

로봇의 운동특성을 고려한 새로운 시각구동 방법

A Novel Visual Servoing Techniques Considering Robot Dynamics

이준수*+, 서일홍*, 배재욱*, 김태원**

* 한양대학교 전자공학과 (Tel: (0345)408-5802; Fax: (0345)408-5803; E-mail: ihsuh@shira.hanyang.ac.kr)

+ 한국과학기술연구원 정보전자부(Tel: 958-5747; Fax: 958-5749; E-mail: jslee@amadeus.kist.re.kr)

** 삼성항공 정밀기기연구소 (Tel: (0342)40-8446; E-mail: twkim@pacific.ssalab.samsung.co.kr)

Abstract A visual servoing algorithm is proposed for a robot with a camera in hand. Specifically, novel image features are suggested by employing a viewing model of perspective projection to estimate relative pitching and yawing angles between the object and the camera. To compensate dynamic characteristics of the robot, desired feature trajectories for the learning of visually guided line-of-sight robot motion are obtained by measuring features by the camera in hand not in the entire workspace, but on a single linear path along which the robot moves under the control of a commercially provided function of linear motion. And then, control actions of the camera are approximately found by fuzzy-neural networks to follow such desired feature trajectories.

To show the validity of proposed algorithm, some experimental results are illustrated, where a four axis SCARA robot with a B/W CCD camera is used.

Keywords Visual Servoing, Image Features, Fuzzy-neural Network, feature-based feature jacobian

1. 서론

최근 시각 구동은 지능형 로봇 응용을 위한 강력한 도구 중의 하나로 여겨져 왔다. 특히 시각 구동에서는 영상 특징 자코비안 방법이 주로 사용되어 왔다. 영상특징 자코비안은 구성분들이 카메라와 물체 사이의 상대적인 위치와 자세에 의해 표현되는 위치를 이용한 방법 (position-based feature jacobian)과, 영상특징을 이용하는 방법 (feature-based feature jacobian)으로 분류된다[5]. 위치를 이용한 방법은 영상특징 자코비안의 역변환을 이용하기 때문에 계산상의 복잡성과 특이해등을 고려해야 한다[7]. 영상 특징을 이용한 방법은 매 영상 샘플링 주기마다 영상특징 자코비안의 역변환을 실시간으로 구해야 하고 로봇 팔끝단의 6 자유도 운동 전부가 영상특징만으로 표현될 수 없다는 단점이 있다[3]. 이를 해결하기 위해 신경망을 이용하여 영상특징 자코비안을 학습하는 많은 시도가 있었다[1].

한편 로봇의 6 자유도 운동은 6개의 영상특징과 그 변화량으로 직접표현되며 자코비안 역변환을 피할 수 있는 퍼지소속 함수를 이용한 신경망 (FMFNN, Fuzzy Membership Function-based Neural Network)에 의해 근사화되었다 [2]. 그러나 로봇의 운동 특성이 고려되지 않았기 때문에 실제 로봇이 저속으로 움직이며 카메라의 자세운동이 완전히 고려되지 않았다.

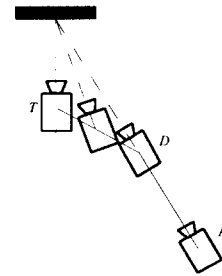


그림 1. 제시된 시각구동방법을 이용한 카메라의 운동
Fig.1 Schematic diagram of camera motion by employing the proposed visual servoing method

본 논문에서는 그림 1 에서와 같이 물체영상의 크기에 따라 두가지의 제어방식이 적용되는 방법을 제안한다. 물체의 영상이 미리 정해둔 크기보다 작을 경우 카메라의 시선 방향만으로 움직이고, 클 경우에는 물체의 정면까지의 선형경로를 따라 카메라와 물체사이의 주어진 기준 상대 자세를 유지하면서 움직이도록 제어된다. 후자의 경우 [2]의 FMFNN을 사용하였으며 투시사영 모델을 이용한 새로운 영상특징을 사용하였다. 제안하는 새로운 투시사영 모델을 이용한 영상특징은 [6]에서의 시각구동을 위한 영상인식 기준을 만족시키며, 실제 응용에서도 실시간으로 처리가 가능하다.

제안하는 방법의 유용성을 보이기 위해 CCD 카메라를 장착한 4축 스카라(SCARA) 로봇을 이용해 실험결과를 보였다.

2. 시각구동을 위한 영상 특징

시각 변환제어를 위한 영상특징의 선택에 있어 영상특징의 유일성, 강인성, 계산의 간편성등을 포함한 영상선택 기준이 [4]에서 제안되었다. 시각구동을 위해 이런 기준을 만족시키면서 기준영상이 정사각형인 경우에 대하여 꼭지점의 좌표를 이용하여 다음과 영상특징을 선택하였다.

- F1 = 영상의 무게중심의 x 좌표
- F2 = 영상의 무게중심의 y 좌표
- F3 = 영상의 면적
- F4 = 카메라와 물체의 x 축 롤링(rolling) 각도
- F5 = 카메라와 물체의 y 축 핏치(pitching) 각도
- F6 = 카메라와 물체의 z 축 요잉(yawing) 각도

영상의 무게중심과 면적은 식(1), (2), (3)에 의해 구해진다.

$$F1 = (x1+x2+x3+x4) / 4 \quad (1)$$

$$F2 = (y1+y2+y3+y4) / 4 \quad (2)$$

$$F3 = (x2+x4-x1-x3) * (y2+y4-y1-y3) \quad (3)$$

식(1),(2),(3)에서 x1, x2, x3, x4 은 각꼭지점의 x 좌표이고, y1, y2, y3, y4 는 y 좌표이다. 카메라와 물체의 상대적 회전각도인 F4, F5, F6 를 구하기 위해서 투시사영 모델[6]을 이용한다. 그림 2 와 같이 기준좌표계 (x,y,z)에 대해 카메라가 x 축으로 x0 만큼 위에서 α 만큼 아래에 있는 직사각형을 내려다 보는 좌표계(x'', y'', z'') 를 생각해 보자.

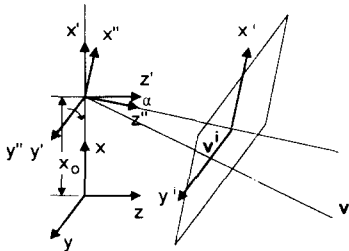


그림 2. 물체의 카메라 영상의 투시사영
Fig. 2. Perspective Transformation with object and camera frames

기준좌표계상의 한점 V 에 대해 영상좌표계 (x'', y'', z'') 상의 V'' 는 (4-7)의 매트릭스에 의한 변환에 의해 식(8)과 같이 구해진다.

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -x_0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4) \quad R = \begin{bmatrix} c\alpha & 0 & -s\alpha & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ s\alpha & 0 & c\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$G = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -f \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6) \quad P = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1/f & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$V'' = PGRTV \quad (8)$$

여기서 f 는 카메라의 초점거리, T 는 x 축으로의 이동, R 은 카메라 좌표계의 y 축 회전, G 는 pinhole 모델에 의한 영상으로의

이동, P 는 초점거리와 실제거리에 의한 영상의 크기변환을 나타낸다. 그리고 x_0 는 기준좌표계에서의 x 축이동, $c\alpha$ 는 $\cos\alpha$, $s\alpha$ 는 $\sin\alpha$ 이다. 영상좌표계에서 영상은 x와 y 좌표만 중요하므로 식(9)과 식(10)으로 표현된다.

$$x'' = f \frac{\cos\alpha(x-x_0) - \sin\alpha z}{\sin\alpha(x-x_0) + \cos\alpha z} \quad (9)$$

$$y'' = f \frac{y}{\sin\alpha(x-x_0) + \cos\alpha z} \quad (10)$$

투시사영 모델에는 흥미있는 두가지 성질이 있는데 하나는 수직사점(vertical vanishing point)이고 다른 하나는 수평선(horizontal line)과 사점(vanishing point)이다[6]. 수직사점이란 그림 3. 예사와 같이 영상좌표계의 수직인 x'' 축에 평행인 직선은 직선의 위치와 크기에 상관없이 x'' 축 상의 한점인 수직사점에 모인다는 성질이 있다. 수직사점을 구하기 위해 식(9)(10)을 x'' 와 y'' 에 대해 정리하면 식(11)과 같이 되고 이때 x'' 축상의 좌표는 식(12)과 같다. 따라서 y'' 축에 대한 핏치각도(F5)는 식 (13)과 같이 구해진다.

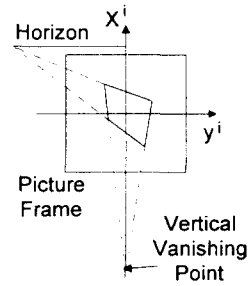


그림 3. 사점
Fig. 3. Vanishing Point

$$x'' = \left(-\frac{z}{\sin\alpha y} \right) y'' + \frac{f}{\tan\alpha} \quad (11)$$

$$x'' = \frac{f}{\tan\alpha} \quad (12) \quad \alpha = a \tan(f/x'') \quad (13)$$

수평선은 그림 2의 기준좌표계상의 직선이 y, z 평면에 평행할 경우 $(0, y, my+b)^T$ 의 형태를 갖게 되는데, 이러한 직선은 카메라로부터의 거리와 b에 상관없이 그림 3과 같이 m에 의해 결정되는 수평선상의 한점에 영상의 사점이 모이게 된다. 식(9)와 (10)에 $(0, y, my+b)^T$ 을 대입하고 정리하면 식(14)와 같이된다.

$$x'' = \frac{-mx_0 y'' + f(x_0 \cos\alpha + bs\sin\alpha)}{\sin\alpha x_0 - \cos\alpha b} \quad (14)$$

수평선상의 사점의 좌표를 구해보면 식(15)와 (16)과 같이 x'' 와 y'' 좌표가 구해진다. 식(16)에서 m은 y, z 평면상의 직선의 기울기로 x'' 에 대한 롤링각도(F4)를 식(17)과 같이 구할 수 있다.

$$x'' = -f \tan\theta \quad (15) \quad y'' = \frac{f}{m \cos\alpha} \quad (16)$$

$$\beta = a \tan\left(\frac{f}{y'' \cos(\alpha)} \right) \quad (17)$$

마지막으로 요잉각도(F6)는 그림 3에서의 수직사점이 카메라의

z에 대해 회전한 각도로 식(18)와 같이 구해진다.

$$\gamma = \text{atan2}(v_{D_y}, v_{D_x}) \quad (18)$$

3. 기준영상계적과 시선방향 운동의 학습

기준영상계적은 로봇손이 진동없이 목표지점에 정확하게 도달하도록 설정되어야 한다. 이를 위해 그림 4에서와 같이 카메라 좌표계 상의 L_1 위치에서부터 목표위치 T 까지의 선형 경로를 따라 로봇손이 움직이도록 상용 산업용 로봇 제어기에서 기본적으로 제공하는 선형운동 함수를 이용해서 얻는다. 그림 5(a), (b)는 각각 로봇의 동역학을 $6.5/(s + 6.5)$ 로 가정했을 때, 로봇 손의 선형운동을 위한 위치계적과 속도 프로파일이다. 로봇 손이 주어진 위치계적 혹은 속도 프로파일을 따라가도록 학습하기 위해, 영상특징 F_3 의 크기가 D 지점에서 측정된 영상특징 F_3 의 크기인 F_3^D 보다 작을 때까지 로봇이 최대 속도로 움직이게 한후 기준영상특징 $F_3^R(t)$ 은 매 시각 샘플링 주기마다 D 지점에서 T 지점 사이의 선형경로에서 얻는다.

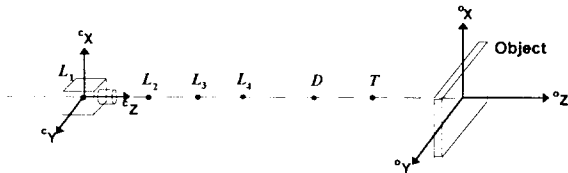


그림 4. 카메라의 시선이 물체의 중심과 일치됨
Fig. 4. The line of sight of camera which is aligned to the center of the object

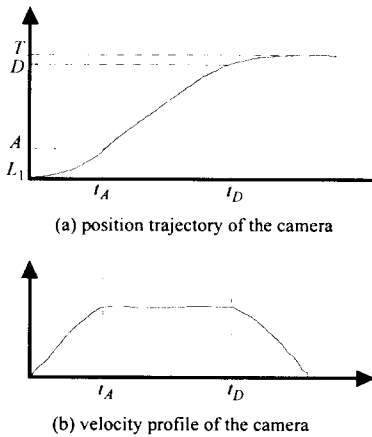


그림 5. 카메라의 위치와 속도 계적

Fig. 5. A position trajectory and a velocity profile of a camera in hand

여러 속도 프로파일에 대한 영상특징계적을 얻기위해 그림 4의 선형경로상의 임의의 위치 $L_i, i=2,3,\dots,n$ 에서부터 로봇손을 출발시킨다. 속도에 따라 어느 영상계적이 선택되어야 하는지를 구분하기 위해 영상특징 뿐만 아니라 로봇손의 속도를 알 필요가 있다. 여기서는 로봇 손 팔끝단의 속도를 알아내는데 영상특징 F_3 의 변화량인 δF_3 를 사용한다.

이제 δX_3 를 단위 시각 샘플링 주기 동안에 카메라가 OZ 축을 따라 움직인 거리라고 하고, $G(F_3, \delta F_3)$ 를 $(F_3, \delta F_3)$ 와 δX_3 사이의 관계식이라고 하면 근사적인 $G(F_3, \delta F_3)$ 를 얻기 위하여 FMFNN의 변형된 형태를 사용한다. 특히 $G(F_3, \delta F_3)$ 는 m 개의 함수 $G_i(F_{3i}, \delta F_{3i}), i=2,3,\dots,m$ 를 퍼지로 조합함으로써 근사화한다. 이를 위해, 일반성을 잃지 않는 범위 내에서 δF_{3i} 가 주어진다고 가정하여, 퍼지규칙에 의해 근사화된 $G_i(F_{3i}, \delta F_{3i})$ 가 초기에 설정된 후, FMFNN에 의해 반복적으로 개선된다.

정밀한 시각추적을 위해, 대략적인 추적의 초기 퍼지규칙은 다음과 같이 FMFNN의 형태로 표현된다.

$$\delta^c X_3 = \sum_{i=1}^q \lambda_i \Phi_i(F_3) \quad (19)$$

FMFNN의 기본함수 $\phi_i(\bullet)$ 는 i 번째 퍼지규칙의 입력 퍼지변수의 삼각형 모양의 소속함수이다. FMFNN의 가중치 λ_i 는 출력 퍼지 변수의 싱글톤(singleton) 소속함수이다. 이제 λ_i 는 기준영상특징계적 $F_3^R(t)$ 을 이용해 반복적으로 수정된다. 이를 위한 FMFNN의 오차함수는 다음과 같이 주어진다.

$$E(t) = \frac{1}{2} (F_3^R(t) - F_3(t))^2 \quad (20)$$

수정된 FMFNN의 가중치를 적용하기 위한 학습규칙은 다음과 같이 주어진다.

$$\lambda_i(t+1) = \lambda_i(t) + k [F_3^R(t) - F_3(t)] \text{sgn} \left(\frac{F_3(t) - F_3(t-1)}{\lambda_i(t) - \lambda_i(t-1)} \right) \quad (21)$$

여기서, k 는 수정된 FMFNN의 선형 출력단 함수의 기울기이다. 이전에 학습되지 않은 영상특징계적을 만날 때에는 이전에 학습된 시선방향운동들을 이용하여 처리할 수 있다. 시선방향운동을 위한 시각구동 운동의 운동역학들이 많이 다르지는 않기 때문에 이를 위해 간단한 선형 보간 방법이 사용된다. 즉, 카메라의 OZ 축에 대한 운동명령값인 δX_3 는 다음과 같이 결정된다.

$$\delta X_3 = \Psi(F_3)_{\delta F_3} = \frac{|\delta F_3^i - \delta F_3| G_{i+1}(F_3, \delta F_3) + |\delta F_3^{i+1} - \delta F_3| G_i(F_3, \delta F_3)}{|\delta F_3^i + \delta F_3^{i+1}|} \quad (22)$$

여기서 δF_3 는 δF_3^i 와 δF_3^{i+1} 사이의 값으로 계산된다.

4. 게이즈(gaze) 제어와 자세운동

카메라의 시선방향 운동이 물체의 중심과 일치하지 않을 경우에 대해서도 게이즈 홀딩이 되도록 하기 위해서는 카메라가 물체에 접근하는 방향 OZ 에 대해 수직인 축들에 대해 얼마만큼 회전해야 하는지를 결정해야 한다. 이를 위해 그림 6과 같이 카메라와 물체 사이의 기하학적 관계를 이용하여, (2)에서의 F_2 이 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$F_2 = k_s \frac{f}{cZ_o} cY_o \quad (23)$$

여기서, f 와 k_s 는 각각 카메라의 초점거리와 영상크기상수로써 미리 알고 있는 값이다. 식(23)에서, cY_o 와 cZ_o 는 각각 카메라 좌표계를 기준으로한 물체의 cY 방향과 cZ 방향의 위치이다.

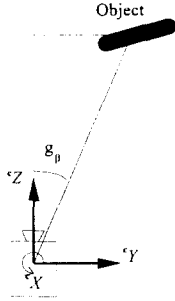


그림 6. 물체에 대한 카메라의 상대적인 요잉(yawing) 각
Fig. 6. The relative yawing angle of the camera with respect to the object

그래서, 식(23)을 이용하여, 게이즈 홀딩을 위한 각 g_β 는 영상 특징 F_2 만을 이용하여 다음과 같이 얻어질 수 있다.

$$g_\beta = \tan^{-1}\left(\frac{cY_o}{cZ_o}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{F_2 cZ_o / k_s f}{cZ_o}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{F_2}{k_s f}\right) \quad (24)$$

3 차원 배치상에서의 게이즈 홀딩을 위한 카메라의 피칭각 g_α 는 다음과 같이 주어진다.

$$g_\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{F_1}{k_s f}\right) \quad (25)$$

D 지점에서 부터 T 지점 까지를 선형경로로 보고 쫓아가기 위한 $D(oX_D, oY_D, oZ_D)$ 를 추정하기 위해 퍼지론을 이용한 위치 추정 방법이 제안된다. 상대적인 피칭각과 요잉각을 0 deg 로 고정 시켜 놓은 상태로 이미 구해놓은 F_3 와 실제 거리와의 관계정보를 이용하여 퍼지규칙이 설계된다. 이를 위해 d_{DT} 를 D 지점과 T 지점 사이의 거리라 하고, F_3^D 와 F_3^T 를 각각 D 지점과 T 지점에서 측정된 영상특징이라 하자. 또한 설계하는 퍼지규칙의 갯수를 의미하는 상수 n 을 이용하여 δF_3^T 를 $(F_3^T - F_3^D)/n$ 이라고 정의하자. 그런 후, 식(26) 같이 D 지점에서 T 지점 까지의 선형경로상의 d_{DTi} 를 선택한다.

$$F_{3i} = F_3 \text{ at } d_{DTi} = F_3^D + i \cdot \delta F_3^T, \text{ for } i = 1, 2, \dots, n \quad (26)$$

물체의 실제크기 F_3 는 식(13)(17)에서 구한 α 와 β 에 의해 식(27)과 같이 추정할 수 있다.

$$\hat{F}_3 = F_3 \cos^{-1}(\alpha) \cos^{-1}(\beta) \quad (27)$$

카메라와 물체 사이의 상대위치를 추정 하기 위한 퍼지 규칙은 식(28)과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} &\text{if } \hat{F}_3 \text{ is near } F_{3i} \\ &\text{then } {}^oZ_c^* \text{ is near } ({}^oZ_T + d_{DTi}), \text{ for } i = 1, 2, \dots, n, \end{aligned} \quad (28)$$

이때, ${}^oZ_c^*$ 와 oZ_T 는 각각 물체를 기준으로한 카메라의 추정된 상대위치와 미리 계산된 목표지점의 추정된 상대위치이다.

이제, 물체 좌표계를 기준으로한 T 를 알 수 있고 현재 카메라의 위치는 식(27)와 (28)을 이용하여 추정할 수 있기 때문에, 현재 카메라의 위치에서 T 까지의 직선을 나타내는 단위벡터 u_c 는 식(29)와 같이 주어진다.

$$\bar{u}_c = \begin{bmatrix} u_{cx} \\ u_{cy} \\ u_{cz} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{\tan^2 \alpha + \tan^2 \beta + 1}} \begin{bmatrix} \tan \alpha \\ \tan \beta \\ 1 \end{bmatrix} \quad (29)$$

그래서, 매 시각 샘플링 주기 동안에 D 에서 T 까지의 선형경로를 따라 카메라가 움직이도록 위치이동 명령 $\delta^c X_1, \delta^c X_2, \delta^c X_3$ 은 식(22)에서 $\Psi(F_3)$ 를 이용하여 식(30)과 같이 계산된다.

$$\begin{bmatrix} \delta^c X_1 \\ \delta^c X_2 \\ \delta^c X_3 \end{bmatrix} = \Psi(\hat{F}_3) \bar{u}_c \quad (30)$$

로봇의 자세는 피칭각 E_α 와 요잉각 E_β 를 ${}^oZ_C, \delta^c X_1, \delta^c X_3, \alpha, \beta$ 를 이용하여 식(31),(32)과 같이 구한다.

$$E_\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{{}^oZ_c^* \cos \alpha - \delta^c X_1}{{}^oZ_c^* - \delta^c X_3}\right) \quad (31)$$

$$E_\beta = \tan^{-1}\left(\frac{{}^oZ_c^* \cos \beta - \delta^c X_1}{{}^oZ_c^* - \delta^c X_3}\right) \quad (32)$$

이제, 팔끝단에 달린 카메라의 회전제어 명령 δX_6 은 영상특징 F_6 에 의해 구해진다.

5. 실험

제안한 시각구동 방법의 유용성을 보이기 위하여 흑백 CCD 카메라를 장착한 4 축 수평다관절로봇(SCARA)을 사용하였다. CCD 카메라는 신호모듈 IK-M41MK와 초점거리가 7.5mm인 렌즈모듈 IK-M30M으로 구성되어 있다. 제어시스템은 상용 32bits CPU 보드와 실시간 멀티태스킹 O.S인 VxWorks를 채택하였다. 영상 획득과 영상특징 추출을 위해 상용 32bits CPU 보드와 흑백 프레임 그래버인 DT1451이 제어시스템에 장착되었다. 물체는 검은색 배경 위에 4cmx4cm의 흰색 사각형으로 설정하였다. 목표지점 T 는 로봇 좌표계에서 (25.3, 55.8, 10.8)cm로 주어졌으며 단위 시각 샘플링 주기인 160msec 동안에 카메라 좌표계의 카메라가 움직이는 최대 거리 $\delta X_{max}, \delta Y_{max}, \delta Z_{max}$ 는 11mm로 주어졌다.

위치제어를 계산하기 위하여, $L_I(13.0, 55.8, 10.8)$ cm에 위치해 있는 카메라를 T 를 향해 최대 속도로 움직이게 만든후 카메라의 위치제적으로 부터 감속시작 지점인 D 를 구한다. 이때 영상 특징제적을 구하기 위하여 D 에서 T 구간까지 F_3 (면적)를 계산하고 이를 영상특징 제적으로 저장한다. 시선방향 운동의 학습을 위하여, 11개의 초기 퍼지 규칙이 사용된다. 그리고, 그 입력변수의 소속함수는 그림 7과 같다. 그림 8는 식(3)에서의

FMFNN을 이용하여 학습하는 동안의 F_3 의 궤적을 보여주고있다. D 지점을 통과하는 순간, 로봇트가 여러 가지 속도로 지나갈 수 있으므로 카메라를 $L_2(15.0, 55.8, 10.8)\text{cm}$, $L_3(17.0, 55.8, 10.8)\text{cm}$, $L_4(19.0, 55.8, 10.8)\text{cm}$ 의 위치에서 시작하여 목표지점 T 까지 움직이게 하면서 각각의 영상특징 궤적을 계산한다.

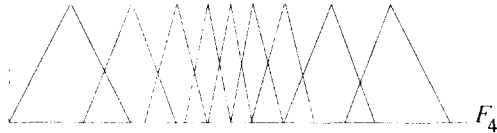


그림 7. 입력의 멤버십 함수
Fig. 7. Membership functions for input

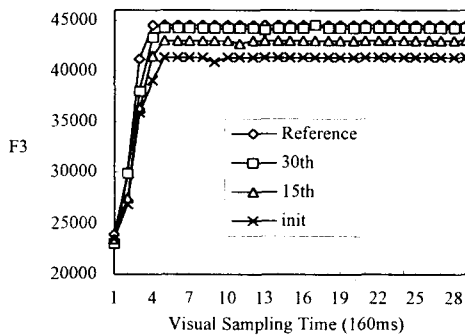


그림 8. 학습횟수에 대한 특징궤적

Fig. 8. Feature trajectories with respect to the number of learning trials

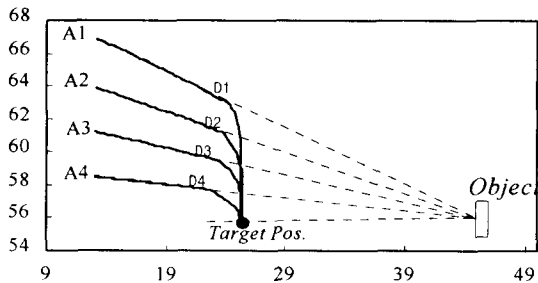


그림 9. 제안된 알고리즘의 추적 성능

Fig. 9. The servoing performances of the proposed algorithm

그림 9은 제안한 시각구동 방법의 실험적 성능을 보여주고 있다. 여기서 카메라는 $A_1(13.0, 58.9, 10.8)\text{cm}$, $A_2(13.1, 61.2, 10.8)\text{cm}$, $A_3(13.0, 63.96, 10.8)\text{cm}$, $A_4(13.0, 66.87, 10.8)\text{cm}$ 에서 부터 목표지점 T 까지 시각구동에 의해 움직인다.

6. 결론

이 논문에서는 새로운 영상특징과 개선된 시각구동 방법이 제안되었다. 상대적으로 노이즈에 매우 강하고 크기에 영향력을 받지 않는 특성을 가진 영상특징을 얻기 위해 투시사영모델이 사용되었다. 로봇의 운동특성을 보상하기 위해 시선방향

운동의 학습은 기준영상 특징궤적을 전체 작업영역에서 아니고 상용 선형운동 함수의 제어하에서 움직이는 로봇의 단일 직선 경로에서 로봇손에 달린 카메라에 의해 추출되는 영상특징들에 의해 얻어진다. 카메라의 자세 운동은 게이즈 홀딩에 의해 제어되면서, 카메라의 시선방향 운동은 퍼지 신경망에 의해 기준 영상특징 궤적을 따라가도록 근사적으로 제어된다. 실험 결과를 통해, 제안한 시각구동방법이 전체 작업영역 내의 여러 경로에 대해서도 동작한다는 것을 보였다.

우리가 제안한 시각구동 방법의 장점은 이제 다음과 같이 요약될 수 있다. 1) 로봇트의 운동역학 특성을 영상특징궤적을 사용하여 보상함으로써 효과적으로 고려하였다. 2) 새로운 투시모델을 이용한 영상특징은 영상 노이즈와 혹은 계산상의 오차에 강하다. 3) 카메라, 물체, 환경에 대한 위치정보가 상대적으로 적게 필요하다. 4) 전체 작업 영역이 아닌 단일 선형경로에서만 학습하면 되므로 학습량이 적다. 5) 단일 선형 경로 내에서의 시선방향운동과 게이즈 홀딩을 이용함으로써 로봇트의 시선방향운동이 전체 작업 공간 내에서 보장된다. 6) 기존의 영상특징 자코비안과 비교할 때, 영상특징 자코비안의 역변환을 계산하지 않아도 되므로, 상대적으로 계산 시간이 빠르다.

참고문헌

- [1] H.Hashimoto, T.Kubota, W-C.Lo, and F.Harashima, "A control scheme of visual servo control for robotic manipulators using artificial neural network," In Proc. of *IEEE Int. Conf. Control and Applications*, pp.TA-3-6, 1989 (Jerusalem, Israel).
- [2] I.H.Suh and T.W.Kim, "Fuzzy Membership Function Based Neural Networks with Applications to the Visual Servoing of Robot Manipulators," *IEEE Trans. Fuzzy Systems*, Vol.2, No.3, pp.203-220, Aug. 1994.
- [3] J.T.Feddema and O.R.Mitchell, "Vision-guided servoing with feature-based trajectory generation," *IEEE Trans. Robotics and Automation*, Vol.5, No.5, pp.691-700, Oct. 1989.
- [4] J.T.Feddema, C.S.G.Lee, and O.R.Mitchell, "Weighted selection of image features for resolved rate visual feedback control," *IEEE Trans. Robotics and Automation*, Vol.7, No.1, pp.31-47, Feb. 1991.
- [5] P.I.Corke, "Visual Control of Robot Manipulator - A Review," In *Visual Servoing: Real-Time Control of Robot Manipulators Based on Visual Sensory Feedback*, K.Hashimoto, Ed., World Scientific Publishing Co., 1993.
- [6] Richard O. Duda, Peter E. Hart, *Pattern Classification and Scene Analysis*, A Wiley-Interscience Publication
- [7] W.Jang and Z.Bien, "Feature-based visual servoing of an eye-in-hand robot with improved tracking performance," In Proc. of *IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp.2254-2260, 1991.