

# 兩眼 시공간을 이용한 Linear Visual Feedback Control

## Linear Visual Feedback Control using Binocular Visual Space

임 승 우\*, 박 창 균\*\*

(Seung Woo Lim\*, Chang Kyun Park\*\*)

### 요 약

본 논문에서는 사람의 눈과 팔의 구조를 모방한 兩眼視 LVFC-로봇 시스템을 구성하였다. 시공간과 관절공간 사이의 선형 근사식을 최소 자승법에 의해 유도하여 兩眼視 LVFC-로봇 위치 제어에 응용하고, 시뮬레이션을 통해 그 타당성을 확인하였다. 논자가 제안한 兩眼視 LVFC-로봇은 특징점을 이용한 기존의 兩眼視 VFC-로봇과 비교할 때 이미지 자코비안과 로봇 자코비안의 계산이 생략되므로 실시간 제어가 가능하였다.

### ABSTRACT

This paper proposes the stereo LVFC-Robot which imitates eyes and arms of man, we derived linear approximation equation between visual space and joint space by minimum square method and then applied it to the proposed stereo LVFC-Robot. As a result of a simulation, its efficiency is verified.

Compared with the stereo VFC, the stereo LVFC Robot don't need the Image Jacobian and the Robot Jacobian. Thus it is possible to control Robot in real time.

### I. 서 론

로봇 팔을 보다 정확히 목표 위치까지 이동시킬 때 내부 관절 센서 만으로는 페루프를 형성할 수 없기 때문에 외부 환경 변화에 대응하기 어렵다. 따라서 이를 극복하도록 로봇에 시각기능(카메라)을 부가한 것을 VFC-로봇(Visual Feedback Control)이라 한다.[1, 2]

VFC-로봇에서는 제어 대상 물체의 화상상 특징점 위치변화를 이용하여 로봇 팔의 이동 속도를 계산하므로 이미지 자코비안 행렬로 특징점의 속도와 카메라 이동 속도의 관계를 해석해야만 한다.[3-6]

VFC-로봇은 單眼視(Monocular Camera)와 兩眼視(Stereo Camera)로 대별된다. 單眼視 VFC-로봇의 경우, 3차원 정보를 2차원 정보만으로 처리함에 따라 다음 문제점이 발생한다.

첫째, 특징점과 카메라 사이의 3차원적 거리 정보를 미리 설정하고 제어 대상 물체의 형태를 모델링해서 기억

시켜야 한다. 둘째, 이미지 자코비안은 화상 정보만으로 해석될 수 없기 때문에 초기 오차와 특징점 선택 방법에 따라 목표 위치로의 오차가 발생한다.[7-10]

이상의 單眼視 VFC-로봇이 갖는 문제점을 개선 보완하기 위해 兩眼視 VFC-로봇이 개발되었다. 兩眼視 VFC-로봇은 대상 물체의 모델을 미리 설정하지 않고 좌우 화상 상에 위치한 특징점의 정보만으로 이미지 자코비안을 계산할 수 있다.

기존의 兩眼視 VFC-로봇은 이미지 자코비안과 로봇 자코비안을 이용하여 제어된다. End-effector와 관절공간 및 좌우 화상 상의 특징점과의 기하학적 관계식이 비선형이므로 로봇운동의 정량적해석을 위해 자코비안을 매 시간 계산해야 하고 그 계산량 또한 방대하므로 실시간 제어에 문제점이 있다.[11-14]

그러므로 본 논문에서는 자코비안 계산이 필요 없이 실시간 제어가 가능하도록 視 공간 좌표계와 관절공간좌표계 사이의 선형 근사식을 유도, 이식을 이용하여 화상 좌표값만을 제어 입력으로 하는 兩眼視 LVFC-로봇(Linear VFC)을 제안하고 시뮬레이션을 통해 그 타당성을 확인한다.

\*동신전문대학교 전자과

\*\*조선대학교 전자공학과

접수일자: 1995년 10월 17일

II. 로봇의 계층적제어

시각 기능을 갖지 않는 로봇은 내부 센서 신호만으로 제어되기 때문에 기구 모델이나 환경모델에 未知 또는 부정확한 요소가 있으면 작업 실행에 장애가 발생한다. 따라서 로봇의 자율적 제어를 위해서는 작업 진행 상황을 귀환하기 위한 외부센서가 필요하다. 그러므로 정확히 목표위치까지 이동시키고 외부 환경 변화에 대응하기 위한 로봇은 내부센서에 의한 관절제어와 외부센서에 의한 궤도생성이 계층적으로 이루어져야 하고 그 계략도는 그림 1과 같다.

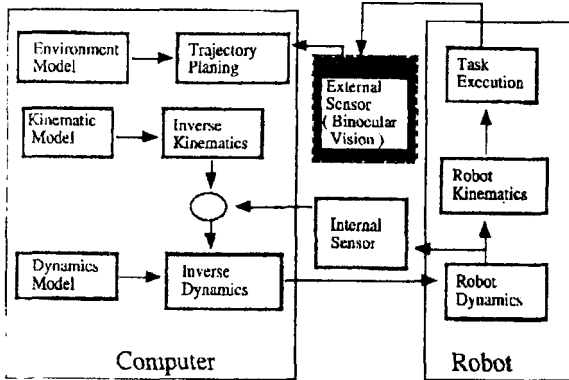


그림 1. VFC 로봇의 블럭선도

III. 視空間의 관절공간으로의 선형근사

兩眼視 VFC-로봇은 이미지 자코비안과 로봇 자코비안을 이용하여 제어된다. 여기서 End-effector와 관절공간 및 좌우 화상 상의 특징점과의 기하학적 관계식이 비선형이므로 로봇운동의 정량적해석을 위해 자코비안을 매 시간 계산해야 하고 그 계산량 또한 방대하므로 실시간 제어에 문제점이 있다.

기존 VFC-로봇의 양안은 좌우 화상 상에 맺힌 제어 대상 물체의 특징점 좌표값만을 이용하였으나 본 논문에서는 이 기능에 물체이동에 따른 시공간상의 양안의 수평 이동각과 수직이동각을 부가하여 전술한 비선형 기하학적 관계식을 선형근사화시켜 兩眼視 VFC로봇에 적용하였다.

1. 카메라와 로봇의 모델

兩眼視 LVFC-로봇의 배치는 인간의 눈과 팔을 모방해서 그림2와 같이 배열한다.

카메라의 양안은 수평, 수직방향으로 이동이 가능하고, 카메라는 수평방향으로만 이동 가능하다. 그리고 로봇은 어깨관절 2자유도를 갖는 2링크 3자유도 회전관절

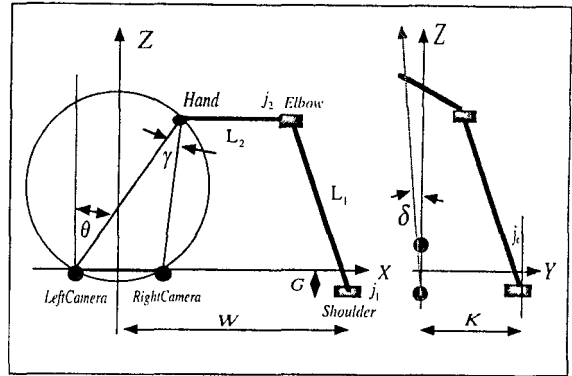


그림 2. 카메라와 로봇모델

형이다. 그림2에서 로봇의 관절각도  $J_0, J_1, J_2$ 는 로봇을 포함한 평면(X-Z평면)상에 결정된 각도이며 시공간 좌표  $\gamma, \theta, \delta$ 은 視線을 포함한 평면(X-Z평면)상에 결정된 각도이다.

2. 兩眼 視空間

시공간 좌표계는 兩眼視로 특징점을 바라볼 때 수평방향각  $\gamma$ 와 시각  $\theta$ , 수직방향각  $\delta$ 로 결정된 좌표계로 그림3과 같다.

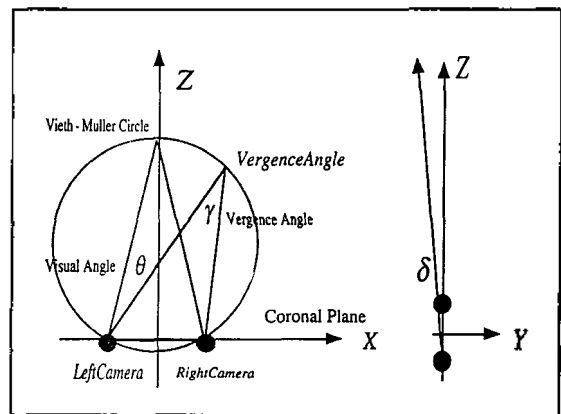


그림 3. 시공간 좌표계

그림2에서 스테레오 카메라가 정면을 향할 때, 시공간 좌표계( $\gamma, \theta, \delta$ )로부터 직각 좌표계( $x, y, z$ )로 변환은 식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned}
 x &= \frac{E \sin(2\theta)}{\sin(\gamma)} \\
 y &= -\hat{z} \sin(\delta) \\
 z &= +\hat{z} \cos(\delta)
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

$$\hat{z} = E \frac{\cos(\gamma) + \cos(2\theta)}{\sin(\gamma)}$$

또한 직각 좌표계(x, y, z)로부터 시공간 좌표계(γ, δ, θ)로 역변환은 식 (2)와 같이 유도된다.

$$\begin{aligned} \delta &= \tan^{-1}\left(\frac{x+E}{\hat{z}}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{x-E}{\hat{z}}\right) \\ \theta &= \frac{\tan^{-1}\left(\frac{x+E}{\hat{z}}\right) + \tan^{-1}\left(\frac{x-E}{\hat{z}}\right)}{2} \\ \delta &= -\tan^{-1}\left(\frac{y}{z}\right) \\ \hat{z} &= \sqrt{xy^2 + z^2} \end{aligned} \tag{2}$$

식 (1)과 식 (2)에서 E는 직각 좌표계 원점에서 좌우 안 중심까지의 거리이다.(그림2)

3. 로봇 운동학

그림2의 兩眼視 LVFC-로봇의 순운동방정식을 구하면 식 (3)과 같다.

$$\begin{aligned} x &= L_1 \cos(j_1) + L_2 \cos(j_1 + j_2) + w \\ y &= -\hat{z} \sin(j_0) + k \\ z &= +\hat{z} \cos(j_0) - g \\ \hat{z} &= L_1 \sin(j_1) + L_2 \sin(j_1 + j_2) \end{aligned} \tag{3}$$

또한 기하학적 방법을 적용하여 역운동방정식을 구하면 식 (4)와 같다.

$$\begin{aligned} j_0 &= -\sin^{-1}\left(\frac{\hat{y}}{\hat{x}}\right) \\ j_1 &= \tan^{-1}\left(\frac{\hat{y}}{\hat{x}}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{\sqrt{d}}{\hat{x}}\right) + \hat{z} + L_1^2 - L_2^2 \\ j_2 &= \tan^{-1}\left(\frac{\sqrt{d}}{\hat{x}^2} + \hat{z}^2 - L_1^2 - L_2^2\right) \\ \hat{x} &= x - w \\ \hat{y} &= y - k \\ \hat{z} &= \sqrt{\hat{y}^2 + (z + G)^2} \\ d &= (\hat{x}^2 + \hat{z}^2 + L_1^2 + L_2^2)^2 - 2[(\hat{x}^2 + \hat{z}^2) + L_1^4 + L_2^4] \end{aligned} \tag{4}$$

4. 視空間과 關節空間의 線形化

로봇의 운동방정식 및 시공간(γ, θ, δ)과 관절공간(j<sub>0</sub>, j<sub>1</sub>, j<sub>2</sub>)사이의 관계식은 비선형이므로 시각제어시스템에 이용될 경우 이미지자코비안 J<sub>I</sub>(I)과 로봇 자코비안 J<sub>R</sub>(θ)은 시간이 경과함에 따라 경신되어야 하고 그 계산량은

방대하다. 따라서 이같은 문제를 해결하고 실시간 제어를 하기 위해 선형화를 한다.

따라서, 직각 좌표계에서 관절공간으로 변환과 시공간에서 관절공간으로 변환을 선형화하면 식 (5), 식 (6)과 같다.

$$\begin{aligned} j'_0 &= A_1x + B_1y + C_1z + d_1 \\ j'_1 &= A_2x + B_2y + C_2z + d_2 \\ j'_2 &= A_3x + B_3y + C_3z + d_3 \\ j'_0 &= \Gamma_1\gamma + \Theta_1\theta + \Delta_1\delta + \epsilon_1 \\ j'_1 &= \Gamma_2\gamma + \Theta_2\theta + \Delta_2\delta + \epsilon_2 \\ j'_2 &= \Gamma_3\gamma + \Theta_3\theta + \Delta_3\delta + \epsilon_3 \end{aligned} \tag{5}$$

식 (5), (6)에서 j'<sub>0</sub>, j'<sub>1</sub>, j'<sub>2</sub>은 선형근사화 관절각이고 A, B, C 및 Γ, Θ, Δ는 선형근사화 계수이다. 선형근사계수는 작업 공간내에서 최소자승법을 이용하여 결정한다.

시공간으로부터 관절공간으로 변환은 식 (7)과 같이 행렬식을 이용하여 표현한다.

$$\begin{aligned} j &= RV + \epsilon \\ V &: (\gamma, \theta, \delta)^T \\ j' &: (j'_0, j'_1, j'_2)^T \\ R &: 3 * 3 \text{행렬} \\ \epsilon &: 3 * 1 \end{aligned} \tag{7}$$

카메라가 정면을 향하고 있으면 로봇의 작업 공간이 제한되므로 작업영역을 확대하기 위해 카메라를 회전시킨다. 작업영역 반경 Φ와 회전각 φ의 극 좌표계를 직각 좌표계(x, y, z)로 변환하면 식 (8)과 같다.

$$\begin{aligned} x &= \Phi \cos(\varphi) \\ y &= \Phi \sin(\varphi) \end{aligned} \tag{8}$$

한편, 작업영역을 확대하기 위해 카메라가 회전가능하도록 시스템을 구성하면 식 (7)은 식 (9)와 같이 된다.

$$j = R(\zeta)V + \epsilon \tag{9}$$

IV. 兩眼視 LVFC-로봇 해석

기존의 兩眼視 VFC의 flow chart는 그림 4와 같다.

兩眼視 LVFC로봇해석을 위한 스테레오 카메라 좌표계는 그림 5와 같다.

좌우 카메라 수평방향의 회전각을 α<sub>L</sub>, α<sub>R</sub>, 수직방향의 회전각을 α<sub>p</sub>라 하고, 좌우 화상 상의 특징점의 좌표를

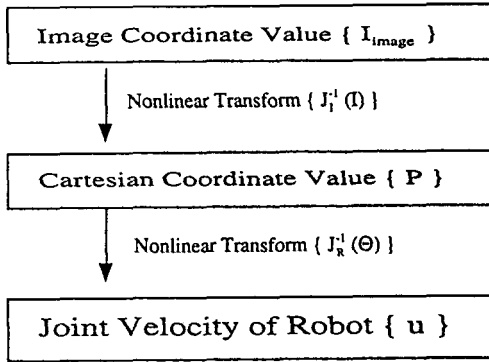


그림 4. 兩眼視 VFC 로봇의 flow chart

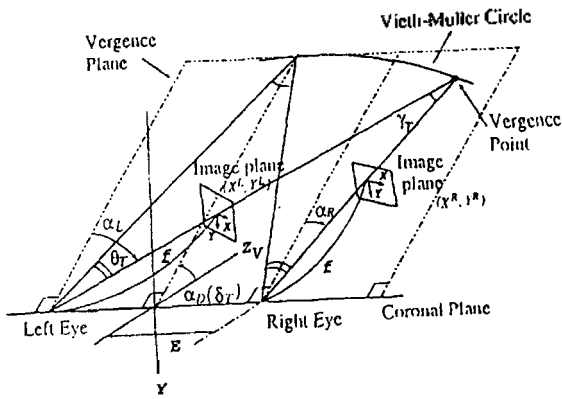


그림 5. 스테레오 카메라 좌표계

$(X^L, Y^L)(X^R, Y^R)$ 로 표현할 때 양안 시공간 좌표계  $V = (\gamma, \theta, \delta)$ 는 식 (10)과 같다.

$$V = \begin{pmatrix} \alpha_L - \alpha_R \\ (\alpha_L + \alpha_R)/2 \\ \alpha_D \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} X^L - X^R/f \\ (X^L + X^R)/2f \\ Y^L/f \end{pmatrix} \quad (10)$$

로봇의 동력학방정식이 이상적인 시스템이라 가정하면 제어입력  $u$ 는 식(11)과 같다.

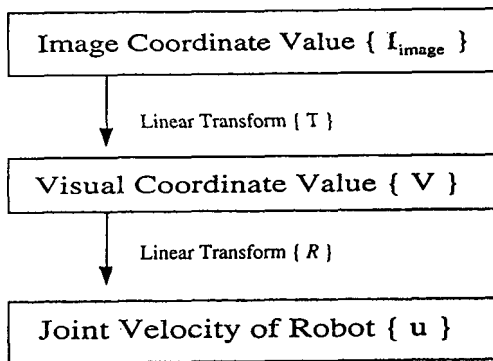


그림 5. 양안시 LVFC 로봇의 flow chart

$$u = \lambda R(S)(V - V_d) \quad (11)$$

식 (11)에서  $V_d$ 는 목표 시공간 좌표계이고  $\lambda$ 는 이득이다. 식 (10)을 식 (11)에 대입하면 식 (12)와 같다.

$$V = -\lambda R(\xi) \begin{pmatrix} (X^L - X^R) - (X_d^L - X_d^R)/f \\ (X^L + X^R) - (X_d^L + X_d^R)/2f \\ (Y^L - Y^L)/f \end{pmatrix} \quad (12)$$

$$= -\lambda R(\xi) T(I - I_d)$$

$$T = \begin{pmatrix} \frac{1}{f}, & \frac{-1}{f}, & 0, & 0 \\ \frac{1}{2f}, & \frac{-1}{2f}, & 0, & 0 \\ 0, & 0, & \frac{1}{f}, & \frac{-1}{f} \end{pmatrix}$$

식 (12)에서 兩眼視 LVFC-로봇 제어입력은 화상 정보만으로 표현 됨을 알 수 있으며 이를 실행하기 위한 flow chart는 그림 6과 같다.

### V. 시뮬레이션

Macintosh 840AV상에 실행되는 CodeWarrior C++을 사용하여 시뮬레이션을 수행하고 兩眼視 LVFC-로봇의 타당성을 검증한다.

그림 2에 대한 兩眼視 LVFC-로봇의 사양은 표 (1)과 같다.

표 1. Robot Specification and Camera Parameter

Link Length(mm)	$L_1 = 250, L_2 = 380$
Camera(mm)	$W = 200, K = 200, G = 0$
Baseline Length/2(mm)	$E = 38$
Focus Length	$f = 38$

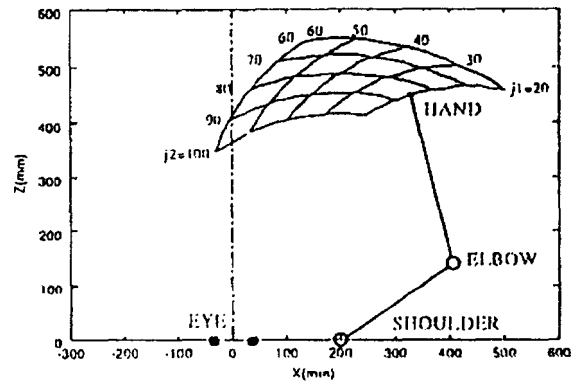


그림 7. 관절공간을 직각좌표공간으로 투영

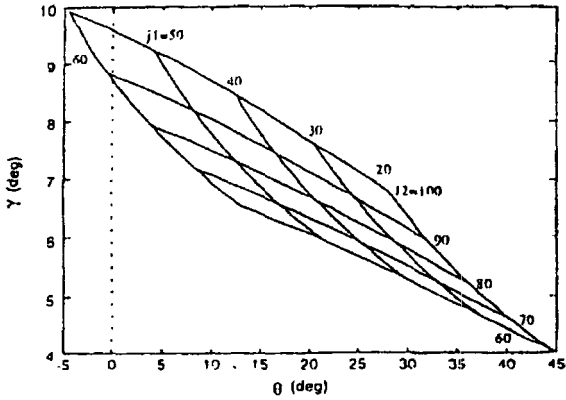


그림 8. 시공간을 관절공간으로 투영

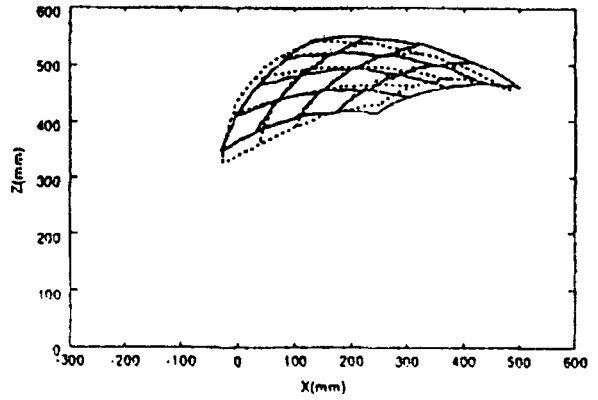


그림 10. 시공간의 선형근사

수직 관절각  $j_0=0(\text{deg})$ 으로 고정하고, 수평관절각  $j_1, j_2$ 를 변화 ( $20 < j_1 < 60, 60 < j_2 < 120(\text{deg})$ ) 할 때 End-effector의 궤적을 직각 좌표 공간에 투영하면 그림 7과 같다. 또한 관절공간을 시공간으로 투영하면 그림 8과 같다.

그림 7과 그림 8의 결과를 비교할 때 직각 좌표 공간과 관절공간 사이의 비선형성 보다 관절공간과 시공간사이의 비선형성이 덜함을 확인할 수 있다.

그림 (7)과 그림 (8)으로 나타낸 직각 좌표계와 시공간을 관절공간으로 선형 근사하는 변환식은 식 (13), 식 (14) 이고 이를 좌표계로 나타내면 그림 9, 그림 10과 같다.

$$\begin{aligned} j_1' &= -0.001180x + 0.00226z + 0.0182 \\ j_2' &= -0.000388x + 0.00381z + 3.25 \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} j_1' &= -12.1\gamma - 2.26\theta + 2.93 \\ j_2' &= 2.29\gamma + 1.94\theta - 1.92 \end{aligned} \quad (14)$$

그림 9와 그림 10으로 시각적인 선형화를 확인할 수 있고 이를 정량화한 근사오차(SSD: Square Sum Derivation)는 각각  $1609(\text{deg}^2), 427(\text{deg}^2)$ 이다. 결과적으로 직각 좌표계에서 보다 시공간에서의 정량적근사오차가 개선되었다.

선형근사식을 이용한 兩眼視 LVFC-로봇의 귀환시스템은 그림 11과 같다.

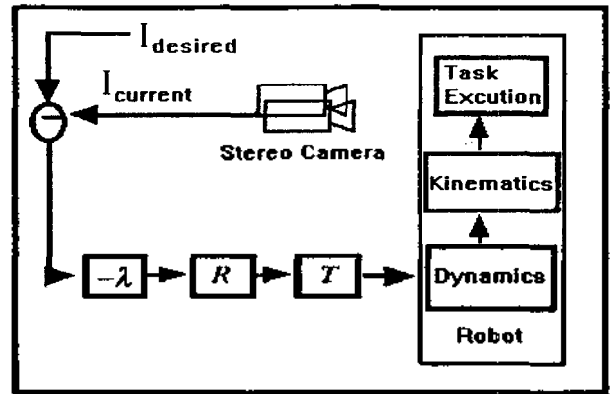


그림 11. 양안시 LVFC 로봇의 귀환시스템

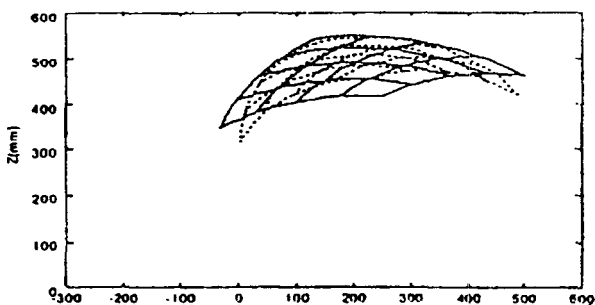


그림 9. 관절공간의 선형근사

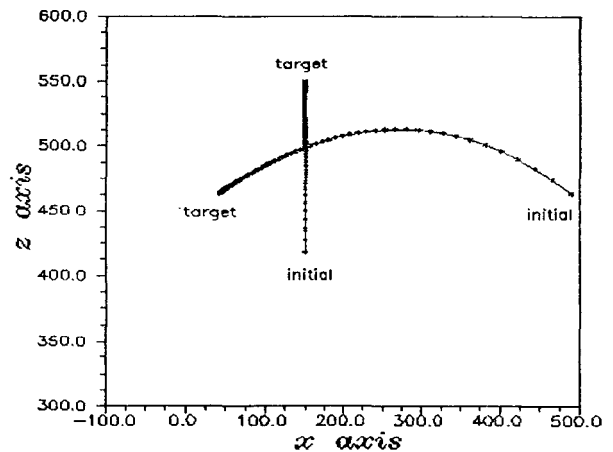


그림 12. End Effector의 전후좌우 운동궤적

초기위치에서 목표위치를 추적한 End-effector의 전후,좌우 운동 궤적은 그림 12와 같고, 대각운동궤적은 그림 13과 같다.

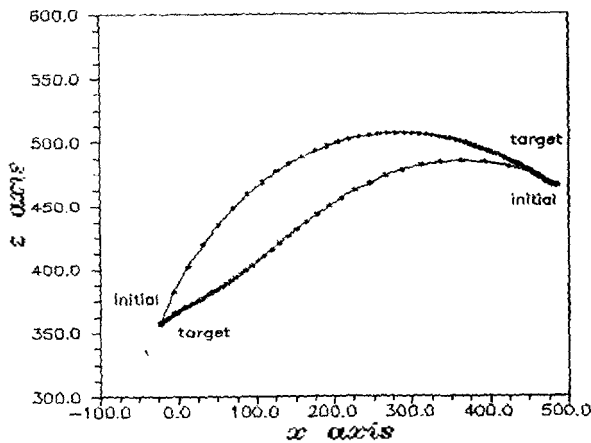


그림 13. End Effector의 대각 운동계획

VI. 결 론

兩眼視 VFC-로봇의 관절공간과 End-effector 그리고 좌우화상 특징점과의 기하학적 관계가 비선형인 문제점을 개선 보완하기 위해 본 논문에서는 자코비안 계산이 필요 없이 실시간 제어가 가능하도록 視공간 좌표계와 관절공간 사이의 선형화사식을 유도하였다. 이식을 이용하여 화상 좌표값만을 제어입력으로 하는 兩眼視 LVFC-로봇(Linear VFC)을 제안하고 시뮬레이션을 통해 초기 위치로부터 목표위치로 정확히 도달할 수 있음을 확인했다.(그림 12, 그림 13)

선형성을 정량적으로 평가할 수 있는 평가함수의 설정과 3차원 공간에서의 로봇운동에 대한 연구를 앞으로 계속하고자 한다.

참 고 문 헌

1. P.K.Allen et al., "Real-time visual servoing," in Proc. IEEE Int. Conf. Robotics Automat., pp851-856, Apr. 1991.
2. L.E.Weiss, A.C.Sanderson, "Dynamic sensor based control of robot with visual feedback," IEEE J.Robotics Automat., vol. RA-3, no. 5, pp404-417, Oct. 1987
3. A.J.Koive and N.Houshngi, "Real Time vision feedback for sservoing of a robotic manipulator with self-tuning controller," IEEE Trans. Syst. Man Cybern., vol. 21, no. 1, pp134-142, 1991.
4. Hiroshi Kase, "Manipulator Control by visual Servoing with Stereo Vision," 시스템 制御 情報 學會 論文誌, vol. 6, no. 8, pp360-367, 1993.
5. Nobuhiro OKADA and Tadashi NAGATA, "A Parts Picking System with a Range Finder and a Camera System," IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.1410-1415, 1995.
6. P.K.Allen et al., "Real-time visual servoing," in Proc.

7. IEEE Int. Conf. Robotics Automat., pp851-856, Apr. 1991.
7. L.E.Weiss, A.C.Sanderson, "Dynamic sensor based control of robot with visual feedback," IEEE J.Robotics Automat., vol. RA-3, no. 5, pp. 404-417, Oct. 1987.
8. A.J.Koive and N.Houshngi, "Real Time vision feedback for servoing of a robotic manipulator with self-tuning controller," IEEE Trans. Syst. Man Cybern., vol. 21, no. 1, pp134-142, 1991.
9. P.I.Corke, Visual Control of Robot Manipulators A Review. In K.Hashimoto, editor, Visual Servoing pages 1-32. World Scientific, 1993.
10. J.T.Feddema, C.S.George Lee, and O.R.Mitchell. Weighted Selection of Image Features for Resolved Rate Visual Feedback Control. IEEE Transactions on robotics and Automation, 7: 31-47, 1991.
11. J-O.Kim and P.K.Khosla, Dexterity Measures for Design and Control of Manipulators In Proc. IEEE/RSJ Int. Workshop on Intelligent Robots and Systems, pages 758-763, 1991.
12. A.J.Koiv and N.Houshngi, Real-Time Vision Feedback for Servoing Robotic Manipulator with Self-Tuning Controller. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 21: 134-142, 1991.
13. N.P.Papanikolopoulos, P.K.Khosla, and T.Kanade. Visual Tracking of a Moving Target by a Camera Mounted on a Robot: A Combination of Vision and Control. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 9(1): 14-35, 1993.
14. L.E.Weiss, A.C.Sanderson, and C.P.Neuman. Dynamic Sensor-Based Control of Robots with Visual Feedback. IEEE Journal of Robotics and Automation, 3: 404-417, 1987.

▲임 승 우 (Seung Woo Lim)



1988년 2월 : 조선대학교 공과대학  
전자공학과 졸업(공학사)  
1990년 2월 : 동대학원 전자공학과  
졸업(공학석사)  
1990년 3월 : 동대학원 전기공학과  
박사과정 입학  
1996년 10월 : 동대학원 박사과정  
수료  
1991년 9월 : 동신전문대학 전자과 전임강사  
1995년 4월 : 동신전문대학 전자과 조교수

▲박 창 균 : 14권 3호 참조