

외란관측기를 이용한 시각구동 방법의 구현

이준수¹, 서일홍², 유범재¹, 오상록¹
¹한국과학기술연구원 지능제어연구센터, ²한양대학교 전자공학과

Experiments on a Visual Servoing Approach using Disturbance Observer

Joon-Soo Lee¹, Il-Hong Suh², Bum-Jae You¹, Sang-Rok Oh¹
¹KIST Intelligent System Control Research Center, ²Hanyang Univ. Dept. of Electronics

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 stabilized the disturbance observer loop by saturating the differential changes of the image features.

1. 서 론

영상 기반 시각구동은 3차원 영상 정보의 재구성 필요 없고 센서 모델링과 카메라 보정으로 인한 오차를 줄일 수 있는 장점으로 인하여 많은 연구가 되어 오고 있다[1].

영상 기반 시각구동의 신뢰성 있는 제어를 위해서는 영상특징의 측정성과 민감성 그리고 로봇 머니플레이터의 제어성과 안정성을 고려 해야 한다. 이러한 시각 구동 제어의 성능을 평가하기 위하여 영상 특징 자코비안 행렬의 특이값을 이용한 성능지수에 대하여 많은 연구가 되어 오고 있다[2][3][4][5]. Feddema[2]는 영상 특징 자코비안의 조건지수를 이용하여 영상특징의 측정성 그리고 로봇 머니플레이터의 제어성과 민감성이 향상 되도록 영상 특징점을 선택하였다. Hashimoto는 영상 기반 제어의 민감성이 좋아지도록 최소 특이값이 커지는 영상특징을 선택하였다. Sharma와 Hutchinson은 조작 성능지수를 영상특징 자코비안 행렬에 적용한 특이값의 곱인 운동 인지도를 도입하였고, Nelson과 Khosla[5]는 시각 분해 타원을 이용하여 시각센서가 물체의 위치와 방향을 분해할 수 있는 정도를 나타내었다.

본 논문의 선행 연구로 시각구동의 제어 성능을 향상시키기 위해 외란관측기[6][7], 영상사점[8]을 이용한 영상특징 자코비안과 블록 대각 행렬을 이용하여 조건지수를 감소시키는 연구를 하였다[9][10]. 영상사점을 이용하여 상위블록 삼각 영상특징 자코비안 행렬을 구하고, 외란관측기로 대각 이외의 성분제거로 인한 오차를 보상하며 외부의 외란을 제거하였다.

본 연구에서는 선행연구[9][10]에 대하여 삼성 FARAMAN-AS1 6축 다관절 로봇을 이용한 손눈구조의 시각구동 방법을 구현하고 실험결과를 분석하였다. 최대특이값은 감소하고 최소특이값은 약간 증가하였으며 영상 특징 자코비안의 조건지수는 감소하여 성능이 향상되는 결과를 보였다. 특이값의 곱인 운동 인지도에 대해서는 블록 이외의 성분의 제외에도 불구하고 같은 값임

을 수학적으로 증명하였다. 특히 실제 구현에 있어 속도 명령이 로봇 머니플레이터의 운동 능력의 최대 범위를 벗어나는 경우에 영상 특징의 미분 변화량을 제한하기 위해 특징 포화기를 제안하였다.

2. 외란관측기를 이용한 시각 구동 방법

외란 관측기를 이용한 시각구동 방법은 블록 대각 영상특징 자코비안 행렬이 블록 삼각 영상 특징 자코비안 행렬에 비하여 조건지수가 감소한다는 특징에 의해 그림 1과 같이 제안되었다.

조건지수와 최소 특이값은 영상 자코비안 행렬의 성능지수로써 사용되며 조건지수, χ , 는 다음과 같이 정의된다.

$$\chi = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \geq 1, \tag{1}$$

χ 는 자세 제어성과 제어 민감성으로 사용되며 다음과 같이 정의 된다.

$$\chi(J) = \|J\| \cdot \|J^{-1}\| = \chi, \tag{2}$$

여기서 norm은 Spectral Radius Theorem[11]에 의해 다음과 같이 정의된다.

$$\|J\| = \max\{\sigma_1, \dots, \sigma_p\}, \tag{3}$$

$$\|J^{-1}\| = 1/\min\{\sigma_1, \dots, \sigma_p\}, \tag{4}$$

여기서

$\sigma_1, \dots, \sigma_p$: singular values of J .

다음과 같은 정리에 의하여 영상특징 자코비안을 블록 삼각행렬로 나타낼 수 있다면 이상에서의 성능지수들이 좋아진다.

정리 1. [9][10]

블록 삼각 행렬 A 의 블록 대각 행렬, $C(A)$, 이

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ 0 & A_{22} \end{bmatrix}, C(A) = \begin{bmatrix} A_{11} & 0 \\ 0 & A_{22} \end{bmatrix} \tag{5}$$

과 같이 주어질 때,

$$\sigma_{\max, C(A)} \leq \sigma_{\max, A} \tag{6}$$

$$\sigma_{\min, C(A)} \geq \sigma_{\min, A} \tag{7}$$

의 관계가 있다. ■

영상 특징 자코비안의 특이값의 곱인 운동 인지도는 다음과 같이 정의된다.

$$w_v = \sqrt{\det(J_v J_v^T)} = \sigma_1 \sigma_2 \dots \sigma_p. \tag{8}$$

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 정리2에서 보이겠다.

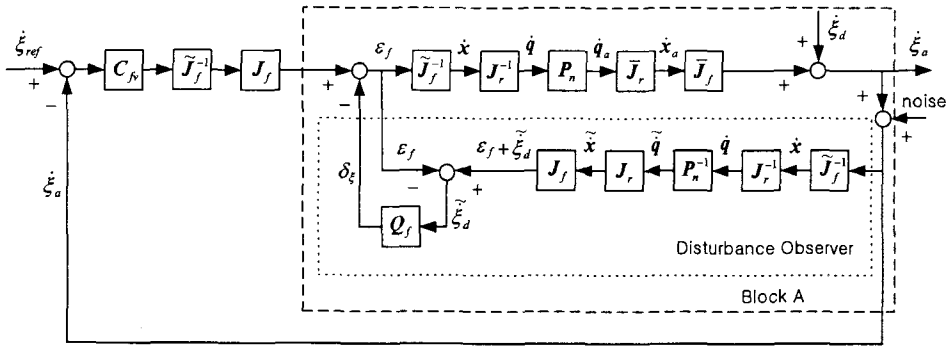


그림 1. 외란관측기를 이용한 시각구동 방법의 구성도

정리 2.

블록 삼각 행렬 A 의 블록 대각 행렬, $C(A)$, 이 식(5)와 같이 주어진다 하면 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$\prod_i \sigma_{i, C(A)} = \prod_i \sigma_{i, A} \quad (9)$$

증명

식(9)로부터 특이값의 곱 대신 $\sqrt{\det(A A^T)}$ 을 고려하자. 만약 A 가 정방 행렬이면[12]

$$\det(A A^T) = \det(A^T A) = \det A \cdot \det A^T. \quad (10)$$

또한 삼각 혹은 블록 삼각행렬의 determinant는 대각 블록들의 determinant의 곱이다.

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

따라서

$$\sqrt{\det(A A^T)} = \sqrt{\det(C(A)C(A^T))} \quad (12)$$

이고

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

결론적으로 $C(A)$ 의 운동 인지도는 A 의 값과 같다. ■

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

외란관측기 루프를 안정시키기 위하여 그림 1의 점선부분과 같이 특징 오차, ϵ_f ,의 변화량을 제한하는 특징 포화기(feature saturator)를 제안한다. 특징포화기를 이용한 외란 관측기는 실제 구현에 있어 그림 1의 블록 A를 대체한다. 영상특징의 변화량에 의한 매우 큰 관절 속도 명령은 로봇 제어기의 최대 속도나 토크의 범위를 넘어 로봇이 움직이지 못하는 경우가 있다. 이러한 경우에 외란 관측기는 초과하는 특징 오차 명령을 외부의 외란으로 간주하고 더 큰 특징 오차 명령을 만들어 시스템이 불안해 진다. 이런 포화문제를 해결하기 위하여 포화된 관절 명령 변화의 제한 신호를 이용하여 특징 포화기의 특징오차의 변화의 포화수준을 조절한다.

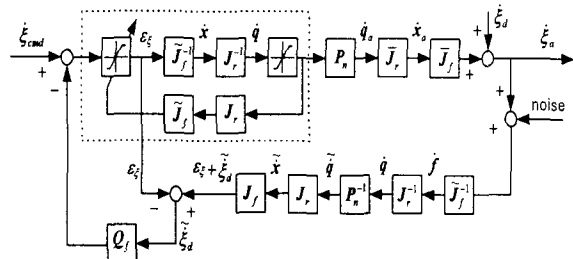


그림 2 특징포화기를 이용한 외란관측기의 시각구동

4. 실험 결과

제안된 시각구동 방법의 타당성과 유용성을 보이기 위하여 그림 3과 같은 삼성 FARAMAN-AS1 산업용 6축 수직 다관절 로봇과 흑백 CCD 카메라를 사용하여 손눈 구조의 실험을 하였다. 로봇의 주제어기는 VME 버스를 기반으로 모토롤라사의 MVME172 싱글보드 컴퓨터 1대와 TMS320C30 DSP 모션 제어기 2대를 사용하였다. 영상처리는 IBM PC Pentium II-233MHz에서 Matrox사의 Meteor 흑백 디지털izer 보드를 사용하여 구한다. 이렇게 계산된 특징값은 전용 허브를 이용하여 주제어기로 TCP/IP통신으로 보내어진다. 그림 4는 전체 구성도를 보여준다. 샘플링 시간은 NTSC 신호의 수직 동기신호의 2배인 67msec이며 그림 1의 외란 관측기의 저역통과 필터의 절단주파수는 샘플시간의 20배로 잡았다.

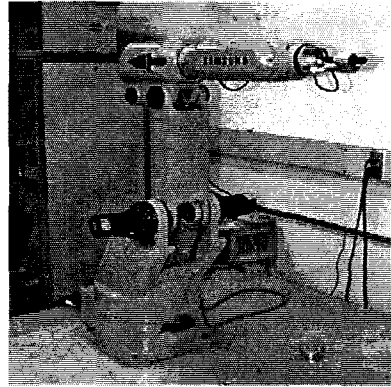


그림 3. 삼성 FARAMAN AS-1

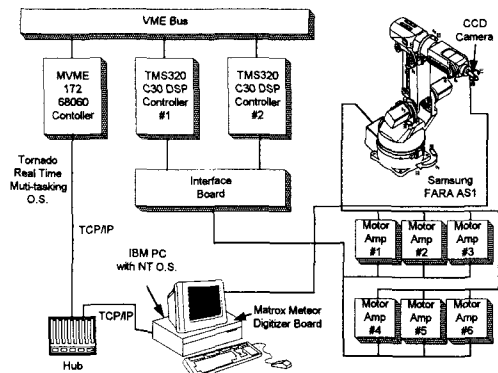


그림 4. 실험 구성도

그림 5은 로봇의 초기 위치 (-31, 53, -4.7, 18.6, 39.9, -9.0) deg에서 목표지점인 (-26, 38, -13, 11.4, 34.9, -6) deg로 영상특징이 (-6.2e-5, 4.47e-5, 1.41e-6, 7.68e-3, -1.22e-3, -2.3e-2) m가 되도록 시각구동에서 외란관측기를 사용한 경우 (with DO)와 사용하지 않은 경우(without DO)에 대한 목표물의 무게중심의 x좌표에 대한 추적 결과이다. 전반적으로 외란관측기를 사용한 방법이 안정된 결과를 보임을 알 수 있다.

그림 6, 7, 8는 각각 시각 구동에서 최대, 최소 특이값 및 조건지수를 보여준다. 최대특이값과 조건지수는 외란 관측기를 사용하지 않는 방법에 비해 앞에서 설명한 바와 같이 감소함을 볼 수 있다. 이는 외란 관측기를 사용하면 로봇 머니플레이터의 자세 제어성 및 제어의 민감성이 향상됨을 볼 수 있다. 최소 특이값은 거의 비슷함을 보이지만 약간 커졌다. 이렇게 변화가 작은 것은 물체의 면적을 이용하는 영상특징이 로봇의 움직임에 너무 둔감하기 때문이다.

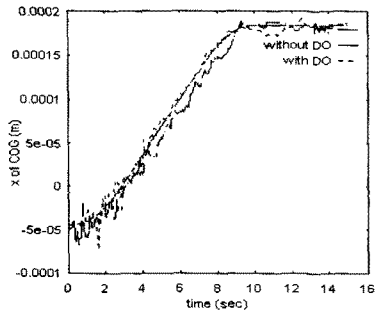


그림 5. 목표 영상의 무게중심의 x 좌표

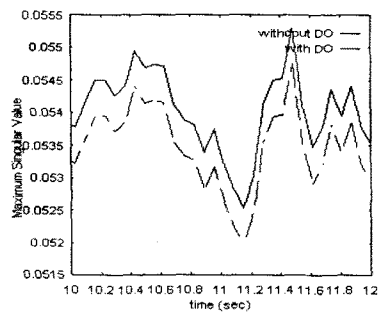


그림 6. 최대 특이값

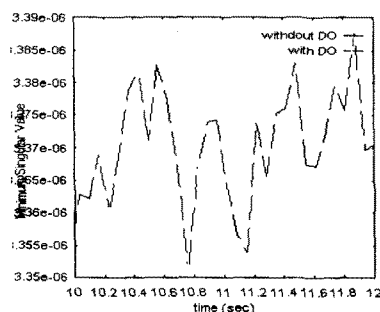


그림 7. 최소 특이값

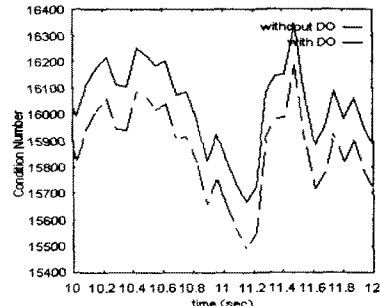


그림 8. 조건지수

5. 결 론

본 논문에서는 실험을 통하여 선행 논문에서 제안한 외란 관측기를 이용한 시각구동 방법의 성능을 분석하였다. 수학적으로 블록 대각이외의 성분을 제거하더라도 운동 인지도는 변함이 없음을 보였다. 또한 특징 오차의 변화를 제한함으로써 외란 관측기 루프를 안정화 시키는 특징 포화기를 제안하였다.

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

(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, pp. 651-670, Oct., 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 Trans. 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 Trans. 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, and W. K. Chung and S. R. Oh, "Disturbance observer based force control of robot manipulator without force sensor", Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, 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 48A호 3월호, 294쪽 - 303쪽, 1999
- [10] 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. , 1999
- [11] R. Bhatia, *Matrix Analysis*, Springer, 1997
- [12] S. Skogestad and I. Postlethwaite, *Multivariable Feedback Control*, John Wiley & Sons, 1995