

A Novel Visual Servoing Method involving Disturbance Observer

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

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 the null. The performance indices such as sensitivity for a measure of richness, sensitivity of the control to noise, and controllability are shown to be improved when the image feature Jacobian is given as a block diagonal matrix. Computer simulations are carried out for a PUMA560 robot and show some results to verify the effectiveness of the proposed method.

Key Words : 시각구동, 외란관측기, 영상사점, eye-in-hand

1. 서 론

로봇의 지능제어에 있어서 시각구동은 인간과 같이 눈으로 보면서 작업을 할 수 있다는 장점으로 인하여 많은 연구가 되어 오고 있다[1]-[3]. 시각구동은 위치 기반 제어 (position-based control) [4]과 영상 기반 제어 (image-based control) [1]로 나눌 수 있는데, 영상 기반 제어는 영상해석이 필요 없을 뿐만 아니라 센서 모델링, 카메라 보정으로 인한 오차, 계산 시간을 줄일 수 있는 장점으로 연구의 많은 부분을 차지하고 있다. 영상 기반 제어에서 영상 특징 자코비안은 Weiss등[5]에 의해 제안되었으며 로봇의 움직임에 의한 영상 특징의 변화량의 관계를 나타낸다. 일반적인 방법으로는 강체의 선형 및 회전 속도[6]를 이용하여 영상에서의 한 점의 속도에 대해 실제 물체의 특징점의 상대속도의 관계를 구한다[7]. 이런 관계를 해석적으로 구하는 대신 퍼지 소속함수 신경망을 이용하여 학습[8]을 통하여 구하거나, 영상특징을 수학적 형태로 표시하고 미분하여 영상 특징 자코비안을 구하는 방법도 있다[9].

영상 특징 자코비안의 특이값은 여러 연구에서 시각구동의 성능평가의 방법으로 사용되었다. 시각구동에서 사용되는 특징점의 선택의 경우, 제어측면에서 물체 자세(pose)의 측정성(observability), 역 자코비안 행렬을 이용한 물체의 자세

(pose) 제어성(controllability), 잡음에 대한 제어의 민감성(sensitivity)등을 영상특징 자코비안 행렬의 조건지수(condition number)를 이용하여 1에 가까운 값을 갖는 특징점들을 선택하였다[10]. 한편, Hashimoto[11]등은 민감성(sensitivity)이 좋아지게 물체에 대한 특징점들의 최소 특이값이 커지도록 개수를 늘리고 구성을 바꾸는 연구를 하였다.

이상에서의 성능지수들은, 주어진 특징점들에 대하여 영상 특징 자코비안의 특이값을 이용하여 구하며, 시각구동의 제어 성능을 높이기 위해서 특징점과 카메라의 위치 및 구성을 바꾸어 성능지수가 좋아지도록 하는 방법을 취하였다. 하지만 이런 방법들은 물체와 카메라의 위치 및 구성에 의해 성능 지수가 결정되기 때문에 주어진 위치에서는 좋은 결과를 보이다가 작업 실행중에는 이런 성능지수들이 나빠지는 경우가 발생하게 된다.

본 논문에서는 기존의 방법인 특징점과 카메라의 위치 및 구성을 바꾸는 대신, 위에서 언급한 성능지수들이 좋아지도록 외란관측기를 이용하는 새로운 방법을 제시하겠다. 외란관측기를 이용하여 행렬의 놈(norm)의 삼각 부등성(triangular inequality) [13][14]에 의해 블록 삼각 행렬(block-triangular matrix)을 블록 대각 행렬(block-diagonal matrix)과 대각선 상에 없는 행렬(off-diagonal matrix)로 분리하여 블록 대각 행렬만 이용할 경우 최소 특이값이 커지고, 조건지수가 1에 가까워 지도록 작어지는 것을 보이겠다. 상위 블록 삼각 행렬(upper block-triangular matrix)의 형태를 갖는 영상특징 자코비안을 구하기 위해 방향성분이 위치성분과 독립된 영상사점(vanishing points)[15]-[18]을 이용한 영상 특징 자코비안을 제안하고, 자코비안의 블록 대각 성분만을 이용한 역 행렬을 이용하여 제어기를 구성한 후 대각 이외의 성분의

* 正 會 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,

서울대 ERC-ACI연구위원 · 工博

接受日字 : 1998年 8月 12日

最終完了 : 1999年 2月 4日

제외로 인한 오차를 외란 관측기를 이용하여 보상함으로써, 영상 자코비안이 블록 대각 행렬로 표현 가능함을 보이고자 한다. 또한 외란에 대해서도 제거성능이 우수함을 보이겠다.

외란관측기는 로봇의 정확한 모델없이 비선형적 특성을 보상해주기 때문에 계산시간이 빠르고 쉽게 구현이 가능할 뿐만 아니라 외란에 대해서도 매우 잘 제거하는 능력이 있어 최근 많은 연구가 진행되고 있다[19]-[22]. 로봇의 역 자코비안 행렬의 계산에 있어서도 복잡한 역행렬을 구하는 대신 전치 행렬로 간단히 계산한 후에 오차를 보상해 주는 연구가 있다[23]. 또한 힘 제어에 있어 작업공간에서 비선형적으로 서로 관련되어 있는 운동을 독립적으로 제어하였다[24].

제안된 방법의 타당성과 성능을 보이기 위하여 PUMA560 을 이용한 컴퓨터 모의 실험 결과를 보이겠다.

2. 성능지수

성능지수는 여러 연구에서 영상특징점의 선택이나 개수 및 구성을 위해, 또 카메라의 대수 및 배치를 위해 제시되었다. 조건지수[11], 민감도[10] 등이 그 예인데, 이들은 행렬의 특이값을 이용하여 구한다

2.1 조건지수

조건지수, κ , 는 역 자코비안 행렬을 이용한 물체의 자세 (pose) 제어성(controllability), 잡음에 대한 제어의 민감성 (sensitivity)으로 사용되며 다음과 같이 나타내 진다.

$$\kappa = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\min}} \geq 1. \quad (2-1)$$

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

영상특징 자코비안 J 의 제어성 $\alpha(J)$ 은

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

로 나타낼 수 있으며, $\|J\|, \|J^{-1}\|$ 는 각각 J 의 행렬놈과 역행렬 놈이다. 행렬 놈은 스펙트럴 레디우스 이론 (Spectral Radius Theorem) [13]에 의해 다음과 같이 정의된다.

$$\|A\| = \max \{ \sigma_1, \dots, \sigma_p \}, \quad (2-3)$$

$$\|A^{-1}\| = 1 / \min \{ \sigma_1, \dots, \sigma_p \}, \quad (2-4)$$

$$\kappa = \|A\| \|A^{-1}\| = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\min}}. \quad (2-5)$$

J 는 영상특징의 단위 움직임에 대한 로봇 움직임의 변화에 대한 측정치이다. 너무 작은 $\|J\|$ 는 로봇이 움직여도 영상 특징이 변하지 않고, 너무 크면 잡음에 너무 민감해 진다. J 의 역행렬의 놈인 $\|J^{-1}\|$ 는 영상특징의 단위 움직임에 대한 로봇 움직임에 대한 로봇 움직임의 변화에 대한 측정치이다. 따라서 제어성이 1에 가까워야 안정적인 제어가 가능해 진다. 잡음에 대한 제어의 민감성은 다음과 같이 정의 된다[12].

$$y = Ax. \quad (2-6)$$

여기서 $x, y \in R^n$, $A \in R^{n \times n}$ 이다. x 와 y 에 각각 잡음,

$\Delta x, \Delta y$ 이 더해지면

$$x + \Delta x = A^{-1}(y + \Delta y) \quad (2-7)$$

이 되고, 식(2-7)은

$$\Delta x = A^{-1} \Delta y \quad (2-8)$$

로 된다. 따라서 잡음의 증폭율은

$$\frac{1}{\sigma_{\max}} \leq \frac{\|\Delta x\|}{\|\Delta y\|} \leq \frac{1}{\sigma_{\min}} \quad (2-9)$$

로 나타내 진다. x 와 y 의 상대적 잡음의 증폭율은

$$\kappa^{-1} \leq \frac{\|\Delta x\|/\|x\|}{\|\Delta y\|/\|y\|} \leq \kappa \quad (2-10)$$

로 나타낼 수 있다. 따라서 잡음의 민감도 κ 는 1에 가까울 수록 잡음에 덜 민감하다.

2.2 민감성

민감성은 로봇의 움직임에 대하여 영상특징이 가장 둔감하게 움직이는 정도를 나타내며 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$Sensitivity = \sigma_{\min} \quad (2-11)$$

따라서 민감성은 클 수록 주어진 영상특징에 대하여 로봇을 제어하여 원하는 영상특징을 얻기가 쉬워진다.

2.3. 블록 대각 형태의 영상특징 자코비안

이상에서 설명한 영상 특징 자코비안에 대한 성능 지수를 향상 시키기 위하여 본 논문에서는 블록 삼각 형태의 영상 특징 자코비안이 다음의 정리와 같이 주어지는 성질이 있음을 먼저 보이고자 한다.

정리 1. 블록 삼각 행렬 A 의 블록 대각 행렬, $C(A)$,이

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ 0 & A_{22} \end{bmatrix}, C(A) = \begin{bmatrix} A_{11} & 0 \\ 0 & A_{22} \end{bmatrix} \quad (2-13)$$

과 같이 주어질 때,

$$\sigma_{C(A)\max} \leq \sigma_{A\max} \quad (2-14)$$

$$\sigma_{C(A)\min} \geq \sigma_{A\min} \quad (2-15)$$

의 관계가 있다.

증명 만약 U 를

$$U = \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & -I \end{bmatrix} \quad (2-16)$$

과 같이 하면 블록 대각 행렬 $C(A)$ 는

$$C(A) = \frac{1}{2}(A + UAU^{-1}) \quad (2-17)$$

와 같고 삼각 부등성 (triangular inequality)[13][14] 정의에 의해

$$\|C(A)\| \leq \frac{1}{2}\|A\| + \frac{1}{2}\|UAU^{-1}\| \quad (2-18)$$

가 된다. A 와 UAU^{-1} 행렬은 서로 유사 행렬 (singular matrix)로 고유값이 같고 특이값도 같다. 따라서

$$\|C(A)\| \leq \|A\| \quad (2-19)$$

의 관계가 되고 최대 특이값의 관계는

$$\sigma_{C(A)\max} \leq \sigma_{A\max} \quad (2-20)$$

와 같이 된다.

블록 삼각 형태를 갖는 행렬의 역행렬이 존재할 때 다음과 같이 쓸 수 있다[25].

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ 0 & A_{22} \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} A_{11}^{-1} & -A_{11}^{-1}A_{12}A_{22}^{-1} \\ 0 & A_{22}^{-1} \end{bmatrix}. \quad (2-21)$$

식(2-13)의 역 행렬과 이의 블록 대각 행렬을 다음과 같이 놓으면,

$$A^{-1} = \begin{bmatrix} A_{11}^{-1} & -A_{11}^{-1}A_{12}A_{22}^{-1} \\ 0 & A_{22}^{-1} \end{bmatrix}, C(A^{-1}) = \begin{bmatrix} A_{11}^{-1} & 0 \\ 0 & A_{22}^{-1} \end{bmatrix}. \quad (2-22)$$

앞에서와 같은 관계에 의하여

$$\frac{1}{\sigma_{C(A)\min}} \leq \frac{1}{\sigma_{A\min}} \quad (2-23)$$

의 관계에 의해

$$\sigma_{C(A)\min} \geq \sigma_{A\min} \quad (2-24)$$

과 같이 블록 대각 형태의 행렬이 원래의 상위 블록 삼각 행렬 보다 민감도가 커짐을 알 수 있다.

하위 블록 삼각 행렬인 경우에 대해서도 상위 블록 삼각 행렬인 경우와 마찬가지로 위에서와 같은 방법으로 정리1가 성립한다.

$$\begin{bmatrix} A_{11} & 0 \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} A_{11}^{-1} & 0 \\ -A_{21}^{-1}A_{11}^{-1} & A_{22}^{-1} \end{bmatrix} \quad (2-25)$$

일반 행렬에 대해서는 블록 형태를 이용한 여러 역행렬이 있겠지만 식(2-21)이나 식(2-25)의 형태를 갖는 역행렬이 없어서 위에서의 논의 삼각부동의 정의를 적용할 수 없다.

3. 영상 사점을 이용한 영상특징 자코비안

본 논문에서는 영상 사점을 이용한 영상특징을 이용하여 영상특징 자코비안을 구하며 정사각형을 기준영상으로 이용한다. 영상 사점은 카메라의 자세에 대하여 위치와는 독립적으로 회전성분만을 구할 수 있는 장점이 있어 상위 블록 삼각 행렬을 만들 수 있다. 시각구동을 위한 영상특징은 다음과 같다.

- u, v : 물체 영상의 무게중심의 x, y 좌표
- a : 물체 영상의 면적
- x_v : 수직 영상 사점의 x 좌표
- y_v : 수직 영상 사점의 y 좌표
- x_h : 수평 영상 사점의 x 좌표
- y_h : 수평 영상 사점의 y 좌표

u, v, a 는 물체 영상의 주변을 체인 코드(chain code)를 이용하여 구하고 x_v, y_v, x_h, y_h 는 영상 사점을 이용하여 구한다.

영상사점을 이용한 카메라에 대한 물체의 상대적 각도인

요잉, 피칭, 롤각은 각각 식(3-1), (3-2), (3-3)과 같다. 영상 특징 자코비안은 강체의 선형 및 회전 속도를 이용한 물체 무게 중심의 좌표 및 면적을 이용하고 식(3-1), (3-2), (3-3)을 미분한 식을 이용하여 구한다. 이들을 구하는 방법은 부록 A에서 자세하게 기술 되어 있다.

$$\alpha = \text{atan}\left(\frac{-f}{x_h \cos \beta \sin \gamma + y_h \cos \beta \cos \gamma}\right) \quad (3-1)$$

$$\beta = \text{atan}\left(\frac{f}{x_v \cos \gamma - y_v \sin \gamma}\right) \quad (3-2)$$

$$\gamma = -\text{atan}2(y_v, x_v) \quad (3-3)$$

영상 특징 자코비안은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{a} \\ \dot{x}_v \\ \dot{x}_h \\ \dot{y}_h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ 0 & J_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \\ \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix} \quad (3-4)$$

여기서

$$J_{11} = \begin{bmatrix} \frac{f}{z} & 0 & -\frac{u}{z} \\ 0 & \frac{f}{z} & -\frac{v}{z} \\ 0 & 0 & -\frac{2cf^2}{z^3} \cos \alpha \cos \beta \end{bmatrix}$$

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

$$J_{22} = f \begin{bmatrix} 0 & -\frac{\cos \gamma}{\sin^2 \beta} & -\frac{\sin \gamma}{\tan \beta} \\ \frac{\sin \gamma}{\sin^2 \alpha \cos \beta} & \frac{\tan \beta \sin \gamma}{\tan \alpha \cos \beta} & \frac{\cos \gamma}{\cos^2 \beta} \\ \frac{\cos \gamma}{\sin^2 \alpha \cos \beta} & \frac{\tan \beta \cos \gamma}{\tan \alpha \cos \beta} + \frac{\sin \gamma}{\cos^2 \beta} & \frac{\cos \gamma}{\tan \alpha \cos \beta} + \tan \beta \sin \gamma \\ \frac{\cos \gamma}{\sin^2 \alpha \cos \beta} & \frac{\tan \beta \cos \gamma}{\tan \alpha \cos \beta} + \frac{\sin \gamma}{\cos^2 \beta} & \frac{\sin \gamma}{\tan \alpha \cos \beta} + \tan \beta \cos \gamma \end{bmatrix} \quad (3-5)$$

4. 외란 관측기

로봇의 위치제어에서 사용하는 외란 관측기는 로봇의 비선형적 특성과 각 축간 상호 간섭효과에 대하여 외란으로 간주하여 보상한다. 본 연구의 시각구동에 대한 외란관측기는 블록 삼각 형태의 영상 특징 자코비안에 대하여 성능 향상을 위하여 블록 대각 형태로 바꾸고 대각 이외의 항들에 의한 영향을 외란으로 보고 이를 보상하는데 사용된다.

4.1 기존의 방법

일반적인 영상 특징 자코비안을 이용한 시각구동에 대한 구성도는 그림 4-1과 같다.

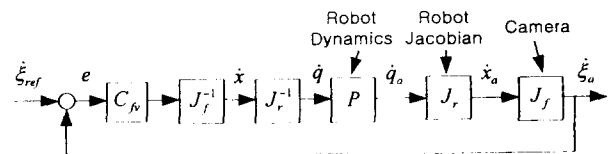


그림 4-1. 일반적인 시각구동의 구성도

Fig. 4-1. The block diagram of general visual servoing method

여기서 $\dot{\xi}_r$ 은 영상특징의 속도명령, C_R 는 영상특징 속도제어기(PID), J_f 는 실제 측정된 영상특징의 속도이다. 역 영상특징 자코비안, \tilde{J}_f^{-1} 은 상위 블록 삼각 행렬의 경우 수식(2-14)과 같이 쓸 수 있다.

그림 4-1의 로봇의 관절 속도 제어기의 경우에 로봇의 동력학을 무시하고 기구학적으로 모터의 속도제어만 하던가, 동력학을 고려해서 로봇의 비선형성을 보상해 주기 위해 계산 토크 방법(computed torque method), 선형 이차 방법(linear quadratic method)[2], [27], 적응 제어(adaptive control)등을 사용한다. 이들 방법들은 로봇의 정확한 모델을 기초로 하고 있어서 모델을 정확하게 알아야 하며 복잡한 로봇 운동 방정식을 풀어야 하는 단점이 있다. 적응제어에 있어서도 제어기의 파라메타를 조정하는 알고리즘이 매우 복잡하여 많은 연산을 필요로 하기 때문에 실제 적용이 어렵다.

4.2 외란관측기를 이용한 시각구동 시스템

본 논문에서 영상기반 시각구동 시스템에 외란 관측기를 사용하여 영상 특징 자코비안의 대각이외의 성분을 보상해 주며, 카메라, 로봇 제어기등의 각 부분에서 발생하는 모델링 오차등을 보상해 주고 외란을 제거하여 안정된 시각구동을 할 수 있도록 해준다. 그림 4-2는 외란관측기를 이용한 시각구동 시스템의 전체 구성도를 보여준다. 여기서, $\dot{\xi}_{ref}$ 는 영상특징의 속도 명령, C_R 는 영상특징 속도 제어기(PID), J_f 은 식(3-28)의 상위 블록 삼각 형태의 영상 특징 자코비안, \tilde{J}_f^{-1} 은 블록 대각 형태의 역 영상 특징 자코비안, J_r 과 J_r^{-1} 은 로봇의 자코비안과 역 자코비안, P_n 은 실제 로봇 및 외란 관측기를 이용한 관절 속도 제어기, \bar{J}_r 은 실제 계산되지 않고 로봇의 움직임에 의해 카메라 위치 변환을 정의하는 로봇 자코비안, $\dot{\xi}_d$ 는 외부에서 인가되는 영상특징의 잡음 및 외란, $\dot{\xi}_a$ 는 실제 측정된 영상특징의 변화량, P_n^{-1} 은 P_n 의 역 기준 모델, Q_f 는 저역통과 필터이다. 역 영상 특징 자코비안, \tilde{J}_f^{-1} 은 블록 대각 형태로 다음과 같으며

$$\dot{x} = \tilde{J}_f^{-1} \dot{\xi}$$

$$\tilde{J}_f^{-1} = \begin{bmatrix} J_{11}^{-1} & 0 \\ 0 & J_{22}^{-1} \end{bmatrix} \quad (4-1)$$

여기서 대각 블록 항인 J_{11} , J_{22} 는 식(3-4)에서 주어진다. 실제 로봇 및 외란 관측기를 이용한 관절 속도 제어기의 선형화된 모델, P_n 은 4.3절에서 설명하겠다.

그림 4-2는 외란 관측기와 J_f , \tilde{J}_f^{-1} 항의 곱으로 다음과 같은 시각구동 시스템으로 바뀌며

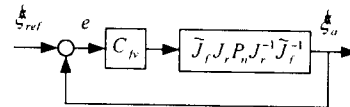


그림 4-3. 외란 관측기에 의한 최종 시각구동 시스템의 구성도

Fig. 4-3. The block diagram of final visual servoing system by disturbance observer

이에 대한 설명은 다음과 같다. 블록 A에서 외란 관측기를 제외한 부분의 시스템을

$$F = \bar{J}_f \bar{J}_r P_n J_r^{-1} \tilde{J}_f^{-1} \quad (4-2)$$

라 놓자. 여기서 \bar{J}_f 는 실제 카메라에 의한 영상 특징 자코비안, \bar{J}_r 은 실제 로봇 자코비안이다. 외란 관측기의 역 기준 모델을

$$F_n^{-1} = J_f J_r P_n^{-1} J_r^{-1} \tilde{J}_f^{-1} \quad (4-3)$$

이라 놓으면 기준 모델은

$$F_n = \tilde{J}_f J_r P_n J_r^{-1} J_f^{-1} \quad (4-4)$$

과 같다. 이들을 이용하여 그림 4-2를 다시 그리면 그림 4-3과 같다.

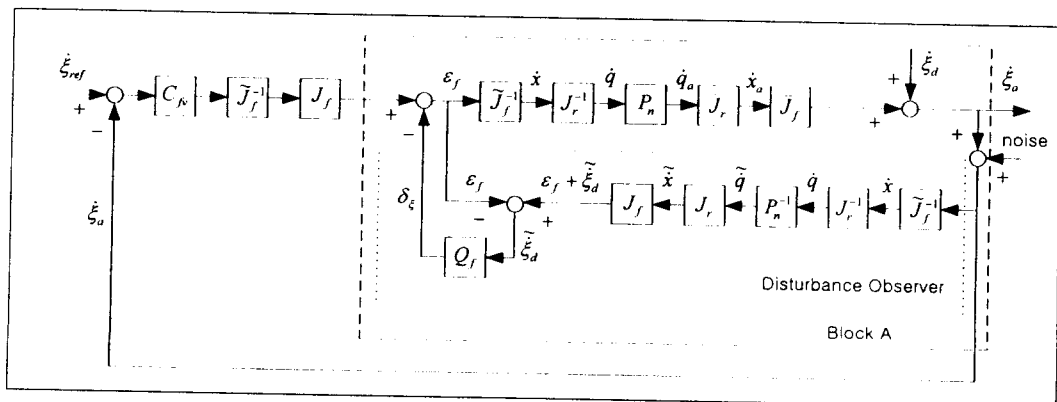


그림 4-2. 영상관측기를 이용한 시각구동 시스템의 전체 구성도

Fig. 4-2. The block diagram of visual servoing method using disturbance observer

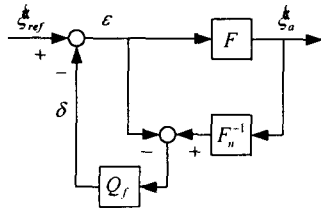


그림 4-4. 단순화된 외란관측기를 이용한 시각구동 시스템의 전체 구성도

Fig. 4-4. The block diagram of simplified visual servoing system using disturbance observer

그림 4-4의 전달함수는

$$\begin{aligned} \frac{\dot{\xi}_a}{\xi_{ref}} &= [F^{-1} + Q_f(F_n^{-1} - F^{-1})]^{-1} \\ &= F[I - Q_f + Q_f F_n^{-1} F]^{-1} \end{aligned} \quad (4-5)$$

로 만약 $Q_f = I$ 로 놓으면

$$\frac{\dot{\xi}_a}{\xi_{ref}} = F_n \quad (4-6)$$

이 되며, 항 J_f 와 \tilde{J}_f^{-1} 을 곱하면

$$\tilde{F}_n = \tilde{J}_f J_r P_n J_r^{-1} \tilde{J}_f^{-1} \quad (4-7)$$

로 바뀌게 된다. 따라서 2장에서 설명한 것과 같이 식(4-2)는 영상 특징 자코비안 \tilde{J}_f 과 역 영상 특징 자코비안 \tilde{J}_f^{-1} 이 모두 블록 대각 행렬만의 형태로 표시되어 2절에서 설명한 것과 같이 조건지수, 민감성등의 성능지수들이 좋아진다.

4.3 외란 관측기를 이용한 로봇 제어기

실제 로봇 및 외란 관측기를 이용한 관절 속도 제어기, P_{nm} 은 그림 3-5과 같다.

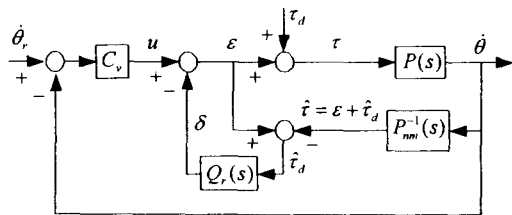


그림 4-5. 외란 관측기를 이용한 로봇 속도 제어기

Fig. 4-5. The joint speed controller using disturbance observer

여기서 $P(s)$ 는 실제 로봇, $P_{nm}(s)$ 는 로봇의 선형화된 운동 모델, $Q_r(s)$ 는 저역 통과 필터이며, C_v 는 관절의 속도제어기이다. 실제 로봇, $P(s)$ 의 운동 방정식은 다음과 같이 쓸

수 있다[28].

$$M(\theta) \ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) + F(\dot{\theta}) = \tau \quad (4-8)$$

여기서, $M(\theta)$ 는 $n \times n$ 관성행렬, $C(\theta, \dot{\theta}), G(\theta), F(\dot{\theta})$ 는 각각 구심 및 원심력, 중력, 점성력을 나타내는 $n \times 1$ 벡터이다. 일반적으로 이들은 비선형 함수이며 각각의 축들은 서로 상호 작용, 간섭하여 제어가 어려워 각 축을 독립적으로 제어하기 위해 다음과 같이 독립된 선형시스템과 비선형 성분으로 나눌 수 있다.

$$\tilde{M}_{ii} \ddot{\theta}_i + \tau_{di}(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}) = \tau_i \quad (4-9)$$

여기서

$$\tau_{di} = \sum_{j=1, j \neq i}^n M_{ij} \ddot{\theta}_j + \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \theta_j \dot{\theta}_k + G_i + F_i + (M_{ii} - \tilde{M}_{ii}) \ddot{\theta}$$

이며, \tilde{M}_{ii} 는 로봇 자세의 함수인 $M_{ii}(\theta)$ 의 근사값으로 실험을 통해 상수로 정한다. 그림 4-3에서 로봇의 선형화된 모델, P_{nm} 은

$$P_{nm} = \frac{1}{\tilde{M}_s} \quad (4-10)$$

로 정의 된다.

5. 모의실험

외란관측기를 이용한 시각구동 방법의 타당성과 성능을 보이기 위한 6축 수직 다관절 로봇인 PUMA560[28]에 흑백 카메라를 1대 설치한 손 카메라 (eye-in-hand) 구조에 대하여 모의실험을 하였다. 그림 5-1은 PUMA560 로봇의 각관절의 좌표계를 보여준다. 카메라에 대한 모델은 영상왜곡, 빛, 카메라의 해상도, 렌즈의 비선형성등으로 편향 카메라 모델을 사용하였다. 모의실험은 SUN Sparc 20에서 C언어를 이용하여 수행하였다.

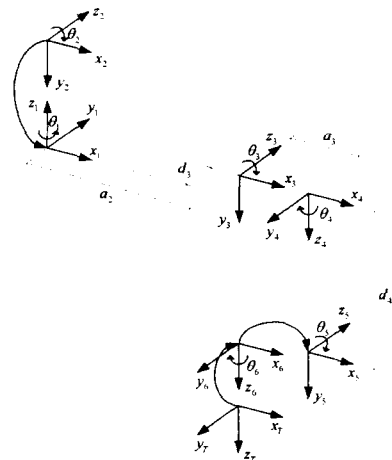


그림 5-1. Puma560의 좌표계

Fig. 5-1. The Coordinates of PUMA560 manipulator

5.1 외란 관측기를 이용한 로봇 속도 제어기

본 논문에서는 로봇의 정확한 운동방정식 없이도 빠르고 간단한 또한 외란에도 강한 4절에서 다룬 외란 관측기를 사용한다. 제어기 구성은 그림 4-5에서와 같다. 모의 실험은 실제 실험에서와 같이 이산 시스템으로 구성하였다. 외란 관측기의 샘플링 시간은 200 μsec 이고 전체 속도 제어 루프의 샘플링 시간은 1 msec이다.

Q-필터, $Q_f(s)$,는 2차 저역 통과 필터로 외란관측기의 샘플링 시간의 10배 정도를 차단 주파수로 갖는다. 따라서 차단 주파수는 $\tau = 2\pi/2 \text{ rad/msec} = 1000\pi \text{ rad/sec}$ 로 설정하였다.

$$Q_f(s) = \frac{\tau^2}{s^2 + 2\tau s + \tau^2} = \frac{9.876}{s^2 + 6283s + 9.876} \quad (5-1)$$

모의 실험을 위한 PUMA560의 선형화된 모델은 운동방정식에서 각축의 값을 0도 로 했을때의 값을 취하여 다음과 같은 상수의 대각 행렬로 정한다.

$$P_{nm}^{-1} = \text{diag}[3.95, 6.79, 1.16, 0.2, 0.18, 0.19] \quad (5-2)$$

그림 5-1은 주기가 10msec이고 크기가 0.1 rad. 인 사인파에 대한 외란 관측기를 이용한 각속도 제어 결과를 보여준다.

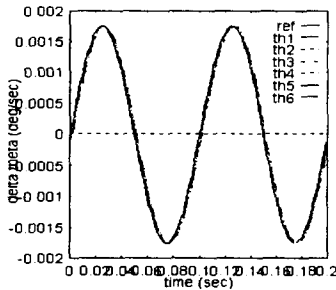


그림 5-10. 외란 관측기를 이용한 속도제어 오차
Fig. 5-10. The errors of joint speed control using disturbance observer

5.2 외란 관측기를 이용한 시각구동 시스템

외란 관측기를 이용한 시각구동 시스템은 그림 4-2와 같은 구조를 갖으며 카메라의 초점거리는 7.5mm이다. 실험은 이산 시스템으로 구성했으며 카메라의 특성상 샘플링 시간이 30msec로 외란관측기의 샘플링 시간은 50msec로 하였다. 영상특징의 변화량(속도)에 대한 제어 샘플링 시간은 외란 관측기 샘플링의 5배인 250msec로 실험하였다. Q-필터는 샘플링 시간이 50msec 이므로 차단 주파수는 4π 로 다음과 같다.

$$Q_f(s) = \frac{157.9}{s^2 + 25.13s + 157.9} \quad (5-3)$$

외란 관측기를 사용하지 않는 기존의 제어기 구성도는 그림 4-1과 같으며 영상사점을 이용한 영상특징 자코비안을 이용하여 로봇의 초기위치 (10,-10,10,10,10)deg에서 물체의 상대적 자세가 (100, 100, 500 mm, 15, 15, 5 deg.)에서 목표

자세 (0, 0, 100 mm, 10, 10, 5 deg.)로 시각구동한 결과는 그림 5-11와 같다. 그림 5-11는 외란 관측기를 이용하여 똑같은 과제에 대한 시각 구동 결과의 비교이다. 두 제어 방법에 대한 결과에서는 외란이나 잡음이 없는 상태에서는 거의 비슷한 결과를 보인다.

그림 5-12(A), (B)와 그림 5-13은 각각 카메라에 대한 물체의 상대적 위치가 (100, 100, 300mm, 30, 30, 5deg)에서 (50, 50, 100mm, 45, 45, 5deg)로 시각구동한 결과에 대하여 기존의 방법과 외란관측기를 사용한 시각구동방법의 영상특징 자코비안의 최대 특이값 과 최소 특이값, 조건지수를 보여 준다. 이들 결과로 앞에서 주장한것과 같이 최대 특이값은 작아지고, 최소특이값은 커지며, 조건지수는 외란관측기를 사용하지 않은 결과에 비해 상대적으로 1에 가까워 지도록 작아진 것을 볼 수 있다.

잡음이 영상특징에 있을 때의 오차와 잡음의 비를 보면 그림 5-14와 같다. 인가된 잡음은 크기가 (0.01, 0.01, 0.01, 0.01, 0.01, 0.01)mm인 임의의 잡음 (random noise)이다. 그림 5-14에서 외란 관측기를 사용했을 경우 사용하지 않은 경우에 비해 많이 감소함을 볼 수 있다. 하지만 두 군데의 큰 오차를 보이는 것은 너무 큰 잡음에 대해서는 외란 관측기가 보상을 못하는 것으로 생각된다.

외란에 대해선 본 논문의 시각구동 시스템의 Q-필터의 차단 주파수가 4π 인 외란관측기를 사용한 경우의 결과를 보여준다. 그림 5-15는 명령에 0.4π 의 주기를 갖고 크기가 (0.01, 0.01, 0.01, 0.1, 0.1, 0.1)mm 인 외란이 인가된 경우의 결과를 보여준다. 결과적으로 외란 관측기를 사용했을 경우에 외란이 많이 감소함을 볼 수 있다.

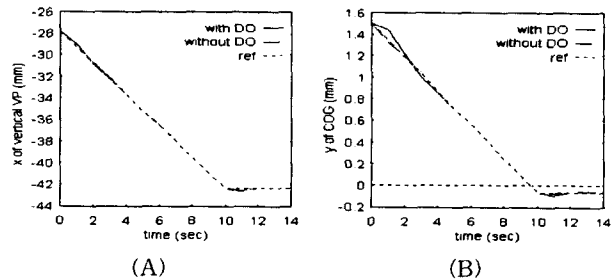


그림 5-11. 시각 구동 결과 (A) 수직영상 사점의 x 좌표, (B) 영상의 무게중심의 y 좌표

Fig. 5-11. The visual servoing results
(A) x coord. of vertical vanishing point,
(B) y coord. of center of gravity.

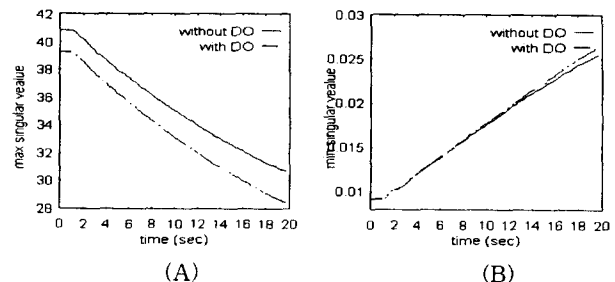


그림 5-12. (A) 최대 특이값, (B) 최소 특이값
Fig. 5-12. (A) maximum singular value,
(B) minimum singular value

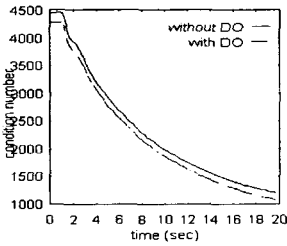


그림 5-13. 조건지수
Fig. 5-13. Condition number

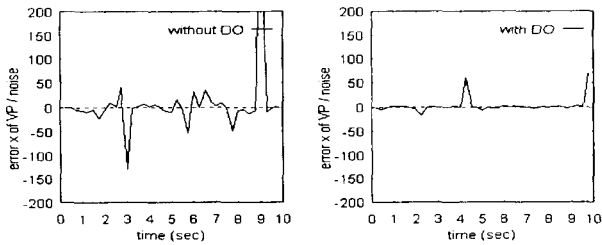


그림 5-14 영상잡음에 의한 영상특징
(수직 영상사점의 x좌표) 오차의 비
(A) 기존의 방법 (b) 외란관측기를 사용한 방법
Fig. 5-14. The ratio of image feature
(x coord. of vertical vanishing point) error and noise
(A) without disturbance observer
(B) with disturbance observer

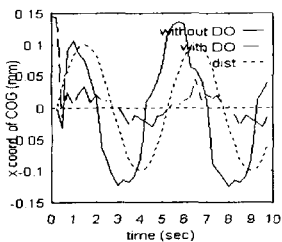


그림 5-15 영상외란에 의한 영상특징의 오차
Fig. 5-15. The image feature error by feature disturbance

3. 결 론

본 논문에서는 외란관측기를 이용하여 조건지수, 민감성 등의 성능을 향상시키는 방법을 제시하였다. 기존의 방법들은 이러한 성능향상의 방법으로 특징점중에서 조건이 좋은 점들을 선택, 특징점의 개수를 늘리고 구성을 변경, 카메라의 구성 변경등의 방법을 이용하였다. 이에 반해 본 논문의 방법은 상위 블록 삼각 형태의 영상사점을 이용한 영상특징 자코비안을 구하고, 외란관측기를 이용하여 블록 대각 행렬도 바뀌어서 성능을 향상시키는 방법을 제시하였다. 또한 삼각 부등 정의를 이용하여 블록 대각 형태의 자코비안이 상위 블록 삼각 형태보다 성능지수가 더 좋아짐을 증명하였다. 로봇의 비선형적 특성을 외란 관측기를 이용하여 선형적 모델로 제어 하였을 경우에서 실시간으로 안정적 결과를 보여주고 있다.

모의실험을 통해서 본 논문에서 제시된 방법이 기존의 방법들보다 잡음 및 외란이 있는 경우에 특히 강한 성능을 보여 줄뿐만 아니라 제어성능에서도 향상된 결과를 볼 수 있었다.

앞으로의 연구과제는, 역 영상 특징 자코비안을 구할 때 상위 블록 삼각 행렬의 대각 이외의 성분 없이 블록 대각 행렬만을 이용하여 기존 모델 (nominal model)을 구하는데, 이때 어느 정도의 크기까지 대각 이외의 성분을 외란관측기가 보상할 수 있는지의 여부이다. 또한 현재 영상사점의 특성상 직사각형에만 적용되는 한계로 인하여 일반적인 도형에 대해서도 적용 가능한 상위 블록 삼각 영상 자코비안을 구하거나 일반적인 영상 특징 자코비안에 대해서도 가능한 방법을 연구하려고 한다.

본 연구의 일부는 1998년 한양대 공학기술연구소의 연구비 지원으로 수행된 것입니다.

참 고 문 헌

- [1] S. Hutchinson, G. D. Hager and Peter I. Corke, A tutorial on visual servo control, IEEE Trans. Robot. and Automat., vol. 12, no. 5, Oct., pp. 651-670, 1996.
- [2] K. Hashimoto, T. Ebine, and H. Kimura, Visual servoing with hand-eye manipulator-optimal approach, IEEE Trans. Robot. Automat., vol. 12, no. 5, Oct., pp. 766-774, 1996.
- [3] J. T. Feddema, C. S. G. Lee, Adaptive image feature prediction and control for visual tracking with a hand-eye coordinated camera, IEEE Trans. Sys., Man, & Cybern., vol. 20, no. 5, Sep/Oct. 1990.
- [4] W. J. Wilson, C. C. W. Jullis, and G. S. Bell, Relative end-effector control using cartesian position based visual servoing, IEEE Trans. Robot. and Automat., vol. 12, no. 5, Oct., pp. 684-696, 1996.
- [5] 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.
- [6] J. T. Craig, *Introduction to robotics: mechanics & control 2nd ed.*, Addison-Wesley Pub. Co., 1989.
- [7] K. Hashimoto, T. Kimoto, T. Ebine, and H. Kimura, Manipulator control with image-based visual servo, Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Automat., pp. 2267-2272, 1991.
- [8] I. H. Suh and T. W. Kim, Fuzzy membership function based neural networks with applications to the visual servoing of robot manipulators, IEEE Tans. Fuzzy Systems, vol. 2, no. 3, pp. 203-220, Aug. 1994
- [9] W. Jang and Z. Bien, and J. Park, Characterization and use of feature-Jacobian matrix for visual servoing, Visual Servoing: Real-Time Control of Robot Manipulators Based on Visual Sensory

Feedback, K. Hashimoto, Ed. London: World Scientific, pp. 317-363, 1993.

[10] J. T. Feddema, C. S. G. Lee, O. R. Mitchell, Weighted selection of image features for resolved rate visual feedback control, IEEE Tans. Robot. Automat., vol. 7, no. 1, pp. 607-617, Feb., 1997.

[11] K. Hashimoto and T. Noritsugu, Performance and sensitivity in visual servoing, Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Automat., pp. 2321- 2326, 1998.

[12] Y. Nakamura, *Advanced robotics-redundancy and optimization*, Addison-Wesley Pub. Co., 1991.

[13] M. J. Maron, *Numerical analysis*, Macmillan Publishing Co., Inc. 1982.

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

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

[16] L. L. Wang and W. H. Tsai, Camera calibration by vanishing lines for 3-D computer vision, IEEE Trans. On Pattern analysis and Machine Intelligence, vol. 13, no. 4, Apr., 1991.

[17] Z. Chen, D. C. Tseng, and J. Y. Lin, A simple vision algorithm for 3-D position determination using a single calibration object, Pattern Recognition, vol. 22, no. 2, pp. 173-187, 1989.

[18] B. Caprile and V. Torre, Using vanishing points for camera calibration, Int. J. Computer Vision, 4, pp. 127-140, 1990.

[19] K. Ohnishi, A new servo method in mecharonics, Trans. Japanese Society of Electrical Eng., vol. 107-D, pp. 83-86, 1987.

[20] H. S. Lee, Robust digital tracking controllers for high-speed/high-accuracy positioning system, Ph.D. Dissertation, U.C. Berkeley, 1994.

[21] K. Kaneko, K. Ohnishi, and Kiyoshi Komoriya, A design method for manipulator control based on disturbance observer, Proc. Int. Conf. Intl. Robot and Systems, pp. 1405-1412, 1994.

[22] 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.

[23] S. Komada, J. Shin, M. Ishida, K. Ohnishi, and T. Hori, Simplification of inverse kinematics routine of robot manipulators using disturbance observer in task space, Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Automat., pp. 1381-1386, 1992.

[24] K. Kaneko, K. Komoriya, K. Ohnishi, K. Tanie, Manipulator control based on disturbance observer in the operational space, Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Automat., pp. 902-909, 1994.

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

[26] J. S. Lee and I. H. Suh, An intelligent visual

servoing method using vanishing point features, J. of Elec. Eng. And Info. Sci., vol. 2, no. 6, pp. 177-182, 1997.

[27] K. Hashimoto and H. Kimura, LQ optimal and nonlinear approaches to visual servoing, Visual Servoing: Real-Time Control of Robot Manipulators Based on Visual Sensory Feedback, K. Hashimoto, Ed. London: World Scientific, pp. 165-198, 1993.

[28] F. L. Lewis, C. T. Abdallah, and D. M. Dawson, *Control of Robot Manipulators*, Macmillan Pub. Co., 1993.

부록 A. 영상 사점을 이용한 영상특징 자코비안의 계산 방법

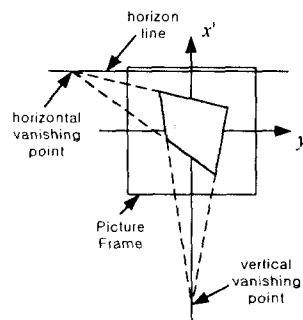


그림 A-1. 영상사점

Fig. A-1. Vanishing points

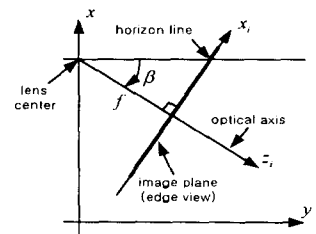


그림 A-2. 수평선

Fig. A-2. Horizon line

영상 사점은 그림 A-1에서와 같이 카메라 좌표계에서 수직인 모든 선들의 영상은 한 점의 수직 영상 사점을 통과한다. 또한 수평 영상 사점은 수평선과 영상의 선이 만나는 점이다. 수평선은 그림 A-2에서와 같이 전체 좌표계와 평행하고 카메라의 렌즈의 중심을 통과하는 평면과 영상면이 만나는 선으로 정의된다.

영상 사점을 이용하여 물체에 대한 카메라의 회전각을 구하기 위해서는 그림 A-3과 같은 카메라 CCD상에 정의되는 영상좌표계와 전체좌표계가 필요하다.

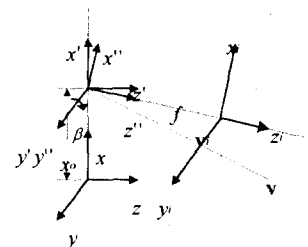


그림 A-3. 물체의 카메라 좌표계로 투시 변환

Fig. A-3. Perspective transformation from World Coordinate to Camera Coordinate

여기서 $\{x, y, z\}$ 좌표계는 전체 좌표계, $\{x', y', z'\}$ 는 오프셋 x_0 만큼 이동한 좌표계, $\{x'', y'', z''\}$ 는 y' 축을 기준으로 β 만큼 회전한 카메라 좌표계, f 는 초점거리, $\{x_i, y_i, z_i\}$ 는 영

상화면 좌표계, v 는 전체 좌표계 상의 물체의 위치벡터, v_i 로 변환된다.

$$v_i = PGRTv \quad (A-1)$$

여기서 행렬 T 는 카메라 위치보상 x_o 에 의한 동차(homogeneous)변환이고, 행렬 R 은 y' 축을 기준으로 β 만큼 회전, 행렬 G 는 카메라에 대한 초점 거리 만큼의 이동, 행렬 P 는 물체상의 한 점에서 영상의 한 점으로의 선형 변환이다.

T, R, G, P 는 각각 다음과 같이 주어진다.

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -x_o \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad R = \begin{bmatrix} c\beta & 0 & -s\beta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ s\beta & 0 & c\beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$G = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -f \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad P = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1/f & 1 \end{bmatrix} \quad (A-2)$$

여기서 x_o 는 x 축으로의 보상, f 는 초점거리, $s\beta$ 는 $\sin\beta$, $c\beta$ 는 $\cos\beta$ 이다. 식(A-1)과 식(A-2)로 부터 영상 좌표 (x_i, y_i) 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$x_i = f \frac{\cos\beta(x-x_o) - \sin\beta z}{\sin\beta(x-x_o) + \cos\beta z} \quad (A-3)$$

$$y_i = f \frac{y}{\sin\beta(x-x_o) + \cos\beta z} \quad (A-4)$$

식(A-3)과 식(A-4)를 결합하면 x_i 는

$$x_i = \left(-\frac{z}{\sin\beta y} \right) y_i + \frac{f}{\tan\beta} \quad (A-5)$$

와 같다. 수직 영상 사점의 x_v 는 y_i 를 영으로 놓으면 y 축으로 회전한 피칭(pitching) 각은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$x_v = \frac{f}{\tan\beta}, \quad y_v = 0 \quad (A-6)$$

$$\beta = \text{atan}(f/x_v) \quad (A-7)$$

수직 영상 사점의 좌표 (x_h, y_h) 을 구하기 위해선 전체 좌표계의 x, y 의 평면위에 놓여있는 $(0, y, my+b)^T$ 형태의 직선을 고려한다. 여기서 m 은 기울기, b 는 y 축과 만나는 점이다. $(0, y, my+b)^T$ 을 식(A-3), (A-4)에 대입하면

$$x_i = \frac{-mx_o y_i + f(x_o \cos\beta + b \sin\beta)}{\sin\beta x_o - \cos\beta b} \quad (A-8)$$

이 되고, 수평 영상 사점의 x 좌표 값, x_h 은 수평선으로부터 쉽게 구할 수 있다.

$$x_h = -f \tan\beta \quad (A-9)$$

수평 영상 사점의 y 좌표 값, y_h 은 식(A-8)의 x_i 에 식(A-9)의 x_h 를 대입해서

$$y_h = \frac{f}{m \cos\beta} \quad (A-10)$$

와 같다. 따라서 요잉(yawing)각, α 는 다음과 같다.

$$\alpha = \text{atan}\left(\frac{f}{y_h \cos\beta}\right) \quad (A-11)$$

이상에서 피칭각, β ,과 요잉각, α ,는 카메라의 롤링각, γ ,이 영인 상태에서 구한 값들이다. 따라서 롤링각, γ ,를 수직 영상 사점을 이용하여 다음과 같이 피칭각과 요잉각 보다 제일 먼저 구한 후 롤링각을 보상에 준다. 롤링각은 수직 영상 사점이 x_i 축상에 없는 경우가 되는데

$$\gamma = -\text{atan}2(y_v, x_v) \quad (A-12)$$

과 같이 구한 후에 롤링각을 이용하여 영상 좌표계의 z_i 축을 기준으로 롤링각, γ ,만큼 회전시켜 수직 영상 사점이 x_i 축에 오도록 한다. 이렇게 해서 식(A-6), 식(A-9), 식(A-10)을 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\frac{f}{\tan\beta} = x_v \cos\gamma - y_v \sin\gamma \quad (A-13)$$

$$0 = x_v \sin\gamma + y_v \cos\gamma \quad (A-14)$$

$$-f \tan\beta = x_h \cos\gamma - y_h \sin\gamma \quad (A-15)$$

$$\frac{-f}{\tan\alpha \cos\beta} = x_h \sin\gamma + y_h \cos\gamma \quad (A-16)$$

식(A-13)으로부터 피칭각은 다시

$$\beta = \text{atan}\left(\frac{f}{x_v \cos\gamma - y_v \sin\gamma}\right) \quad (A-17)$$

로 쓸 수 있고 요잉각은 식(A-16)으로부터

$$\alpha = \text{atan}\left(\frac{-f}{x_h \cos\beta \sin\gamma + y_h \cos\beta \cos\gamma}\right) \quad (A-18)$$

와 같이 구할 수 있다.

영상 사점을 이용한 영상 특징 자코비안은 다음과 같이 구한다. 식(A-14)를 식(A-13)에 대입하고, x_v 에 대하여 정리하면,

$$x_v = f \frac{\cos\gamma}{\tan\beta}, \quad (A-20)$$

의 관계로 \dot{x}_v 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\dot{x}_v = -f \frac{\cos\gamma}{\sin^2\beta} \dot{\beta} - f \frac{\sin\gamma}{\tan\beta} \dot{\gamma} \quad (A-21)$$

식(A-15)를 식(A-16)에 대입함으로써 x_h 에 대하여 정리하면

$$x_h = -f \frac{\sin\gamma}{\tan\alpha \cos\beta} - f \tan\beta \cos\gamma$$

이 되고

$$\dot{x}_h = f \frac{\sin\gamma}{\sin^2\alpha \cos\beta} \dot{\alpha} + f \left(-\frac{\sin\gamma \tan\beta}{\tan\alpha \cos\beta} - \frac{\cos\gamma}{\cos^2\beta} \right) \dot{\beta}$$

$$+ f \left(-\frac{\cos \gamma}{\tan \alpha \cos \beta} + \tan \beta \sin \gamma \right) \dot{\gamma}, \quad (A-22)$$

식(A-15)을 식(A-16)에 대입해서 y_h 에 대하여 정리하면

$$y_h = f \frac{-\cos \gamma}{\tan \alpha \cos \beta} + f \tan \beta \sin \gamma,$$

이 되고

$$\dot{y}_h = f \frac{\cos \gamma}{\sin^2 \alpha \cos \beta} \dot{\alpha} + f \left(-\frac{\cos \gamma \tan \beta}{\tan \alpha \cos \beta} + \frac{\sin \gamma}{\cos^2 \beta} \right) \dot{\beta} + f \left(\frac{\sin \gamma}{\tan \alpha \cos \beta} + \tan \beta \cos \gamma \right) \dot{\gamma}. \quad (A-23)$$

카메라의 위치를 위한 영상특징 자코비안 성분은 강체의 선형 및 회전속도를 이용하여 물체 영상의 무게중심의 좌표 및 면적을 이용하여 구한다.

$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{f}{z} & 0 & -\frac{u}{z} & -\frac{uv}{f} & \frac{\lambda^2 + u^2}{f} & -v \\ 0 & \frac{f}{z} & -\frac{v}{z} & -\frac{\lambda^2 + v^2}{f} & \frac{uv}{f} & u \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \\ \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \\ \dot{\gamma} \end{bmatrix}. \quad (A-24)$$

여기서 u, v 는 영상에서 물체 영상의 무게중심의 좌표, z 는 물체의 무게중심과 카메라의 거리로 $z \gg f$ 의 조건을 만족하며 다음과 같은 식으로 구한다.

$$\alpha \cong \frac{cf^2}{z^2} \cos \alpha \cos \beta \quad (A-25)$$

여기서 a 는 영상의 면적, c 는 물체가 카메라의 핀홀로부터 f 만큼 떨어져 있을때의 면적을 먼저 계산한 상수값, α 와 β 는 각각 앞에서 양상사점으로 계산한 요잉각과 피칭각이다. 식(A-25)로부터 물체와 카메라의 거리는 다음과 같이 계산된다.

$$z \cong \sqrt{\frac{cf^2 \cos \alpha \cos \beta}{a}} \quad (A-26)$$

물체의 영상의 면적과 카메라의 변화량의 관계는 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{a} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{2cf^2}{z^3} \cos \alpha \cos \beta & -\frac{cf^2}{z^2} \sin \alpha \cos \beta & -\frac{cf^2}{z^2} \cos \alpha \sin \beta & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \\ \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \\ \dot{\gamma} \end{bmatrix} \quad (A-27)$$

전체 영상특징 자코비안은 식(A-22), 식(A-23), 식(A-24), 식(A-27)의 결과를 모두 결합하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{a} \\ \dot{x}_v \\ \dot{x}_h \\ \dot{y}_h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ 0 & J_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \\ \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \\ \dot{\gamma} \end{bmatrix}. \quad (A-28)$$

여기서

$$J_{11} = \begin{bmatrix} \frac{f}{z} & 0 & -\frac{u}{z} \\ 0 & \frac{f}{z} & -\frac{v}{z} \\ 0 & 0 & -\frac{2cf^2}{z^3} \cos \alpha \cos \beta \end{bmatrix}$$

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

$$J_{22} = f \begin{bmatrix} 0 & -\frac{\cos \gamma}{\sin^2 \beta} & -\frac{\sin \gamma}{\tan \beta} \\ \frac{\sin \gamma}{\sin^2 \alpha \cos \beta} & \frac{\tan \beta \sin \gamma}{\tan \alpha \cos \beta} - \frac{\cos \gamma}{\cos^2 \beta} & -\frac{\cos \gamma}{\tan \alpha \cos \beta} + \tan \beta \sin \gamma \\ \frac{\cos \gamma}{\sin^2 \alpha \cos \beta} & \frac{\tan \beta \cos \gamma}{\tan \alpha \cos \beta} + \frac{\sin \gamma}{\cos^2 \beta} & \frac{\sin \gamma}{\tan \alpha \cos \beta} + \tan \beta \cos \gamma \end{bmatrix} \quad (A-29)$$

이다.

저 자 소 개



이준수(李峻秀)

1964년 3월 28일 생. 1987년 한양대 전자공학과 졸업. 1989년 동 대학원 전자공학과 졸업(석사). 1989년~현재 한국과학기술연구원 지능제어연구센터 연구원. 1994년~현재 한양대 대학원 전자공학과 박사과정



서일홍(徐一弘)

1955년 4월 16일생. 1977년 서울대 공대 전자공학과 졸업. 1982년 한국 과학기술원 전기 및 전자 공학과 졸업(공학). 1982년 대우 중공업 기술 연구소 근무.

1987-1988년 미국 미시간대 객원 연구원. 현재 한양대학교 공대 교수.