고려되어 왔던 OLP보상에 있어서도 처리 과정의 복잡성이나 3차원 복원 문제 등을 피하기 위해서는 픽셀 단계의 궤환 제어에의 적용 연구가 절실하다고 판단 된다.

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2005. 3. 23., 채택확정 : 2005. 12. 14.

김진대 : (주) 유진 MS 기술부(p9950086@hanmail.net)

신찬배 : 울산과학기술대 디지털기계학부(cbshin@mail.uc.ac.kr)

이재원 : 영남대학교 기계공학부(jwlee@yu.ac.kr)

※ 본 연구는 교육부 두뇌한국21 사업에 의하여 지원됨을 감사드립니다.

본 연구는 가상 환경과 실제 환경의 작업 조건 불일치로 인한 OLP 경로 보상 문제에 대하여 영상 기반 시각 서보잉을 적용코자 한다. 이를 위하여 가상 환경 안에서도 실제 카메라 모델을 그대로 구현하여 가상 영상과 실제 영상의 차(differences)만을 이용하여 실제 작업 로봇의 OLP 경로 보상을 수행할 수 있는 시각 지원 기법을 제안하려고 한다.

전체 논문 구성은 2장에서 가상 카메라 지원 OLP 보상의 기본 개념을 소개하고 카메라 모델링 과정에 대하여 언급한다. 영상 기반 시각 구동 방법에서 피드백 제어 명령을 유도하는 과정을 설명하고 실제 구동기인 로봇의 제어에 대해서 적용된 댐프(damped) 최소 자승 제어에 대하여 기술한다. 3장에서는 6축 다관절 로봇의 핸드-아이(hand-eye)구조에 사용된 실험 장치에 대하여 설명하며 가상환경 상에 모델 된 카메라로부터 촬영된 영상결과를 보인다. 4장에서는 실험을 통하여 영상 차를 이용한 OLP 경로 보상의 타당성을 검증한다. 마지막으로 5장에서 결론을 기술한다.

II. 영상 시각 서보잉에 의한 OLP 보상

1. 가상 시각 지원

그림 1은 기존의 시각 센서 기반 OLP에서 실제 환경과 가상 환경에서의 작업 과정을 나타내고 있다. 이와 같은 로봇 OLP 시스템은 로봇에 대한 기구학 모델이나 작업 대상에 대하여 수치적으로 모델링하여 계산하기 때문에 실제 환경과 비교하여 오차를 수반할 수 있고 이로 인하여 작업 로봇은 경로 오차를 가진다.

그래서 그림 1과 같이 실제 현장에서는 카메라를 부착하여 작업 물체에 대한 3차원 위치를 카메라 보정을 통하여 얻어내고 경로를 보상 하게 된다. 하지만 작업 공간이 달라지거나 작업 대상물이 바뀔 경우 등 보정 작업의 빈번한 재수정과 많은 시간이 요구되며 로봇 자체의 기구학적 보정도 또한 다시 수행해 주어야 하는 단점을 안고 있다.

시각 서보 구동(servicing)의 제어 목표는 시스템의 큰 변동과 시변 외란(time varying disturbance)에 기인하는 오차를 허용 범위 내로 줄이면서 수렴시키는 것이라 할 수 있다. OLP 로봇 시스템에서의 시변 외란은 로봇의 기구학적 파라미터와 작업 대상물의 위치 및 방향 파라미터가 될 수 있다. 즉, 상기한 기존의 시각 센서를 이용한 경로 보상에서 발생할 수는 문제점들을 한꺼번에 고려할 수 있게 된다.

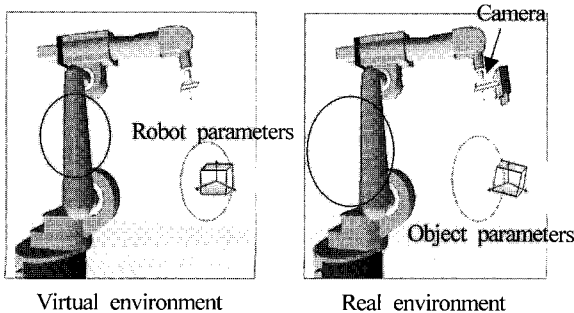


그림 1. 작업 대상물의 위치 및 방향 오차.
Fig. 1. Object position and direction error.

만약 그림 1에서 왼쪽의 가상 환경 안에서도 가상 카메라를 이용하게 되면 그림 2와 같이 물체의 오차와 로봇의 기구학 오차로 인해 영상 차를 보일 것이다.

따라서 OLP 로봇 경로 보상은 가상 영상이 실제 영상으로 서보잉 되면서 일치되도록 제어 목표를 세우면 되는 것이다. 그리고 그 동안에 업데이트 되는 로봇 조인트 각도를 실제 작업 로봇에 적용하면 로봇 기구학적 오차나 물체의 위치 및 방향 오차가 공존하더라도 OLP 로봇 경로 보상이 가능하게 된다.

2. 가상 카메라 모델링

언급한 바와 같이 가상 시각 지원 OLP 보상을 구현하기 위해서는 가상의 스테레오 카메라 모델이 필요하고 실제의 카메라가 촬영하듯이 가상의 카메라에도 또한 측정 능력을 부여하여야 한다. 이를 위해서는 우선적으로 실제 카메라에 대한 내부 파라미터가 선행적으로 얻어져야 하며 이를 기반으로 가상 카메라를 모델링하게 된다.

그림 3에서 ${}^e_{cl}Q$ 과 ${}^e_{cr}Q$ 은 로봇 손 끝단 좌표계에서 카메라 좌표계 원점까지의 변환을 나타내는 행렬을 나타내는데 이는 카메라 원점 설치에 관련된 내용이다. 로봇핸드-아이 형 시각 작업에서 카메라 장착을 위한 파라미터(${}^e_{cl}Q$, ${}^e_{cr}Q$)에 대한 보정 오차는 전체적 로봇 작업 관점에서 본다면 로봇 기구학적 모델링 오차로도 간주할 수 있다. 측정 능력과 직결된 것은 K_l , K_r 은 각각 좌우 카메라의 내부 파라미터를 정의하는 행렬로 (1)로 표현 가능하다.

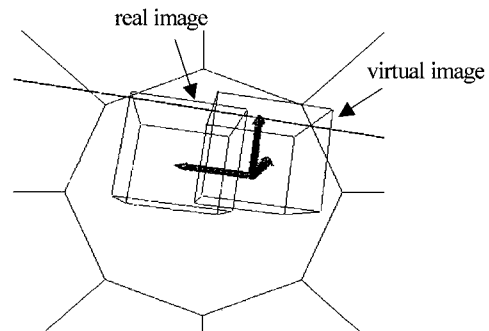


그림 2. 실제 영상과 가상 영상의 차.
Fig. 2. Image difference between real and virtual.

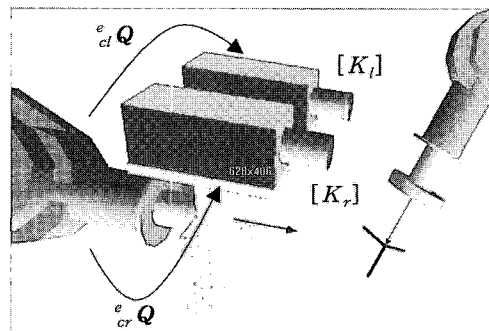


그림 3. 카메라 모델링 파라미터.
Fig. 3. Parameters of camera for modeling.

$$K = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서 f_x, f_y 는 영상 평면 좌표계에 대한 초점 거리 인자이고 u_0, v_0 는 영상 중심을 나타낸다. 이를 찾아내기 위해서 본 논문에서는 DLT(Direct Linear Transform)방법을 활용하였다[8]. 이는 주어진 물체 좌표계 값과 이에 상응하는 이미지 좌표계 값 간의 관계를 나타내는 식을 이용하여 구할 수 있다. 카메라 투사 행렬을 P 라하고 3×4 DLT 행렬로 표현하면 (2)와 같다.

$$\begin{bmatrix} \omega_i u_i \\ \omega_i v_i \\ \omega_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^w p_{x,i} \\ {}^w p_{y,i} \\ {}^w p_{z,i} \\ 1 \end{bmatrix} = P X_i \quad (2)$$

복수개의 주어진 점으로부터 SVD(Singular Value Decomposition)하여 \hat{P} 을 추정할 수 있고 이는 (3)을 만족하여야 한다.

$$\hat{P} = \lambda K [R|T] = \lambda P$$

$$= \lambda \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & f_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서 λ 는 스케일 인자이며 회전 행렬의 직교성(orthogonality)을 이용하여 구하면,

$$|\lambda| = \sqrt{\hat{p}_{31}^2 + \hat{p}_{32}^2 + \hat{p}_{33}^2} \quad (4)$$

따라서

$$P = \hat{P}/|\lambda| = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} \end{bmatrix} \quad (5)$$

이로부터 구하는 내부파라미터는 (6),(7)로 유도된다.

$$u_0 = [p_{11}, p_{12}, p_{13}] [p_{31}, p_{32}, p_{33}]^T \quad (6)$$

$$v_0 = [p_{21}, p_{22}, p_{23}] [p_{31}, p_{32}, p_{33}]^T$$

$$f_x = \sqrt{[p_{11}, p_{12}, p_{13}] [p_{11}, p_{12}, p_{13}]^T - u_0^2} \quad (7)$$

$$f_y = \sqrt{[p_{21}, p_{22}, p_{23}] [p_{21}, p_{22}, p_{23}]^T - v_0^2}$$

위의 과정으로 구한 내부 파라미터(f_x, f_y, u_0, v_0)는 가상 환경 상에서는 화각(view angle)으로 변환하여 구현하여야 하는데 이에 대한 변환 식은 (8)과 같다.

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

여기서, $W = u_0 \times 2$ 는 가로 방향, $H = v_0 \times 2$ 는 세로 방향 해상도를 나타내며 θ 는 수직 방향 화각을 θ' 는 수평 방향 화각을 나타낸다.

3. 시각 서보 구동

본 연구에서는 사용된 KUKA 로봇의 하드웨어적 제약과 시스템 부하를 고려하여 룩 앤 무브(look and move) 방식으로 영상 기반 시각 서보를 택하였다. 영상 기반 시각 제어는 그림 4에서 보이듯이 피드백 되는 데이터가 카메라 보

정 과정 없이 뽑아낸 스테레오 영상의 픽셀 좌표 값이다.

그림 4에서 시각 서보잉은 카메라로부터 얻어지는 시스템의 출력이 목표치(I_d)를 추적하도록 하는 것이 목적이다. 입력(${}^c u$)가 시스템에 주어졌을 때 출력(${}^r p$)가 나왔다면 이를 카메라로 읽고(${}^c p$) 카메라 공간에서의 출력 (I_c)로 변환한다. 이로부터 목표치와 출력의 차인 오차(e)를 영(zero)에 근접하도록 제어기를 수정해야 한다. 현재 특징 점들의 위치(I_c)와 원하는 특징 점들의 위치 (I_d)간의 출력 오차는 다음으로 정의된다.

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

여기서, C 는 시스템을 안정화하기 위한 행렬이다. 위에서 ${}^c u = -\lambda_i e$ 이고 λ_i 는 게인 대각(gain diagonal)행렬이다. 오차의 시간 변화량을 구하여 보면,

$$e' = \frac{\partial e}{\partial t} = C \frac{\partial I_c}{\partial t}$$

$$= C I_c = C J_i {}^c u = -\lambda_i C J_i e \quad (10)$$

안정화를 위한 조건, $C J_i > 0$ 가 만족되도록 하면,

$$C = J_i^+ = (J_i^T J_i)^{-1} J_i^T \quad (11)$$

위의 유도로부터 피드백 제어 입력은 (12)로 된다.

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

(12)에서 J_i 는 영상 자코비안으로 본 논문에서는 그림 5와 같은 평행 카메라 모델을 선정하였다.

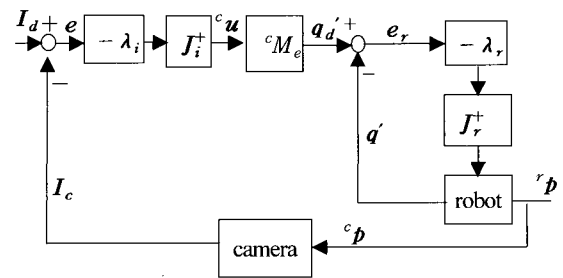


그림 4. 룩-앤-무브 방식의 영상 서보잉.
Fig. 4. Image based servoing with look and move.

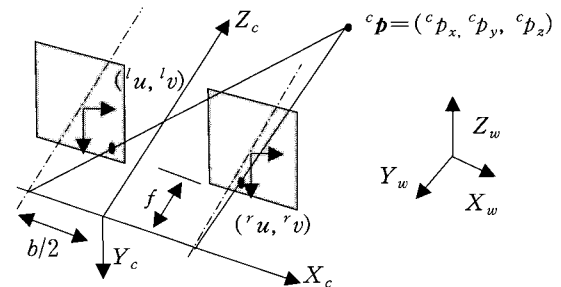


그림 5. 평행 스테레오 카메라 모델.
Fig. 5. Parallel stereo camera model.

이 모델에 대한 영상 자코비안은

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

여기서 $s = 'u - r'u$ 로 특정 점들의 디스패리티(disparity)이고 b 는 베이스 라인(base line)거리이다. 마지막으로 $'M_e$ 는 카메라에서 로봇 끝단으로의 속도 변환을 나타내고 아래와 같다.

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

4. 댐프(damped) 최소화제어

비주얼 서보잉에서 실제 카메라의 속도 제어를 부담하는 것은 로봇이다. 그러므로 로봇의 역 기구학 제어 또한 병행되어야 한다. 조인트 변수가 $\theta_j, j=1, 2, \dots, n$ 으로 표현되는 n 자유도 직렬 형 로봇을 고려하고 관심이 되는 작업 변수를 $x_j, j=1, 2, \dots, m$ 이라 하면, x_j 와 θ_j 에 대한 역 기구학 벡터 방정식은 (15)로 표현된다.

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

여기서, $x = [x_1, x_2, \dots, x_m]^T$: 작업 벡터.

$\theta = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n]^T$: 조인트 벡터.

하지만 위의 (15)를 위치 기구학에 의존하여 해결하고자 하면 6개의 미지수를 가진 다수의 비선형 방정식을 풀어야 하므로 해의 존재성 여부와 유일성 문제가 발생한다. 이에 대한 해결책으로 본 논문에서는 선형 속도 관계식인 자코비안을 이용한 역 기구학 제어를 도입하였다. 자코비안을 유도하기 위해 정기구학 식을 미분하면,

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

여기서, $J_r(\theta)$ 는 로봇 자코비안이다.

(16)에서 작업 벡터와 조인트 벡터의 차원이 서로 다르면 정방이 아닌 시스템 방정식이 나타난다. 여기서 의미 있는 해를 구하는 방법으로 의사 역 제어 방법이 사용되어 왔다[9,10]. $J_r(\theta)$ 를 SVD하면 (17)로 되고 작업 벡터와 조인트 벡터에 대한 속도 식을 정리하면 (18)로 된다.

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

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

(18)에서 의사 역 제어의 해는,

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

여기서 $r = rank(J_r(\theta))$ 이고 $J_r^+(\theta)$ 는 $J_r(\theta)$ 의 의사 역이다. (19)에서 특이치(σ_i)는 입력 공간과 출력 공간의 스케일

비를 나타내며 특이치가 0에 접근할수록 입력 조인트 각도는 무한대가 됨을 확인할 수 있다.

따라서 본 연구의 OLP 지원 시각 제어에서는 로봇의 특이 조건으로 인하여 발생할 수 있는 일-컨디션드(ill-conditioned)를 방지하기위하여 댐프드 최소 자승 방법을 사용한다. 이는 (19)에서 $\|\theta'\|$ 의 값을 최소화하는 조건하에서 $\|x' - J_r \theta'\|$ 를 최소화하는 작업으로 (20)으로 정리할 수 있다.

$$\theta'^{(i)} = (J_r^T J_r + \lambda^2 I)^{-1} J_r^T x' = \sum_{i=1}^r \frac{\sigma_i}{\sigma_i^2 + \lambda^2} \hat{u}_i \hat{v}_i^T x' \quad (20)$$

여기서 λ 는 댐핑 인자(damping facotr)로 조인트 속도의 크기를 제한하는 가중치에 해당한다.

III. 시스템 구성과 가상 카메라 모델링

본 실험에 사용된 로봇은 그림 5의 KUKA GmbH의 KR 15/2 6R이며 보정된 조인트 각도만큼 로봇을 움직일 수 있도록 외부 AI/O 인터페이스로 Device Net의 BK5200을 제공한다. 카메라는 Sony의 xc003을 사용하였고 프레임 그래버는 DATA Translation의 DT3133을 사용하였다. 작업 대상물은 50mm 육면체 모델을 이용하였고 그림의 p_1, p_2, p_3, p_4 , 4점을 OLP 보상을 위한 서보잉 특징 점으로 잡았다.

사용된 로봇의 각 축에 대한 D-H파라미터는 표 1에 나타내었다.

가상 환경 모델링은 C++에서 WTK(World Tool Kit)가상 환경 라이브러리와 OpenGL을 사용하였다. 카메라의 외부파

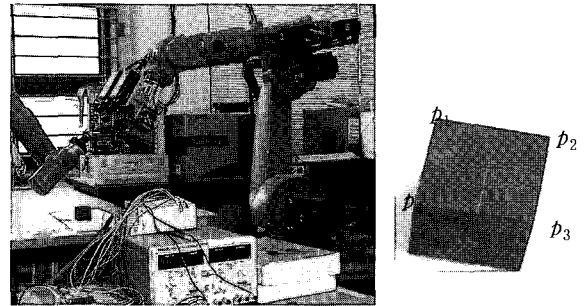


그림 6. 실험 구성도와 작업 대상물.
Fig. 6. Experimental setup and object model.

표 1. KUKA 6R의 D-H 파라미터.
Table 1. D-H parameters of KUKA 6R.

Joint	θ (radian)	d (mm)	α (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	π	-140	π	0

라미터는 우선적으로 지그 제작 시 수직도를 유지 하였고 장착 시에는 수평계를 이용하여 다음과 같이 베이스 라인 거리 100mm를 구성하였다.

$${}^e_c Q = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & -122 \\ -1 & 0 & 0 & 50 \\ 0 & 0 & 1 & 153 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, {}^e_r Q = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & -122 \\ -1 & 0 & 0 & -50 \\ 0 & 0 & 1 & 153 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

다음으로 가상 공간에서의 카메라 모델링을 위한 보정으로부터 구한 카메라 파라미터는 표 2와 같다.

그림 7은 위의 실제 모델을 기반으로 구성된 가상 공간 결과를 나타낸다. 그림의 좌/우 카메라 이미지에서 나타나는 영상은 로봇 끝단에 부착된 스테레오 가상공간 카메라 시점에서 본 것을 OpenGL의 깊이 버퍼를 읽어 이미지화한 것이다.

표 2. 스테레오 카메라의 시각파라미터.

Table 2. Viewing parameters of cameras.

	Left camera	Right camera
f_x	3342.977	3732.7959
f_y	3952.525	4481.103
θ	0.19086 (radian)	0.1710 (radian)
θ'	0.12129 (radian)	0.0535 (radian)

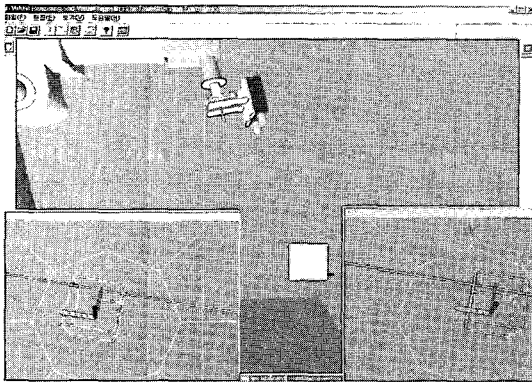


그림 7. 시각 지원 가상공간 구성도.
Fig. 7. Virtual space setup with virtual camera.

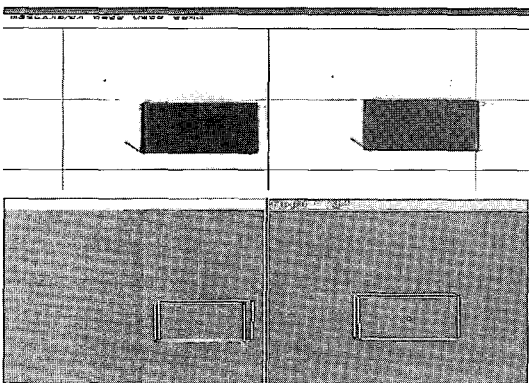


그림 8. 가상영상과 실제 영상.
Fig. 8. Between real and virtual image.

위의 그림 8은 로봇 조인트 각도를 $\theta_1=45.015$, $\theta_2=-0.88^\circ$, $\theta_3=2^\circ$, $\theta_4=-0.03^\circ$, $\theta_5=89.9^\circ$, $\theta_6=180.03^\circ$ 에서 육면체 모델을 로봇 원점으로부터 x, y, z로 각각 1054.6mm, -25.206mm, 47.704mm에 놓고 촬영한 실제 영상과 가상 영상이다. 가상 환경 안에서의 카메라는 와이어(wire) 모델에 대한 영상을 직접 얻을 수도 있고 이는 윤곽 추출등과 같은 이미지 처리에 있어서도 장점을 가질 수 있다.

IV. OLP 보상 실험 및 검토

로봇의 기구학적 오차와 작업 대상물의 포지셔닝 오차로 인한 가상 영상과 실제 영상의 픽셀 차이 값을 이용한 로봇 OLP 보상을 위한 실험은 다음의 순서로 이루어졌다. 실제의 작업 물체에 대한 위치 및 방향 정보를 얻기 위해서 로봇 끝단에 z방향 툴(tool)을 달아 로봇을 측정 도구로 사용하여 직접 측정하고 계산된 병진성분은 각각 $x=1197.7\text{mm}$, $y=3.23\text{mm}$, $z=656.31\text{mm}$ 였고, 회전 성분은 $\theta_x=-0.23^\circ$, $\theta_y=-1.5^\circ$, $\theta_z=1.64^\circ$ 였다.

이에 대한 가상 환경 상에서의 작업 물체는 실제에서의 포지셔닝 오차를 감안하여 $x=1207.7\text{mm}$, $y=13.23\text{mm}$, $z=666.31\text{mm}$ 에 $\theta_x=1.3^\circ$, $\theta_y=-2.1^\circ$, $\theta_z=0.5^\circ$ 가 되도록 위치 시켰다. 즉, 작업 물체가 x, y, z로 각각 -10mm씩 오차를 가지며 회전 오차가 가지도록 하였다.

그리고 영상 촬영을 위한 실제 작업 로봇의 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 설정하였다. 이는 가상 로봇에서도 같은 조건으로 구현하였다. 하지만 전체적으로 로봇 끝단에 부착된 시각 시스템의 측정 위치는 2장 2절에서 설명하였듯이 ${}^e_c Q$ 와 ${}^e_r Q$ 의 정확한 보정 없이 수행하였기 때문에 로봇의 기구학적 오차로 간주할 수 있다. 위의 조건하에서 그림 4의 영상에 대한 계인값(λ_i)과 로봇 계인값(λ_r)을 변화시켜 가면서 실험을 수행하였다.

그림 9는 $\lambda_i=\lambda_r=0.5$ 로 선정한 경우에 대한 결과인데 카메라 보정이 포함되지 않으므로 픽셀 좌표 값으로 나타난 것이다. 그림에서 초기 픽셀 값(initial pixel value)은 가상 카메라로부터 얻어진 영상 값이고 작업 대상물의 위치

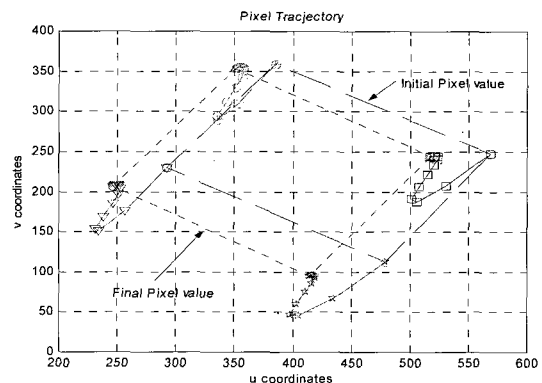


그림 9. 가상 서보잉의 픽셀 경로 결과.
Fig. 9. Pixel trajectory for virtual servoing.

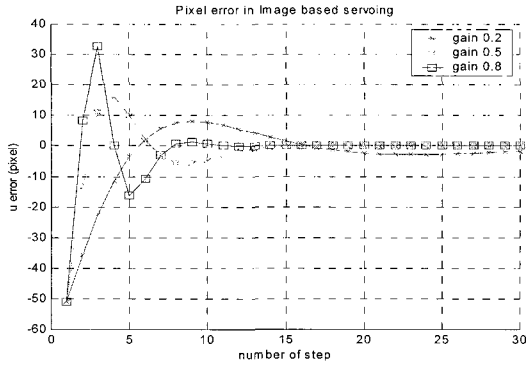


그림 10. 게인 0.2, 0.5, 0.8에 대한 u-방향 픽셀 응답.
Fig. 10. u-direction pixel response for 0.2,0.5,0.8.

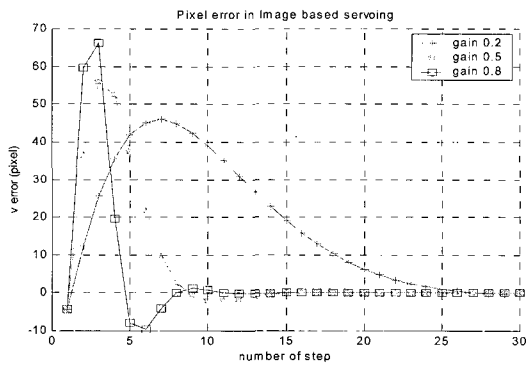


그림 11. 게인 0.2, 0.5, 0.8에 대한 v-방향 픽셀 응답.
Fig. 11. v-direction pixel response for 0.2,0.5,0.8.

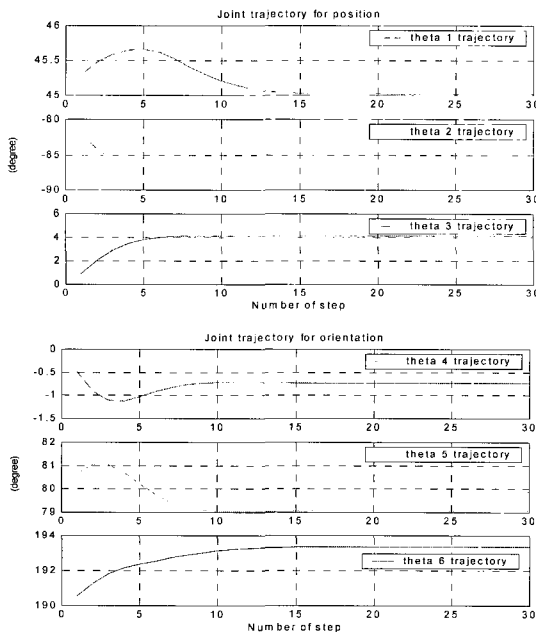


그림 12. 게인 0.5에 대한 로봇 조인트 경로 응답.
Fig. 12. Robot joint response for gain 0.5.

오차 및 로봇 기구학적 오차로 인한 실제 카메라로부터 얻은 영상에 대한 픽셀 값만큼 서보잉하여 로봇 조인트 각도

를 보상하여야 하므로 목표치(final pixel value)값으로 정하였다.

그림 10과 그림 11은 $\lambda_i = \lambda_r = 0.2, 0.5, 0.8$ 로 둔 경우에 물체 상의 한 점 p_1 에 대한 u방향 픽셀의 응답과 v방향 픽셀 응답을 그래프화한 것이다. 위의 결과로는 게인 0.5가 수렴 스텝과 정밀도 조건을 함께 고려한 결과로는 가장 좋은 성능을 보임을 확인 할 수 있다.

그림 12는 $\lambda_i = \lambda_r = 0.5$ 경우에 해당하는 픽셀 차이 값 만큼의 로봇 조인트가 업데이트되는 응답을 나타낸 것이다. 이상의 실험과 같이 영상 차에 의한 로봇 OLP 보상은 서보잉 초기에 조인트 각도의 오버슈트(overshoot)이 관측되지만 시간이 지남에 따라 픽셀 오차를 줄이면서 안정한 조인트 각도로 보상시킬 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 로봇 기구학적 오차와 물체의 위치 오차가 복합된 경우의 OLP 보상에 대하여 보상 성능 향상과 작업 안정성을 지원하기 위해서 가상 카메라 모델을 이용한 영상 기반 서보잉 방법을 응용하여 적용하였다.

가상 카메라를 이용한 로봇 OLP 보상법은 실제 환경의 영상 데이터와 가상 영상 데이터의 픽셀 차이만을 이용하는 방법으로 기존 시각 센서 기반 위치 인식에서 빈번히 발생하는 카메라 보정을 통한 3차원 복원의 복잡한 문제들을 피할 수 있으며 로봇 시각 시스템의 기구학적 오차가 공존하더라도 쉽게 경로 보상하는 방법을 제공할 수 있을 것으로 본다. 또한 가상 카메라의 도입으로 로봇 시각 시스템에서 조명 문제나 노이즈 등으로 인한 영상 처리의 어려움에 있어서도 도움이 될 것으로 판단된다.

향후 과제는 움직이는 작업 대상물에 대한 속도를 고려하는 것으로 운동하는 물체 모델에 대한 연구가 남아 있으며 OLP 보상을 위한 시각 서보 구동으로부터 로봇 기구학 파라미터와 물체의 위치 파라미터를 분해하여 보다 견실한 성능을 확인하려고 한다.

참고문헌

- [1] G. V. Puskorius and L. A. Feldkamp, "Global calibration of a robot/vision system," *IEEE International Conference*, vol. 4, pp. 190-195, 1987.
- [2] C. K. Ahn and M. C. Lee, "An off-line automatic teaching by vision information for robotic assembly task," *IEEE International Conference*, vol. 3, pp. 2171-2176, 2000.
- [3] S. Hutchinson, G. D. Hager, and P. I. Corke, "A tutorial on visual servo control," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 12, no. 5, pp. 651-670, Oct, 1996.
- [4] J. A. Gangloff and M. F. Mathelin, "Visual servoing of a 6-DOF manipulator for unknown 3-D profile following," *IEEE International Transactions*, vol. 18, pp. 511-520, 2002.
- [5] 김진대, 조영식, 이재원, "동적 서보잉을 이용한 비주

얼 서보잉에서 안정성에 관한 연구,” 한국정밀공학회 논문지, 제20권, 제10호, pp. 82-88, 2003.

[6] 이준수, 서일홍, 유범재, 오상록, “QR분해와 외란 관측기를 이용한 시각구동 방법,” 제어 · 자동화 · 시스템공학 논문지, 제6권, 제6호, pp. 462-470, 2000.

[7] S. H. Han, J. W. Choi and J. M. Lee, “A study on feature-based visual servoing system of intelligent robot system by utilizing redundant feature,” *Proc. of the IEEE International Symposium*, vol. 2, pp. 552-558, 2000.

[8] Y. I. Abdel-Aziz, “Direct linear transformation into object space coordinates in close-range photogrammetry,” *American Society of Photogrammetry*, pp. 1-18, 1971.

[9] Y. Nakamura and H. Hanafusa, “Inverse kinematic solutions with singularity robustness for robot manipulator control,” *Journal of Dynamic system, Measurements and Control*, vol. 108, pp. 163-171, 1986.

[10] 정원지, “여유 자유도 매니플레이터의 기구학 및 동역학적 제어,” 박사학위논문, 기계공학과, 포항공과대학 대학원, 1992.



김진대

1994년 영남대학교 기계공학과 졸업.
1996년 영남대학교 기계공학과 석사.
2003년 영남대학교 기계공학과 박사.
2004년~현재 유진엠에스(주) 책임연구원. 관심분야는 Tele Robot, Force and visual Control, VR.



신찬배

1992년 영남대학교 기계공학과 졸업.
1994년 동 대학원 정밀기계공학과 석사.
1996년 동 대학원 기계공학과 박사수료
1996년~현재 울산과학기술대학 디지털기계학부 부교수. 관심분야는 Tele Robot, 시스템자동화.



이재원

1979년 서울대학교 기계과 졸업. 1981년 한국과학기술원 기계과 석사. 1990년 Georgia Institute of Technology 기계공학 박사. 1991년~현재 영남대학교 기계공학부 교수. 관심 분야는 Parallel robotics, Haptic rendering.