

외란관측기를 이용한 새로운 시각구동방법

이준수, 서일홍, 유범재*

*한국과학기술연구원 지능제어연구센터, #한양대학교 전자공학과

A Novel Visual Servoing Method involving Disturbance Observer

Joon-Soo Lee*, Il-Hong Suh, Bum-Jae You*

*KIST Intelligent System Control Research Center, *Hanyang Univ. Dept. of Electronics

Abstract - To improve the visual servoing performance, several strategies were proposed in the past such as redundant feature points, using a point with different height and weighted selection of image features. The performance of these visual servoing methods depends on the configuration between the camera and object. And redundant feature points require much computation efforts.

This paper proposes the visual servoing method based on the disturbance observer, which compensates the upper off-diagonal component of image feature Jacobian to be null. The performance indices such as sensitivity for a measure of richness, sensitivity to noise, and controllability are shown to be improved when the image feature Jacobian is given a block diagonal matrix. Computer simulation is carried out for a PUMA560 robot and shows results to verify the effectiveness of the proposed method.

1. 서론

로봇의 지능제어에 있어서 시각구동은 인간과 같이 눈으로 보면서 작업을 할 수 있다는 장점으로 많은 연구가 되어오고 있다[1][2].

영상특징 자코비안을 이용한 시각구동 방법들은 제어 성능을 향상시키기 위하여 여러개의 특징점중에서 성능이 좋은 점들을 선택하는 방법을 사용하거나[3] 영상특징점을 추가하고 구성을 달리하는[4] 방법을 사용하였다 하지만 이런방법들은 특징점들을 잘 선택했다라도 카메라와 물체사이의 위치에 따라 성능이 변하고 여유 특징점을 추가했을때는 이에 대한 계산도 복잡해지는 문제점이 있다. 성능 지수로는 영상 특징 자코비안의 singular value를 이용하여 물체가 변하면 영상특징도 변하는 정도를 정의하는 민감도(sensitivity)[3], 잡음에 대한 민감도와 역 자코비안을 이용한 물체 위치의 제어능력(controllability)[4]등이 이용되고 있다.

또한 최근에는 외란 관측기를 이용해서 로봇의 정확한 모델 없이 로봇의 비선형적 특성을 보상[5]해 주거나 역 자코비안의 계산에 있어 transpose 행렬로 간단히 계산한후 오차를 보상[6]해 주는 연구가 있다. 또한 힘제어에 있어 작업공간(operational space)에서 외란 관측기를 사용함으로써 각각의 운동이 서로 독립적으로 제어가능하도록 하였다[7].

본 논문에서는 영상특징을 바꾸지 않고 영상특징

자코비안을 직접 변경해서 물체에 대한 영상 특징의 sensitivity를 향상시키고, 잡음 및 외란에 대해 강하며, 제어능력을 향상시키는 방법을 제시하려고 한다.

영상 특징 자코비안이 block triangular인 경우 성능을 향상시키기 위하여 block diagonal 행렬로 만들고 이때의 오차를 외란 관측기를 이용하여 보상한다. 또한 block triangular의 구조를 갖는 영상 특징 자코비안을 구하기 위하여 영상 사점을 이용한 영상 특징 자코비안도 제시한다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 제안된 방법의 타당성과 성능을 보일 것이다.

2. 외란관측기를 이용한 Block-Diagonal 영상특징 자코비안

2.1 성능지수

시각 구동의 성능을 평가하기 위한 성능지수로, sensitivity는

$$\text{Sensitivity} = \sigma_{\min} \tag{1}$$

와 같이 정의되고 큰값이 되도록 해야하며[3], 잡음에 대한 sensitivity와 역 자코비안을 이용한 물체 위치의 제어능력(controllability)은

$$\pi = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\min}} \tag{2}$$

와 같이 정의되고 값이 작아져야 한다[4]. 여기서 $\sigma_{\max}, \sigma_{\min}$ 는 각각 영상 특징 자코비안의 최대, 최소 singular value이다.

본 논문에서는 이러한 성능지수를 향상시키기 위하여 다음과 같은 definition과 theorem[6]을 이용한다.

Definition

Non-negative : $\|A\| \geq 0$

Triangular inequality : $\|A+B\| \leq \|A\| + \|B\|$

Spectral Radius Theorem

a. $\|A\| = \max \{ \sigma_1, \dots, \sigma_n \}$

b. $\|A^{-1}\| = \min 1 / \{ \sigma_1, \dots, \sigma_n \}$

c. $\pi = \|A\| \|A^{-1}\| = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\min}}$

정의에서 $\|A+B\| \leq \|A\| + \|B\|$ 의 관계를 이용해서

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & 0 \\ 0 & A_{22} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 & A_{12} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, A+B = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ 0 & A_{22} \end{bmatrix} \tag{3}$$

라고 놓으면

$$\|A+B\| \geq \|A\|$$

의 관계가 되고 최대 singular value는

$$\sigma_{(A+B)\max} \geq \sigma_{(A)\max} \tag{4}$$

과 같이 작아진다.

Block triangular 구조를 갖는 행렬의 역이 존재할 때

역 행렬은 다음과 같이 구해진다.

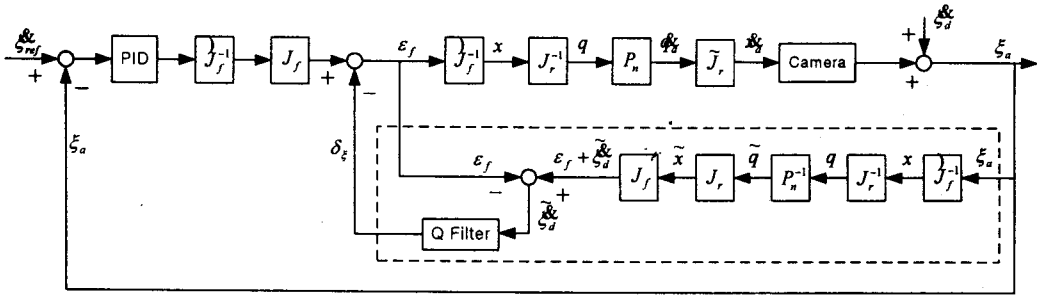


그림 2 외란관측기를 이용한 시각구동 시스템의 블럭도

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ 0 & A_{22} \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} A_{11}^{-1} - A_{11}^{-1} A_{12} A_{22}^{-1} & A_{11}^{-1} A_{12} A_{22}^{-1} \\ 0 & A_{22}^{-1} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

역 행렬(5)을 다음과 같이 놓으면

$$A^{-1} = \begin{bmatrix} A_{11}^{-1} & 0 \\ 0 & A_{22}^{-1} \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} 0 & A_{11}^{-1} A_{12} A_{22}^{-1} \\ 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$A^{-1} + C = \begin{bmatrix} A_{11}^{-1} - A_{11}^{-1} A_{12} A_{22}^{-1} & A_{11}^{-1} A_{12} A_{22}^{-1} \\ 0 & A_{22}^{-1} \end{bmatrix} \quad (6)$$

이 되고

$$\|A^{-1} + C\| \geq \|A^{-1}\|, \quad \frac{1}{\sigma_{(A^{-1}+C)\min}} \geq \frac{1}{\sigma_{(A^{-1})\min}} \quad (7)$$

의 관계에 의해

$$\sigma_{(A+B)^{-1}\min} \leq \sigma_{(A^{-1})\min} \quad (8)$$

과 같이 최소 singular value는 원래의 역 행렬의 값보다 작아진다. 따라서 block triangular 형태의 영상 특징 자코비안에 대하여 block diagonal 형태로 만들면 앞에서의 성능 지수에 의해 성능이 향상됨을 알 수 있다.

2.2 영상사점을 이용한 영상특징 자코비안

본 논문에서는 영상사점 (Vanishing Points)를 이용 block triangular 형태의 영상특징 자코비안을 이용하여 정사각형을 기준영상으로 이용한다[9]. 시각구동을 위한 영상특징은 다음과 같다.

- u, v : 영상의 사각형의 무게중심의 x, y 좌표
- a : 영상의 사각형의 면적
- x_v : 수직 영상사점의 x 좌표
- x_h : 수평 영상사점의 x 좌표
- y_h : 수평 영상사점의 y 좌표.

영상특징을 이용한 영상특징 자코비안은

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ a \\ x_v \\ x_h \\ y_h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ 0 & J_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \\ \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \\ \dot{\gamma} \end{bmatrix} \quad (7)$$

로 나타낼 수 있고, 여기서

$$J_{11} = \begin{bmatrix} \frac{\lambda}{z} & 0 & -\frac{u}{z} \\ 0 & \frac{\lambda}{z} & -\frac{v}{z} \\ 0 & 0 & -\frac{2cf^2}{z^3} CaCb \end{bmatrix},$$

$$J_{12} = \begin{bmatrix} -\frac{uv}{\lambda} & \frac{\lambda^2 + u^2}{\lambda} & -v \\ -\frac{\lambda^2 + v^2}{\lambda} & \frac{uv}{\lambda} & u \\ -\frac{cf^2}{z^2} SaCb & -\frac{cf^2}{z^2} CaSb & 0 \end{bmatrix},$$

$$J_{22} = \lambda \begin{bmatrix} 0 & -\frac{Cy}{S^2\alpha} & -\frac{Sy}{Ta} \\ \frac{Sy}{CaS^2\beta} & -\frac{TaT\beta}{CaT\beta} - \frac{Cy}{C^2\alpha} & -\frac{Cy}{CaT\beta} + TaSy \\ \frac{Cy}{CaS^2\beta} & -\frac{TaCy}{CaT\beta} + \frac{Sy}{C^2\alpha} & \frac{Sy}{CaT\beta} + TaCy \end{bmatrix},$$

λ 는 초점거리, z 는 카메라와 물체중심간의 거리, c 는 물체의 실제면적, α, β, γ 는 각각 yaw, pitch, roll 각 S 는 \sin , S^2 은 \sin^2 , C^2 은 \cos^2 , C 는 \cos , T 는 \tan 이다

영상사점을 이용한 영상특징 자코비안의 특징은 영상사점의 성질에 의해 방향성분이 위치성분과 독립되었기 때문에 upper block diagonal 형태의 행렬이며, 잡음 강하고 보다 정확한 각도계산이 가능하다[9].

2.3 외란관측기

시각구동에 있어서 외란 관측기는 영상특징 자코비안의 upper diagonal 항을 보상 해주며, 카메라, 로봇제어 기등의 각 부분에서 발생하는 모델링 오차를 보상하고, 외란을 제거하여 안정된 시각구동을 할 수 있게 해준다.

영상 특징 자코비안의 역행렬은

$$J^{-1} = \begin{bmatrix} J_{11}^{-1} & -J_{11}^{-1} J_{12} J_{22}^{-1} \\ 0 & J_{22}^{-1} \end{bmatrix} \quad (8)$$

로 나타내고 이를 이용한 전형적인 시각구동 방법은 그림 1과 같이 나타낼 수 있다.

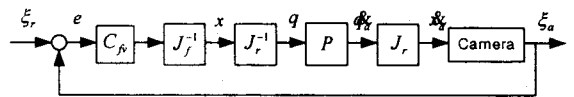


그림 1. 전형적인 시각구동 방법

그림 1에서 ξ_a 는 영상 특징의 속도 명령, C_f 는 특징 속도 제어기, J_f 는 영상 특징 자코비안, J_r 는 로봇 자코비안, F 는 실제 로봇의 전달함수, ξ_a 는 측정된 영상 특징의 속도이다.

본 논문에서는 (8)식의 역 영상 특징 자코비안을 (9)식과 같이 block diagonal로 줄여서 계산한다.

$$J^{-1} = \begin{bmatrix} J_{11}^{-1} & 0 \\ 0 & J_{22}^{-1} \end{bmatrix} \quad (9)$$

이에의한 오차를 보상하기 위해 외란 관측기를 이용한 시각구동 시스템의 전체 구성은 그림 2와 같다. 여기서 P_n 은 그림 3과 같이 외란 관측기를 이용한 로봇제어기이다. 또한 전체시스템은 최종적으로 그림 4와 같이 나타낼 수 있으면 제어기와 성능지수는 영상특징 자코비안과 역 영상특징 자코비안이 block diagonal에 대해서 고려하면 된다.

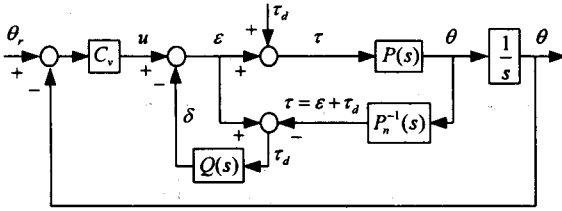


그림 3. 외란 관측기를 이용한 로봇 제어

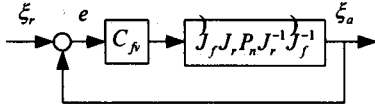


그림 4 간략화된 전체 시스템

3. 컴퓨터 시뮬레이션

컴퓨터 시뮬레이션은 6축 수직 다관절형 PUMA56 [10]과 초점거리 7.5mm인 흑백카메라, 4x4cm크기의 각형 물체를 사용하였다. 프로그램은 C 언어를 사용하여 SUN Sparc 20를 사용하였다. 시뮬레이션은 discr model로 외란관측기의 샘플링 시간은 50msec, 영상특 속도 loop의 샘플링 시간은 250msec 이다.

그림 5는 외란 관측기를 이용하여 카메라에 대하여 물체가 {0., 0., 500.mm, 10., 10., 10deg.}인 지점에서 [400.mm, 5., 5., 5.deg.}로 시각구동한 결과를 보여준다.

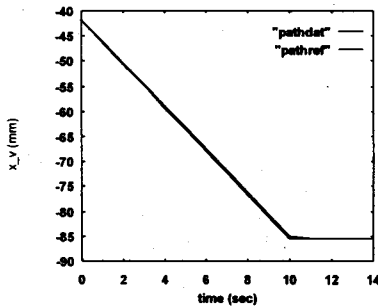


그림 5. 시각구동 결과

그림 6은 카메라의 영상특징에 잡음이 추가되었을 때 두 시스템의 오차이다. 외란관측기를 사용하지 않았을 경우에는 외부의 잡음이 그대로 오차에 반영이 되었고 사용한 경우에는 오차가 거의 제거됨을 볼 수 있다.

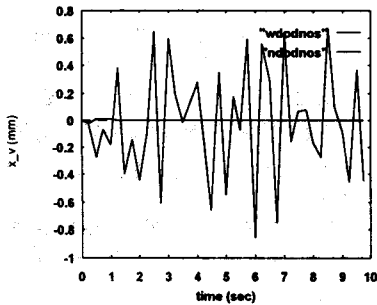


그림 6 잡음에 의한 오차

그림 7은 주기가 $\pi/2$ rad/sec이고 크기가 [0.1m 0.1mm 0.1mm² 1mm 1mm 1mm]의 외란이 영상특 인가되었을 때 의 오차를 보여준다. 외란 관측기를 사용 했을 때의 거의 오차를 볼 수가 없다.

두 결과를 비교했을 때 외란 관측기에 의해 잡음과 외란이 잘 제거됨을 볼 수 있다.

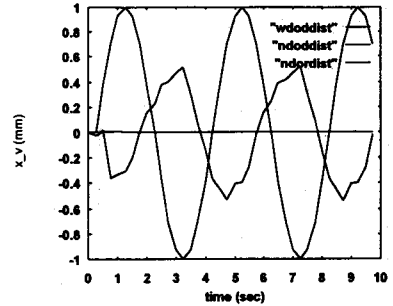


그림 7. 외란에 의한 오차

4. 결 론

본 논문에서는 시각구동 성능을 향상시키기 위하여 영상 특징점들에 대한 개수나 구성을 변경하는 대신에 영상 특징 자코비안을 외란 관측기를 이용하여 block triangular 형태를 갖는 영상사점을 이용한 영상 특징 자코비안을 제시하고, 외란관측기를 이용한 block diagonal 형태의 역 영상특징 자코비안을 갖는 제어기를 구성하였다. 또한 성능 향상의 증명을 위한 행렬 norm의 triangular inequality를 이용하여 민감도, 잡음에 대한 민감도, 제어능력등이 좋아짐을 보였다.

컴퓨터 시뮬레이션을 통해서 주어진 기준영상에 시각구동이 잘됨을 볼 수 있고 외부의 외란에 대해서도 외란관측기가 없는 시스템보다 외란을 잘 제거함을 볼 수 있다. 앞으로의 과제는 실제 로봇에 적용하여 실험을 하는 것과 일반화된 물체의 특징 자코비안에서의 적용 가능성 검토등이다.

[참 고 문 헌]

- [1] Seth Hutchinson, Gregory D. Hager and Peter I. "A Tutorial on Visual Control", IEEE Trans. on Ro and Automation, Vol. 12, No. 5, pp. 651-670, Oct. 19
- [2] I.H.Suh and T.W.Kim, "Fuzzy membership F Based Neural Networks with Applications to the Servoing of Robot Manipulators," IEEE Trans. Systems, Vol.2, No. 3, pp.203-220, Aug. 1994.
- [3] John. T. Feddema, C. S. George Lee, Owen Mitchell, "Weighted Selection of Image Feature Resolved Rate Visual Feedback Control", IEEE Tra Robotics and Automation, Vol. 7, No. 1, pp. 31-47, F
- [4] K. Hasimoto and T. Noritsugu, "Performanc Sensitivity in visual Servoing", Int. Conf. on Roboti Automation, pp. 2321-2326, 1998
- [5] K. Ohnishi, "A New Servo Method in Mechatr Trans. japanese Society of Eletrical Eng., Vol. 107-83-86, 1987
- [6] S. Komada, J. Shin, M. Ishida, K. Ohnishi, and "Simplification of Inverse Kinematics Routine of Manipulators Using Disturbance Observer in Task S Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 1381-1386
- [7] K. Kaneko, K. Komoriya, K. Ohnishi, K. "Manipulator Control based on Disturbance Observer Operational Space", Int. Conf. on Robotics and Auto pp. 902-909, 1994
- [8] Melvin J. Maron, *Numerical Analysis*, Mac Publishing Co., Inc. 1982
- [9] J. S. Lee and I. H. Suh, "An Intelligent Visual S Method using Vanishing Point Features", J. of Elec and Info. Sci., Vol. 2, No. 6, pp. 177-182, 1997
- [10] F. L. Lewis, C. T. Abdallah and D. M. D *Control of Robot Manipulators*, Macmillan Pub. Co., 1