

QR분해와 외란 관측기를 이용한 모노 카메라의 시각구동 방법

A Novel Mono Camera Visual Servoing Method using QR Decomposition and Disturbance Observer

이준수*, 서일홍**, 유범제*, 오상득*

* 한국과학기술연구원 지능제어연구센터

** 한양대학교 전자공학과

Abstract : This paper proposes a visual servoing method based on QR decomposition and disturbance observer. The QR decomposition factors the image feature Jacobian into a unitary matrix and an upper triangular matrix. And it is shown that several performance indices such as measurement sensitivity of visual features, sensitivity of the control to noise and controllability can be improved for any general image feature Jacobian by QR decomposition and disturbance observer. To show the validities of the proposed approach, visual servoing with monocular vision is carried out for a Samsung FARAMAN 6-axis industrial robot manipulator.

1. 서론

시각구동은 인간과 같이 눈으로 보면서 작업할 수 있다는 장점이 있다. 이러한 시각구동은 물체의 위치나 움직임에 대한 사전 지식없이 로봇이 물체를 조작하거나 임의의 방향으로 움직이는 물체를 추적할 수 있게 해준다. 이처럼 영상에서 어떤 정보를 추출하고 시각 궤환을 이용하여 로봇을 제어하는 것을 시각 구동이라 한다 [1].

영상 기반 시각구동(image based visual servoing)은 로봇의 움직임에 대한 영상 특징의 변화량을 나타내는 영상 특징 자코비안(image feature Jacobian)을 이용하여 3차원 영상 정보의 재구성이 필요 없고 센서 모델링과 카메라 보정으로 인한 오차를 줄일 수 있는 장점으로 연구의 많은 부분을 차지하고 있다[1].

영상 기반 시각구동의 신뢰성 있는 제어를 위해서는 영상특징의 측정성과 민감성 그리고 로봇 머니플레이터의 제어성과 안정성을 고려해야 한다. 이러한 시각구동 제어의 성능을 평가하기 위해 영상 특징 자코비안 행렬의 특이값을 이용한 성능지수에 대해 많은 연구가 되어 오고 있다. Feddema[2]는 영상 특징 자코비안의 조건지수(condition number)를 이용하여 영상특징의 측정성(observability) 그리고 로봇 머니플레이터의 제어성(controllability)과 민감성(sensitivity)이 향상되

도록 영상 특징점을 선택하였다. Hashimoto[3]는 영상기반 제어의 민감성이 좋아지도록 최소 특이값이 커지는 영상특징을 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.

외란 관측기를 이용한 시각구동 방법 [6][7][8]에선 영상 사점을 이용하여 블록 삼각 행렬 형태의 영상 특징 자코비안을 구하고 외란 관측기[9][10]를 이용하여 블록 대각 행렬로 변환하여 제어하는 방법을 제안하였다. 블록 대각 형태로 변환된 영상 특징 자코비안은 블록 삼각 형태의 영상 특징 자코비안에 비하여 위에서 언급한 조건 지수가 감소하여 영상특징의 측정성, 로봇 머니플레이터의 제어성과 민감성이 향상된다. 또한 최소 특이값이 커져 영상기반 제어의 민감성이 좋아지고 외란을 제거하는 장점이 있다. 하지만 제안된 방법은 블록 삼각 행렬 형태의 영상 특징 자코비안에 대해서만 적용할 수 있고 영상 사점의 특징상 사각형의 물체를 사용하여야 하며 잡음에 민감하다는 단점이 있다.

본 논문에서는 외란 관측기를 이용한 시각구동 방법에서 블록 삼각 행렬의 영상 특징 자코비안에

대해서만 적용 가능했던 시각구동 방법을 QR 분해(QR decomposition) [11][12]를 이용하여 일반적인 영상 특징 자코비안에 대해서도 적용하여 성능 지수를 향상시키는 방법을 제안하려고 한다.

전체 논문 구성은 2장에서 QR 분해를 이용한 시각구동 방법을 이용하여 일반 영상 특징 자코비안에 대해서도 조건지수가 감소하고 최소 특이값이 가지는 장점이 있음을 설명한다. 3장에서는 6축 수직 다관절 로봇인 삼성 FARAMAN AS-1에 대하여 손눈(eye-in-hand) 구조에 모노 카메라의 경우에 대하여 시각 구동 실험을 통하여 제안된 방법의 타당성을 증명한다. 마지막으로 4장에서 결론을 기술한다.

2. QR분해와 외란 관측기를 이용한 시각구동

외란 관측기를 이용한 시각 구동 방법은 블록 삼각 영상 특징 자코비안 행렬을 블록 대각 영상 특징 자코비안 행렬로 변환시키던 여러 성능지수가 좋아진다는 특징에 의해 제안되었다. QR 분해는 임의의 행렬을 정규적외 행렬(orthonormal matrix)과 상위 삼각 행렬(upper triangular matrix)로 분해한다. 이렇게 분해된 행렬에 대하여 직교 행렬은 특성상 특이값이 1 이며, 상위 삼각 행렬에 대하여 앞에서의 연구[6][7][8]와 같은 방법을 적용하면 성능이 향상되는 같은 결과를 얻을 수 있다.

조건지수와 최소 특이값은 영상 자코비안의 성능 지수로써 조건지수는 다음과 같이 정의된다.

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

여기서 σ_{\max} 는 영상 자코비안의 최대 특이값이고 σ_{\min} 는 최소 특이값이다.

κ 는 자세 제어성, $c(J_f)$ 과 제어 민감성으로 사용되며 다음과 같이 정의된다.

$$c(J_f) = \|J_f\| \cdot \|J_f^{-1}\| = \kappa, \quad (2)$$

여기서 놈(norm)은 Spectral Radius Theorem [11][12]에 의해 다음과 같이 정의된다.

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

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

여기서

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

$\|J_f^{-1}\|$ 가 너무 크면 즉, J_f 의 최소 특이값이 너무 작으면 영상 특징의 작은 변화도 급격한 로봇 운동을 발생시킨다. 한편, 최대 특이값, $\|J_f\|$,이 너무 크면 영상 특징의 변화는 로봇의 움직임의 변화량에 대한 잡음에 민감해 진다. 따라서 조건지수가 1에 가까워 질수록 좋은 시각구동의 결과를 얻을 수 있다. 또한 로봇의 제어 민감성은 조건지수가 1에 가까워 질수록 입력 잡음에 둔감해 진다. 한편, 최소 특이값은 로봇 운동에 대한 영상 특징의 민감성을 나타내는데 사용하였다. 민감성이 큰 영상특징을 이용할수록 안정된 시각구동을 할 수 있다.

다음의 정리 1은 영상특징 자코비안을 QR분해하고 상위 삼각행렬을 대각 행렬로 바꾸면 이상에서의 성능 지수가 좋아짐을 보인다.

정리 1.

임의의 $m \times n$, ($m > n$) 행렬 A 의 행이 선형적으로 독립이라면 다음과 같이 QR 분해(orthonormal-triangular decomposition)할 수 있다[11][12].

$$A = QR, \quad (6)$$

여기서

Q : $m \times m$ 인 unitary 행렬

R : $n \times n$ 인 상위 삼각(upper triangular)

이고 $(m-n) \times n$ 인 영인 행렬(zero matrix)이다.

상위 삼각 행렬 R 을 블록 대각 행렬 \tilde{R} 로 변환시키고 \tilde{A} 를

$$\tilde{A} = Q\tilde{R} \quad (7)$$

과 같이 놓으면, 행렬 A 와 \tilde{A} 는 다음과 같은 관계가 있다.

$$\sigma_{\max, \tilde{A}} \leq \sigma_{\max, A} \quad (8)$$

$$\sigma_{\min, \tilde{A}} \geq \sigma_{\min, A} \quad (9)$$

QL 분해에 대해서도 마찬가지로의 결과를 얻을 수 있다.

영상 특징 자코비안의 특이값의 곱인 운동 인지도는 다음과 같이 정의된다.

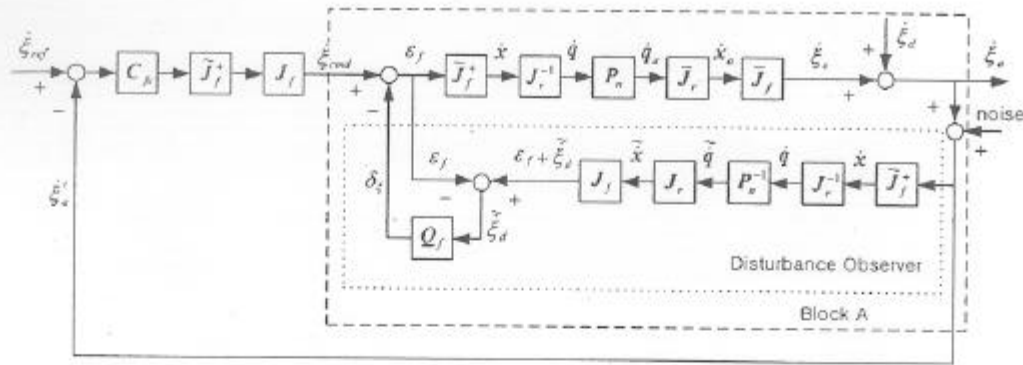


그림 1. 외란관측기를 이용한 시각구동 방법의 구성도

Fig. 1. The block diagram of visual servoing method using disturbance observer

$$w_r = \sqrt{\det(J_f J_f^T)} = \sigma_1 \sigma_2 \cdots \sigma_p \quad (10)$$

운동 인지도는 컴퓨터 비전 시스템이 시야에서 물체의 운동을 인지하는 정도를 나타내는 지수이다. A 와 \tilde{A} 의 운동 인지도는 QR분리에 의한 상위 삼각 행렬의 블록 대각 이외의 성분의 제거에도 불구하고 이들의 값이 같음은 정리2와 같다.

정리 2.

임의의 $m \times n$, ($m > n$) 행렬 A 의 행이 선형적으로 독립이라면 식(5)와 같이 QR 분해(orthonormal triangular decomposition)할 수 있으며[11][12], 상위 삼각 행렬 R 을 블록 대각 행렬 \tilde{R} 로 변환시키고 \tilde{A} 를 식(6)과 같이 놓으면 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$\prod_i \sigma_{i,\tilde{A}} = \prod_i \sigma_{i,A} \quad (11)$$

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

- $\dot{\xi}_{ref}$: 영상특징의 속도 명령,
- C_p : 영상특징의 PID 제어기,
- J_f : 영상특징 자코비안,
- \tilde{J}_f^+ : QR분해를 이용한 의사 역 영상특징 자코비안,
- J_f, J_f^{-1} : 로봇 자코비안과 역 자코비안,
- \tilde{J}_r : 실제 로봇의 자코비안,
- \tilde{J}_f : 실제 CCD 카메라의 영상 특징 자코비안,
- $\xi_s, noise$: 외부에서 들어 오는 영상 특징의 외란과 잡음,

$\hat{\xi}_d$: 측정된 영상 특징의 변화량,

Q_f : 저역 통과 필터

P_n : 외란관측기를 이용한 선형화된 로봇 관절 속도 제어기[6]

δ_f : $Q_f \hat{\xi}_d$ 이다.

3. 실험

제안된 QR 분해와 외란관측기를 이용한 시각구동 방법의 타당성과 유용성을 보이기 위하여 삼성 PARAMAN-AS1 산업용 6축 수직 다 관절 로봇에 모노 흑백 CCD 카메라를 사용한 시각 구동(monocular visual servoing)을 손 눈(eye-in-hand) 구조에 대하여 실험하려고 한다.

그림 2는 실험을 위한 전체 구성도를 보여준다. 여기서 로봇의 주 제어기는 VME-비스를 기반으로 모듈라의 MVME172 싱글보드 컴퓨터 1대와 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-350MHz에 스테레오 시각구동을 위해 Matrox사의 Meteor 칼라 디지털이저 보드를 사용하여 구한다. 이렇게 계산된 특징값은 통신 속도를 높이기 위하여 전용 허브를 이용하여 MVME-172와 TCP/IP방식으로 통신한다. 시각구동을 위한 샘플링 시간은 NTSC 비디오 신호의 수직 동기 신호의 2배인 67msec이며 그림 1의 외란관측기에서 사용하는 저역통과 필터의 절단주파수는 시각구동 샘플링 시간의 10배로 잡았다.

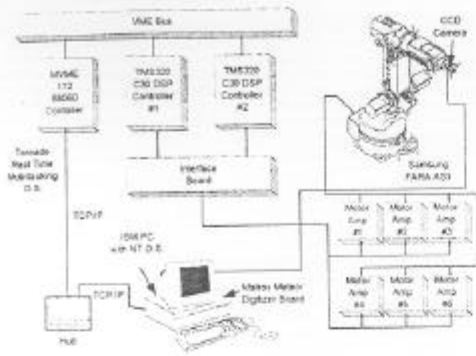


그림 2. 실험 구성도

모노 카메라의 시각구동은 Nelson과 Khosla [5], Hashimoto등[15]에서 구한 영상 특징 자코비안을 사용하여 시각구동을 하려고 한다. 모노 카메라는 그림 3과 같고 투시 모델은 그림 4와 같다. 로봇 매니플레이터의 변화에 대한 영상특징의 변화를 나타내는 모노 영상 특징 자코비안은 식(12)와 같고 N 개의 특징점에 대해 영상특징 자코비안을 모으면 식(13)와 같다.

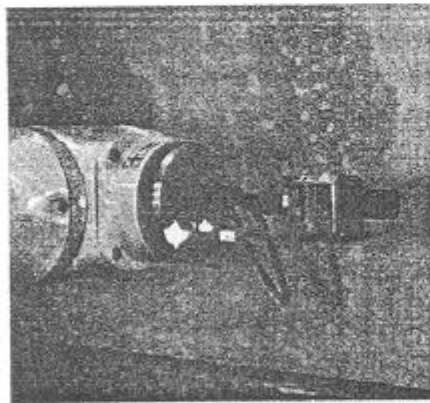


그림 3. 모노 카메라

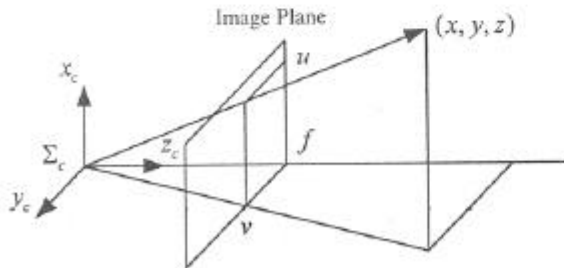


그림 4. 모노 카메라의 투시 모델

$$J_f(u, v, z) = \begin{bmatrix} -\frac{f}{z} & 0 & \frac{u}{z} & \frac{uv}{f} & -\frac{u^2 + f^2}{f} & v \\ 0 & -\frac{f}{z} & \frac{v}{z} & \frac{v^2 + f^2}{f} & -\frac{uv}{f} & -u \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{u}_1 \\ \dot{v}_1 \\ \vdots \\ \dot{u}_N \\ \dot{v}_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_f(u_1, v_1, z_1) \\ \vdots \\ J_f(u_N, v_N, z_N) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \\ \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \quad (13)$$

여기서 u, v 는 한 특징점의 화면상의 좌표, f 는 초점거리, z 는 카메라의 초점과 특징점 간의 거리, v_x, v_y, v_z 는 카메라의 선속도, $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ 는 카메라의 각속도이다.

시각구동의 기준궤적은 로봇의 초기 위치 (-21., -60., 1.98, 2.5, 41.94, -6.04) deg.에서 초기 영상 특징이 (55, -18, 3, 13, 81, 35) pixel 인 영상과 목표지점에서 영상 특징이 (9, -72, -58, -18, 63, -4) pixel 인 영상을 이용하였다. 그림 5 과 6는 제어 이득을 똑같이 할 경우에 ($P=0.9, I=0.01$) 기준의 방법 (without DOB)과 제안하는 방법(with DOB)에 대하여 1번 특징점에 대한 각각의 추적 결과이다. 기준 궤적은 사다리꼴 모양의 속도로 주어졌으며, 카메라의 이동속도는 약 5cm/sec로 50cm를 움직이도록 하였다.

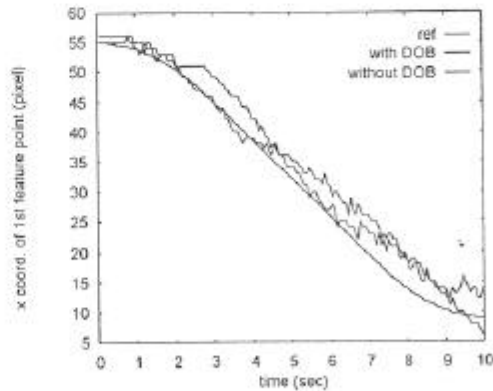


그림 5. 1번 특징점의 x 좌표 궤적

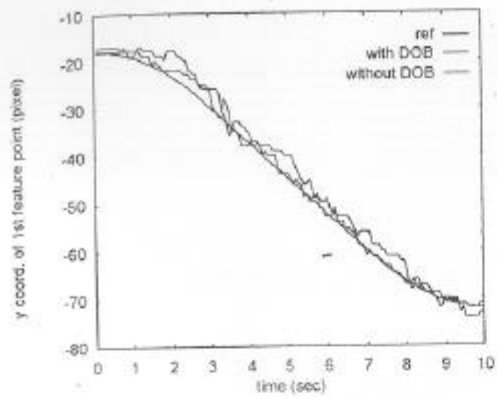


그림 6. 1번 특징점의 y 좌표 궤적

그림 7, 8은 계단 응답 (step response)에 대한 결과를 보여준다. 초기 위치의 영상 특징값이 (32, -100, -38, -43, 90, -29) pixel에서 (9, -72, -58, -18, 63, -4) pixel이 되도록 (23, 28, 20, 25, 27, 25) pixel을 움직이도록 하였다.

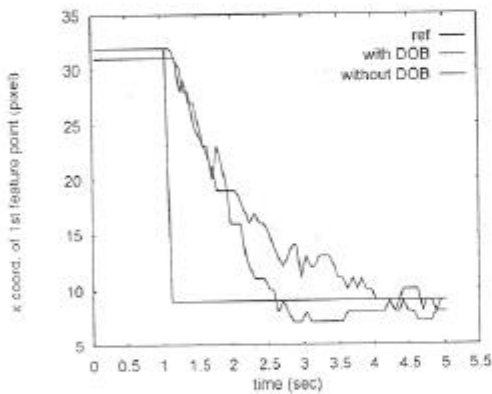


그림 7. 1번 특징점의 계단 응답의 x 좌표

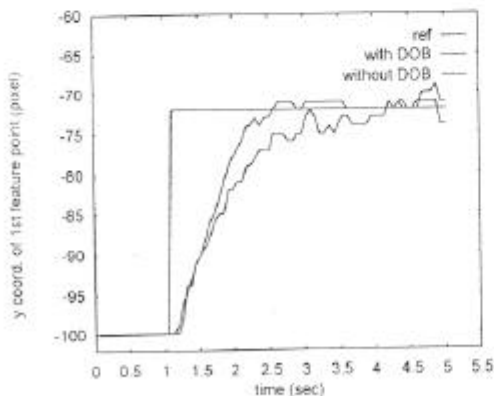


그림 8. 1번 특징점의 계단 응답의 y 좌표

그림 9, 10, 11은 각각 시각구동에서의 최대, 최소 특이값 및 조건지수를 보여준다. 영상특징 자코비안 행렬의 최대값과 조건지수는 외란 관측기를 사용하지 않는 방법에 비해 각각 20%, 40% 감소하였다. 이는 제안된 제어방법을 사용하면 로봇 머니플레이터의 자세 제어성 및 제어의 민감성이 향상됨을 보여준다. 외란 관측기를 사용할 때의 자코비안 행렬의 최소 특이값 역시 크기는 23%, 작게는 10% 커져서 영상 기반 제어의 민감성이 좋아졌다.

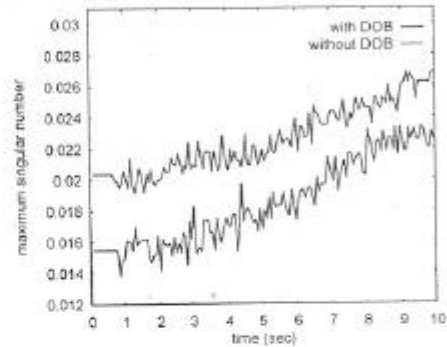


그림 9. 최대 특이값

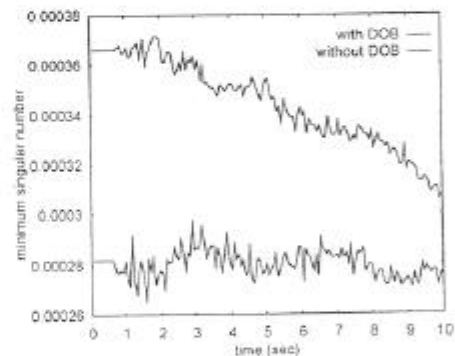


그림 10. 최소 특이값

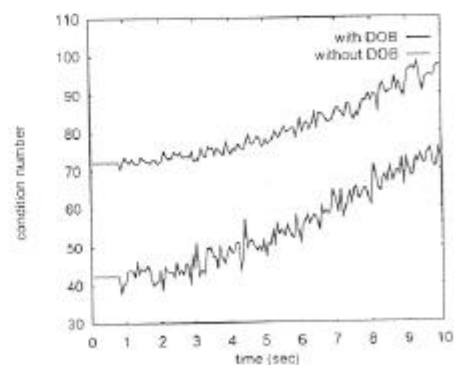


그림 11. 조건지수

4. 결 론

본 논문에서는 외란 관측기를 이용한 시각구동 방법에서 블록 삼각 행렬의 영상 특징 자코비안에 대해서만 적용 가능했던 시각구동 방법을 QR 분해를 이용하여 일반적인 영상 특징 자코비안에 대해서도 적용할 수 있는 방법을 제시 하였다.

수학적으로 QR 분해를 사용하면 블록 삼각 행렬을 블록 대각 행렬로 변환시켰을 때와 마찬가지로 조건지수는 감소하고 최소 특이값은 커져 성능이 향상됨을 보였다. 또한 특이값의 급인 운동 인지도의 경우에도 값의 변화가 없음을 알 수 있다.

모노 카메라를 이용한 시각 구동 실험을 통하여 본 논문에서 제시한 방법이 일반적인 영상 특징 자코비안에 대해서도 성능향상의 결과를 볼 수 있었다. 앞으로의 연구과제는 이동 로봇에 대한 시각 구동 방법에 대해서도 본 논문에서 제시한 방법의 적용 가능성 및 성능 향상을 확인하려고 한다.

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] 이준수, 서일홍, "외란관측기를 이용한 새로운 시각구동 방법", 대한전기학회 논문지 3월호 pp. 294-303, 1999
- [7] J. S. Lee, I. H. Suh, B. J. You and S. R. Oh, "A novel visual servoing approach involving disturbance observer", Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 269-274, 1999
- [8] J. S. Lee, I. H. Suh, B. J. You and S. R. Oh, "Experiments on a visual servoing approach using disturbance observer", Proc. IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, vol. 3, pp. 1334-1339, 1999
- [9] 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
- [10] 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. on Robotics and Automation, pp. 3012-3017, 1998
- [11] G. Strang, *Linear Algebra and Its Application 2nd ed.*, Academic Press, 1980
- [12] R. Bhatia, *Matrix Analysis*, Springer, 1997
- [13] L. E. Weiss, A. C. Sanderson, and C. P. Neuman, "Dynamics sensor-based control of robots with visual feedback," IEEE J. Robotics and Automation, vol. RA-3, no. 5, pp. 404-417, Oct., 1987
- [14] S. Skogestad and I. Postlethwaite, *Multivariable Feedback Control*, John Wiley & Sons, 1995
- [15] K. Hashimoto, T. Kimoto, T. Ebine and H. Kimura, "Manipulator control with image-based visual servo," Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 2267-2271, 1991