

## 축소차수 관측기를 이용한 로보트 제어기 설계에 관한 연구

A Study on the Robot Controller Design using a Reduced-order Observer

D.S.Kim J.G.Kim  
Dept. of Industrial Automation  
Inha University

## ABSTRACT

This paper is concerned with the design of a robust tracking controller using a state observer on a robotic manipulator under the disturbance. The controller is designed to follow a step or ramp reference input without steady state error in the presence of a disturbance and a system parameter variation. In most cases, since all the state vectors are not measured, unmeasurable state vectors must be estimated or reconstructed. A reduced order observer is proposed to estimate unmeasurable state vectors of the non-linear system. Some problems are caused by the Coulomb friction, the disturbance, and the spring effect of a link between the drive motor and the manipulator arm. The state variables, directly measured and estimated by the reduced order observer, are fed back to the controller. When the robot system exhibits the limit cycle, the feedback gains initially obtained by optimal control theory are changed. As a result, the limit cycle is eliminated by the new controller gains.

## 1. 서론

산업용 로보트로 대표되는 FA 기기로부터 일반 산업기기, OA 기기 등 모든 분야에 있어서 운동 및 위치 결정 정밀도의 요구는 점차 강해지고 있다. 일반적으로 감속기를 사용하여 구동시키는 로보트 시스템은 유연관절의 뒤틀림 스프링 효과를 가진 비선형 4차 미분방정식으로 표현된다. 본 논문에서는 비선형 마찰과 외란 및 파라미터 변동에 따른 정상상태 오차를 제거할 수 있는 견실한 추적제어기 설계를 다루었다. 이러한 로보트 시스템에서의 문제점들은 다음과 같다. 첫째로 강한 비선형 요소인 쿨롱 마찰력, 둘째는 모터와 로보트 팔 사이의 스프링 효과로 인한 진동, 세째는 측정 가능한 변수가 하나 혹은 둘 뿐이어서 나머지 변수들을 추정해야 된다는 점이다. 마지막으로 기준입력을 계단 함수 혹은 경사 함수로 가정할 경우의 추적 문제이다. 이 추적 문제는 실제 출력력과 기준 입력의 차, 즉 오차 신호의 후반부에 적분기를 설치하여 해결하였다. 귀환(feedback) 이득은 최적 제어 이론에 의하여 구했다. 상태

변수를 알아 내는 방법으로 여러가지가 있는데, 첫째는 계측장치를 부착하는 것으로 이 방법은 로보트와 같이 측정해야 할 상태가 많은 경우 고가의 계측장치가 부담이 되고 물리적으로 계측장치를 부착할 수 없는 경우도 있다. 둘째로 측정된 상태 변수들의 미분을 이용하는 것인데 이것은 잡음에 상당히 민감하고 정확성도 떨어진다. 세째는 상태를 추정하기 위해 시스템의 수학적 모델의 지식을 충분히 이용하는 것으로 관측기(observer)<sup>[1]</sup>라 불리는 추정 시스템을 쓰는 것이다. 이 추정 시스템은 모델에 기초한 전자 회로나 컴퓨터 프로그램으로 구현시킬 수 있다. 관측기에는 모든 상태변수를 추정하는 총 차수 관측기(full order observer)와 측정할 수 없는 상태만 추정하는 축소차수 관측기(reduced order observer)가 있는데, 본 논문에서는 축소차수 관측기를 사용하여 상태를 추정하였다. 기준 입력의 추적을 위해 출력축에 적분기를 추가시키지 않고 피드 포워드(feedforward) 투프 제어를 사용할 경우에는 외란의 영향을 완벽히 제거할 수 없기 때문에 등가 외란 관측기(equivalant disturbance observer)를 구성하여 외란도 추정해서 보상해야 할 것이다.<sup>[2,3]</sup> 그러나, 본 논문에서는 출력축에 설치한 적분기의 작용으로 외란이 제거되므로 외란을 추정할 필요가 없다. 만약 관측기로부터 추정한 신호들을 이용하여 제어기를 구성한 결과 리미트 싸이클이 발생하면 제어기의 귀환 이득들을 조정함으로써 강인한 추적제어 장치를 설계하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장은 시스템의 모델링을 하였고, 3장은 관측기를 구성하였으며, 4장은 추적제어기를 설계하였다. 5장은 모의실험 결과를 보였으며 리미트 쌔이들이 생길 경우 이득을 조정하여 기준 입력과 의란에도 오차없이 잘 추적할 수 있는 견실한 추적제어기를 설계하였다. 6장에서 본 연구의 결과를 검토하고 정리하였다.

## 2. 모델

지금까지 일반적으로 되어온 로보트의 한 관절에 대한 모델링은 로보트 팔을 강체(rigid body)로 해석해 왔기 때문에 2차로 모델링이 되어왔다.<sup>[4,5]</sup> 그러나, 실제로 로보트 팔은 유연관절(flexible joint)을 가지고 있어서 2차의 모델링으로는 실 시스템과 많은 차이가 있다. 그래서 본 논문에서는 유연관절의 스프링 효과를 고려해서 4차로 모델링을 했다. 그리고 기

어식 로보트에서는 관절들의 결합효과(coupling effect)<sup>[6.7]</sup>가 크지 않으므로 각각의 관절을 따로 제어할 수 있다.  
그림 2.1은 Rhino 로보트의 F관절의 시스템에 대해서 볼록선도로 나타낸 것이다.

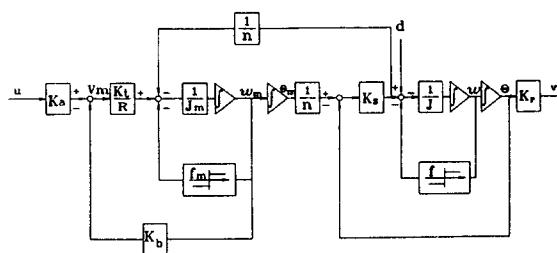


그림 2.1 F관절에 대한 로보트 구동 시스템

위의 그림에서 각 상수와 변수들은 다음과 같이 정의 한다.

$U$	: 증폭기의 입력
$V_m$	: 모터의 입력
$d$	: 외란 토크
$V$	: 전위차계의 출력
$\theta_m$	: 부하의 위치각도
$w_m$	: 부하의 각속도
$\theta$	: 모터의 위치각도
$\omega$	: 모터의 각속도
$K_p$	: 전위차계의 상수 ( $= 4.8$ Volt/rad)
$R$	: 모터 권선 저항 ( $= 8.19$ ohm)
$K_b$	: 모터 역기전력 상수 ( $= 0.0388$ Volt-sec/rad)
$K_t$	: 모터 토크 상수 ( $= 0.0388$ N-m/A)
$K_a$	: 증폭기 상수 ( $= 6$ )
$n$	: 감속기어비 ( $= 436.7$ )
$K_s$	: 스프링 상수 ( $= 200$ N-m/rad)
$f_m$	: 모터축 클립마찰 ( $= 0.004264$ N-m)
$J_m$	: 모터 관성 ( $= 0.000003$ Kg-m <sup>2</sup> )
$f$	: 부하축 클립마찰 ( $= 0.207$ N-m)
$J$	: 부하관성 ( $= 0.15 - 0.3$ Kg-m <sup>2</sup> )

만약 상태변수 벡터  $x$ 를 다음과 같이 정의 하면

$$\begin{aligned} x &= [x_1, x_2, x_3, x_4]^T \quad (2.1) \\ x_1 &= V, \quad x_2 = \omega, \quad x_3 = \theta_m/n, \quad x_4 = w_m/n \end{aligned}$$

식 (2.1)에서 첨자 T는 행렬의 Transpose이며, 그림 2.1의 로보트 구동시스템에 대한 상태방정식은 다음과 같다.

$$\dot{x}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 4.8 & 0 & 0 \\ -139.89 & 0 & 666.67 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 72.83 & 0 & -349.58 & -61.27 \end{bmatrix} x(t) \quad (2.2)$$

$$+ \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 21.697 \end{bmatrix} u(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ -3.33F(x_2) \\ 0 \\ 763.3F_m(x_4) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ 3.33 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} d(t)$$

$$y(t) = [1 \ 0 \ 0 \ 0] x(t)$$

여기서  $x(t)$ 는 상태 변수,  $u(t)$ 는 제어 입력,  $F$ 는 부하축의 클립마찰이고  $F_m$ 은 모터축의 클립마찰이다. 그리고  $d(t)$ 는 외란,  $y(t)$ 는 출력이다. 특히 여기서 부하관성  $J$ 는  $0.15 - 0.3$  Kg-m<sup>2</sup> 인데 최대치인  $0.3$  Kg-m<sup>2</sup> 을 택했다. 식(2.2)는 비선형성분을 가진 유연관절 로보트에 대한 시스템을 나타낸 것으로 두개의 비선형성분(부하 축, 구동부 축)과 기어로 인한 스프링 효과와 그리고 모터축과 관절축의 기어비로써 표현 하였다.

로보트 시스템에서 모터축에는 계측장치를 부착할 수 없다고 하고 부하축에는 위치와 속도를 측정할 수 있는 계측장치를 부착하면 상태변수  $x_1$ 과  $x_2$ 는 측정 가능하고  $x_3$ ,  $x_4$ 는 알 수 없는 상태변수이므로 관측기를 사용하여 추정된 상태변수  $\hat{x}_3$ ,  $\hat{x}_4$ 를 재구성 하여야 한다. 본 논문에서  $\hat{\cdot}$ 는 추정된 상태변수를 나타내는 기호로 쓰기로 한다.

### 3. 관측기 구성

선형 시불변 시스템이 다음과 같이 표현된다고 하자.

$$\begin{aligned} x(t) &= Ax(t) + Bu(t) \quad (3.1) \\ y(t) &= Cx(t) \end{aligned}$$

귀환 제어기  $u(t)$ 를 설계하는데 있어서, 일반적으로 모든 상태변수가 측정 가능한 것이 아닌 경우 상태벡터를 접근적으로 가능한한 빨리 수렴하게끔 추정하는 방법이 있는데, 이 시스템이 확정(deterministic)적인 선형 동적 시스템의 추정인 경우, 확률(stochastic)동적 시스템에서 추정하는 칼만 필터와 비교해서 특히 관측기 혹은 Luenberger 관측기라 한다. 우선 모든 상태 벡터가 관측 가능하다는 가정아래 제어기를 설계하고, 근사적 방법으로 상태벡터를 구하는 관측기를 각각 독립적으로 설계한 후 하나의 시스템으로 통합한다. 모든 상태를 추정하는 충차수 관측기는 시스템(3.1)을 재구성하여 보통 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{\hat{x}}(t) = (A - \ell C)\hat{x}(t) + \ell y + Bu(t) \quad (3.2)$$

여기서  $\ell$ 은 관측기의 귀환 이득을 나타내는 변수이다. 충차수 관측기는 상태벡터를 추정할 때 측정가능한 상태변수도 추정하기 때문에 정확하게 측정되는 상태변수도 근사적 방법으로 다시 구하게 되고 불필요한 부분까지 중복해서 설계하게 되므로 측정할 수 없는 변수들만을 추정하는 축소차수 관측기를 고려한다.

축소차수 관측기를 구성하려면 전체시스템을 직접적으로 측정되는 부분과 추정을 요하는 나머지 부분으로 다음과 같이 분할 한다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_m \\ \vdots \\ \dot{x}_u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ \hline A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_m \\ \vdots \\ x_u \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ \vdots \\ B_2 \end{bmatrix} u$$

( 3.3 )

$$y_o = [1 : 0] \begin{bmatrix} x_m \\ \vdots \\ x_u \end{bmatrix}$$

여기서 첨자  $m$ 과  $u$ 는 각각 측정 가능한(measurable)과 측정 불가능(unmeasurable)을 나타낸다. 그리고,  $y_o$ 는  $x_m$ 과 같고 ( $m \times 1$ )인 출력 벡터이다.

측정 불가능한 상태의 동력학은 다음과 같이 표현되고

$$\dot{x}_u = A_{22}x_u + \{A_{21}x_m + B_2u\} \quad ( 3.4 )$$

한편, 측정 가능한 상태의 동력학은 다음과 같다.

$$\dot{x}_m = \dot{y}_o = A_{11}y_o + A_{12}x_u + B_1u \quad ( 3.5 )$$

식(3.5)에서 측정 가능한 항과 측정 불가능한 항을 정리하면 아래와 같이 되는데, 측정으로 알 수 있는 항과 모르는 항 사이의 관계를 나타낸다.

$$\dot{y}_o = A_{11}y_o - B_1u = A_{12}x_u \quad ( 3.6 )$$

식(3.4)와 식(3.6)는 각각 식(3.1)의  $\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t)$ 와  $y(t) = Cx(t)$ 와 같은 형태로 표현된다. 따라서 축소차수 관측기는 식(3.4)와 식(3.6)을 식(3.2)와 같이 나타내면 다음과 같다.

$$\dot{\hat{x}}_u = A_{22}\hat{x}_u + A_{21}y_o + B_2u + \ell(\dot{y}_o - A_{11}y_o - B_1u - A_{12}\hat{x}_u) \quad ( 3.7 )$$

$x_u$  와  $\hat{x}_u$  의 차이를  $\tilde{x}_u$ 라 하면 그 오차의 동력학은 다음과 같다.

$$\dot{\tilde{x}}_u = (A_{22} - \ell A_{12})\tilde{x}_u \quad ( 3.8 )$$

이 때, 오차 동력학의 특성 방정식은 아래와 같다.

$$\det[sI - (A_{22} - \ell A_{12})] = 0 \quad ( 3.9 )$$

그리고, 원하는 위치의 극점  $S_i = P_1, P_2, \dots, P_n$ 이라하면, 관측기 극점의 특성 방정식은 아래와 같다.

$$\alpha_o(S) = (S - P_1)(S - P_2) \cdots (S - P_n) = 0 \quad ( 3.10 )$$

식(3.9)와 식(3.10)을 같다고 놓고 풀면 관측기 귀환 이득  $\ell$  을 구할 수 있다.

식(3.7)을 재정리하면 아래와 같다.

$$\dot{\tilde{x}}_u = (A_{22} - \ell A_{12})\tilde{x}_u + (A_{21} - \ell A_{11})y_o + (B_2 - \ell B_1)u + \ell y \quad ( 3.11 )$$

그런데,  $y$ 의 미분항이 있어서 잡음에 민감하게 되어 실제 시스템을 구현하는데 문제가 있다. 그래서 미분기를 제거하는 방향으로 식을 재조정해야 하는데, 다음과 같은 상태벡터  $z$ 를 정의하자.

$$z = \hat{x}_u - \ell y$$

이 경우, 새로운 상태벡터로 구현한 관측기는 다음과 같다.

$$z = (A_{22} - \ell A_{12})\hat{x}_u + (A_{21} - \ell A_{11})y_o + (B_2 - \ell B_1)u \quad ( 3.12 )$$

그림 3.1은 축소 차수 관측기를 나타낸 그림이고, 그림 3.2는 축소차수 관측기를 이용한 귀환 제어 시스템이다.

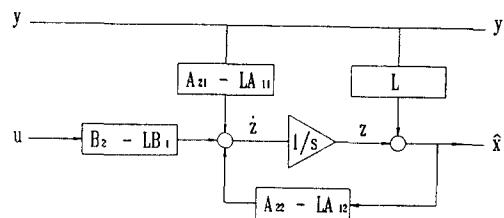


그림 3.1 축소차수 관측기

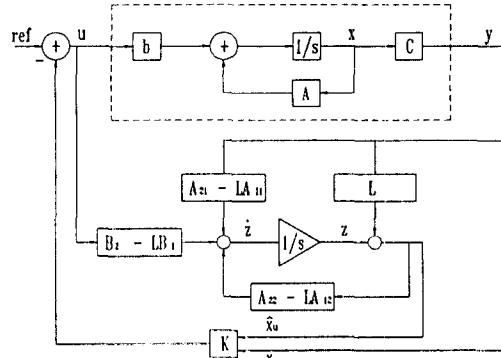


그림 3.2 축소차수 관측기를 이용한 귀환 제어시스템

관측기의 극점을 선정하는데 일반적으로 제어기의 극점보다 빠르게 해야한다. 그러나, 너무 빠르게 하면 큰 제어탕이 요구되며 잡음신호가 증폭될 수 있기 때문에 보통 제어기 극점보다 2배에서 6배 정도 빠르게 선정한다.<sup>[8]</sup> 관측기의 오차가 빨리 감소하면 전체 시스템 응답은 제어기의 대표극점을 영향을 받는다. 그런데, 잡음이 큰 문제가 될 경우 관측기의 극점을 제어기의 극점보다 두 배보다 느리게 해야 한다. 그러면 저주파의 에너지를 가지게 되어서 잡음을 줄일 수 있지만, 전체 시스템의 응답이 관측기의 극점에 영향을 받게 된다. 따라서 관측기의 극점을 적절히 선택하는 것이 문제가 된다.

본 논문에서 관측기를 구성할 때 전체 시스템에서 비선형 항을 제거한 선형 시스템으로 관측기를 구성했으며, 외란도 고려하지 않았는데 이는 외란성분이 오차신호 뒤쪽에 적분기를 설치함으로써 제거할 수 있기 때문이다.<sup>[9]</sup> 로보트 시스템의 상태

변수  $x_1, x_2$ 를 알고  $x_3, x_4$ 를 추정하므로 다음과 같이 전체 행렬을 식 (3.3)과 같이 분할하게 된다.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 4.8 & 0 & 0 \\ -139.89 & 0 & 666.67 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 72.83 & 0 & -349.58 & -61.27 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 21.697 \end{bmatrix}$$

축소차수 관측기는 첫 행렬을 식 (3.12)에 대입하면 다음과 같다.

$$z = \hat{x}_u - t y \quad (3.13)$$

$$\dot{z}(t) = (A_{22} - t A_{12}) \hat{x}_u + (A_{21} - t A_{11}) y(t) + (B_2 - t B_1) u(t)$$

$$\text{여기서 } A_{11} = \begin{bmatrix} 0 & 4.8 \\ -139.89 & 0 \end{bmatrix}, A_{12} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 666.67 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A_{21} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 72.83 & 0 \end{bmatrix}, A_{22} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -349.58 & -61.27 \end{bmatrix}$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}, B_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 21.697 \end{bmatrix}$$

첫 식을 풀어서 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} z_3 &= -666.67 t_3 \hat{x}_3 + \hat{x}_4 + 139.89 t_3 y_1 - 4.8 t_3 y_2 \\ z_4 &= (-349.58 - 666.67 t_4) \hat{x}_3 - 61.27 \hat{x}_4 \\ &\quad + (72.83 + 139.89 t_4) y_1 - 4.8 t_4 y_1 + 21.697 u(t) \end{aligned} \quad (3.14)$$

$$\begin{aligned} \hat{x}_3 &= z_3 + t_3 y_1 + t_3 y_2 \\ \hat{x}_4 &= z_4 + t_4 y_1 + t_4 y_2 \end{aligned}$$

관측기 귀환 이득 값  $t$ 을 구하는 과정은 다음 절에서 논하였다.

#### 4. 추적 제어기 설계

관측기와는 독립적으로 제어기를 설계할 수 있으므로 제어기를 설계하고, 관측기의 극점을 정할 때에 제어기의 극점을 알아내서 그 보다 빠른 극점을 선택해야 한다.

로보트 시스템이 추적해야 할 기준 입력은 다음과 같은 계단과 경사 입력으로 주어진다고 하자.

$$r(t) = at + b \quad (4.1)$$

앞의 기준입력의 추적을 위해서 (기준 입력의 차수 + 1)개 즉, 두 개의 적분기를 출력축에 추가시키고<sup>[9]</sup>, 이 두 상태변수를 귀환시킨다. 만약 다음과 같은 새로운 상태변수  $x_5, x_6$ 을 부가하면

$$x_5(t) = x_6(t) \quad (4.2)$$

$$x_6(t) = y(t) - r(t) = Cx(t) - r(t)$$

확장된 전체 시스템의 상태방정식은 아래와 같이 된다.

$$\dot{x}_a(t) = \begin{bmatrix} 0 & 4.8 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -139.89 & 0 & 666.667 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 72.87 & 0 & -349.577 & -61.27 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} x_a(t) \quad (4.3)$$

$$+ \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 21.697 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u_a(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} r(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ F(x_2) \\ 0 \\ 763.3F_m(x_4) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ 3.33 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} d(t)$$

여기서  $x_a$ 와  $u_a$ 는 확장된 시스템에서 다음과 같이 정의된다.

$$x_a = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5 \ x_6]^T \quad u_a = u \quad (4.4)$$

결국 시스템(2.2)의 상태방정식은 식(4.3)과 같이 확장된다.

만약 제어기  $u(t)$ 가 시스템(4.3)에서  $r(t)=d(t)=0$ 인 경우에 비선형부분( $F$ 와  $F_m$ )을 제거한 전체 선형 시스템을 안정시킬 경우, 똑같은 이득을 가진 제어기를  $d(t)=r(t)=0$ 인 원래의 비선형시스템(4.3)에 가하면 시스템은 전체적으로 점근적 안정하거나, 시스템 응답이 리미트 사이클을 가지게 된다.<sup>[9]</sup> 만약 시스템 응답이 리미트 사이클을 가질 경우 귀환 이득을 재조정하여 리미트 사이클을 제거할 수 있으면서, 또한 점근적으로 안정하도록 해야 한다.

먼저, 비선형 부분을 제거한 선형 시스템을 안정시킬 수 있는 제어기  $u_a(t) = -Kx_a(t)$ 를 구해야 한다.

성능지표(performance index)  $J$ 를 다음과 같이 정의 하자.

$$J = \int_0^{\infty} [x_a(t)^T Q x_a(t) + u_a(t)^T R u_a(t)] dt \quad (4.5)$$

이 때 귀환 이득 행렬  $K$ 는 Riccati 방정식을 풀어서 구할 수 있다. 임의의 가중행렬  $Q$ 와  $R$ 이 아래와 같다.

$$Q = \text{diag} [100 \ 0 \ 0 \ 0 \ 20000 \ 60] \quad R = 1 \quad (4.6)$$

성능지표  $J$ 를 최소화 시키는 귀환 이득  $K$ 는 다음과 같다.

$$K = [-3.378 \ 1.919 \ 91.941 \ 1.233 \ 139.524 \ 67.192] \quad (4.7)$$

관측기의 귀환 이득은 다음과 같은 방법으로 구하였다. 먼저, 제어기의 귀환 이득을 최적제어이론에 의해 구하고, 그에 따른 고유값을 구해서 제어기 극점을 찾아낸다. 관측기 극점은 제어기 극점보다 빠른 극점을 선정하여 식(3.9)과 (3.10)을 이용해  $t$ 을 구한다.

식(4.7)에서  $x_1, x_2, x_3, x_4$ 에 대한 귀환 이득  $-3.378, 1.919, 91.941, 1.233$  내 개에 대한 고유값을 구하면 다음과 같다.

$$\lambda = [ 55.368 \quad 20.791 \quad 5.932+j30.431 \quad 5.932-j30.431 ] \quad (4.8)$$

이 중 두 개 55.368과 20.791을 선택해서 5배하면서 아래와 같고, 이 극점은 제어기 극점보다 매우 빠르게 되어 전체 시스템의 응답은 제어기의 대표극점의 영향을 받게된다.

$$(S + 276.84)(S + 103.955) = 0 \quad (4.9)$$

이 극점을 사용해서 나온 관측기 귀환 이득 값은 다음과 같다.

$$k_3 = 0.479 \quad k_4 = 13.295 \quad (4.10)$$

그림 4.1은 로보트 시스템에 대해서 관측기를 통한 추정된 상태변수와 직접 측정된 상태변수를 제어기  $u_a(t) = -Kx_a(t)$ 와 합한 전체 로보트 구동 시스템이다.

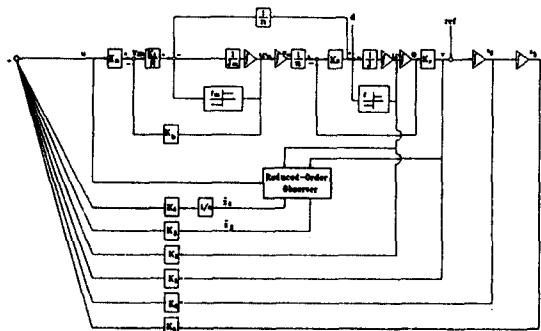


그림 4.1 축소차수 관측기 이용한 로보트 귀환 제어 시스템

그림 4.2와 4.3은 비선형 로보트 시스템에 이득 행렬(4.7)을 적용했을 경우의 응답이다. 경사응답은 오차없이 잘 추적하지만 계단응답은 리미트 싸이클이 생김을 알 수 있다. 따라서 귀환 이득을 재조정하여 리미트 싸이클의 크기를 충분히 줄이거나 제거해야 할 필요가 있다.



그림 4.2 이득 K에 대한 크기 0.1인 계단 응답

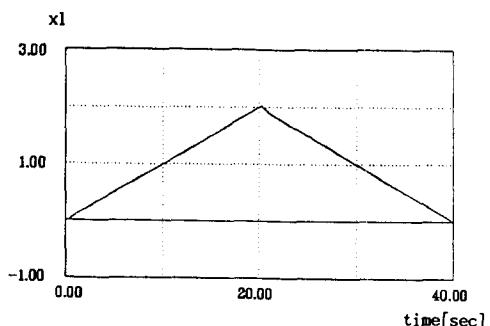


그림 4.3 이득 K에 대한 기울기 0.1인 경사응답

## 5. 모의 실험 결과 및 귀환 이득 조정

계단 입력인 경우 리미트 싸이클이 생기므로 귀환 이득을 조정하여 리미트 싸이클의 크기를 줄이거나 없애야 한다. 이러한 리미트 싸이클을 해석하기에 적합한 방법으로는 기술함수법을 이용하는 것인데, 로보트의 F관절 시스템의 경우 귀환 이득 중  $k_1$ 과  $k_4$ 은 크게하고  $k_3$ 은 작게하여 복소평면에서 비선형부분과 선형부분이 만나는 점을 가능한 멀리하여 리미트 싸이클을 제거할 수 있음을 보였다.<sup>[10]</sup> 물론 관측기를 구성했을 경우에 선형 부분이 달라지겠지만 이득의 변화에 따른 궤적의 변화의 경향은 비슷하라 예상하고 이득 값을 그 경향에 따라 다음과 같이 조정 했다.

$$K' = [ -3.0 \quad 1.919 \quad 91.941 \quad 1.233 \quad 110.0 \quad 90.0 ] \quad (5.1)$$

그림 5.1 ~ 5.7는 이득  $K'$ 를 갖는 귀환 시스템의 다양한 기준 입력 및 외란에 대한 시스템 응답들을 나타낸 것으로 정상상태에서 오차없이 잘 추적함을 보여주고 있다.

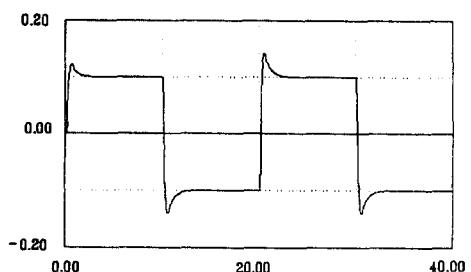


그림 5.1 크기 0.1인 계단입력의 응답

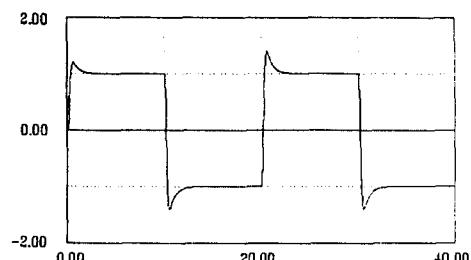


그림 5.2 크기 1.0인 계단입력의 응답

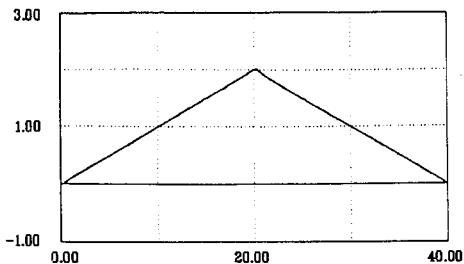


그림 5.3 기울기 0.1인 경사입력의 응답

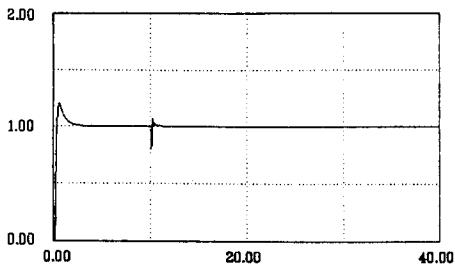


그림 5.4  $r(t)=1$  과  $t \geq 10$ 에서 외란  $d(t)=10$ 의 응답

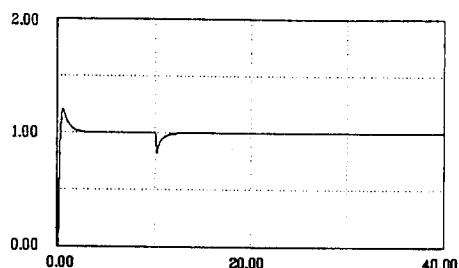


그림 5.5  $r(t)=1$  과  $t \geq 10$ 에서 외란  $d(t)=100t$ 의 응답

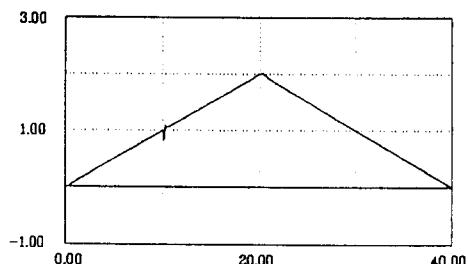


그림 5.6  $r(t)=0.1t$  와  $t \geq 10$ 에서 외란  $d(t)=10$ 의 응답

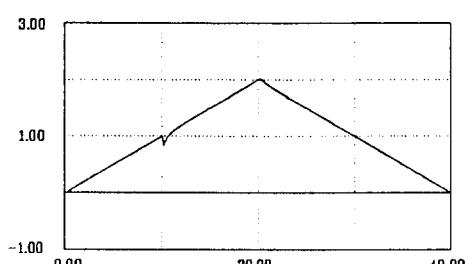


그림 5.7  $r(t)=0.1t$  와  $t \geq 10$ 에서 외란  $d(t)=100t$ 의 응답

## 6. 결론

모든 상태변수를 측정할 수 없는 로보트 시스템에서 최적 제어 이론을 적용하여 귀환 이득을 구하고 상태변수를 귀환시키려면 모든 상태변수들을 알아야 하므로 이를 해결하기 위해 축소 차수 관측기를 사용하여 측정 불가능한 상태변수를 추정하여 귀환 시켰다. 비선형 시스템에서 비선형 부분(콜통마찰)을 제거한 선형시스템에 대한 관측기를 구성하여 측정할 수 없는 상태벡터들을 추정하여 제어기를 설계하였다.

유연관절을 갖고 있는 로보트 시스템에 외란이 발생했을 때 주어진 계단이나 경사의 기준입력을 정상상태 오차없이 잘 추적할 수 있는 제어기 설계를 위해 원래의 비선형 로보트 시스템에 두 개의 적분기를 출력 쪽에 추가하여 외란의 영향을 배제시키고, 이 상태변수들을 귀환시켜 이루어졌다. 또한 강한 비선형 요소인 콜통 마찰로 인하여 로보트 시스템 응답에서 리미트 싸이클이 생기면 이득을 재조정함으로써 리미트 싸이클을 제거하였다.

측정 가능한 상태변수가 부하축의 위치와 속도가 아닌 위치 하나만 알고 나머지 상태를 관측하는 경우에도 본 논문에서 제안한 방법을 적용할 수 있다. 그러나, 센서 잡음에 의한 영향이 크다면 축소차수 관측기 보다는 총차수 관측기를 이용해 그 영향을 줄일 수 있으리라 생각된다.

## 참고 문헌

- [ 1 ] D.G.Luenberger, " An Introduction to Observer ", IEEE Trans Automt.contr, vol AC-16, NO.6, 1971
- [ 2 ] Yasuhiro Date, " Servo Motor and Motor Control Using Digital Signal Processors ", Prentice-Hall, 1990
- [ 3 ] Y.Date, " Digital signal processor-based variable structure control with observer for robot manipulator ", Proc.of the IECON'87(Cambridge, MA, U.S.A), Nov. 1987
- [ 4 ] H.Asada and J.J.e.Slotine, "Robot Analysis and Control", John Wiley & Sons, New York, 1986.
- [ 5 ] M.W.Spong, M.Vidyasagar, " Robot dynamics and control", John Wiley & Sons, Canada, 1989
- [ 6 ] Sweet,L.M. and Good,M.C., " Re-Definition of the Robot Motion Control Problem : Effects of Plant Dynamics, Drive System Constraints, and user Requirements, " Proc. 23rd IEEE Conf. on Decision and Contril, pp. 724-731, Las Vegas, Nov., Dec. 1984
- [ 7 ] M.C.Good, L.M.Sweet, and K.L.Strobel, " Dynamics Models for Control System Design of Integrated Robot and Drive Systems, " J.Dyn.Sys. Meas. and Control, Vol. 107, pp. 53-59
- [ 8 ] G.F.Franklin, J.D.Powell, " Feedback Control of Dynamic systems ", Addison Wesley, 1988
- [ 9 ] J.G.Kim, " Design of A Digital Tracking Controller For Non-Linear Sampled-Data Systems", Ph.D. Thesis, Electrical and Computer Engineering, University of Iowa, 1988.
- [ 10 ] 박 경진, 김 진걸, " 기술함수법을 이용한 로보트 제어기 설계 ", 춘계제어계측 학술회의 논문집, 1991