

동적 보정을 이용한 비주얼 서보잉에서 안정성에 관한 연구

김진대[#], 조영식^{*}, 이상화^{*}, 이재원^{**}

A Stability Study on Visual Servoing using Dynamic Calibration

Jin-Dae Kim[#], Young-Sik Cho^{*}, Sang-Hwa Lee^{*} and Jeh-Woon Lee^{**}

ABSTRACT

Many visual servoing algorithms have been recently developed by the robot vision researchers. They do not, however, consider the stability of servoing system. The camera calibration is the most important factor to the control stability and performance of position based visual servoing. In this article we describe the ECL(End Point Closed Loop) servoing can make no steady state error for the control of 6-DOF robot of which accuracy is dependent on the camera calibration and kinematics. And we propose a dynamic calibration algorithm, which can improve stability and performance of ECL visual servoing. To verify the potential of our approach, we run assembly experiments and present our finding.

Key Words : Position Based Visual Servoing (위치 기반 비주얼 서보잉), Camera Calibration(카메라 보정), ECL (끝점 폐 루프), Stability and Performance(안정성과 성능), Dynamic Calibration(동적 보정)

1. 서론

비전 센서는 2차원 비접촉식 센서로서 인간의 시각 능력과 유사한 기능을 할 수 있기 때문에 로봇 제어 시스템에 이용되어 왔다. 로봇 비전 시스템을 운용하기 위해서는 카메라 보정이 선행되어야 한다. 카메라 보정을 통하여 이미지 공간의 값이 실제 좌표로 변환되므로 보정 오차는 실제 작업의 오차로 연결된다. 따라서 오차를 줄이기 위해 여러 가지 효과적인 보정 방법들이 연구되어 왔다. 최근에는 우주 공간이나 원자력 발전소등과 같은 비구조적 환경(unknown environment)이나 수술용 로봇처럼 높은 정밀도를 가지는 작업에 대한 연구가 많

이 요구되고 있다. 이러한 경우에는 보정 자체가 곤란할 뿐만 아니라 카메라의 비선형 요소들로 인하여 완벽한 보정이 불가능하기 때문에 보정 방법의 개선만으로는 이러한 문제점들을 해결할 수가 없다. 개루프 시스템이 가지는 단점을 피드백 제어로 극복하듯이 로봇 비전 시스템에서도 비주얼 서보잉을 이용하여 이런 문제를 해결하고자 하는 노력이 1970년대부터 시작되었다.¹⁻² A. Krupa, J. Gangloff는 레이저 포인터를 이용한 수술용 로봇의 자세제어에 비주얼 서보잉을 적용시켰고,³ R. Mori와 F. Miyazaki는 3차원 공간상의 운동하는 물체를 로봇이 잡게 하는 실험을 수행하였다.⁴ 하지만, 주로 다룬 문제는 비구조적 환경에 대한 자동 보정(auto calibration)방법이

접수일: 2002년 12월 31일; 게재승인일: 2003년 8월 14일

[#] 교신저자: 영남대학교 대학원 기계공학과

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

^{*} 영남대학교 대학원 기계공학과

^{**} 영남대학교 기계공학과

나 비전 센서의 낮은 샘플링 시간으로 인한 자유도가 낮은 작업에 관한 연구였다. 그리고 기존의 연구들에서 안정성에 대한 내용은 미미한 실정이다. 본 연구에서는 위치 기반 비주얼 서보잉을 사용하여 정확히 보정되지 않은 환경에서 6자유도 정밀한 조립을 수행하고자 한다. 특히, 보정 독립적으로 정상 상태 오차를 영으로 수렴시키는데 역점을 두었고, 동적 보정 알고리즘을 적용시켜 시스템의 안정성을 높이고 작업의 견실성을 향상시키는 방법을 제시하였다

2. 이론적 배경

2.1 카메라 보정

위치 기반 비주얼 서보잉에서는 카메라 보정이 우선적으로 이루어져야 한다. 이는 이미지 공간과 실제 로봇이 구동하는 공간과의 관계를 결정하는 작업으로서 이미지 중심, 초점 거리, 기준 좌표계로부터 카메라 좌표계의 변환 행렬 등을 구하는 것이다.

본 논문에서는 핀 홀 카메라 모델을 이용하여 11개의 DLT(direct linear transformation) 파라미터들로부터 보정을 수행하고자 한다.

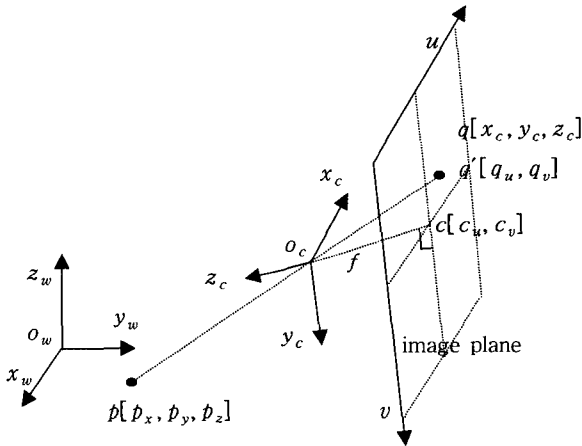


Fig. 1 Pinhole camera model

Fig. 1은 DLT를 위한 핀 홀 카메라 모델을 나타낸다. 여기에서 W 는 기준좌표계, C 는 카메라좌표계, $[c_u, c_v]$ 는 이미지 중심, f 는 초점 거리를 나타낸다. 측정 점의 좌표 p 와 투사된 점 q 그리고 광학 중심 O_c 는 동일선(collinear)의 관계에 있다. 스

케일 비를 k , 카메라 좌표계에서 기준 좌표계로의 회전 변환을 cR 라고 하면 핀 홀 모델은 식(1)로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} q_u - c_u \\ q_v - c_v \\ -f \end{bmatrix} &= k \quad {}^cR \begin{bmatrix} p_x - x_c \\ p_y - y_c \\ p_z - z_c \end{bmatrix} \\ &= k \begin{bmatrix} i_x & j_x & k_x \\ i_y & j_y & k_y \\ i_z & j_z & k_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_x - x_c \\ p_y - y_c \\ p_z - z_c \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (1)$$

위의 식을 전개하고 단위 변환 계수 $[f_u, f_v]$ 를 적용하면 식(2)로 정리된다.

$$\begin{aligned} q_u &= \frac{L_1x + L_2y + L_3z + L_4}{L_9x + L_{10}y + L_{11}z + 1} \\ q_v &= \frac{L_5x + L_6y + L_7z + L_8}{L_9x + L_{10}y + L_{11}z + 1} \end{aligned} \quad (2)$$

여기에서,

$$\begin{aligned} L_1 &= \frac{c_u i_z - f_u i_x}{D}, L_2 = \frac{c_u j_z - f_u j_y}{D} \\ L_3 &= \frac{c_u k_z - f_u i_z}{D}, L_5 = \frac{c_v i_z - f_v j_y}{D} \\ L_6 &= \frac{c_v j_z - f_v j_y}{D}, L_7 = \frac{c_v k_z - f_v k_z}{D} \\ L_4 &= \frac{(f_u i_x - c_u i_z)x_c + (f_u j_x - c_u j_z)y_c + (f_u i_x - c_u k_z)}{D} \\ L_8 &= \frac{(f_v i_y - c_v i_z)x_c + (f_v j_y - c_v j_z)y_c + (f_v z_y - c_v k_z)}{D} \\ L_9 &= \frac{i_z}{D}, L_{10} = \frac{j_z}{D}, L_{11} = \frac{k_z}{D} \\ [f_u, f_v] &= \left[\frac{f}{1}, \frac{f}{1} \right], D = -(x_c i_z + y_c j_z + z_c k_z) \end{aligned}$$

DLT의 미지수 (L_1, \dots, L_{11}) 대해서 1 개의 점에 대하여 식 2개가 나오므로 최소 6개의 점에 대하여 적용하였고 식(3)의 최소 자승법으로 11개의 파라미터를 구할 수 있다

$$L = (X^T X)^{-1} (X^T Y) \quad (3)$$

여기에서, $L = (L_1, L_2, \dots, L_{11})^T$

식(3)에서 X 는 기준 좌표계 상의 점들로 구성된 행렬이고, Y 는 그에 대응되는 이미지 상의 점들로

이루어진 벡터를 나타낸다. 식(3)으로부터 11개의 DLT파라미터가 구해지면 다음의 식(4)로 카메라 외부 파라미터들을 얻을 수 있고 식(5)로부터 카메라 내부 파라미터를 구할 수 있다.

$$p^c = \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_1 & L_2 & L_3 \\ L_5 & L_6 & L_7 \\ L_9 & L_{10} & L_{11} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -L_4 \\ -L_8 \\ -1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$${}^cR = D \begin{bmatrix} \frac{u_c L_9 - L_1}{f_u} & \frac{u_c L_{10} - L_2}{f_u} & \frac{u_c L_{11} - L_3}{f_u} \\ \frac{v_c L_9 - L_5}{f_v} & \frac{v_c L_{10} - L_6}{f_v} & \frac{v_c L_{11} - L_7}{f_v} \\ L_9 & L_{10} & L_{11} \end{bmatrix}$$

위의 식(4)에서 p^c 는 병진 파라미터이고 cR 은 회전 파라미터이다.

$$c = \begin{bmatrix} u_c \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{L_1 L_9 + L_2 L_{10} + L_3 L_{11}}{L_9^2 + L_{10}^2 + L_{11}^2} \\ \frac{L_5 L_9 + L_6 L_{10} + L_7 L_{11}}{L_9^2 + L_{10}^2 + L_{11}^2} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} f_u \\ f_v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{K_1}{\sqrt{L_9^2 + L_{10}^2 + L_{11}^2}} \\ \frac{K_2}{\sqrt{L_9^2 + L_{10}^2 + L_{11}^2}} \end{bmatrix}$$

여기에서,

$$K_1 = \sqrt{(u_c L_9 - L_1)^2 + (u_c L_{10} - L_2)^2 + (u_c L_{11} - L_3)^2}$$

$$K_2 = \sqrt{(v_c L_9 - L_5)^2 + (v_c L_{10} - L_6)^2 + (v_c L_{11} - L_7)^2}$$

$[u_c, v_c]$ 는 이미지 중심을 나타내며 $[f_u, f_v]$ 는 카메라 초점 거리를 나타내는 내부 파라미터들이다.

2.2 ECL 비주얼 서보잉

비주얼 서보잉에는 크게 EOL(End Point Open Loop)방식과 ECL(End Point Closed Loop)방식이 있다. EOL방식은 이미지 공간의 값으로부터 카메라 보정을 통해 실제 공간의 값으로 변환하여 로봇을 구동하는 방법으로서 카메라 보정에 종속적인 작업 결과를 가져오게 된다. 이에 반해 ECL방식을 사용

하는 서보잉은 로봇의 제어에 필요한 기준 입력, 결과치, 오차 등을 이미지 공간의 값들을 사용한다. 이미지 공간에서의 기준 입력으로의 수렴은 실제 공간에서의 수렴으로 연결되는 것이다.

본 연구에서는 현재 비전 시스템의 낮은 샘플링 시간과 동적 보정 작업을 고려하여 ECL방식을 채택하였다. Fig. 2은 ECL 시각 서보잉 시스템의 블록-선도를 보이고 있다.

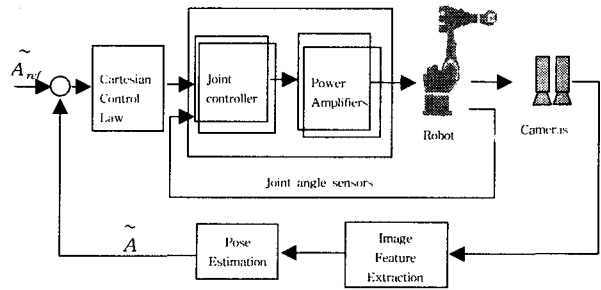


Fig. 2 Block diagram of ECL servoing system

본 논문에서의 속도 명령을 이용한 로봇의 자세 제어는 안정한 시스템을 기반으로 하며 과도한 부하가 걸리지 않는 한 비례 제어만으로 정상상태오차를 영으로 만들 수 있다. 본 논문의 관심은 효과적인 제어기의 설계가 아니라 비주얼 서보잉 시스템에 안정성을 높이는 데에 있기 때문에 여러 가지 제어법칙 중에서 비례제어법칙만을 사용하였다. 이상적인 센서를 사용하여 정확한 기준좌표계 A_{ref} 와 로봇 말단(end effector)좌표계 A_{eof} 를 획득하였다고 가정했을 때 로봇의 비례 제어 법칙 u 는 다음과 같다.

$$u = \dot{q} = J^{-1} \begin{bmatrix} v_n \\ \omega_n \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$= K J^{-1} {}^oA_c \begin{bmatrix} {}^c p_{ref} - {}^c p_{eof} \\ \theta_s \end{bmatrix}$$

식(6)에서 oA_c 는 카메라 보정 행렬, J 는 로봇 자코비안(jacobian), ${}^c p_{ref}$ 는 기준 입력이 되는 위치 벡터이며, ${}^c p_{eof}$ 는 현재 로봇 말단의 위치벡터이다. s 는 현재 말단 좌표축과 기준 입력 좌표축 사이의 회전 중심축의 벡터이고 θ 는 회전각도이다.

만약 ${}^{eol}R_{err} = [i, j, k]$ 로 주어진다면 식(7)로 s 와 θ 는 결정 할 수 있다.

$$\theta = \cos^{-1}\left(\frac{i_x + j_y + k_z - 1}{2}\right) \quad (7)$$

$$s = \left[\frac{j_z - k_y}{2\sin\theta}, \frac{k_x - i_z}{2\sin\theta}, \frac{i_y - j_x}{2\sin\theta}\right]^T$$

여기에서 θ 와 s 는 2개의 해로 구성될 수 있지만 같은 회전을 의미한다.

3. 동적 보정을 이용한 서보잉

3.1 동적 보정 알고리즘

앞의 식(6)에서 나타나 있듯이 카메라 보정은 서보잉 시스템의 수렴성과 안정성에 가장 중요한 영향을 미친다. 따라서 카메라 보정을 제대로 수행할 수 없는 비구조적 환경이나 외란에 대해서 보정 행렬을 동적으로 바꿀 수 있으면 서보잉 시스템에 수렴성과 안정성을 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다. Fig. 3은 본 논문에서 제안하는 동적 보정 서보잉 시스템의 블록-선도이다.

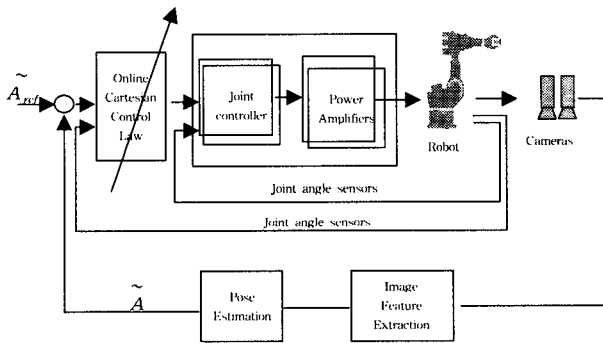


Fig. 3 Block diagram of suggest servoing system

위의 선도에서 제어 법칙(Online Cartesian control law)부분의 화살표는 동적 보정 행렬의 강인성과 안정성을 부여하기 위하여 앞에서 제시한 DLT 파라미터를 동적으로 보정 시키는 과정을 표시 한 것으로 이에 대해 본 연구에서 제시하는 알고리즘은 다음과 같다. DLT 파라미터를 구하는 식(3)을 k번째 측정에 대해 나타내면 다음의 식(8)로 된다.

$$L_k = (X_k^T X_k)^{-1} (X_k^T Y_k) \quad (8)$$

$$X_k = \begin{bmatrix} X_{k-1} \\ X_k \end{bmatrix}, Y_k = \begin{bmatrix} Y_{k-1} \\ Y_k \end{bmatrix}$$

$${}_{k-1}X_k = \begin{bmatrix} \boldsymbol{p}_k & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -q_{uk}\boldsymbol{p}_k \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \boldsymbol{p}_k & 1 & -q_{vk}\boldsymbol{p}_k \end{bmatrix}$$

$${}_{k-1}Y_k = \begin{bmatrix} q_{uk} \\ q_{vk} \end{bmatrix}$$

여기서 \boldsymbol{p}_k 는 3차원 위치 값으로 $[\boldsymbol{p}_{xk}, \boldsymbol{p}_{yk}, \boldsymbol{p}_{zk}]$ 를 의미하며 X_k, Y_k 는 1에서 k까지의 X, Y이고 ${}_{k-1}X_k, {}_{k-1}Y_k$ 는 k번째 측정된 X, Y이다. 따라서 L_k 는 식(9)와 같이 다시 기술 할 수 있다.

$$L_k = (X_{k-1}^T X_{k-1} + {}_{k-1}X_k^T X_{k-1})^{-1} \times (X_{k-1}^T Y_{k-1} + {}_{k-1}X_k^T Y_{k-1}) \quad (9)$$

식(9)에서 $X_k^T X_k$ 와 $X_k^T Y_k$ 을 A_k 와 B_k 로 두면 k번째 측정에 대한 DLT 파라미터를 구하는 식은 식(10)과 같이 된다.

$$L_k = A_k^{-1} B_k \quad (10)$$

$$A_k = A_{k-1} + {}_{k-1}X_k^T X_{k-1}$$

$$B_k = B_{k-1} + {}_{k-1}X_k^T Y_{k-1}$$

본 연구에서는 시작 값으로 A_0, B_0 를 3.2절의 대략적 카메라 보정으로부터 구하였다.

3.2 시스템 모델 및 초기 보정

본 실험에 사용된 로봇은 KUKA GmbH의 KR 15/2이며 각 축에 대한 D-H 파라미터는 Table 1에 나타내었다

Table 1 D-H Parameters of the KUKA Robot

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	-304	π	0

식(11)은 로봇 말단의 속도와 조인트 속도와의 관계를 나타낸 것이다.

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} v_n \\ \omega_n \end{bmatrix} = [J_1, J_2, \dots, J_6] \dot{q} \quad (11)$$

$$J_i = \begin{bmatrix} z_{i-1} \times {}^{i-1}p_6^* \\ z_{i-1} \end{bmatrix} \quad i=1, 2, \dots, 6.$$

Table 2는 비주얼 서보잉을 가동하기에 앞서 실시한 스테레오 카메라의 내부 보정 결과를 보여준다. 식(12)는 초기 외부 보정 결과이다. 본 실험은 다소의 보정 오차를 가지는 것을 가정하므로 대략적인 보정만 수행하였다.

Table 2 Interior Calibration Result of Stereo Camera

Joint	Left camera	Right camera
u_c	307.2954	310.1756
v_c	274.7008	269.5568
f	2700.8918	2506.1164

$$A_{Left} = \begin{bmatrix} -0.2457 & -0.1351 & 0.9599 & -775.2718 \\ -0.9391 & 0.2120 & -0.2703 & -652.1875 \\ -0.2401 & -0.9679 & 0.0748 & 1315.7796 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$A_{Right} = \begin{bmatrix} 0.1002 & 0.01703 & 0.9948 & -811.1724 \\ -0.9537 & 0.2866 & 0.0912 & -868.3046 \\ -0.2835 & -0.9579 & 0.0450 & 1305.9446 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

4. 실험 및 검토

아래의 Fig. 4는 정밀 조립을 위한 전체 서보잉 시스템을 나타낸다. 구동용 로봇의 말단(end effector)과 다른 쪽 로봇의 말단에 설치된 기준(reference)을 스테레오 카메라로 측정하여 말단을 기준에 맞추는 조립 작업 과정에서 동적 보정을 수행하고자 하였다. KUKA 로봇은 실시간 적용에 문제가 있었으므로 영상은 한 스텝(step) 단위로 처리하였다.

카메라는 Sony의 xc003을 스테레오로 설치하였고 영상 보드는 DT3133을 사용하였다. Fig. 6에서

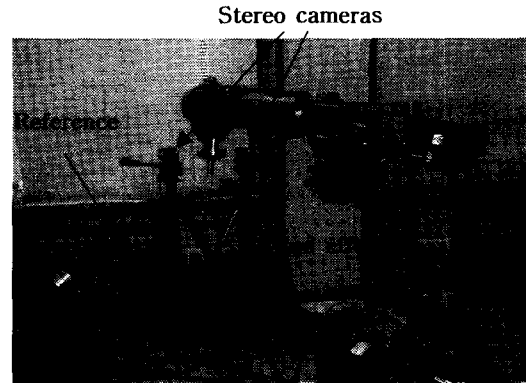


Fig. 4 Experiment system for visual servoing

Fig. 8은 0.5의 비례제어 이득과 z-방향으로 30도, 300mm 그리고 x-방향으로 30도, 300mm 편차를 주고 동적 보정을 적용하지 않았을 때의 실험 결과이다.

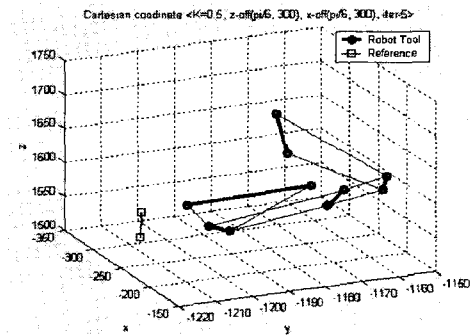


Fig. 5 End effector 3-D trajectory

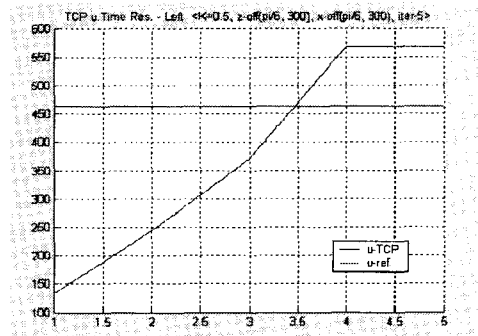


Fig. 6 End effector u(t) response w.r.t left camera

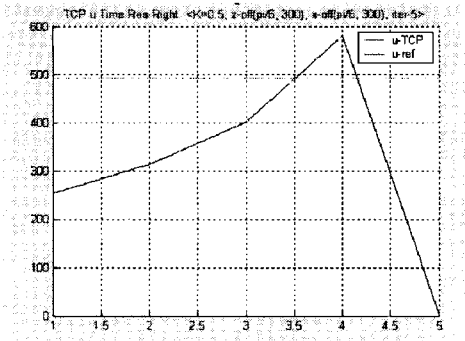


Fig. 7 End effector $u(t)$ w.r.t right camera

Fig. 5는 3차원 공간 좌표로 재구성한 것이고 Fig. 6과 Fig. 7은 그때의 왼쪽과 오른쪽 카메라에 대한 시간응답 $u(t)$ 를 보여준다. 보정 오차에 따른 시스템의 안정성과 성능이 저하됨을 확인할 수 있다. 다음으로 Fig. 8에서 Fig. 10은 앞의 실험 조건으로 본 논문에서 제시한 알고리즘인 동적 보정을 적용하였을 때의 결과를 나타낸다.

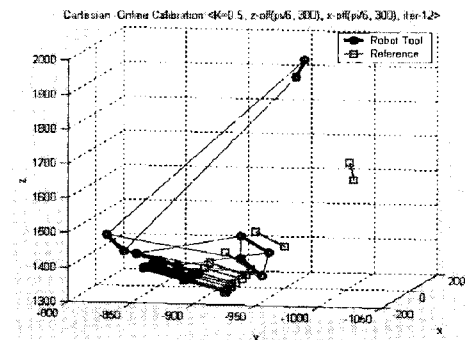


Fig. 8 Robot end effector 3-D trajectory

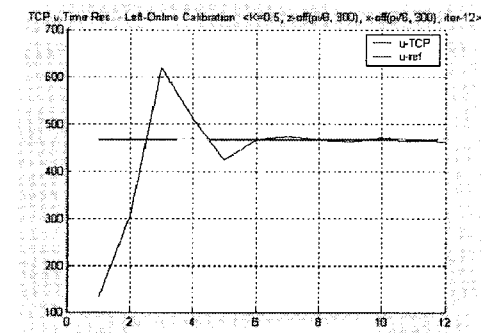


Fig. 9 End effector $u(t)$ response w.r.t left camera

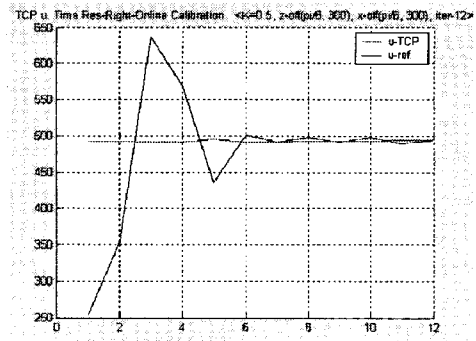


Fig. 10 End effector $u(t)$ w.r.t right camera

Fig. 8에서 기준이 변하는데 이는 서보잉 동안 카메라 보정 행렬이 계속 수정되기 때문이다. 초기의 로봇 궤적은 동적 보정을 적용하지 않았을 때와 비슷하게 시작을 하여 불안정한 시스템의 모습을 보이나 시간이 지남에 따라 보정 오차가 줄어들면서 안정된 시스템으로 유도 되었음을 알 수 있다. 결과적으로 본 논문에서 제시한 실시간 동적 보정 알고리즘을 적용하면 비주얼 서보잉에서 안정성과 성능을 개선 할 수 있을 것으로 생각된다

5. 결론

본 논문에서는 6자유도ECL 방식의 비주얼 서보잉 조립 작업에 있어서 DLT 파라미터를 순차적으로 업데이트(Update)하는 알고리즘을 이용한 동적 보정을 적용하여 불안정한 시스템을 안정한 시스템으로 유도하고 성능을 향상시킬 수 있음을 보였다. 초기에 보정 오차를 가지는 불안정한 시스템을 사용하는 경우에도 좋은 성능을 가지는 시스템으로 유도할 수도 있고 서보잉 시스템의 성능의 향상과 더불어 유지, 보수에도 도움이 될 것으로 기대된다. 향후, 넓은 작업 영역을 확보할 수 있는 방법, 비례 제어 보다 발전된 제어기 설계에 대한 추가의 연구가 필요하다.

후기

본 논문은 2002년도 BK21사업에 의하여 지원되었음.

참고문헌

1. Shirai, Y. and Inoue, H., "Guiding a Robot by Visual Feedback in Assembling Tasks," Pattern Recognit., Vol. 5, pp. 99-108, 1973.
2. Hill, J. and Park, W. T., "Real Time Control of a Robot with a Mobile Camera," in Proc. 9th ISIR, Washington, D.C., pp. 233-246, Mar. 1979.
3. Krupa, A., Gangloff, J., Morel, G., Leroy, J. and Marescaux, J., "Autonomous Retrieval and Positioning of Surgical Instruments in Robotized laparoscopic Surgery Using Visual Servoing and Laser Pointers," IEEE international Conference on Robotics & Automation, pp. 3769-3774, 2002
4. Mori, R. and Miyazaki, F., "Examination of human Ball Catching Strategy through Autonomous Mobile Robot," IEEE international Conference on Robotics & Automation, pp. 4236-4241, 2002
5. Sanderson, A. C., Neuman, C. P., "Dynamic Sensor Based Control Of Robots with Visual Feedback," IEEE Trans. Robot. Automat., Vol. RA-3, pp. 404-417, Oct. 1987.