

## 구동력 계산법 및 $H_\infty$ 제어를 병용한 직접구동방식 머니플레이터의 궤적제어

김충기\*, 강봉수\*\*, 김수현\*\*\*, 곽윤근\*\*\*

### Robust Trajectory Control of Direct Drive Manipulator based on combining $H_\infty$ Controller and Computed Torque Method

C.K. Kim\*, B.S. Kang\*\*, S.H. Kim\*\*\* and Y.K. Kwak\*\*\*

#### ABSTRACT

Computed torque method has been used for precise trajectory control of the robotic system that involves nonlinear dynamics. It is hard to know exact values of robot system parameters, and the robot arm receives unpredictable interference from the working environment. These disturbances, especially in a direct drive robot, are directly transmitted to actuating motor without reduction. Modelling error and disturbance can cause significant errors in a trajectory tracking problem. In this paper, we propose a new controller that  $H_\infty$  controller is combined to robot system linearized by computed torque. Simulations are made for comparing the performance of the proposed controller with that of a nonlinear  $H_\infty$  controller proposed by Chen and also computed torque method.

**Key Words :** Direct Drive Manipulator (직접구동방식 머니플레이터), Modeling Error (모델링 오차), Disturbance (외란), Robust Control (강인제어),  $H_\infty$  Controller ( $H_\infty$  제어기)

#### 1. 서론

비선형성을 갖는 로봇의 빠르고 정확한 궤적제어를 위해서 로봇 동역학적 모델의 비선형항을 고려한 피드포워드(feedforward) 제어기 혹은 구동력계산법(computed torque method)을 이용한 제어기가 많이 사용되어왔다.<sup>(1)</sup> 그러나 로봇의 정확한 모델링이 어렵고, 로봇의 동역학적 모델을 구현한 후에도 시간이 경과함에 따라 실제

매개변수가 변하게 된다. 또한 수행작업에 따라 가변하중이 변하며, 작업 환경으로부터 외란을 받기 때문에 피드포워드 제어만으로는 정확한 궤적제어를 실현하기가 쉽지 않다. 특히 고속운동에 적합한 직접구동방식 로봇의 경우 로봇팔의 관성항이 감속비 없이 직접 모터에 작용한다. 따라서 정밀한 위치제어를 수행하기 위해서는 모델링 오차와 외란의 영향을 최소화할 수 있는 강인한 제어기가 필요하다. 최근 선형 시스템에는  $H_\infty$  이론을 이용한 강인

\* 한국과학기술원 기계공학과 (석사과정)  
\*\* 한국과학기술원 기계공학과 (박사과정)  
\*\*\* 한국과학기술원 기계공학과 (정회원)

한 제어기가 많이 이용되어 좋은 성능을 보여주고 있으나 로봇과 같은 비선형성을 갖는 시스템에서는  $H_\infty$  제어기의 해를 구하기 어렵기 때문에 이에 대한 연구는 많이 이루어지지 않았다.<sup>(2)</sup>

본 논문에서는 로봇의 동역학적 모델을 이용한 구동력 계산법과 비교적 해를 구하기 용이한 선형  $H_\infty$  제어기<sup>(3)</sup>를 이용하여 모델링 오차 및 외부외란에 강인한 새로운 구조의 복합 제어기를 제안한다. 본 제어기는 먼저 구동력 계산법에 의하여 빠르고 정확한 궤적추종을 하게되며, 구동력 계산법에서 완전히 제거하지 못한 오차는 선형  $H_\infty$  제어기에 의하여 감소시킴으로써 모델링 오차 및 외부외란에 대하여 강인성을 가지게 된다. 그리고 이와 같이 제안된 복합 제어기를 직접구동방식 SCARA형 로봇인 KIRO-3 모델에 적용하여 그 해를 구하였으며, 여러 조건하에서 전산모의실험을 통해 궤적제어를 수행함으로써 그 성능을 고찰하였다. 또한 다른 제어기와의 비교분석을 위하여 비선형  $H_\infty$  제어기 그리고 구동력 계산법을 이용한 제어기에 대해서 같은 조건으로 전산모의 실험을 수행하였다.

2. 이론

2.1 구동력 계산법을 이용한 제어기

비선형 시스템을 제어함에 있어 역동역학식(inverse dynamics)을 이용한 피드포워드 제어신호를 시스템에 가하고 응답오차를 이용한 궤환(feedback)제어기를 추가하는 방법을 구동력 계산법<sup>(4)</sup>이라 한다. 이 제어방식은 연성이 심한 비선형 동역학식을 상쇄시켜 연성되지 않은 간단한 선형 시스템으로 만들어 주는 장점이 있어 로봇제어에서 많이 사용되나, 모델에 기초한 제어 방식이기 때문에 모델링 오차 및 외부외란이 존재할 때에는 응답 성능이 나빠진다.

$q_r$ 을 기준궤적,  $q$ 를 실제 위치라 하면 위치, 속도 및 가속도 오차는 각각 식 (1)과 같다.

$$e = q_r - q, \dot{e} = \dot{q}_r - \dot{q}, \ddot{e} = \ddot{q}_r - \ddot{q} \quad (1)$$

모델링한 동역학 행렬을  $M_0(q), C_0(q, \dot{q}), G_0(q)$ 이라 정의하고 실제 동역학 행렬을  $M(q), C(q, \dot{q}), G(q)$ 이라 하면, 라그랑지(Lagrange) 방법을 이용하여 구한 로봇의 일반적인 동역학식<sup>(5)</sup>은 식 (2)와 같다. 이때,  $M(q)$ 는 관성항,  $C(q, \dot{q})\dot{q}$ 은 코리올리력, 원심력 및 접

성마찰항,  $G(q)$ 는 중력항이다.

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau \quad (2)$$

제어입력  $u$ 를 식 (3)과 같이 정의하면

$$u = \ddot{q}_r + M_0^{-1}(C_0 + G_0 - \tau) \quad (3)$$

구동력 계산법을 이용한 제어법칙은 식 (4)가 된다.

$$\tau = M_0 (\ddot{q}_r - u) + C_0 + G_0 \quad (4)$$

$W_d$ 라는 외부외란 존재시 제어입력  $u$ 로 비례미분 제어를 사용하면, 즉  $u = -K_p e - K_v \dot{e}$ 이면, 식 (2)와 식 (4)에서 오차방정식은 식 (5)가 된다.

$$\ddot{e} + K_v \dot{e} + K_p e = M_0^{-1}[(M - M_0)\ddot{q} + (C - C_0) + (G - G_0)] + M^{-1}W_d \quad (5)$$

전체외란  $d$ 를 식 (6)과 같이 정의하면

$$M_0^{-1}[(M - M_0)\ddot{q} + (C - C_0) + (G - G_0)] + M^{-1}W_d = d \quad (6)$$

오차방정식은 식 (7)과 같이 된다.

$$\ddot{e} + K_v \dot{e} + K_p e = d \quad (7)$$

윗 식에서 구동력 계산법을 이용한 제어기 사용시 모델링 오차 또는 외부외란이 존재하면 정상상태 오차가 발생하게 됨을 알 수 있다. 로봇에 적용된 구동력 계산법을 이용한 제어기를 블럭선도로 나타내면 Fig. 1과 같다.

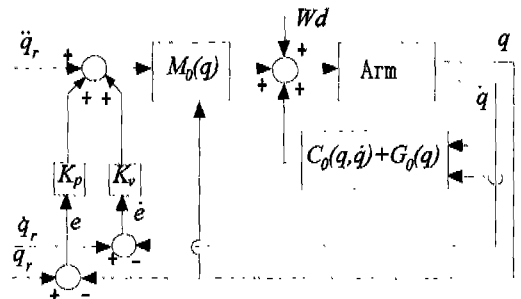


Fig.1 Block diagram of computed torque method in robot system

2.2 복합제어기

2.2.1 선형  $H_\infty$  제어기의 개요

선형  $H_\infty$  제어시스템의 일반적인 구조는 Fig. 2와 같다.<sup>(6)</sup>

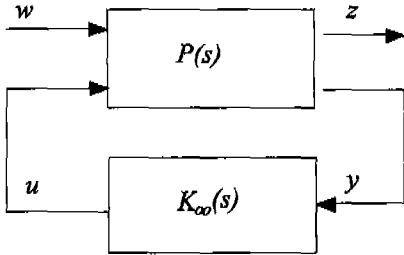


Fig. 2 Two port diagram of linear  $H_\infty$  control system

$P(s)$ 는 플랜트이고  $K_\infty(s)$ 는  $H_\infty$  제어기이다.  $w$ 는 외란, 센서 잡음, 기준입력과 같은 외부입력을 나타내고  $z$ 는 오차, 제어입력, 출력과 같은 조정되어야 할 변수를 나타낸다.  $u$ 는 제어입력이고  $y$ 는 측정된 출력이다. 이 시스템을 상태 공간식으로 나타내면 식 (8)이 되고 전달함수로 나타내면 식 (9)가 된다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + B_1w + B_2u \\ z &= C_1x + D_{11}w + D_{12}u \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} y &= C_2x + D_{21}w + D_{22}u \\ P_{zw} &= C_1(sI - A)^{-1} B_1 + D_{11}, \\ P_{zu} &= C_1(sI - A)^{-1} B_2 + D_{12}, \\ P_{yw} &= C_2(sI - A)^{-1} B_1 + D_{21}, \\ P_{yu} &= C_2(sI - A)^{-1} B_2 + D_{22} \end{aligned} \quad \text{이면,}$$

$$\begin{bmatrix} z \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{zw} & P_{zu} \\ P_{yw} & P_{yu} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ u \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$u = Ky$$

$P_{zw}$ ,  $P_{yw}$ ,  $P_{zu}$ ,  $P_{yu}$ 는 입력  $w, u$ 에서 출력  $y, z$ 로의 전달함수이다.

외란  $w$ 에서 조정되어야 할 변수  $z$  사이의 폐회로 전달함수  $T_{zw}$ 는 식 (10)처럼 된다.

$$z = T_{zw}w \quad (10)$$

여기서  $T_{zw} = P_{zw} + P_{zu} K(I - P_{yu}K)^{-1} P_{yw}$ 이다.

$T_{zw}$ 는 LFT(linear fractional transformation)이라 한다.  $H_\infty$  제어의 목적은 전체외란이 오차에 미치는 영향을 최소화 하는 것이므로, 결국 전체 시스템을 안정화시키면서 LFT를 최소화하는 제어기를 설계하면 된다. 그러나 LFT를 정확히 최소화하는 제어기를 구하는 것은 어렵기 때문에 식 (11)과 같이  $\gamma$  이내로 LFT를 줄여주는 제어기를 설계하게 된다.

$$\|T_{zw}\|_\infty < \gamma \quad (11)$$

이 때  $\gamma$ 의 역수는 Small Gain Theorem에 의해 시스템이 안정성을 유지할 수 있는 덧셈형 모델링 오차 (additive modeling error) 및 외부외란의 상한값을 의미하게 된다.<sup>(7)</sup>

2.2.2 복합 제어기의 구조

식(7)에서 로봇에 구동력 계산법을 이용한 제어기를 사용하면 모델링 오차 및 외부외란이 존재할 때는 정상상태 오차가 발생한다는 것을 보였다. 이러한 단점을 보완하기 위해, 구동력 계산법을 이용한 제어에 의해 선형시스템이 된 오차방정식에 강인제어기인 선형  $H_\infty$  제어기를 추가하여, 이중 포트 다이어그램으로 간단하게 나타내면 Fig. 3과 같이 예측된 매개변수를 가진 플랜트에 기준입력  $r$ 과 외란  $d$ 가 가해지는 구조를 갖는다.

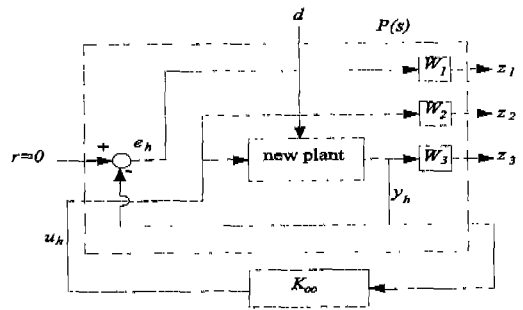


Fig. 3 Two port diagram of computed torque plus linear  $H_\infty$  controller in robot system

제어 법칙은  $\tau = M_0(q)(\ddot{q}_r + K_v \dot{e} + K_p e + u_h) + C_0(q, \dot{q}) + G_0(q)$ 이며 결국 이 제어문제는 식 (7)인 시스템에서 전체외란  $d$ 의 영향을 최소화 하는 문제로 귀결된다. Fig. 3에서 기준입력  $r$ 은 0이고,  $H_\infty$  제어입력은  $u_h$ 이며,  $e_h$ 는  $-e$ 이다. 조정되어야 할 제어변수  $z_1, z_2, z_3$ 와 전달함수  $P(s)$ 는 각각 식 (12) 및 식 (13)과 같다.

$$z_1 = W_1 e_h \quad z_2 = W_2 u_h \quad z_3 = W_3 y_h \quad (12)$$

$$P_{zw} = \begin{bmatrix} W_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad P_{zu} = \begin{bmatrix} -W_1 G_{np} \\ W_2 \\ W_3 \quad G_{np} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$P_{yw} = [I], \quad P_{yu} = [-G_{np}]$$

$G_{np}$ 는 식 (7)인 시스템의 전달함수이고  $W_1, W_2, W_3$ 는 시스템의 성능을 개선하기 위해 취하는 가중치 함수이며, 이 함수들의 시스템 행렬은 식 (14)와 같은 형태이다.

$$G_{np} = \begin{bmatrix} A_{np} & B_{np} \\ C_{np} & D_{np} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$W_1 = \begin{bmatrix} A_{W1} & B_{W1} \\ C_{W1} & D_{W1} \end{bmatrix}, \quad W_2 = \gamma_2, \quad W_3 = \begin{bmatrix} A_{W3} & B_{W3} \\ C_{W3} & D_{W3} \end{bmatrix}$$

본래의 시스템과 가중치함수를 포함한  $P(s)$ 를 식 (8)로 표현할때의 시스템 행렬은 식 (15)와 같이 된다.

$$A = \begin{bmatrix} A_{np} & 0 & 0 \\ -B_{W1}C_{np} & A_{W1} & 0 \\ B_{W3}C_{np} & 0 & A_{W3} \end{bmatrix}, \quad B_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ B_{W1} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad B_2 = \begin{bmatrix} B_{np} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$C_1 = \begin{bmatrix} -D_{W1}C_{np} & C_{W1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ D_{W3}C_{np} & 0 & C_{W3} \end{bmatrix}, \quad C_2 = [-C_{np} \quad 0 \quad 0] \quad (15)$$

$$D_{11} = \begin{bmatrix} D_{W1} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad D_{12} = \begin{bmatrix} 0 \\ \gamma_2 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad D_{21} = [I], \quad D_{22} = [0]$$

sensitivity matrix  $S$ 와 complementary sensitivity matrix  $T$ 는 식 (16)과 같이 정의된다.

$$S = (I + G_{np}K_{\infty})^{-1}, \quad T = G_{np}K_{\infty}/(I + G_{np}K_{\infty})^{-1} \quad (16)$$

따라서 LFT는 식 (17)과 같이 간단히 표현된다.

$$T_{zw} = \begin{bmatrix} W_1 S \\ W_2 K_{\infty} S \\ W_3 T \end{bmatrix} \quad (17)$$

결국 위의 LFT가  $\|T_{zw}\|_{\infty} < \gamma$ 의 조건을 만족하고, 시스템 응답이 만족스런 결과를 얻도록  $K_{\infty}, W_1, W_2,$  및  $W_3$ 를 설계해야 한다.

### 3. 전산모의실험

#### 3.1 KIRO-3 로봇

전산모의실험을 위한 모델로는 고강성 탄소섬유 에폭시 복합재료로 만들어진 4자유도 SCARA형 직접구동방식 KIRO-3 로봇을 이용하였다.<sup>18)</sup> 1축 및 2축 구동 모터가 모두 몸체에 붙어 있고 두번째 팔은 폴리와 벨트에 의해 로봇 몸체에 있는 2축 모터에 의해 구동되므로 속도에 관련된 비선형항에 코리올리(Coriolis)항이 없어지게 된다. 모터의 최대 구동 토크는 14.12 Nm 이고 로봇의 최대 가반하중은 2kg이다. 본 논문에서는 로봇의 1, 2축 관절만 고려하였고 KIRO-3 로봇의 모델링과 좌표는 Fig. 4에 나타나 있다.

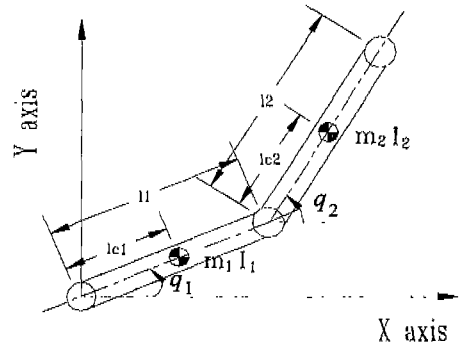


Fig. 4 Generalized coordinates and system parameters of KIRO-3 robot

이 로봇의 1, 2축만 고려한 동역학식과 매개변수 행렬은 각각 식 (18) 및 식 (19)와 같다.

$$\tau_1 = m_{11}\ddot{q}_1 + m_{12}C_{21}\ddot{q}_2 - m_{12}S_{12}\dot{q}_2^2$$

$$\tau_2 = m_{12}C_{21}\ddot{q}_1 + m_{22}\ddot{q}_2 + m_{12}S_{12}\dot{q}_1^2 \quad (18)$$

$$m_{11} = m_1 l_{c1}^2 + m_2 l_1^2 + I_1$$

$$m_{12} = m_2 l_1 l_{c2}$$

$$m_{22} = m_2 l_{c2}^2 + I_2$$

$$C_{21} = \cos(q_2 - q_1)$$

$$S_{21} = \sin(q_2 - q_1)$$

$$M_0 = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12}C_{21} \\ m_{12}C_{21} & m_{22} \end{pmatrix} \quad C_0 = m_{12}S_{21} \begin{pmatrix} 0 & -\dot{q}_2 \\ \dot{q}_1 & 0 \end{pmatrix} \quad (19)$$

시스템 매개변수값은 Table.1에 나타나 있다.

Table.1 System Parameters of KIRO-3 robot

	1st Arm	2nd Arm
길이 (m)	0.32 ( $l_1$ )	0.32 ( $l_2$ )
관성모멘트 ( $Kg \cdot m^2$ )	0.068 ( $I_1$ )	0.0715 ( $I_2$ )
질량 (Kg)	4.25 ( $m_1$ )	3.614 ( $m_2$ )
축에서 팔의 무게 중 심까지의 거리 (m)	0.0623 ( $l_{c1}$ )	0.124 ( $l_{c2}$ )

### 3.2 복합 제어기 설계

외란과 기준입력은 주로 작은 주파수를 가지기 때문에, 외란제거 및 기준입력의 정확한 추종을 위해서는 저주파 범위에서 sensitivity matrix S가 작아야 한다. 반면에 고주파 성분을 가지는 센서잡음을 줄이기 위해서는 고주파 범위에서 complementary sensitivity matrix T가 작아야 한다. 가중치 함수를 이용하여 오차가 작아지도록 루프셰이핑(loop shaping)하면 식 (20)을 만족해야 한다.

$$\frac{1}{\sigma(S(jw))} \geq |W_1(jw)|, \quad \sigma(T(jw)) \leq |W_3^{-1}(jw)| \quad (20)$$

가중치 함수의 선택은 설계패키지 (Matlab Robust Control Toolbox)를 이용한 전산모의실험을 통해 이루어졌다. 식 (7) 시스템의  $H_\infty$  제어를 위하여 최종적으로 선택된 가중치 함수는 식 (21)에 나타나 있고,

$$W_1(s) = \frac{1}{5} \frac{s+1}{s+1}, \quad W_2(s) = 1 \times 10^{-7}, \quad W_3(s) = \frac{1}{10000} \frac{s+1}{s+1} \quad (21)$$

이에 따라 설계된  $H_\infty$  제어기  $K_\infty(s)$ 는 식 (22)와 같다.

$$K_\infty(s) = \frac{14.39s^3 - 6.463 \times 10^4 s^2 - 2.5727 \times 10^{18} s - 1.253 \times 10^{19}}{s^4 + 1.974s^3 + 1.438 \times 10^8 s^2 + 2.575 \times 10^{11} s + 1.284 \times 10^{12}} \quad (22)$$

### 3.3 전산모의실험 과정

복합제어기의 궤적 추종 성능을 평가하기 위하여 전산모의 실험을 수행하였다. 또한 동일한 시스템과 환경내에서 다른 제어기와 비교평가를 위하여 구동력 계산법만 사용하는 경우와 비선형  $H_\infty$  제어기를 사용하는 경우에 대해서도 전산모의 실험을 수행하였다. 구동력 계산법을 이용한 제어기에 사용하는 궤환 이득(feedback gain)  $K_p, K_v$ 는 가반하중이 없는 경우 응답특성을 가장 좋게 하는 값을 선택하였다. 그리고 비선형  $H_\infty$  제어기로는 최근에 발표된 Chen<sup>(2)</sup>의 알고리즘을 사용하였다.

전산모의 실험시 샘플링 시간은 0.15ms 이고 위치와 속도는 런지쿠타(Runge Kutta) 방법을 이용하여 산출하였다. 기준궤적은 로봇의 궤적추종 성능과 위치제어 성능을 평가하기 위하여 다음과 같은 두 가지 형태의 궤적을 선택하였다.

$$\text{궤적 1 : } \begin{aligned} q_{r1} &= 0.4 \sin 5t \\ q_{r2} &= 0.7 \sin 5t \end{aligned}$$

$$\text{궤적 2 : } \begin{aligned} q_{r1} &= 0.5(1 - e^{-5t} - 5e^{-5t}) \\ q_{r2} &= 1 - e^{-5t} - 5e^{-5t} \end{aligned}$$

제어기의 강인성을 알아보기 위해 모델링 오차와 외부외란을 여러가지 경우로 변화시켜 전산모의실험을 수행하였다. 로봇팔의 질량오차 최대 예상치를 20%로 하고, 외부외란 최대 예상치는 모터 토크의 10%인 1.40Nm로 정하였다. 모델링 오차로는, 1, 2축 질량 증가, 가반하중 변동 및 가반하중에 따른 관성 모멘트 변동을 아래와 같이 여러 경우로 나누어서 설정했다. 궤적 추종 성능을 RMS(Root Mean Square) 궤적오차로 평가하기 위해 궤적 1의 각 경우에 대한 전산모의실험에서는 외부외란을 포함시키지 않았다.

- 궤적 1 case 0 : 질량 증가 0% , 가반하중 0.0kgf
- case 1 : 질량 증가 5% , 가반하중 0.5kgf
- case 2 : 질량 증가 10% , 가반하중 1.0 kgf
- case 3 : 질량 증가 15% , 가반하중 1.5kgf
- case 4 : 질량 증가 20% , 가반하중 2.0kgf

- 궤적 2 case 0 : 질량 증가 0% , 가반하중 0.0kgf , 외부외란 0.00 Nm
- case 1 : 질량 증가 5% , 가반하중 0.5kgf , 외부외란 0.35 Nm
- case 2 : 질량 증가 10% , 가반하중 1.0kgf , 외

부외란 0.70 Nm

case 3 : 질량 증가 15% , 가반하중 1.5kgf ,  
외부외란 1.05 Nm

case 4 : 질량 증가 20% , 가반하중 2.0kgf ,  
외부외란 1.40 Nm

따라서 3가지의 제어기를 가지고 각각 5가지 시스템의 환경변화에 대해서 2가지 궤적을 추종하도록 전산모의 실험을 수행하였다.

### 3.4 전산모의실험 결과

Fig. 5 의 (a),(b),(c)는 기준궤적 1에 대해 세가지 제어기로 제어시, 각 경우에 따른 1축의 처음 4초간의 과도상태 궤적오차를 나타낸다. 세가지 제어기 사용시 모두 모델링 오차의 증가에 따라 궤적추종 오차가 증가하는 것

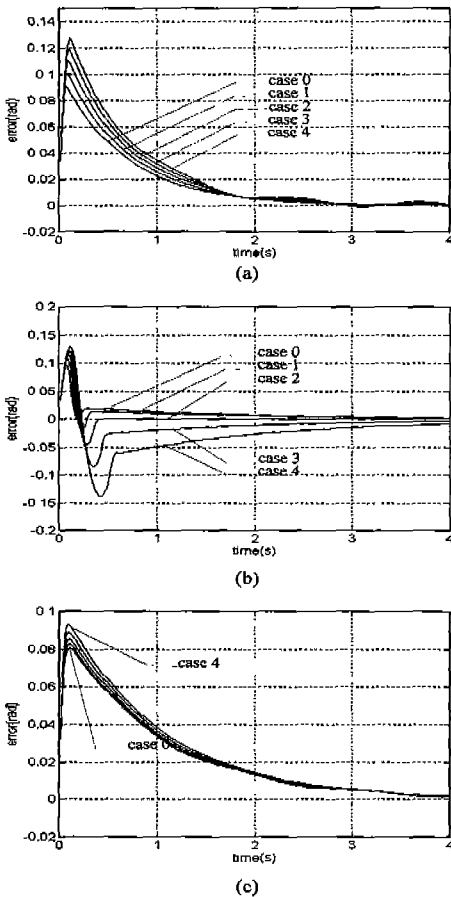


Fig. 5 Tracking error of 1st Arm about reference trajectory 1 in transient period using (a) computed torque method, (b) linear  $H_{\infty}$  controller and (c) nonlinear  $H_{\infty}$  controller

을 보이고 있다. 그러나 오버슛(overshoot), 상승시간, 정착시간은 사용하는 제어기에 따른 차이가 크지 않다.

Fig. 6은 기준궤적 1에서 세가지 제어기를 각각 사용했을 때 1축 팔의 정상상태 오차의 RMS값을 모델링 오차 증가에 따라 나타낸 것이다. 구동력 계산법을 이용한 제어기는 모델링 오차의 증가에 따라 정상상태 오차가 급격히 증가하나  $H_{\infty}$  제어를 이용한 다른 두 제어기는 별 변화를 보이지 않고 있다. Fig. 7은 기준궤적 2를 추종했을 시 1축 팔의 정상상태 오차를 모델링 오차 및 외부외란의 증가에 따라 나타낸 것이다. 이 경우에도 구동력 계산법을 이용한 제어기보다는 다른 두 제어기가 강인성 면에서 우수한 성능을 보이고 있음을 알 수 있다.

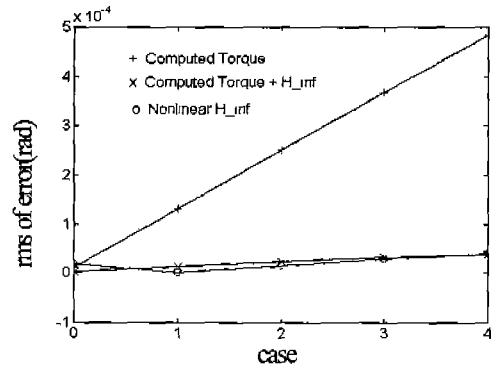


Fig. 6 RMS values of steady state error of 1st Arm about reference trajectory 1 in case 0,1,2,3,4 with three kinds of controller

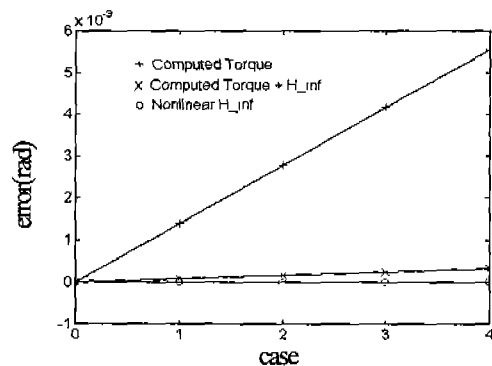


Fig. 7 Steady state error of 1st Arm about reference trajectory 2 in case 0,1,2,3,4 with three kinds of controller

Fig. 8의 (a),(b)는 기준 궤적 1일때 case 0과 case 4의 경우에 대하여 세가지 제어기의 1축에 입력되는 토크

크를 나타낸 것이다. 이 논문에서 제안된 복합제어기는 전이구간에서만 큰 제어입력을 필요로 하며, 정상상태 구간에서는 세 제어기가 동일한 제어입력을 보였다. 또한, (a)와 (b)를 비교하면 모델링 오차가 증가할 수록 전이구간이 길어질뿐 아니라 많은 제어입력이 필요함을 보여주고 있다.

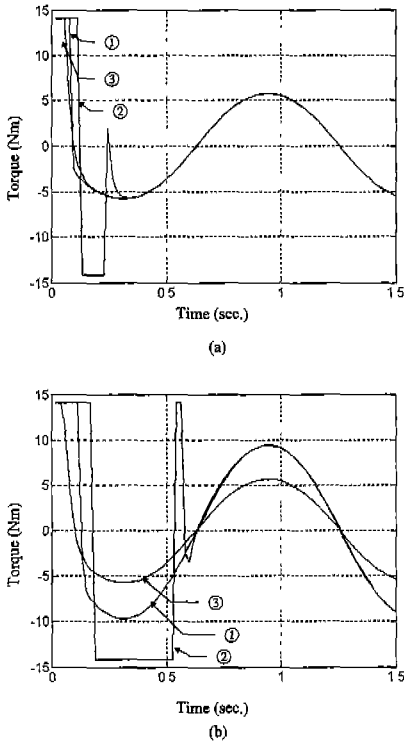


Fig. 8 Torque of joint 1 in reference trajectory 1 (a) case0, (b)case4

①: Computed Torque Control, ②: Combined Control, ③: Nonlinear  $H_\infty$  Control

#### 4. 결 론

본 논문에서는 로봇의 정확한 궤적제어를 위해, 구동력 계산법을 이용한 제어기와,  $H_\infty$  제어이론을 이용하여 로봇의 매개변수 변화 및 외부외란에 대해서 강인성을 갖는 복합 제어기를 제안하고 설계하였다. 제안된 복합 제어기는 구동력 계산법에 의해 로봇의 선형화된 오차방정식을 구하고, 이 오차방정식에 Glover와 Doyle이 제안한 선형  $H_\infty$  제어기를 추가해주는 구조를 갖는다.

직접구동방식 KIRO-3로봇에 본 논문에서 제안된 복합

제어기와 비선형  $H_\infty$  제어기를 적용한 결과 매개변수 변화와 외부외란의 영향에 상관없이 우수한 궤적추종성능을 보여주었다. 반면에 구동력 계산법만을 이용한 제어는 외부외란의 영향에 의해서 성능이 떨어지는 단점을 보였다.

본 논문에서 제안된 복합 제어기와 비선형  $H_\infty$  제어기는 강인성 면에서는 비슷한 성능을 보이지만, 비선형  $H_\infty$  제어기는 모델의 비선형항이 복잡해짐에 따라 제어기의 해를 구하기가 어려워지는 단점이 있는 반면, 제안된 복합 제어기는 모델이 복잡하더라도 구동력 계산법에 의해 선형화된 오차방정식을 구하게 되면, 이를 이용하여 용이하게  $H_\infty$  제어기를 구현할 수 있다는 장점이 있다.

#### 참 고 문 헌

1. An, C. H. , Atkeson, C. G. and Hollerbach, J. H., *Model based control of a robot manipulator*, MIT press, pp.101-111, 1988.
2. Chen, B. S and Lee, T. S., "A nonlinear  $H_\infty$  control design in robotic systems under parameter perturbation and external disturbance," *Int. J. of Control*, vol.59, no.2, pp. 439-361, 1994
3. Doyle, J. C. and Glover, K., "State space solutions to standard  $H_2$  and  $H_\infty$  control problem," *IEEE Trans. on Auto. Contr.* vol. 34, pp. 831-847, 1989.
4. Lewis, F. K., Abdauha, C. T. ,and Dawson, D. M., *Control of robot manipulators*, Macmillan , 1993.
5. Spong, M. W. and Vidyasagar, M. , *Robot dynamics and control* , Wie Wiley, pp.141-143, 1989.
6. Francis, B. A., *A course in  $H_\infty$  control theory* , *Lecture notes in control and information science*, 1988.
7. Grace, A. and Laub, A. J., *MATLAB Toolbox : Robust control* , Math works, pp. 36-44, 1992.
8. Hong, Y. S. , Kim, S. H. , Park, K. H. , and Kwak, Y. K. , "Development and application of dynamic model for SCARA type direct drive robot system," *ISPE / IEE / IFAC Int. conf. on CAD / CAM* , Robotics & factories of the future cars & FOF , 1995.