

Experiments on a Visual Servoing Approach using Disturbance Observer

李 峻 秀* · 徐 一 弘**
(Joon-Soo Lee · Il Hong Suh)

Abstract - A visual servoing method has been proposed based on disturbance observer to eliminate the effect of the off-diagonal component of image feature Jacobian, since performance indices such as measurement sensitivity of visual features, sensitivity of the control to noise and controllability could be improved when an image feature Jacobian was given as a block diagonal matrix. In this paper, experimental results of disturbance observer-based visual servoing are discussed where Samsung FARAMAN-AS1 6-axis industrial robot manipulator is employed. Also, the feature saturator is proposed to stabilize the disturbance observer loop by saturating the differential changes of the image features.

Key Words : image-based visual servoing, disturbance observer

1. 서 론

시각구동은 인간과 같이 로봇이 직접 눈으로 보면서 작업을 할 수 있다는 장점으로 인하여 많은 연구가 진행되어 오고 있다. 영상 기반 제어(image based control)는 로봇의 움직임에 대한 영상특징의 변화량을 나타내는 영상 특징 자코비안을 이용하여 3차원 영상 정보의 재구성이 필요 없고 센서 모델링과 카메라 보정으로 인한 오차를 줄일 수 있는 장점으로 인하여 연구의 많은 부분을 차지하고 있다[1].

영상 기반 시각구동의 신뢰성 있는 제어를 위해서는 영상 특징의 측정성과 민감성 그리고 로봇 머니플레이터의 제어성과 안정성을 고려해야 한다. 이러한 시각 구동 제어의 성능을 평가하기 위하여 영상 특징 자코비안 행렬의 특이값을 이용한 성능지수들에 대하여 많은 연구되어 오고 있다[2-5]. Feddema[2]는 영상 특징 자코비안의 조건지수(condition number)를 이용하여 영상특징의 측정성(observability) 그리고 로봇 머니플레이터의 제어성(controllability)과 민감성(sensitivity)이 향상되도록 영상 특징점을 선택하였다. Hashimoto[3]는 영상기반 제어의 민감성이 좋아지도록 최소 특이값이 커지는 영상 특징을 이용하였다. Sharma와 Huchinson[4]은 조작성능지수를 영상 특징 자코비안 행렬에 적용한 특이값의 곱인 운동 인지도(motion perceptibility)를 도입하였고, Nelson과 Khosla[5]는 시각 분해 타원(visual

resolvability ellipsoid)을 이용하여 시각센서가 물체의 위치와 방향을 분해할 수 있는 정도를 나타내었다.

본 논문의 선행 연구로 시각구동의 제어 성능을 향상시키기 위해 외란관측기[6][7], 영상사점 (vanishing point)[8]을 이용한 영상특징 자코비안과 블록 대각 행렬을 이용하여 조건지수를 감소시키는 연구를 하였다[9][10]. 영상사점을 이용하여 상위 블록 삼각 영상특징 자코비안 행렬은 구하고, 외란 관측기로 대각 이외의 성분 제거로 인한 오차를 보상하며 외부의 외란을 제거하였다.

본 논문에서는 선행 연구[9][10]에 대하여 Samsung FARAMAN-AS1 6축 다관절 로봇을 이용한 손눈(eye-in-hand) 구조의 시각구동 방법을 구현하고 실험 결과를 분석하였다. 최대특이값은 감소하고 최소특이값은 약간 증가하였으며 영상 특징 자코비안의 조건지수는 감소하여 성능이 향상되는 결과 보였다. 특이값의 곱인 운동 인지도에 대해서는 블록 이외의 성분의 제외에도 불구하고 같은 값을 수학적으로 증명하였다. 특히 실제 구현에 있어 속도 명령이 로봇 머니플레이터의 운동 능력의 최대 범위를 벗어나는 경우에 영상 특징의 미분 변화량을 제한하기 위해 특징 포화기(feature saturator)를 제안하였다.

본 논문은 선행 연구에서 제안한 외란 관측기를 이용한 시각구동 방법에 대하여 2장에서 간단히 설명하였다. 3장에서는 실제 구현에 있어 안정성을 위하여 특징 포화기를 도입한 시각 구동 제어기를 제안한다. 삼성 FARAMAN 6축 산업용 로봇을 이용한 실험결과는 4장에서 보이겠다. 마지막으로 5장에서 결론을 기술한다.

* 正 會 員 : 韓國科學技術研究院 知能制御研究센터 研究員
漢陽大 電子工學科 博士課程

** 正 會 員 : 漢陽大 電子工學科 教授 · 工博
서울대 ERC-ACI 연구위원 · 工博

接受日字 : 1999年 4月 6日

最終完了 : 1999年 9月 17日

2. 외란 관측기를 이용한 시각 구동 방법

외란관측기를 이용한 시각구동 방법은 블록 삼각 영상 특징 자코비안 행렬을 블록 대각 행렬로 변환하면 최대 특이값이 작아지고 최소 특이값이 커져서 조건지수가 작아져 영상 특징의 측정성, 로봇 머니플레이터의 제어성과 민감성이 향상되고 영상기반 제어의 민감성이 좋아진다는 장점에 의해 제안되었다[9][10]. 외란관측기는 블록 삼각 행렬의 대각 이외의 성분을 제거함으로써 발생하는 오차를 보상에 주고 외란을 감소시켜 주는 기능을 한다. 영상 특징 자코비안의 특이값을 이용한 성능지수는 다음과 같이 정의된다.

$$\kappa = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\min}} \geq 1. \quad (1)$$

여기서 σ_{\max} 는 최대 특이값이고, σ_{\min} 는 최소 특이값이다. κ 는 자세 제어성, $\kappa(J)$, 과 제어 민감성으로 사용되며 다음과 같이 정의된다.

$$\kappa(J) = \|J\| \|J^{-1}\| \quad (2)$$

여기서 행렬 norms 스펙트럴 레디우스 이론 (Spectral Radius Theorem) [11]에 의해 다음과 같이 정의된다.

$$\|A\| = \max\{\sigma_1, \dots, \sigma_p\}, \quad (3)$$

$$\|A^{-1}\| = 1/\min\{\sigma_1, \dots, \sigma_p\}. \quad (4)$$

여기서

$$\sigma_1, \dots, \sigma_p: J_f \text{의 특이값.}$$

영상 특징 자코비안은 Weiss등[12]에 의해 제안되었으며 로봇의 움직임에 대한 영상특징의 변화량의 관계를 나타내며 식(5)와 같이 쓸 수 있다.

$$\dot{\xi} = J_f \dot{x} \quad (5)$$

여기서 \dot{x} 는 로봇의 움직임의 변화량이고 $\dot{\xi}$ 는 영상특징의 변화량이다.

J_f 의 역행렬의 norm $\|J_f^{-1}\|$ 는 영상 특징 변화에 대한 로봇 변화의 측정치이다. $\|J_f^{-1}\|$ 이 너무 크면 즉, J_f 의 특이값이 너무 작으면 영상 특징의 작은 변화도 급격한 로봇 운동을 발생시킨다. 한편, 최대 특이값, $\|J_f\|$ 이 너무 크면 로봇의 진동이나 모터의 잡음등에 대해 영상 특징의 변화의 증폭율이 커져서 잡음에 민감해진다. 따라서 조건지수가 1에 가까워 질수록 좋은 시각구동의 결과를 얻을 수 있다. 또한 로봇의 제어 민감성은 조건지수가 1에 가까워 질수록 입력 잡음에 둔감해진다. 한편, 최소 특이값은 로봇 운동에 대한 영상 특징의 민감성을 나타내는데 사용하였다. 민감성이 큰 영상특징을 이용할수록 안정된 시각구동을 할 수 있다.

다음과 같은 정리 1 [9][10]에 의하여 영상특징 자코비안을 블록 삼각행렬로 나타낼 수 있고 이를 블록 대각 행렬로 변환하면 이상에서의 성능 지수들이 좋아진다.

정리1. [9][10]

블록 삼각 행렬 A 의 블록 대각 행렬, $C(A)$,이

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ 0 & A_{22} \end{bmatrix}, C(A) = \begin{bmatrix} A_{11} & 0 \\ 0 & A_{22} \end{bmatrix} \quad (6)$$

과 같이 주어질 때,

$$\sigma_{\max, C(A)} \leq \sigma_{\max, A} \quad (7)$$

$$\sigma_{\min, C(A)} \geq \sigma_{\min, A} \quad (8)$$

의 관계가 있다.

영상 특징 자코비안의 특이값의 곱인 운동 인지도는 다음과 같이 정의된다.

$$w_v = \sqrt{\det(J_f J_f^T)} = \sigma_1 \sigma_2 \dots \sigma_p. \quad (9)$$

운동 인지도는 컴퓨터 비전 시스템이 시야에서 물체의 운동을 인지하는 정도를 나타내는 지수이다. 블록 대각 행렬의 운동 인지도는 블록 이외의 성분의 제외에도 불구하고 블록 삼각 행렬의 값과 일치함을 다음의 정리 2에서 보겠다.

정리 2.

블록 삼각 행렬 A 의 블록 대각 행렬, $C(A)$,이 식(6)과 같이 주어진다고 하면 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$\prod_i \sigma_{i, C(A)} = \prod_i \sigma_{i, A} \quad (10)$$

증명

식(9)로부터 특이값의 곱 대신 $\sqrt{\det(A A^T)}$ 를 고려하자. 만약 A 가 정방 행렬이면 [13]

$$\det(A A^T) = \det(A^T A) = \det A \cdot \det A^T. \quad (11)$$

또한 삼각 혹은 블록 삼각 행렬의 determinant는 대각 블록들의 determinant의 곱이다.

$$\begin{aligned} \det A &= \det \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ 0 & A_{22} \end{bmatrix} = \det \begin{bmatrix} A_{11} & 0 \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \\ &= \det(A_{11}) \cdot \det(A_{22}) \end{aligned} \quad (12)$$

따라서

$$\sqrt{\det(A A^T)} = \sqrt{\det(C(A)C(A^T))} \quad (13)$$

이고

$$\prod_i \sigma_{i, C(A)} = \prod_i \sigma_{i, A} \quad (14)$$

결론적으로 $C(A)$ 의 운동 인지도는 A 의 값과 같다. ■

제안된 외란 관측기를 이용한 시각구동을 위해 사각형의 위치 변화에 무관하고 회전 성분만의 영향을 받는 영상 사점을 이용한 블록 삼각 영상 특징 자코비안을 제시하고 다음과 같은 영상특징을 선택하였다[9][10].

u, v : 물체 영상의 무게중심의 x, y 좌표

a : 물체 영상의 면적

x_v, y_v : 수직 영상 사점의 x 좌표

y_v : 수직 영상 사점의 y 좌표

x_h, y_h : 수평 영상 사점의 x, y 좌표

블록 삼각 영상 특징 자코비안은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{a} \\ \dot{x}_v \\ \dot{x}_h \\ \dot{y}_h \end{bmatrix} = J_f \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \\ \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \\ \dot{\gamma} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ 0 & J_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \\ \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \\ \dot{\gamma} \end{bmatrix} \quad (15)$$

여기서

$$J_{11} = \begin{bmatrix} \frac{f}{z} & 0 & -\frac{u}{z} \\ 0 & \frac{f}{z} & -\frac{v}{z} \\ 0 & 0 & -\frac{2cf}{z^2} \cos \alpha \cos \beta \end{bmatrix}$$

$$J_{12} = \begin{bmatrix} -\frac{uv}{f} & \frac{f+u^2}{f} & -v \\ -\frac{f+v^2}{f} & \frac{uv}{f} & u \\ -\frac{cf}{z^2} \sin \alpha \cos \beta & -\frac{cf}{z^2} \cos \alpha \sin \beta & 0 \end{bmatrix}$$

$$J_{22} = f \begin{bmatrix} 0 & -\frac{\cos \gamma}{\sin^2 \beta} & -\frac{\sin \gamma}{\tan \beta} \\ \frac{\sin \gamma}{\sin^2 \alpha \cos \beta} & -\frac{\tan \beta \sin \gamma}{\tan \alpha \cos \beta} & -\frac{\cos \gamma}{\cos^2 \beta} \\ \frac{\cos \gamma}{\sin^2 \alpha \cos \beta} & -\frac{\tan \beta \cos \gamma}{\tan \alpha \cos \beta} + \frac{\sin \gamma}{\cos^2 \beta} & \frac{\sin \gamma}{\tan \alpha \cos \beta} + \tan \beta \cos \gamma \end{bmatrix}$$

그림 1은 제안된 외란 관측기를 이용한 시각구동 방법의 구성도를 보여준다. 여기서

- $\dot{\xi}_{ref}$: 영상 특징의 속도 명령,
- C_{fv} : 영상특징 속도 제어기(PID),
- J_f : 상위 블록 삼각 형태의 영상 특징 자코비안,
- \tilde{J}_f^{-1} : 블록 대각 형태의 역 영상 특징 자코비안,
- J_r, J_r^{-1} : 로봇의 자코비안과 역 자코비안,
- P_n : 실제 로봇 및 외란 관측기를 이용한 선형화된 로봇 관절 속도 제어기,
- \tilde{J}_r : 실제 로봇의 자코비안,
- $\dot{\xi}_d$, noise: 외부 영상특징 외란 및 잡음,
- $\dot{\xi}_a$: 측정된 영상특징의 변화량,

P_n^{-1} : P_n 의 역 기준 모델,

Q_f : 저역통과 필터

이다. 블록 대각 역 영상 특징 자코비안은 다음과 같다.

$$\tilde{J}_f^{-1} = \begin{bmatrix} J_{11}^{-1} & 0 \\ 0 & J_{22}^{-1} \end{bmatrix} \quad (16)$$

점선 부분의 외란 관측기(disturbance observer)는 실제 로봇 및 제어기와 카메라의 영상 특징 자코비안, 로봇 자코비안에 대하여 블록 A가 식(17)의 기준 모델 F_n 과 같아 지도 특징 기준 모델과 오차를 외란으로 간주하고 보상해 주는 역할을 한다.

$$F_n = \tilde{J}_f J_r P_n J_r^{-1} \tilde{J}_f^{-1} \quad (17)$$

또한 식(17)에 J_f 과 \tilde{J}_f^{-1} 를 앞에 곱함으로써 전체 시각구동 시스템은 블록 대각 영상 특징 자코비안 시스템으로 변환된다. 그림 2는 제안된 그림 1의 시각구동 시스템의 등가 시스템을 보여준다.

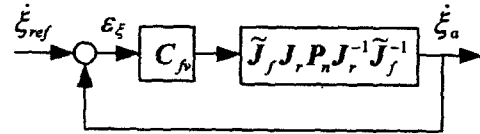


그림 2 그림1의 시각구동 시스템과 등가인 구성도
Fig. 2 The block diagram of equivalent visual servoing system of the system in fig. 1

3. 특징 포화기를 사용한 외란 관측기

외란관측기 루프를 안정시키기 위하여 그림 3의 점선 부분과 같이 특징 오차, ϵ_f 의 변화량을 제한하는 특징 포화기(feature saturator)를 제안한다. 특징포화기를 사용한 외란관측기는 실제 구현에 있어 그림 1의 블록 A를 대체한다. 영상특징의 변화량에 의한 매우 큰 관절 속도 명령은 로봇 제어기의 최대 속도 나 토크의 범위를 넘어 로봇이 움직이지 못

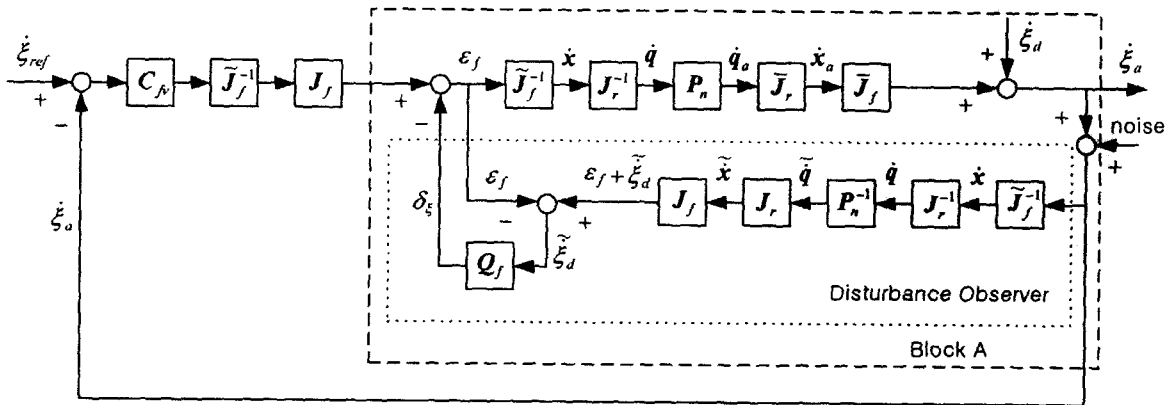


그림 1 외란 관측기를 이용한 시각구동 방법의 구성도
Fig. 1 The block diagram of visual servoing method using disturbance observer

하는 경우가 있다. 이러한 경우에 외란관측기는 초과하는 특징 오차 명령을 외부의 외란으로 간주하고 더 큰 특징 오차 명령을 만들어 시스템이 불안해진다. 이런 포화문제를 해결하기 위하여 포화된 관절 명령 변화의 제한 신호를 이용하여 특징 포화기의 특징 오차의 변화의 포화 수준을 조절한다. 관절 명령 변화의 포화값은 실제 로봇의 최대 허용 관절 각속도로 주어진다. 특징 오차의 변화, ϵ_f ,는 관절 명령의 변화, \dot{q} ,에 대하여 역 영상 특징 자코비안, \tilde{J}_f^{-1} ,과 역 로봇 자코비안, J_r^{-1} ,에 의한 비선형적 관계이기 때문에 관절 명령의 제한 신호로 특징 포화기의 포화 수준을 결정하고 역 특징 자코비안과 외란 관측기에 똑같은 영상특징의 오차 값을 제공한다.

4. 실험 결과

제안된 시각구동 방법의 타당성과 유용성을 보이기 위하여 그림 4와 같은 삼성 FARAMAN-AS1 산업용 6축 수직 다관절 로봇과 흑백 CCD 카메라를 사용하여 손눈(eye-in-hand) 구조의 실험을 하였다. 로봇의 주 제어기는 VME-버스를 기반으로 모토롤라의 MVME172 싱글보드 컴퓨터 1대과 TMS320C30 DSP 모션 제어기 2대를 사용하였다. 싱글보드 컴퓨터에서는 Wind River사의 Tornado 실시간 다중 태스킹 운영체제를 사용하였으며 시각구동 알고리즘 및 각속도 명령을 계산하여 공유 메모리를 통하여 모션 제어 보드로 전달한다. 영상특징은 IBM PC Pentium II-233MHz에 Matrox사의 Meteor 흑백 디지털라이저 보드를 사용하여 구한다. 이렇게 계산된 특징값은 통신 속도를 높이기 위하여 전용 허브를 이용하여 MVME-172 와 TCP/IP방식으로 통신한다. 그림 5는 실험을 위한 전체 구성도를 보여준다. 시각구동을 위한 샘플링 시간은 NTSC 비디오 신호의 수직 동기 신호의 2배인 67msec이며 그림 3의 외란관측기에서 사용하는 저역통과 필터의 절단주파수는 시각 구동 샘플링 시간의 20배로 잡았다.

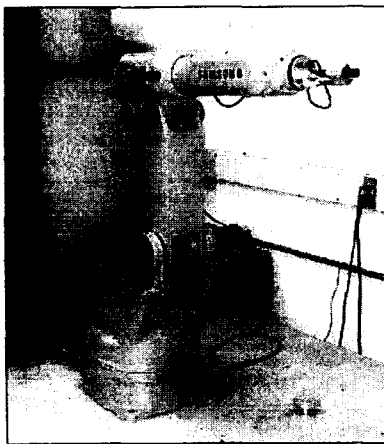


그림 4 삼성 FARAMAN AS-1

Fig. 4 Samsung FARAMAN AS-1

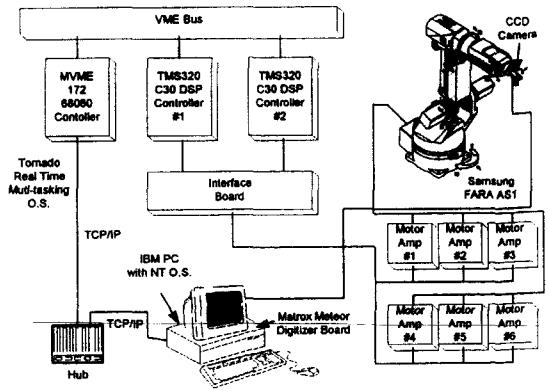


그림 5 실험 구성도

Fig. 5 Experimental Setup

시각 구동의 목표물은 검정 바탕에 16x16cm의 흰색 정사각형을 사용하였다. 로봇의 속도제어를 위해선 로봇 시스템의 비선형성을 보상하고 계산을 간단하게 하기위해 외란 관측기를 사용한 제어기를 구성하였다.

그림 6과 7은 로봇의 초기 위치 (-31, 53, -4.7, 18.6, 39.9, -8.9)deg.에서 목표지점인 (-26, 38, -13., 11.4, 34.9, -6) deg.로 영상특징이 (-6.2e-5, 4.47e-5, 1.41e-6, 7.68e-3, -1.22e-3, -2.3e-2)m 가 되도록 시각구동에서 외란관측기를 사용한 경우(with DO)와 사용하지 않은 경우(without DO)에 대한 실험 결과이다. 그림 6은 목표물의 무게중심(COG)의 x좌표에 대한 추적 결과이고 그림 7은 수평 영상 사점의 x좌표에 대한 추적 결과이다. 비교 결과 외란 관측기를 사용한 시각구동 방법이 사용하지 않은 방법에 비해 같은 제어 이득을 사용했음에도 오차도 적고 잡음과 외란을 제거하는 능력이 전반적으로 좋은 결과를 보임을 알 수 있다. 외란 관측기를 사용할 경우 카메라의 양자화 오차(quantization error)나 로봇의 진동, 로봇 자코비안 파라메타등의 부정확성으로 인한 오차를 외란으로 간주하고 제거한 결과이다. 표1은 각각의 결과에 대한 오차의 평균 및 표준편차를 보여준다. 평균 및 표준 편차에서도 외란관측기를 사용한 방법이 성능이 좋은 결과를 볼 수 있다. 하지만 외란관측기를 사용한 방법이 나쁜 결과를 보일때가 있는데 제거한 블록 대각 이외의 성분이 너무 커서 보상이 충분하지 못했기 때문이다.

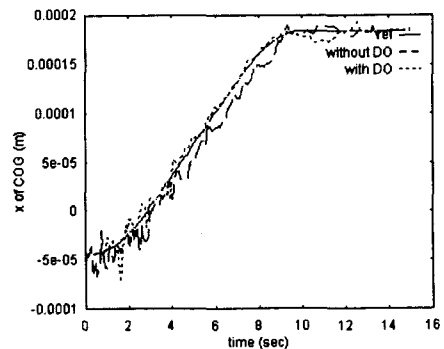


그림 6 목표 영상의 무게 중심의 x좌표

Fig. 6 x-coordinate of COG of visual target

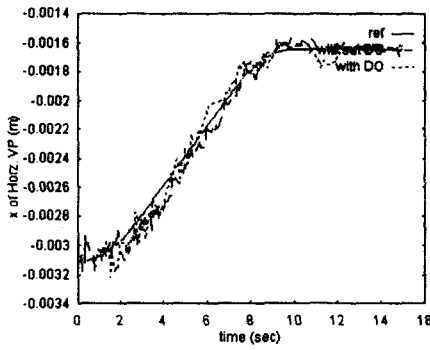


그림 7 수평 영상 사점의 x좌표
Fig. 7 x-coordinate of horizontal vanishing point

표 1 시각 구동 오차의 평균 및 표준편차
Table 1 Average and standard deviation of errors of visual servoing

	목표영상의 무게중심의 x좌표의 오차		수평영상 사점의 x좌표의 오차	
	without DOB	with DOB	without DOB	with DOB
평균	8.66E-6	4.58E-6	5.02E-5	4.78E-5
표준편차	7.37E-6	5.04E-6	4.37E-5	4.32E-5

그림 8, 9, 10은 각각 시각구동에서의 최대, 최소 특이값 및 조건지수를 보여준다. 영상특징 자코비안 행렬의 최대값과 조건지수는 외란관측기를 사용하지 않는 방법에 비해 감소한다. 이는 제한된 제어방법을 사용하면 로봇 머니플레이터의 자세 제어성 및 제어의 민감성이 향상됨을 보여준다. 외란관측기를 사용할 때의 자코비안 행렬의 최소 특이값은 사용하지 않을 때와 거의 비슷하게 보이지만 조금 커진다 (10초에서 1.28×10^{-14} 정도). 이렇게 최소 특이값의 증가가 작은 것은 시각 구동에서 선택한 영상 특징인 물체의 면적이 로봇의 움직임에 대하여 너무 둔감하기 때문이다.

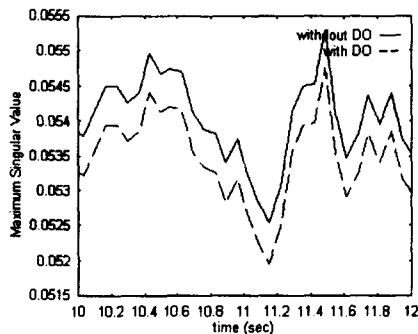


그림 8 최대 특이값
Fig. 8 Maximum singular values

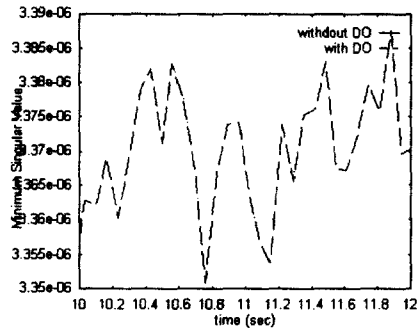


그림 9 최소 특이값
Fig. 9 Minimum singular values

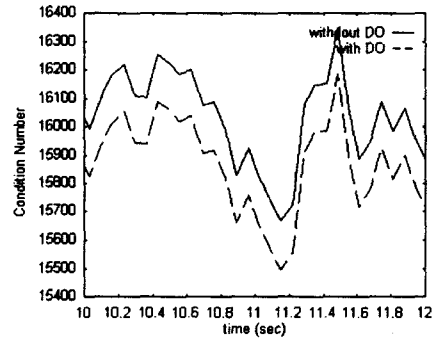


그림 10 조건지수
Fig. 10 Condition number

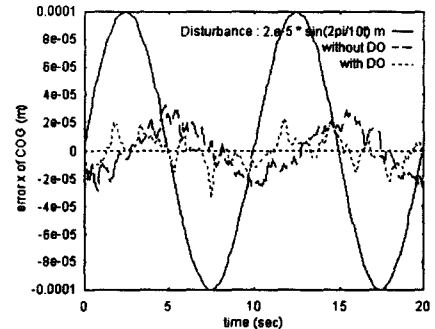


그림 11 외란에 의한 무게 중심의 x좌표의 오차
Fig. 11 Error of x-coordinate of COG by disturbance

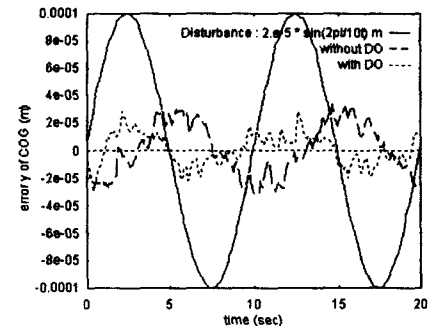


그림 12 외란에 의한 무게 중심의 y좌표의 오차
Fig. 12 Error of y-coordinate of COG by disturbance

외란의 제거 능력을 보이기 위해 그림 11과 12는 외란 $2E-5\sin(2\pi/10t)m$ 가 영상 특징 값에 더해졌을 때 물체영상의 무게 중심의 x와 y 좌표의 오차를 보여준다. 외란의 영향이 외란관측기가 없는 경우에 비교해 감소했음을 알 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 실험을 통하여 선행 논문에서 제안한 외란관측기를 이용한 시각구동 방법의 성능을 분석하였다. 수학적으로 블록 대각이외의 성분을 제거 하더라도 운동 인지도는 변함없음을 보였다. 또한 특징 오차의 변화를 제한 함으로써 외란관측기 루프를 안정화 시키는 특징 포화기를 제안하였다.

영상 특징 자코비안 행렬의 조건지수는 행렬을 블록 대각 이외의 성분을 제외하고 블록 대각성분 만을 이용했을 때 감소하였다. 외란관측기는 블록 대각 이외의 성분의 제거로 인한 오차를 보상하였고 외부의 외란을 제거하였다. 또한 영상 특징의 측정 민감성과 제어성이 좋아지는 결과를 보였다.

앞으로의 연구과제는 외란관측기를 이용한 시각 구동 방법에서 어느 정도의 비선형 기준 모델의 오차까지 외란관측기가 보상할 수 있는지를 연구하려고 한다.

감사의 글

본 연구는 1999년도 한양대 공학기술연구소의 연구비 지원으로 수행된 것입니다.

참 고 문 헌

[1] 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, Oct., pp. 651-670, 1996

[2] J. T. Feddema, C. S. G. Lee, O. R. Mitchell, "Weighted selection of image features for resolved rate visual feedback control," IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol. 7, no. 1, pp. 31-47, Feb., 1991

[3] K. Hashimoto and T. Noritsugu, "Performance and sensitivity in visual servoing," Proc. IEEE Int. Conf. On Robotics and Automation, pp. 2321- 2326, 1998

[4] R. Sharma and S. Hutchinson, "Motion perceptibility and its application to active vision-based servo control," IEEE Tans. on Robotics and Automation, vol. 13, no. 4, pp. 607-617, Aug., 1997

[5] B. J. Nelson and P. K. Khosla, "Force and vision resolvability for assimilating disparate sensory feedback", IEEE Tans. on Robotics and Automation, vol. 12, no. 5, pp. 714-731, Oct., 1996

[6] K. Kaneko, K. Ohnishi, and K. Komoriya, "A design method for manipulator control based on disturbance observer," Proc. Int. Conf. on Intelligent Robots and

Systems, pp. 1405-1412, 1994

[7] K. S. Eom, I. H. Suh, W. K. Chung, and S. R. Oh, "Disturbance observer based force control of robot manipulator without force sensor," Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Automat., pp. 3012-3017, 1998

[8] R. O. Duda and P. E. Hart, Pattern Classification and Scene Analysis, A Wiley-Interscience Pub., 1973

[9] 이준수, 서일홍, "외란관측기를 이용한 새로운 시각구동 방법", 대한전기학회 논문지 48A권 3월호 pp. 294-303, 1999

[10] J. S. Lee, I. H. Suh, B. J. You and S. R. Oh, "A novel visual servoing approach invloving disturbance observer", Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 269-274, 1999

[11] R. Bhatia, *Matrix Analysis*, Springer, 1997

[12] L. E. Weiss, A. C. Sanderson, and C. P. Neuman, "Dynamics sensor-based control of robots with visual feedback," IEEE J. Robot. Automat., vol. RA-3, no. 5, pp. 404-417, Oct., 1987

[13] S. Skogestad and I. Postlethwaite, *Multivariable Feedback Control*, John Wiley & Sons, 1995

저 자 소 개



이 준 수 (李 峻 秀)

1964년 3월 28일생. 1987년 한양대 전자공학과 졸업. 1989년 동 대학원 전자공학과 졸업(석사). 1989년~현재 한국과학기술연구원 지능제어연구센터 연구원. 1994년~현재 한양대 대학원 전자공학과 박사과정
Tel : (02) 958-5747, Fax : (02) 958-5749
E-mail : jslee@amadeus.kist.re.kr



서 일 홍 (徐 一 弘)

1955년 4월 16일생. 1977년 서울대 공대 전자공학과 졸업. 1982년 한국 과학 기술원 전기 및 전자 공학과 졸업(공학). 1982년 대우중공업 기술 연구소 근무. 1987-1988년 미국 미시간대 객원 연구원. 현재 한양대학교 공대 교수.

Tel : (0345) 400-5172
E-mail : ihsuh@email.hanyang.ac.kr