# QR분해와 외란관측기를 이용한 시각구동 방법

## A Novel Visual Servoing Method Using QR Decomposition and Disturbance Observer

이 준 수, 서 일 홍, 유 범 재, 오 상 록
(Joon-Soo Lee, Ih Hong Suh, Bum-Jae You, and Sang-Rok Oh)

**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 validity of the proposed approach, visual servoing with stereo vision is carried out for a Samsung FARAMAN 6-axis industrial robot manipulator.

**Keywords** : visual servoing, QR decomposition, disturbance observer

### I. 서론

로봇은 정밀작업 뿐만 아니라 인간이 직접 작업하기 어려운 환경에서도 어려움 없이 작업할 수 있는 장점으로 많은 연구와 개발이 되어 오고 있다. 하지만 외부의 환경을 인지하는 센서가 없이는 단순 반복작업이나 미리 알고 있는 환경에서만 작업을 할 수 있는 단점이 있다. 또한 작업이 점점 복잡해지고 로봇에 자율적인 제어기능을 요구하게 되어 외부 환경의 정보를 스스로 얻어 로봇이 자율적으로 작업을 하고 사고할 수 있는 기능을 필요로 하게 되었다. 이러한 요구에 의해 환경을 인지할 수 있는 힘 센서, 근접 센서, 초음파 센서, 비젼 센서등에 대한 연구가 되어 오고 있다. 이중에서 비젼 센서는 비접촉 센서이면서 사람과 같이 2차원 및 3차원 정보를 얻을 수 있는 장점이 있지만 하드웨어의 성능이 부족하여 실제로 산업 현장이나 자율로봇등에 사용되지 못하였다. 하지만 현재는 반도체 산업의 발전으로 실시간 처리가 가능한 장비가 많이 개발되어 시각정보를 이용하는 로봇에 대한 많은 연구가 되어 오고 있다. 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 시각구동이라 한다[1].

영상 기반 시각구동(image based visual servoing)은 로봇의 움직임에 대한 영상 특징의 변화량을 나타내는 영상특징 자코비안(image feature Jacobian)을 이용하며 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 머니퓰레이터의 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 머니퓰레이터의 제어성(controllability)과 민감성(sensitivity)이 향상되도록 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 운동인지도(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 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 머니퓰레이터의 제어성과 민감성이 향상된다. 또한 최소 특이값이 커져 영상 기반 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 성능지수를 향상시키는 방법을 제안하려고 한다.

전체 논문 구성은 2장에서 QR분해를 이용한 시각구동

접수일자 : 1999. 9. 9., 수정일자 : 2000. 3. 14.
이준수, 유범재, 오상록 : 한국과학기술연구원 지능제어연구센타
서일홍 : 한양대학교 전자공학과

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

## II. QR 분해와 외란관측기를 이용한 시각구동

외란 관측기를 이용한 시각 구동 방법은 블록 삼각 영상 특징 자코비안 행렬을 블록 대각 영상 특징 자코비안 행렬로 변환시키면 여러 성능지수가 좋아진다는 특징에 의해 제안되었다. QR 분해는 임의의 행렬을 정규직교 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.

$$k = \frac{s_{\max}}{s_{\min}} \geq 1 \tag{1}$$

여기서 $\sigma_{\max}$는 영상 자코비안의 최대 특이값이고 $\sigma_{\min}$는 최소 특이값이며 특이값은 다음과 같이 정의된다. 영상 특징 자코비안을 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$J_f = U \Sigma V^T$$

여기서 $J_f$는 $m \times n$, $(m > n)$이며 $U=[u_1, \cdots, u_n]$, $V=[v_1, \cdots, v_n]$,, $S = \begin{bmatrix} S' \\ 0 \end{bmatrix}$, $\Sigma' = diag(\sigma_1, \cdots, \sigma_m)$이다. 행렬 $U$, $V$는 직교 행렬이며 $u_i$는 $i$-번째 왼쪽 특이 벡터이고 $v_j$는 $j$-번째 오른쪽 특이 벡터이다. 그리고 $s_i$ 를 특이값이라 한다.

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

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

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

$$\| J_f \| = \max\{s_1, \Lambda, s_p\}, \tag{3}$$

$$\| J_f^{-1} \| = 1/\min\{s_1, \Lambda, s_p\}, \tag{4}$$

여기서

$s_1, \Lambda, s_p$ : $J_f$의 특이값.

영상 특징 자코비안은 Weiss등[13]에 의해 제안되었으며 로봇의 움직임에 대한 영상특징의 변화량의 관계를 나타내며 (5)와 같이 쓸 수 있다.

$$\dot{\xi} = J_f \dot{x} \tag{5}$$

여기서 $\dot{x}$는 로봇의 움직임의 변화량이고 $\dot{\xi}$는 영상특징의 변화량이다. $J_f$의 역 행렬의 놈인 $\| J_f^{-1} \|$는 영상 특징 변화에 대한 로봇 운동 변화의 측정치이다. $\| J_f^{-1} \|$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 보여주며 증명은 부록의 증명1에 있다.

정리 1 : 임의의 $m \times n$, $(m > n)$ 행렬 $A$의 행이 선형적으로 독립이라면 다음과 같이 QR분해(orthonormal-triangular decomposition)할 수 있다[11][12].

$$A = QR \tag{6}$$

여기서 $Q$ : $m \times m$인 unitary 행렬

$R$ : $n \times n$이 상위 삼각(upper triangular) 이고 $(m-n) \times n$이 영인 행렬(zero matrix) 이다.

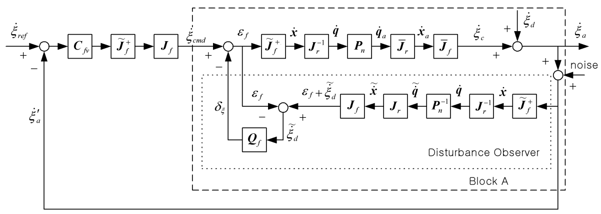



그림 1. 외란관측기를 이용한 시각구동 방법의 구성도.

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

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

$$\tilde{A} = Q\tilde{R} \tag{7}$$

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

$$s_{\max,\tilde{A}} \leq s_{\max,A} \tag{8}$$

$$s_{\min,\tilde{A}} \geq s_{\min,A} \tag{9}$$

QL 분해에 대해서도 마찬가지의 결과를 얻을 수 있다.

영상 특징 자코비안의 특이값의 곱인 운동 인지도는 다음과 같이 정의된다.

$$w_v = \sqrt{\det(J_f J_f^T)} = s_1 s_2 \cdots s_p \,. \tag{10}$$

운동 인지도는 컴퓨터 비젼 시스템이 시야에서 물체의 운동을 인지하는 정도를 나타내는 지수 이다. $A$와 $\tilde{A}$ 의

운동 인지도는 QR분리에 의한 상위 삼각 행렬의 블록 대각 이외의 성분의 제거에도 불구하고 이들의 값이 같음은 정리2와 같으며 증명은 부록의 증명 2에 있다.

정리 2 : 임의의 $m\times n$, $(m>n)$행렬$A$의 행이 선형적으로 독립이라면 (5)와 같이 QR분해(orthonomal triangular decomposition)할 수 있으며[11][12], 상위 삼각 행렬 $R$을 블록 대각 행렬 $\tilde{R}$로 변환시키고 $\tilde{A}$를 (6)과 같이 놓으면 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$\prod_i s_{i,\tilde{A}} = \prod_i s_{i,A} \tag{11}$$

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

$\dot{\xi}_{ref}$ : 영상특징의 속도 명령,
$C_{fv}$ : 영상특징의 PID 제어기,
$J_f$ : 영상특징 자코비안,
$\tilde{J}_f^+$ : QR분해를 이용한 의사 역 영상특징 자코비안,
$J_r$, $J_r^{-1}$ : 로봇 자코비안과 역 자코비안,
$\bar{J}_r$ : 실제 로봇의 자코비안,
$\bar{J}_f$ : 실제 CCD 카메라의 영상 특징 자코비안,
$\dot{\xi}_d$, noise : 외부에서 들어 오는 영상 특징의 외란과 잡음,
$\dot{\xi}_a$ : 측정된 영상 특징의 변화량,
$Q_f$ : 저역 통과 필터
$P_n$ : 란관측기를 이용한 선형화된 로봇 관절속도 제어기[6]
$d_x$ : $Q_f \tilde{\dot{\xi}}_d$ 이다.

그림 1의 블록 A는 다음과 같은 기준모델, $F_n$로 나타낼 수 있다.

$$F_n = \tilde{J}_f J_r P_n J_r^{-1} J_f^+ . \tag{12}$$

블록 A의 앞 부분에 $J_f$ 과 $\tilde{J}_f^+$를 cascade접속을 하면, 결국 (12)에 $J_f$ 과 $\tilde{J}_f^+$를 post multiplication한 것과 같고, 따라서 시각구동 시스템은 블록 대각 영상 특징 자코비안 시스템으로 변환된다. 그림 2는 제안된 그림 1의 시각구동 시스템의 등가 시스템을 보여주며 이에 대한 설명은 다음과 같다.

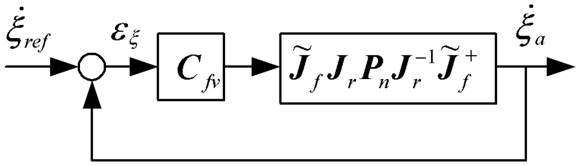



그림 2. 그림 1의 시각구동 시스템과 등가인 구성도.
Fig. 2. The block diagram of equivalent visual servoing system of the system in Fig. 1.

블록 A에서 외란 관측기를 제외한 부분의 시스템을

$$F = \bar{J}_f \bar{J}_r P_n J_r^{-1} \tilde{J}_f^+ \tag{13}$$

라 놓자. 외란 관측기의 역 기준 모델을

$$F_n^{-1} = J_f J_r P_n^{-1} J_r^{-1} \tilde{J}_f^+ \tag{14}$$

라 놓으면 기준모델은

$$F_n = \tilde{J}_f J_r P_n J_r^{-1} J_f^+ \tag{15}$$

과 같다. 이를 이용하여 그림 1을 다시 그리면 다음과 같다.

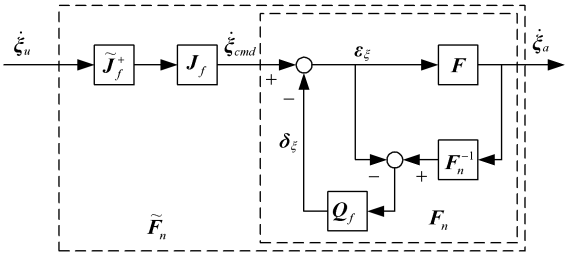



그림 3. 단순화된 시각구동 시스템의 전체 구성도.
Fig. 3. The block diagram of simplified visual servoing system.

그림 3의 전달함수는

$$\dot{\xi}_a = \left[F^{-1} + Q_f(F_n^{-1} - F^{-1})\right]^{-1}\dot{\xi}_{cmd}$$
$$= F\left[I - Q_f + Q_f F_n^{-1} F\right]^{-1}\dot{\xi}_{cmd} \tag{16}$$

로, 만약 $Q_f = I$ 로 놓으면

$$\dot{\xi}_a = F_n \dot{\xi}_{cmd} \tag{17}$$

이 되며, 항 $J_f$와 $\tilde{J}_f^+$ 을 곱하면 실제 제어대상은 다음과 같이 바뀌게 된다.

$$\tilde{F}_n = \tilde{J}_f J_r P_n J_r^{-1} \tilde{J}_f^+ \tag{18}$$

## III. 실험

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

그림 4는 실험을 위한 전체 구성도를 보여준다. 여기서 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-350MHz에 스테레오 시각구동을 위해 Matrox사의 Meteor 칼라 디지타이저 보드를 사용하여 구한다. 스테레오 시각구동에서 Red와 Green단자에 각각 카메라를 연결하여 동시 두 대의 카메

라 영상을 동기시켜 입력 받을 수 있다. 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 시각 구동 샘플링 시간의 10배로 잡았다. 실험에서는 C/C++언어를 사용하였으며 각각의 계산에 사용되는 시간은 표 1과 같다. 시간 계산은 실시간 운영체제의 함수를 이용하였다.

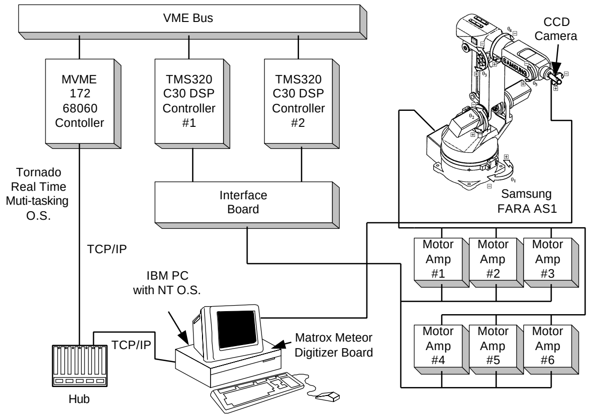



그림 4. 실험 구성도.
Fig. 4. Experimental setup.

표 1. 스테레오 카메라의 계산 시간 (오차범위 2%)
Table 1. Computation time of stereo camera (error range 2%).

| | time (msec) |
|---|---|
| $J_f^{-1}$ | 3.747 |
| $\tilde{J}_f^{-1}$ | 3.997 |
| $J_r^{-1}$ | 0.597 |
| without DOB | 4.497 |
| with DOB | 13.997 |
| Visual Servoing | 67.000 |

표 2. 영상처리 계산 시간.
Table 2. Image processing time.

| | | time (msec) |
|---|---|---|
| Data communication time (TCP/IP 10M) | | 1.788 |
| Window size 10 x 10 pixels | mono camera | 2.14 |
| | stereo camera | 4.00 |
| Window size 20 x 20 pixels | mono camera | 6.50 |
| | stereo camera | 13.30 |

스테레오 카메라의 시각구동은 Nelson과 Khosla[5], Maru, Miyazaki등[15]에서 구한 영상 특징 자코비안을 사용하여 시각구동을 하려고 한다. 스테레오 카메라는 그림 5과 같고 투시 모델은 그림 6와 같다. 로봇 머니퓰레이터의 변화에 대한 영상특징의 변화를 나타내는 스테레오 영상 특징 자코비안은 (19)와 같고 $N$개의 특징점에 대해 영상특징 자코비안을 모으면 (20)와 같다.

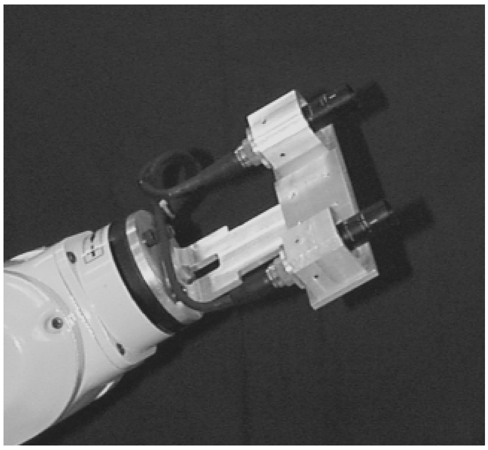


그림 5. 스테레오 카메라.
Fig. 5. Stereo camera.

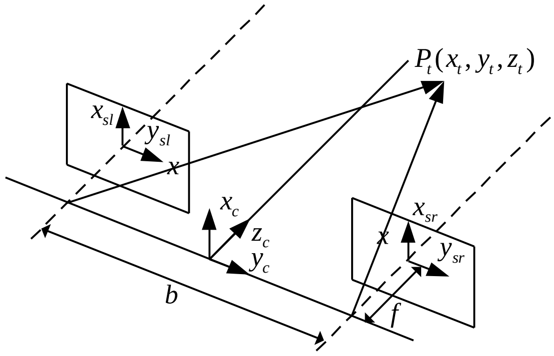



그림 6. 스테레오 카메라의 투시모델.
Fig. 6. Perspective image model of stereo camera.

$$J_f = \begin{bmatrix} -\frac{s}{b} & 0 & x_l\frac{s}{fb} & x_l\frac{y_l+y_r}{2f} & -f-\frac{x_l^2}{f} & \frac{y_l+y_r}{2} \\ -\frac{s}{b} & 0 & x_l\frac{s}{fb} & x_l\frac{y_l+y_r}{2f} & -f-\frac{x_l^2}{f} & \frac{y_l+y_r}{2} \\ 0 & -\frac{s}{b} & y_l\frac{s}{fb} & f+y_l\frac{y_l+y_r}{2f} & -\frac{x_l y_l}{f} & -x_l \\ 0 & -\frac{s}{b} & y_r\frac{s}{fb} & f+y_r\frac{y_l+y_r}{2f} & -\frac{x_l y_r}{f} & -x_l \end{bmatrix} \tag{19}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{l,1} \\ \dot{y}_{l,1} \\ \dot{y}_{r,1} \\ \vdots \\ \dot{x}_{l,N} \\ \dot{y}_{l,N} \\ \dot{y}_{r,N} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{f,1} \\ \vdots \\ J_{f,N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \\ w_x \\ w_y \\ w_z \end{bmatrix} \tag{20}$$

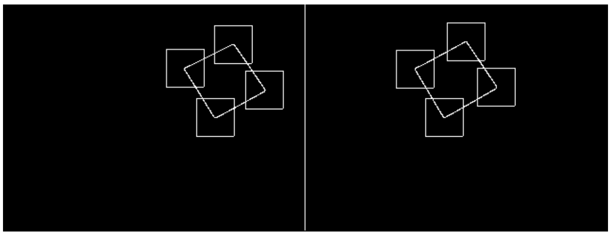
여기서 $s=y_l-y_r$로 특징점의 Disparity이며, $b$는 두 대의 카메라 간의 거리, $x_l$, $y_l$은 특징점의 왼쪽 카메라의 영상 좌표이고 $x_r$, $y_r$은 오른쪽 카메라의 영상 좌표이다. 본 스테레오 카메라에서는 $x_l=x_r$이므로 영상 특징을 $x_l$, $y_l$, $y_r$로 선택하였다. 스테레오 카메라의 시각 구동에서는 사각형

을 대상 물체로 하였는데, 사용한 특징점은 3점에 대하여 3개의 특징($x_l$, $y_l$, $y_r$)을 이용하여 9개의 영상 특징을 이용하였다.

스테레오 카메라의 시각 구동에서는 단안 카메라의 경우와 같은 사각형을 대상 물체로 하였는데, 사용한 특징점은 3점에 대하여 3개의 특징($x_l$, $y_l$, $y_r$)을 이용하여 9개의 영상 특징을 이용하였다.

그림 7과 8은 로봇의 초기 위치(-27.00, -35.89, -13.14, 11.47, 34.80, -5.98) deg.에서 초기 영상 특징이 (55, 31, -45, 3, 63, -14, 80, 82, 9)pixel 인 영상과 목표지점에서 영상 특징이(30, -2, -104, -47, 43, -70, 68, 79, -27)pixel인 영상의 그림이다. 시각 구동에서 영상 특징점의 추적은 꼭지점 추적 방법을 이용하였으며 속도 향상을 위해 그림에서와 같이 꼭지점 주위에 작은 창 (20×20 pixels)과 (320×240 pixel)의 화면 크기를 이용하였다.

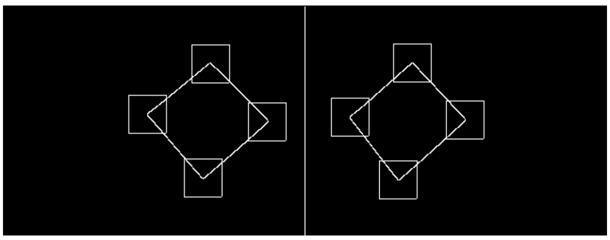
그림 9와 10은 제어 이득을 똑같이 할 경우에 (P=1.0, I=0.01) 기존의 방법(without DOB)과 제안하는 방법(with DOB)에 대하여 1번 특징점에 대한 각각의 추적 결과이다. 기준 궤적은 사다리꼴 모양의 속도로 주어졌으며, 카메라의 이동속도는 약 5cm/sec로 50cm를 움직이도록 하였다. 비교 결과 표 3과 같이 RMS는 크게는 28.31%에서 작게는 84.37%로 감소하고 표준편차 역시 50%정도 감소함을 볼 수 있다. 3번째 특징점의 왼쪽 카메라의 y좌표의 경우에 오차와 표준 편차가 120.97%, 120%로 커짐을 볼 수 있는데 제어 게인을 9개의 특징점에 대하여 똑같이 놓아서 조정이 필요하고, 블록 대각 이외의 성분제거로 인하여 가장 영향을 많이 받는 부분이다.



(a) (b)

그림 7. 초기위치에서의 특징점의 스테레오 영상.
(a) 왼쪽 카메라, (b) 오른쪽 카메라.

Fig. 7. Feature points on the stereo images of initial position. (a) left camera, (b) right camera.



(a) (b)

그림 8. 목표위치에서의 특징점의 스테레오 영상.
(a) 왼쪽 카메라, (b) 오른쪽 카메라.

Fig. 8. Feature points on the stereo images of goal position. (a) left camera, (b) right camera.

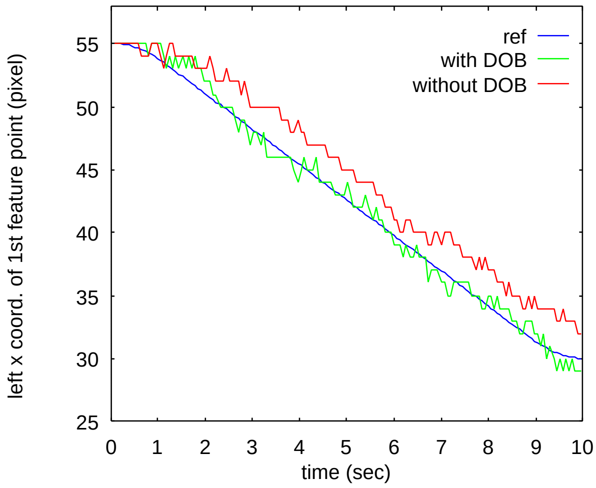



그림 9. 왼쪽 카메라의 1번 특징점의 x좌표의 궤적.

Fig. 9. Trajectories of the x coordinate of 1st feature point on the left camera image.

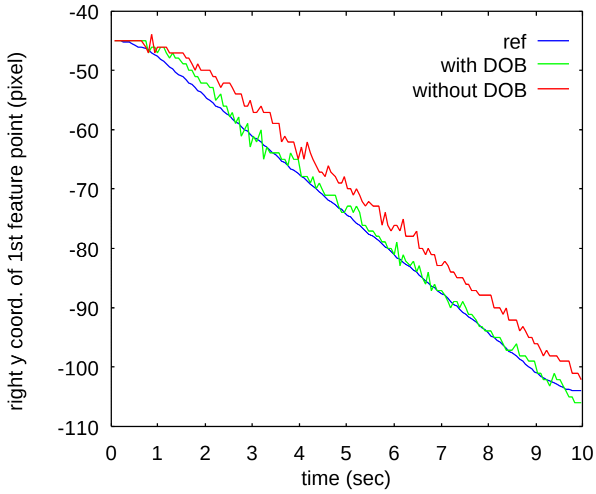



그림 10. 오른쪽 카메라의 1번 특징점의 y좌표의 궤적.

Fig. 10. Trajectories of the y coordinate of 1st feature point on the right camera image.

표 3. 스테레오의 시각구동 오차의 RMS 평균 및 표준편차의 비교 (1/3).

Table 3. RMS average and standard deviation of visual tracking errors of stereo camera (1/3).

| | | Left camera x coord. of 1st point feature | Left camera y coord. of 1st point feature | Right Camera y coord. of 1st point feature |
|---|---|---|---|---|
| RMS | with DOB | 0.62 | 1.89 | 0.99 |
| average | without DOB | 2.19 | 3.51 | 4.32 |
| (pixel) | decrement (%) | 71.69 | 46.15 | 76.85 |
| Standard | with DOB | 0.50 | 1.25 | 0.80 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| deviation | without DOB | 0.89 | 1.81 | 1.58 |
| (pixel) | decrement (%) | 43.82 | 30.94 | 49.37 |

표 3. 스테레오의 시각구동 오차의 RMS 평균 및 표준편차의 비교 (2/3).

Table 3. RMS average and standard deviation of visual tracking errors of stereo camera (2/3).

| | | Left camera x coord. of 2nd point feature | Left camera y coord. of 2nd point feature | Right camera y coord. of 2nd point feature |
|---|---|---|---|---|
| RMS average (pixel) | with DOB | 1.01 | 0.81 | 1.11 |
| | without DOB | 4.36 | 0.96 | 3.99 |
| | decrement (%) | 76.84 | 15.63 | 72.18 |
| Standard deviation (pixel) | with DOB | 0.71 | 0.71 | 0.79 |
| | without DOB | 1.50 | 0.65 | 1.51 |
| | decrement (%) | 42.67 | -9.23 | 47.68 |

표 3. 스테레오의 시각구동 오차의 RMS 평균 및 표준편차의 비교 (3/3).

Table 3. RMS average and standard deviation of visual tracking errors of stereo camera (3/3).

| | | Left camera x coord. of 3rd point feature | Left camera y coord. of 3rd point feature | Right camera y coord. of 3rd point feature |
|---|---|---|---|---|
| RMS average (pixel) | with DOB | 0.66 | 0.75 | 0.84 |
| | without DOB | 1.14 | 0.63 | 2.30 |
| | Decrement(%) | 42.11 | -20.97 | 63.48 |
| standard deviation (pixel) | with DOB | 0.56 | 0.61 | 0.63 |
| | without DOB | 0.63 | 0.49 | 1.05 |
| | Decrement (%) | 11.11 | -20.00 | 40.00 |

where decrement = (withoutDOB−with DOB)／without DOB∗100.0 %

그림 11과 그림 12는 초기 특징값이 (30, -33, -144, -39, 30, -91, 89, 38, –76) pixel에서 목표 특징값 (11, -6, -112, -56, 51, -60, 64, 59, –46) pixel이 되도록 (19, 27, 32, 17, 19, 31, 25, 21, 30)pixel 만큼 움직인 계단응답에 대한 1번 특징점의 결과이다. 표 4는 결과에 대한 Rising Time, Overshoot, Settling Time에 대한 비교이다. Rising Time은 60% 정도로 빨라 졌고 Overshoot는 표와 같이 퍼센트로 볼 경우에 비슷하거나 큰 결과를 보이는데 실제로는 1, 2pixel로 오차와 비슷한 안정된 결과를 보인다. Settling Time의 경우에는 50% 60% 정도로 빨라짐을 볼 수 있다.

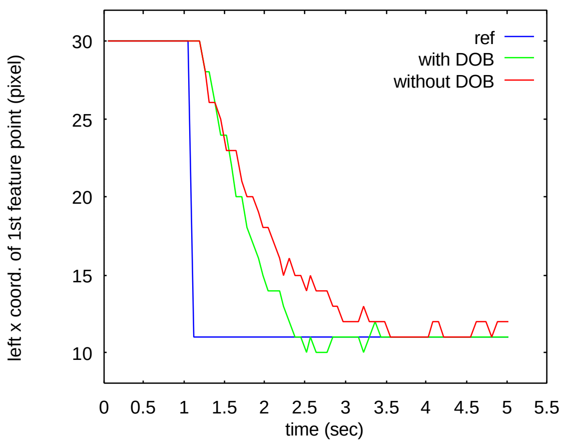



그림 11. 왼쪽 카메라의 1번 특징점의 계단응답의 x좌표.

Fig. 11. Step response of the x coordinate of 1st feature point on the left camera image.

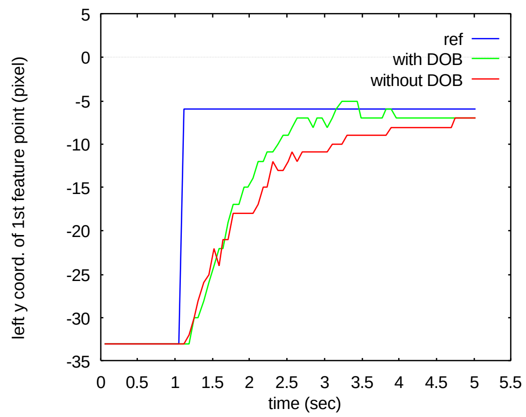



그림 12. 왼쪽 카메라의 1번 특징점의 계단응답의 y좌표.

Fig. 12. Step resonse of the y coordinate of 1st feature point on the left camera image.

표 4. 스테레오 카메라의 계단응답 (1/3).

Table 4. The step response of stereo camera (1/3).

| | | Left camera x coord. of 1st point feature | Left camera y coord. of 1st point feature | Right camera y coord. of 1st point feature |
|---|---|---|---|---|
| rising time (sec) | with DOB | 0.99 | 1.19 | 1.06 |
| | without DOB | 1.59 | 2.05 | 1.92 |
| | Decrement (%) | 37.74 | 41.95 | 44.79 |
| Overshoot (%) | with DOB | 5.2 | 3.7 | 3.1 |
| | without DOB | 0.01 | 3.7 | 3.1 |
| | Decrement (%) | -520.00 | 0.00 | 0.00 |
| settling time (sec) | with DOB | 1.19 | 1.45 | 1.45 |
| | without DOB | 2.38 | 2.77 | 2.68 |
| | Decrement (%) | 50.00 | 46.65 | 45.90 |

표 4. 스테레오 카메라의 계단응답 (2/3).

Table 4. The step response of stereo camera (2/3).

| | | Left camera x coord. of 2nd point feature | Left camera y coord. of 2nd point feature | Right camera ycoord. of 2nd point feature |
|---|---|---|---|---|
| rising time (sec) | with DOB | 0.99 | 0.99 | 1.13 |
| | Without DOB | 1.59 | 1.39 | 2.05 |
| | Decrement (%) | 37.74 | 28.78 | 44.88 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| overshoot (%) | with DOB | 5.9 | 10.5 | 3.2 |
| | Without DOB | 5.9 | 5.3 | 3.2 |
| | Decrement (%) | 0.00 | -100.00 | 0.00 |
| settling time (sec) | with DOB | 1.12 | 1.378 | 1.45 |
| | Without DOB | 1.85 | 2.04 | 2.57 |
| | Decrement (%) | 39.46 | 32.45 | 43.58 |

표 5. 스테레오 카메라의 계단응답 (3/3).

Table 5. The step response of stereo camera (3/3).

| | | Left camera x coord. of 3rd point feature | Left camera y coord. of 3rd point feature | Right camera y coord. of 3rd point feature |
|---|---|---|---|---|
| rising time (sec) | with DOB | 1.06 | 1.19 | 1.12 |
| | without DOB | 1.72 | 1.92 | 1.92 |
| | Decrement (%) | 38.37 | 38.02 | 41.67 |
| overshoot (%) | with DOB | 4.0 | 9.52 | 6.7 |
| | without DOB | 0.01 | 0.01 | 3.3 |
| | Decrement (%) | -400.00 | -952.0 | 79.70 |
| settling time (sec) | with DOB | 1.25 | 1.32 | 1.52 |
| | without DOB | 2.31 | 2.04 | 2.77 |
| | Decrement (%) | 45.89 | 35.30 | 45.13 |

where decrement=(withoutDOB−with DOB)/without DOB∗100.0 %

그림 13, 14, 15는 시각구동에서 최대, 최소 특이값 및 조건지수를 보여준다. 영상특징 자코비안 행렬의 최대값

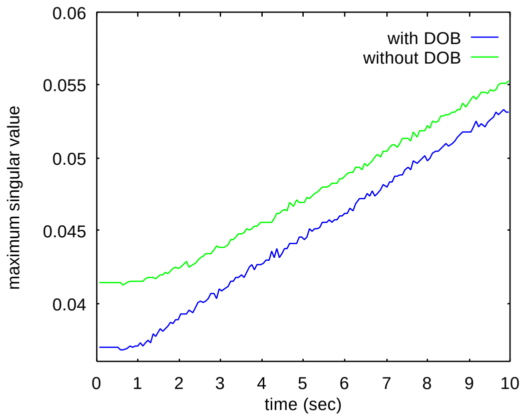



그림 13. 최대 특이값.

Fig. 13. Maximum singular values.

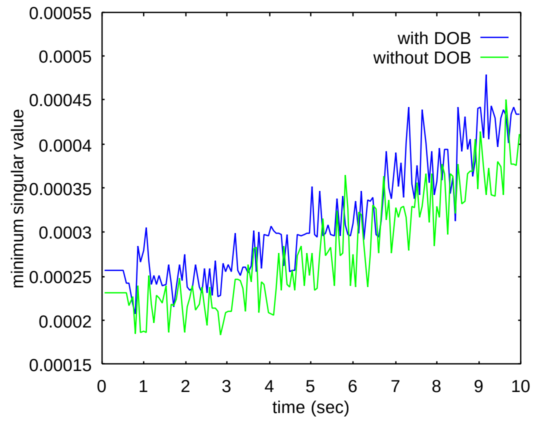



그림 14. 최소 특이값.

Fig. 14. Minimum singular values.

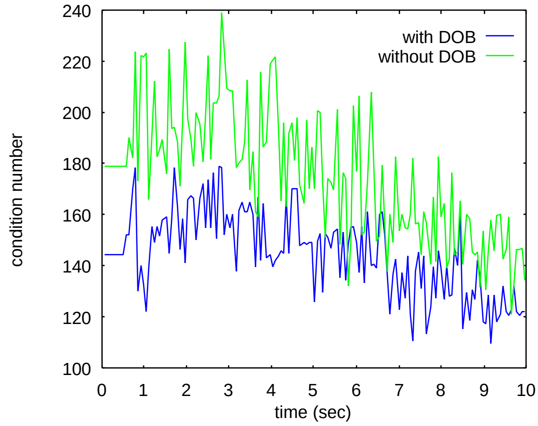



그림 15. 조건지수.

Fig. 15. Condition number.

과 조건지수는 외란 관측기를 사용하지 않는 방법에 비해 각각 12%, 21% 정도 감소하였다. 이는 제안된 제어방법을 사용하면 로봇 머니퓰레이터의 자세 제어성 및 제어의 민감성이 향상됨을 보여준다. 외란 관측기를 사용할 때의 자코비안 행렬의 최소 특이값 역시 12% 정도 커져서 영상 기반 제어의 민감성이 좋아짐을 볼 수 있다.

## IV. 결론

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

수학적으로 QR분해를 사용하면 블록 삼각 행렬을 블록 대각행렬로 변환시켰을 때와 마찬가지로 조건지수는 감소하고 최소 특이값은 커져 성능이 향상됨을 보였다. 기존의 블록삼각 영상특징 자코비안을 이용했을 경우 면적을 이용한 특징이 로봇의 움직임에 둔감한 단점이 있어 최소특이값의 변화가 거의 없고 조건지수가 1에 가까워 지도록 작아야 함에도 너무 큰 단점이 있었다. 하지만 일반 영상특징 자코비안을 이용하고 QR분해를 한 본 연구에서는 이런 문제들이 해결된 결과를 볼 수 있다. 또한

특이값의 곱인 운동 인지도의 경우에도 값의 변화가 없음을 알 수 있다.

스테레오 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 시각구동 방법에 대해서도 본 논문에서 제시한 방법의 적용 가능성 및 성능 향상을 확인하려고 한다.

### 참고문헌


[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, and 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 invloving 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] N. Maru, H. Kase, S. Yamada, A. Nishikawa, and F. Miyazaki, "Manipulator control by visual servoing with the stereo vision", *Proc. IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1866-1870, 1993.


### 부 록

증명 1 : 임의의 행렬$A$를 QR분해하면

$$A = QR \qquad \text{(A-1)}$$

이 되고 $R$을 특이값 분해 (singular value decomposition)하면

$$R = USV^T \qquad \text{(A-2)}$$

이 된다. 여기서 $U$, $V$는 Unitary 행렬이고 $S$는 $R$의 특이값을 갖는 대각 행렬이다. (A-2)을 (A-1)에 대입해 다시 쓰면

$$A = QUSV^T \qquad \text{(A-3)}$$

와 같고 새로운 Unitary 행렬 $U' = QU$로 쓰면 $A$는 다음과 같이 특이값 분해할 수 있다.

$$A = U' SV^T \qquad \text{(A-4)}$$

따라서 $A$행렬의 특이값은 $R$행렬의 특이값과 같으므로 $A$와 $R$의 최대 특이값의 관계는 다음과 같다.

$$s_{\max,A} = s_{\max,R}, \qquad \text{(A-5)}$$

$$s_{\max,\tilde{A}} = s_{\max,\tilde{R}}. \qquad \text{(A-6)}$$

로 쓸 수 있다. 따라서 $s_{\max,A}$ 과 $s_{\max,\tilde{A}}$를 비교하는 대신에 $\tilde{s}_{\max,R}$과 $s_{\max,\tilde{R}}$를 비교한다.

$R$과 $\tilde{R}$의 특이값은 $n \times n$ 상위 삼각 행렬에 의해서만 결정된다. 따라서 최대 특이값을 비교하기 위해 각각의 $n \times n$ 상위 삼각 행렬만을 $R'$과 $\tilde{R}'$로 놓자. $R$과 $R'$의 최대 특이값과 $\tilde{R}$과 $\tilde{R}'$의 최대 특이값은 각각 같기 때문에 이들을 이용해 최대 특이값을 비교할 수 있다. 또 U를

$$U = \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & -I \end{bmatrix} \qquad \text{(A-7)}$$

과 같이 하면 블록 대각 행렬은

$$\tilde{R}' = \frac{1}{2}\left(R' + UR'U^{-1}\right) \qquad \text{(A-8)}$$

와 같고 삼각 부등성 (triangular inequality)[11][12] 정의에 의해

$$\left\|\tilde{R}'\right\| \le \frac{1}{2}\left\|R'\right\| + \frac{1}{2}\left\|UR'U^{-1}\right\| \qquad \text{(A-9)}$$

가 된다. $R'$과 $UR'U^{-1}$ 행렬은 서로 유사 행렬(similar matrix)로 고유값이 같고 특이값도 같다. 따라서

$$\|\tilde{R}'\| \le \|R'\| \quad (A\text{-}10)$$

의 관계가 있고, 최대 특이값의 관계는

$$s_{\max,\tilde{R}'} \le s_{\max,R'} \quad (A\text{-}11)$$

이므로, $A$와 $\tilde{A}$의 최대 특이값의 관계는 다음과 같다.

$$s_{\max,\tilde{A}} \le s_{\max,A}\,. \quad (A\text{-}12)$$

최소 특이값을 비교하기 위해서

$$s_{\min,A} = \frac{1}{s_{\max,A^{-1}}} \quad (A\text{-}13)$$

의 관계가 있고 $A$가 $m \times n$, $(m \times n)$행렬의 역 행렬은 의사 역 행렬(pseudo-inverse matrix)을 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$A^{+} = (A^{T}A)^{-1}A^{T}. \quad (A\text{-}14)$$

이식을 삼각 행렬 $R$과 블록 대각 행렬 $\tilde{R}$인 경우에 대해 전개하면 다음과 같이 구 할 수 있다. 삼각 행렬 $R$인 경우는

$$A^{+} = \begin{bmatrix} R_{11}^{-1} & -R_{11}^{-1}R_{12}R_{22}^{-1} & 0 \\ 0 & R_{22}^{-1} & 0 \end{bmatrix} Q^{T} \quad (A\text{-}15)$$

와 같고, 블록 대각 행렬 $\tilde{R}$인 경우는

$$\tilde{A}^{+} = \begin{bmatrix} R_{11}^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & R_{22}^{-1} & 0 \end{bmatrix} Q^{T} \quad (A\text{-}16)$$

과 같다. 최소 특이값에 대해서도 (A-1) (A-5)의 관계에 의해 다음과 같은 관계가 있다.

$$s_{\min,A} = s_{\min,R}\,. \quad (A\text{-}17)$$

마찬 가지로 $\tilde{A}$와 $\tilde{R}$의 최소 특이값의 관계는

$$s_{\min,\tilde{A}} = s_{\min,\tilde{R}} \quad (A\text{-}18)$$

로 쓸 수 있다. 따라서 $s_{\min,A}$ 과 $s_{\min,\tilde{A}}$ 를 비교하는 대신에 $s_{\min,R}$ 과 $s_{\min,\tilde{R}}$ 를 비교한다.

$$\frac{1}{s_{\min,\tilde{R}}} \le \frac{1}{s_{\min,R}} \quad (A\text{-}19)$$

이 되며

$$s_{\min,\tilde{R}} \ge s_{\min,R} \quad (A\text{-}20)$$

이 된다. 따라서 $A$와 $\tilde{A}$의 최소 특이값의 관계는 다음과 같다.

$$s_{\min,\tilde{A}} \ge s_{\min,A}\,. \quad (A\text{-}21)$$

■

증명 2 : $\det(Q^{T}Q)=1$ 를 이용하면

$$\begin{aligned} \det(A^{T}A) &= \det(R^{T}Q^{T}QR) \\ &= \det(R^{T}R), \\ &= \det\begin{bmatrix} R_{11}^{T}R_{11} & R_{11}^{T}R_{12} \\ R_{12}^{T}R_{11} & R_{12}^{T}R_{12} + R_{22}^{T}R_{22} \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (A\text{-}22)$$

과 같이 되고 Schur의 Determinant 공식[14]

$$\det\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} = \det(A_{11}) \cdot \det(A_{22} - A_{21}A_{11}^{-1}A_{12}) \quad (A\text{-}23)$$

에 의해 (A-23)는

$$\det(R^{T}R) = \det(R_{11}^{T}R_{11}) \cdot \det(R_{22}^{T}R_{22}) \quad (A\text{-}24)$$

와 같이 된다. 역시 $\det(\tilde{R}^{T}\tilde{R})$ 는

$$\begin{aligned} \det(\tilde{R}^{T}\tilde{R}) &= \det\begin{bmatrix} R_{11}^{T}R_{11} & 0 \\ 0 & R_{22}^{T}R_{22} \end{bmatrix} \\ &= \det(R_{11}^{T}R_{11}) \cdot \det(R_{22}^{T}R_{22}) \end{aligned} \quad (A\text{-}25)$$

로 (A-25)과 같아 진다. 따라서

$$\sqrt{\det(R^{T}R)} = \sqrt{\det(\tilde{R}^{T}\tilde{R})} \quad (A\text{-}26)$$

이고

$$\sqrt{\det(A^{T}A)} = \sqrt{\det(\tilde{A}^{T}\tilde{A})} \quad (A\text{-}27)$$

이 된다. 결론적으로 $A$와 $\tilde{A}$의 운동 인지도는 같다.

■

**이 준 수**

1964년 3월 28일생. 1987년 한양대학교 전자공학과(공학사). 1989년 한양대학교 대학원 전자공학과(공학석사). 2000년 한양대학교 대학원 전자공학과(공학박사). 1989년 현재 한국과학기술연구원 지능제어연구센타 연구원. 관심분야는 시각구동 시스템, 생체 모방 시각 시스템.

**유 범 재**

1985년 서울대 제어계측공학과(공학사). 1987년 한국과학기술원 전기 및

전자 공학과(공학석사). 1991년 한국과학기술원 전기 및 전자 공학과(공학박사). 1991  1994년 ㈜터보테크 근무. 1995년  현재 한국과학기술연구원 지능제어연구센타 책임연구원. 관심분야는 고속 영상추적 시스템, Head-Eye 시스템제어.

**서 일 홍**

1955년 4월 16일생. 1977년 서울대 공대 전자공학과(공학사). 1982년 한국과학기술원 전기 및 전자 공학과(공학박사). 1982년 대우중공업 기술연구소 근무. 1987-1988년 미국 미시간대 객원 연구원. 현재 한양대학교 전자공학과 교수.

**오 상 록**

1980년 서울대 전자공학과 졸업. 한국과학기술원 전기전자공학과 석사(1982), 동대학 박사(1987). 1988년  현재 한국과학기술연구원 지능제어연구센터 책임연구원. 관심분야는 로봇의 지능제어, 이동 매니퓰레이터의 동작제어. 로봇 손 제어, 서비스 로봇제어.