

〈論 文〉

## 직접구동 평면 다관절 로봇의 동역학적 모델에 따른 피드포워드 제어의 실험적 평가

홍윤식\* · 강봉수\* · 김수현\*\* · 박기환\*\*\* · 곽윤근\*\*

(1995년 6월 19일 접수)

### Experimental Evaluation of Feedforward Control Based on the Dynamic Models of A Direct Drive SCARA Robot

Y. S. Hong, B. S. Kang, S. H. Kim, K. H. Park and Y. K. Kwak

**Key Words :** Simulation(시뮬레이션), Robotics(로봇공학), Transfer Function(전달함수), Direct Drive Robot(직접구동방식 로봇), SCARA Robot(평면 다관절 로봇), Dynamic Model(동역학적 모델), Model Based Control(모델에 기초한 제어)

#### Abstract

A SCARA type direct drive robot which can be used in the assembly operation was designed and manufactured. Graphite fiber epoxy composite material was used in the fabrication of the robot arm structure in order to improve the speed of the robot arm with a high damping effect. For model-based control and sensitivity analysis of system parameters, the dynamic model of robot arm and drive servo amplifier system has been developed. Most of system parameters were measured directly, and some simplified parameters such as equivalent gains of PWM driver and velocity gains of servo system were estimated from frequency response tests. The complete dynamic model for overall robot system was used in the simulation of the open-loop control. The simulation results agreed reasonably well to the experimental results. The feedforward control using the dynamic models improved the trajectory tracking performance, decreasing the tracking error by factor of three compared with PID control. This study found that the inverse dynamic model of the robot arm including the drive servo system showed better performances than the case of arm dynamic model only.

#### 1. 서 론

로봇의 정확한 위치제어를 수행하기 위해서 전형적인 비례적분 미분제어방법부터 로봇의 정확한 모델에 기초한 피드포워드 제어방법에 이르기까지

많은 제어 알고리즘이 개발되어 왔다. 그러나 대부분의 산업용 로봇이 기어 혹은 하모닉 드라이브 등의 감속장치를 채택함으로써, 로봇운동은 로봇팔의 동역학적 특성변화에 큰 영향을 받지 않는다. 따라서 로봇의 정확한 위치제어를 수행하기 위해서 동역학적 모델에 기초한 피드포워드 제어방법이 실제 로봇에 적용된 사례는 드물다. 이러한 감속장치 채택에서 발생하는 문제인 백래쉬, 동력 전달장치에서의 마찰과 마모, 그리고 비교적 느린 로봇팔의

\*한국과학기술원 기계공학과

\*\*회원 한국과학기술원 기계공학과

\*\*\*회원, 광주과학기술원 기전공학과

운동속도 등의 단점을 극복하기 위하여 직접구동방식 로봇의 개발에 대한 연구가 많이 이루어지고 있다.<sup>(1,2)</sup> 그러나 직접구동방식 로봇은 로봇팔의 비선형적인 동역학적 특성이 로봇운동에 큰 영향을 주고 있다. 특히 급가감속, 고속운동에서 이러한 영향이 더욱 증가하게 되어 연속적인 궤적 추종과 같은 문제에서는 로봇팔의 동역학적 특성을 고려한 제어 시스템의 설계가 요구된다.

실제 시스템의 동적거동을 예측할 수 있는 동역학적 모델을 개발하면 로봇의 동특성 해석, 시스템의 매개변수에 대한 민감도 해석에 의한 시스템의 성능향상 및 모델에 기초한 제어를 통해 실제 시스템의 제어성능을 향상시킬 수 있다.<sup>(3)</sup>

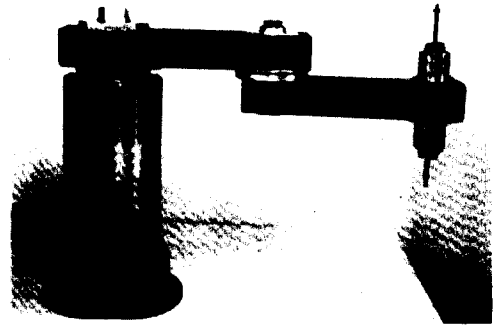
이 논문은 본 연구실에서 설계 및 제작한 직접구동방식 수평 다관절형 로봇의 동역학적 모델을 개발하고 이에 대한 응용을 예시한다. 모델링은 로봇팔과, 증폭기와 모터의 조합으로 이루어진 구동시스템에 대하여 나누어 수행하였다. 동역학적 모델의 매개변수는 로봇제작시 대부분 직접 측정하였거나 모터의 명세서로부터 구하였고, 펄스폭 변조(PWM) 증폭의 이득이나 속도 제한이득은 주파수 응답실험을 통해 추정하였다. 동일한 정현파 전압 입력에 대한 실제 로봇 시스템과 동역학적 모델의 동적거동을 비교하여 동역학적 모델의 타당성을 입증하였다. 또한 로봇팔의 동역학적 모델 및 구동시스템이 포함된 전체의 동역학적 모델을 이용한 피드포워드방법(feedforward method)과 단순한 PID 제어방법을 실제 로봇 시스템에 적용하여 위치제어를 수행하고 궤적 추종성능을 비교하였다.

## 2. 동역학적 모델의 개발

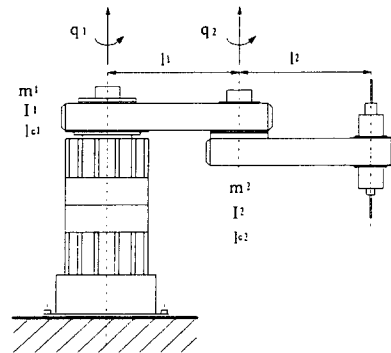
로봇 시스템의 동역학적 모델을 개발하기 위해서, 먼저 총괄 매개변수(lumped parameter)에 의한 물리적 모델을 구성하고, 그에 대한 수학적 모델인 운동방정식을 유도한 후, 모델의 미지 매개변수가 있을 경우 실험을 통해 그 값을 추정한다. 그리고 완성된 운동방정식으로부터 예상할 수 있는 시스템의 동적거동과 실험에 의한 실제 시스템의 동적거동을 비교하여 모델의 타당성을 검증한다.

### 2.1 KIRO-3 평면 다관절 직접구동방식 로봇

Fig. 1은 본 연구실에서 설계, 제작한 직접구동방식 평면 다관절 로봇(이하 KIRO-3 로봇)의 사진



(a) Photograph of KIRO-3 robot



(b) Schematic diagram KIRO-3 robot

Fig. 1 KIRO-3 SCARA type direct drive robot

및 개략도이다.<sup>(1)</sup> 로봇팔은 산업용 로봇에 주로 사용되는 알루미늄에 비하여 비강성(specific modulus)이 5배 이상 크고 구조 감쇠가 10배 정도 높은 탄소섬유 에폭시 복합재료를 사용하여 팔의 무게와 관성모멘트를 감소시키고, 고유진동수를 2배 이상 향상시켰다.<sup>(2)</sup> 두번째 팔의 구동모터는 고정된 몸체(첫번째 팔의 구동모터 하단)에 부착하여 1축 모터의 부하 토크를 줄였고, 백래쉬 영향을 최대한 줄일 수 있는 스틸 벨트로 동력을 전달하도록 하였다. KIRO-3 로봇의 팔을 구동하기 위한 두개의 모터는 무접점 직류모터(Inland RBE-03006-A-50)로 최대 연속출력이 약 466 W이다. 손목부분(wrist mechanism)의 구조는 수직운동을 위한 볼스크류(ball screw)와 회전운동을 위한 볼부시(ball bush)로 구성되어 있고 구동모터는 무접점 직류모터(Inland RBE-00700)로 최대 연속출력이 약 26 W이다.

또한 브러쉬없는 직류전동기를 구동하기 위해 레

줄버를 이용한 고정밀도위치 검출회로, IGBT (insulated gated bipolar transistor)를 이용한 인버터 그리고 전류의 오차를 최소화하는 전류제어 시스템 등이 구동증폭기(drive amplifier)를 이루고 있다.

2.2 로봇팔의 동역학적 모델

KIRO-3 로봇은 크게 로봇팔, 손목부분(3, 4축), 또 이러한 기계적 장치들을 구동하는 구동 시스템의 세 부분으로 나뉜다. 평면 다관절형인 KIRO-3 로봇은 두팔과 손목부분이 동적으로 비연성(decouple) 되어 있기 때문에, 손목부분을 두번째 팔 끝에 부착된 정적하중으로 간주하여 로봇팔의 평면운동 특성을 해석한다.

로봇팔의 운동방정식은 일반적으로 다음과 같이 표현된다.

$$\tau = M(q) \ddot{q} + V(q, \dot{q}) + G(q) + F(q, \dot{q}) \quad (1)$$

여기에서,  $\tau$ 는 관절토크벡터,  $M(q)$ 는 관성행렬,  $V(q, \dot{q})$ 는 원심력 및 코리올리힘벡터,  $G(q)$ 는 중력벡터,  $F(q, \dot{q})$ 는 마찰력벡터를 나타내고,  $q, \dot{q}$  및  $\ddot{q}$ 은 관절의 각변위, 각속도 및 각가속도 벡터이다. 손목부분의 평면위치를 결정하는 1, 2축

관절의 운동방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \tau_1 &= m_{11} \ddot{q}_1 + m_{12} C_{2r} \ddot{q}_2 - m_{12} S_{2r} \dot{q}_2^2 \\ \tau_2 &= m_{12} C_{2r} \ddot{q}_1 + m_{22} \ddot{q}_2 + m_{12} S_{2r} \dot{q}_1^2 \end{aligned} \quad (2a)$$

여기에서

$$\begin{aligned} m_{11} &= m_1 l_1^2 + m_2 l_1^2 + I_1 \\ m_{12} &= m_2 l_1 l_{c2} \\ m_{22} &= m_2 l_{c2}^2 + I_2 \\ C_{2r} &= \cos(q_2 - q_1) \\ S_{2r} &= \sin(q_2 - q_1) \end{aligned} \quad (2b)$$

이다. 측정된 로봇팔의 매개변수 값이 기호설명과 함께 Table 1에 나타나있다. 식 (2)에서 속도에 관련된 비선형항에 원심력의 항만 남아있고 코리올리(Coriolis)의 항은 없는 것을 알 수 있다. 즉, 2축 관절의 구동이 고정 물체에 부착된 모터로부터 스틸벨트에 의하여 구동되므로 코리올리항이 나타나지 않게 된다. 이러한 기구학적 구조는 연속링크에 의한 구조보다 비선형항을 줄일 수 있는 장점이 있다.

식 (2a)에 나타난 매개변수 값( $m_{11}, m_{22}, m_{12}$ )은 Tabel 1과 식 (2b)로부터 구한다. KIRO-3 로봇은 가속기없이 로봇팔이 구동모터에 의하여 직접구동

Table 1 System parameters of KIRO-3 direct drive robot arm

|                             | First arm(symbol)                  | Second arm(symbol)                 |
|-----------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| Length(m)                   | 0.32( $l_1$ )                      | 0.32( $l_2$ )                      |
| Mass(kg)                    | 4.25( $m_1$ )                      | 3.614( $m_2$ )                     |
| Inertia(kg m <sup>2</sup> ) | $6.81 \times 10^{-2}$ ( $I_1$ )    | $7.15 \times 10^{-2}$ ( $I_2$ )    |
| C. G.*(m)                   | $6.23 \times 10^{-2}$ ( $l_{c1}$ ) | $12.4 \times 10^{-2}$ ( $l_{c2}$ ) |

\* C. G. : Distance from axis of joint to center of gravity of arm

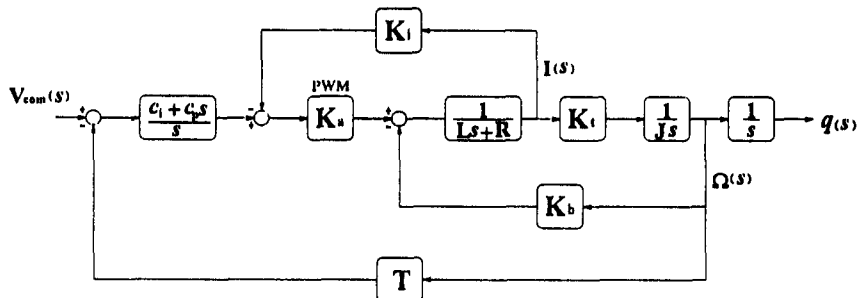


Fig. 2 Simplified block diagram for the combination of drive amplifier and motor

되기 때문에 마찰력이 작으므로  $F(q, \dot{q})$ 를 무시하였다.

2.3 구동 시스템의 동역학적 모델

구동 시스템이라 함은 로봇팔을 구동하는 모터와 증폭기의 조합을 말한다. KIRO-3 로봇팔은 무접점 직류모터로 구동되며, 증폭기는 모터에 직접전류를 인가하는 전력단, 펄스폭 변조(PWM) 방법을 이용한 전류제어기, 레졸버로부터 위치를 검출하고 그 위치에 따라 상전류를 발생하는 상전류 명령발생기와 속도제어기 등으로 구성되어 있다.

전압명령과 관절토크의 관계를 규명하는 것은 로봇팔의 동특성 해석과 모델에 기초한 제어를 수행하는데 필요하다. 이를 위해 구동 시스템의 모델을 세우고 그 매개변수를 실험을 통해 추정하였다. 증폭기(drive amplifier)와 모터의 간략화된 블록선도(block diagram)를 Fig. 2에 나타내었다.<sup>(4,6)</sup> 즉, 구동 시스템의 전압명령( $V_{com}$ )을 입력으로 하고 모터의 각 변위를 출력으로 하는 모델이다. Fig. 2에서  $K_t$ ,  $K_b$ ,  $L$ ,  $R$  등은 각각 모터의 토크상수, 역기전력 상수, 모터 코일의 인덕턴스 및 저항 값이고,  $J$ 는 모터 축의 질량 관성모멘트이다. 전류의 증폭을 상수  $K_a$ 로 모델링하였고, 상전류 제한이득은  $K_i$ 이다. 속도제어기의 비례 및 적분이득은 각각  $c_p$ 와  $c_i$ 이고 속도는 이득  $T$ 를 갖고 제한된다. 직접구동방식의 로봇은 모터의 감속비없이 모터 축과 팔이 직접 연결되므로 기계적인 마찰을 거의 무시할 수 있을 정도다. 이런 시스템에 폐회로 제어를 수행하게 되면 시스템이 불안해지는 현상이 나타난

다. 이런 효과를 줄이기 위해 증폭기에 속도제한을 추가하여 인위적인 감쇠효과를 시스템에 가하였다. Table 2는 모터의 명세서로부터 나와있는 상수와 구동증폭기로부터 직접측정한 이득값이다. Fig. 2의 블록선도에 대한 전달함수를 구하면 다음식과 같다.

$$G(s) = \frac{q(s)}{V_{com}(s)} = \frac{K_i K_s (c_i + c_p s)}{K_i K_a T c_i + K_i (K_b + K_a T c_p) s + J(R + K_a K_i) s^2 + J L s^3} \quad (3)$$

2.4 구동 시스템의 미지 매개변수 추정

구동 시스템의 매개변수 중 대부분은 모터의 명세서에 나타난 값이거나, 증폭기로부터 직접측정하여 얻을 수 있다. 직접측정이 어려운 펄스폭 변조 이득( $K_a$ )과 속도제한 이득( $T$ )은 로봇의 두번째 팔을 첫번째 팔에 고정시키고 1축과 2축 관절간의 상대운동에 의한 간섭력이 작용하지 않게 하여 팔의 비선형적인 간섭력을 배제하고 주파수 응답실험을 수행하여 추정하였다. Fig. 3에서 \*는 0.25 Hz에서 20 Hz 정도의 주파수 범위를 갖는 정현파의 전압명령을 입력으로 하고, 각 변위파형을 출력으로 하여 정상상태에서의 진폭비와 위상 차를 주파수 응답실험을 통하여 얻은 값이다. Fig. 3에서 실선은 식 (3)의 구동 시스템의 동역학적 모델에 의한 진폭비와 위상차이며 실험으로부터 얻은 그림의 \* 값에 가장 가까운 모델을 얻도록  $K_a$ 와  $T$ 를 시행착오법에 의해 선정하였다. 이때의  $K_a$ 와  $T$  값을

Table 2 Parameters of drive systems

|                         | First axis | Second axis |
|-------------------------|------------|-------------|
| $c_i$                   | 37.04      | 19.56       |
| $c_p$                   | 2.44       | 2.44        |
| $K_i$                   | 1.55       | 1.68        |
| $J(\text{kgm}^2)$       | 0.3408     |             |
| $R(\Omega)$             | 2.6        |             |
| $L(\text{mH})$          | 24         |             |
| $K_t(\text{Nm/A})$      | 2.51       |             |
| $K_b(\text{V sec/rad})$ | 3.01       |             |

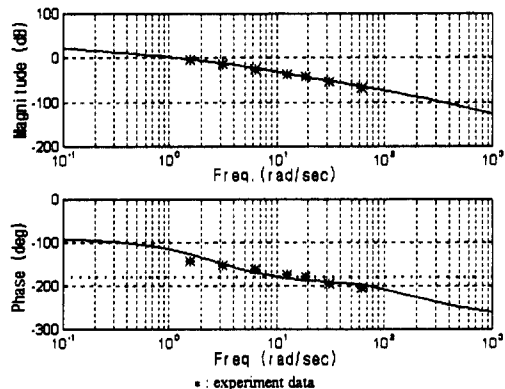


Fig. 3 Bode plot of drive system

**Table 3** Estimated parameters of drive systems

|       | First axis | Second axis |
|-------|------------|-------------|
| $K_a$ | 0.25       | 0.31        |
| $T$   | 0.76       | 0.56        |

Table 3에 나타내었다.

### 2.5 KIRO-3 로봇의 동역학적 모델에 대한 검증

로봇의 동역학적 모델에 의한 시뮬레이션과 로봇의 실제 구동실험의 결과를 비교하여 동역학적 모델에 대한 타당성을 조사하였다.

KIRO-3 로봇의 시뮬레이션을 위해서는 전체 시스템에 대한 관계식이 필요하다. 로봇팔의 동역학적 모델과 구동 시스템의 모델을 연결하여 전체 시스템에 대한 운동방정식을 모두 1차의 미분방정식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\dot{V}_{11} &= -c_{11}T\omega_1 + c_{11}V_{com1} \\ \dot{V}_{12} &= -c_{12}T\omega_2 + c_{12}V_{com2}\end{aligned}\quad (4)$$

$$\begin{aligned}\frac{di_1}{dt} &= -\frac{R+K_{i1}K_{a1}}{L}i_1 - \frac{K_b+K_{a1}TC_{p1}}{L}\omega_1 \\ &\quad + \frac{K_{a1}}{L}V_{11} + \frac{K_{a1}C_{p1}}{L}V_{com1} \\ \frac{di_2}{dt} &= -\frac{R+K_{i2}K_{a2}}{L}i_2 - \frac{K_b+K_{a2}TC_{p2}}{L}\omega_2 \\ &\quad + \frac{K_{a2}}{L}V_{12} + \frac{K_{a2}C_{p2}}{L}V_{com2}\end{aligned}\quad (5)$$

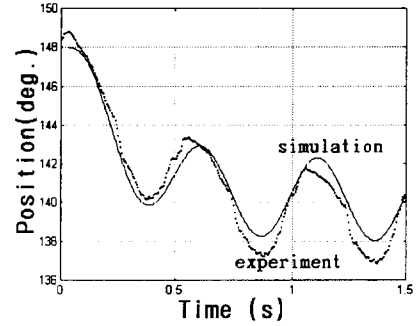
$$\begin{aligned}\dot{q}_1 &= \omega_1 \\ \dot{q}_2 &= \omega_2\end{aligned}\quad (6)$$

$$\begin{aligned}\dot{\omega}_1 &= [m_{22}(\tau_1 + m_{12}S_{12}\omega_2^2) \\ &\quad - m_{12}C_{12}(\tau_2 - m_{12}S_{12}\omega_1^2)]/\det M(q_1, q_2) \\ \dot{\omega}_2 &= [m_{11}(\tau_2 - m_{12}S_{12}\omega_1^2) \\ &\quad - m_{12}C_{12}(\tau_1 + m_{12}S_{12}\omega_2^2)]/\det M(q_1, q_2)\end{aligned}\quad (7)$$

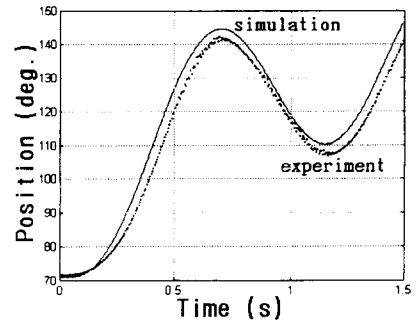
여기에서  $\tau_1 = K_{i1}i_1$ 이고,  $\tau_2 = K_{i2}i_2$ 이며  $\det M(q_1, q_2)$ 는 관성행렬의 행렬식이다.

시뮬레이션에서는 4차의 Runge-Kutta 알고리즘<sup>(6)</sup>을 적용하여 식 (4)~(7)과 Tabel 1, Table 2 및 Table 3의 매개변수 값을 사용하여 계산하였다.

정현파의 전압입력을 선택하여 구동 시스템에 가하고 개방특성(open-loop characteristic)을 살펴보았다. 그 중 1축 관절에는 2 Hz의 정현파를, 2축 관절에는 동시에 1 Hz의 정현파를 가하였을 때 각



(a) First jointing



(b) Second joint

**Fig. 4** Comparison between experiment and simulation of the robot system dynamics

변위 출력에 대한 모델의 시뮬레이션과 실험결과가 Fig. 4에 나타나 있다. 그림에서 보는 바와 같이 동역학적 모델에 의한 시뮬레이션이 실제 구동 실험에 의한 각 변위의 출력과 비슷한 파형을 보이고 있다. Fig. 4에서 보이는 실험치와 시뮬레이션 결과의 오차는 구동 시스템에서 생기는 센서와 전력단의 비선형성 및 잡음특성 등을 무시하고, 펄스폭 변조의 전류 증폭 이득을 상수로 간단히 가정한 결과로 추정된다.

### 3. 동역학적 모델의 응용

지금까지의 로봇 구동은 모두 개루프(open-loop)로 실행 되어 로봇 팔과 구동 시스템에 대한 매개변수의 추정과 동역학적 모델에 대한 타당성을 검증하였다. 본 장에서는 레졸버로부터 얻은 각 변위의 데이터를 케환하고 앞장에서 유도한 동역학 모델을 이용하여 로봇의 위치제어를 수행 한다.

초기 위치부터 최종 위치까지를 5차의 시간에 대

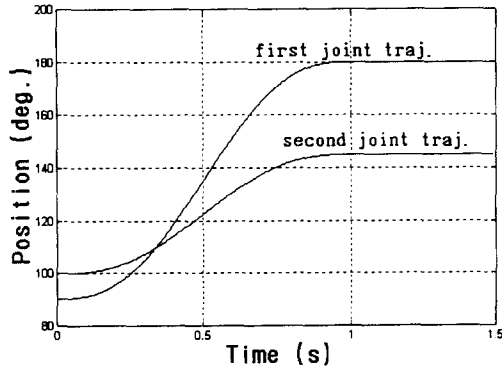


Fig. 5 Test trajectory

한 다항식을 이용해 Fig. 5와 같은 형태의 궤적을 생성하여 기준입력으로 하고, 샘플링시간은 5ms로 하였다. 실험에 적용된 궤적은 관절좌표계에 대해 1축은 90°에서 180°로 2축은 100°에서 145°로 1초만에 로봇팔의 손목부위가 평면이동하는 궤적이다.

먼저 독립관절에 제어에 대한 실험을 하였고, 로봇의 동역학적 모델을 이용한 피드포워드(feedforward)제어에 대한 실험을 하였다. 로봇의 동역학적 모델을 이용한 제어에는 피드포워드방법과 컴퓨터토크(computed torque)방법이 있는데, 피드포워드방법은 궤적이 주어지면 동역학적 모델을 이용하여 오프라인(off line)으로 입력명령을 계산할 수 있고, 컴퓨터토크방법은 로봇 동작중에 축의 각 변위와 각 속도를 감지하고 그 값을 제환한 후 동역학적 모델을 이용하여 입력명령을 계산한다. 두가지 방법에 대한 비교는 기존의 여러 연구를 통해 수행되어 왔고, 그 궤적제어의 성능이 어느 방법이 우수하다고 말할 수 없는 서로 비슷한 결과를 보였다.<sup>(7)</sup> 본 연구의 주된 초점은 동역학적 모델을 개발하여 그 모델의 타당성을 입증하고 이를 이용하는 방법으로 궤적제어를 수행하는 것이다. 그러므로 컴퓨터토크방법에 비해 동역학적 모델을 더 쉽게 이용할 수 있고 비슷한 제어성능의 향상을 보일 수 있는 피드포워드방법을 선택하여 제어를 수행했다.

특히 피드포워드제어에서는 팔의 동역학적 모델만을 고려한 방법과 팔과 구동 시스템의 동역학적 모델을 모두 고려한 방법에 대하여 실험하고 그 결과를 비교하였다.

독립관절의 비례적분미분(PID) 제어에서 각 축

에 가해지는 제어입력은

$$V_{PID_i}(t) = K_p e_i(t) + K_v \dot{e}_i(t) + K_i \int_{t_0}^t e_i(t) dt \quad (9)$$

이다. PID 제어의 경우 제어입력은 위에서 언급한 전압명령  $V_{com}$ 과 같다.

위 식은  $i$ 번째 관절에 대한 제어입력의 관계식이 고, 위 식에서 이득들은 최대로 우수한 추종성능을 낼 수 있도록 조절하였다.

### 3.1 피드포워드 제어

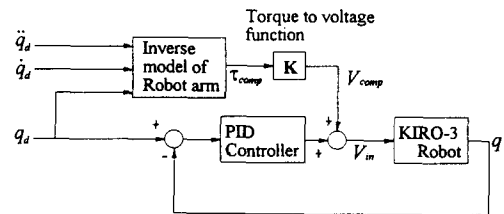
Fig. 6은 단순한 PID 제어에 로봇 시스템의 동역학적 모델을 이용한 피드포워드 제어를 추가한 블록선도이다. 여기서 팔의 동역학적 모델만을 고려하였을 때, Fig. 6(a)와 팔과 구동 시스템의 동역학적 모델 모두를 고려하였을 때, Fig. 6(b)로 나누어 동역학적 모델을 이용한 피드포워드 제어를 구성하였고 그에 따른 제어의 성능을 비교하였다.

팔의 동역학적 모델에 구동 시스템의 모델을 포함한 피드포워드 전압명령을 구하는 과정은 다음과 같다. 식 (2)에 원하는 궤적의 위치, 속도, 가속도를 대입하면 각각의 관절토크  $\tau_{a1}$ ,  $\tau_{a2}$ 를

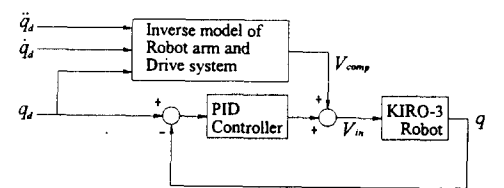
$$\tau_{a1} = m_{11} \ddot{q}_{a1} + m_{12} C_{21} \ddot{q}_{a2} - m_{12} S_{21} \dot{q}_{a2}^2 \quad (10)$$

$$\tau_{a2} = m_{12} C_{21} \ddot{q}_{a1} + m_{22} \ddot{q}_{a2} + m_{12} S_{21} \dot{q}_{a1}^2 \quad (11)$$

와 같이 구할 수 있다. 그리고 관절토크와 전류와의 관계는 토크상수  $K_t$ 로 서로 비례관계에 있으므로



(a) Feedforward method 1



(b) Feedforward method 2

Fig. 6 Two types of feedforward control

로 계산된 전류  $i_{d1}$ ,  $i_{d2}$ 는 각각  $\tau_{d1}/K_t$ ,  $\tau_{d2}/K_t$ 와 같다. 이제 원하는 관절의 위치체적이 정해지면 각 변위, 각속도, 각가속도, 전류의 원하는 값을 결정할 수 있다. 주어진 궤적( $q_{d1}$ ,  $\dot{q}_{d1}$ ,  $\ddot{q}_{d1}$ )과 계산된  $i_{d1}$ ,  $i_{d2}$  값을 식 (4)부터 (5)까지의 구동 시스템 모델식에 대입하면 구동 시스템의 관계식이

$$\begin{aligned} \dot{V}_{11} &= -c_{11} T_1 \dot{q}_{d1} + c_{11} V_{c1} \\ \dot{V}_{12} &= -c_{12} T_2 \dot{q}_{d2} + c_{12} V_{c2} \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \frac{K_{a1}}{L} V_{11} + \frac{K_{a1} C_{p1}}{L} V_{c1} &= \dot{i}_{d1} - \frac{R + K_{t1} K_{a1}}{L} i_{d1} \\ &\quad - \frac{K_b + K_{a1} T_1 C_{p1}}{L} \dot{q}_{d1} \\ \frac{K_{a2}}{L} V_{12} + \frac{K_{a2} C_{p2}}{L} V_{c2} &= \dot{i}_{d2} - \frac{R + K_{t1} K_{a2}}{L} i_{d2} \\ &\quad - \frac{K_b + K_{a2} T_2 C_{p2}}{L} \dot{q}_{d2} \end{aligned} \quad (13)$$

와 같이 표현된다. 위의 식 (10), (11)과 식 (12)를 연립하여 피드포워드 전압명령  $V_{c1}$ ,  $V_{c2}$ 를 소거하면

$$\begin{aligned} \dot{V}_{11} &= -\frac{c_{11}}{C_{p1}} V_{11} + \frac{L C_{11}}{K_{a1} C_{p1}} \dot{i}_{d1} \\ &\quad - \frac{(R + K_{t1} K_{a1}) C_{11}}{K_{a1} C_{p1}} i_{d1} - \frac{K_b C_{11}}{K_{a1} C_{p1}} \dot{q}_{d1} \\ \dot{V}_{12} &= -\frac{c_{12}}{C_{p2}} V_{12} + \frac{L C_{12}}{K_{a2} C_{p2}} \dot{i}_{d2} \\ &\quad - \frac{(R + K_{t2} K_{a2}) C_{12}}{K_{a2} C_{p2}} i_{d2} - \frac{K_b C_{12}}{K_{a2} C_{p2}} \dot{q}_{d2} \end{aligned} \quad (14)$$

이 된다. 여기서 주어진 궤적에 따라 결정되는 항들을 묶어

$$\begin{aligned} u_{d1}(\dot{q}_{d1}, i_{d1}, \dot{i}_{d1}) &= \frac{L C_{11}}{K_{a1} C_{p1}} \dot{i}_{d1} - \frac{(R + K_{t1} K_{a1}) C_{11}}{K_{a1} C_{p1}} i_{d1} \\ &\quad - \frac{K_b C_{11}}{K_{a1} C_{p1}} \dot{q}_{d1} \\ u_{d2}(\dot{q}_{d2}, i_{d2}, \dot{i}_{d2}) &= \frac{L C_{12}}{K_{a2} C_{p2}} \dot{i}_{d2} - \frac{(R + K_{t2} K_{a2}) C_{12}}{K_{a2} C_{p2}} i_{d2} \\ &\quad - \frac{K_b C_{12}}{K_{a2} C_{p2}} \dot{q}_{d2} \end{aligned} \quad (15)$$

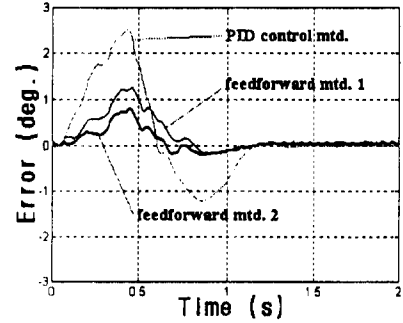
와 같이  $u_{d1}$ ,  $u_{d2}$ 를 정의하면, 두 관절의 입력에 대한 시스템의 역동역학적 모델(inverse dynamic model)에 대한 관계식은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \dot{V}_{11} &= -\frac{c_{11}}{C_{p1}} V_{11} + u_{d1} \\ \dot{V}_{12} &= -\frac{c_{12}}{C_{p2}} V_{12} + u_{d2} \end{aligned} \quad (16)$$

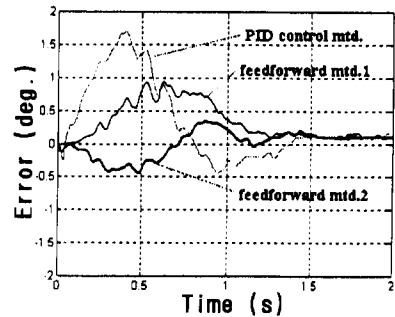
$$\begin{aligned} V_{c1} &= -T_1 \dot{q}_{d1} + \frac{1}{C_{11}} \dot{V}_{11} \\ V_{c2} &= -T_2 \dot{q}_{d2} + \frac{1}{C_{12}} \dot{V}_{12} \end{aligned} \quad (17)$$

식 (16)은 주어진 궤적에 의존하는 입력항  $u_{d1}$ ,  $u_{d2}$ 를 갖는 미분방정식이 되어 수치적인 해를 구할 수 있다.  $u_{d1}$ ,  $u_{d2}$ 는 주어진 궤적에 대한 팔의 동역학과 전류제어기 및 속도제어기 등의 효과가 고려된 함수로 속도제어기의 적분제어 항에 입력 전압의 형태로 가해진다. 수치적으로 적분제어기의 전압  $V_{11}$ 와  $V_{12}$ 을 구해 식 (17)과 연립하면 피드포워드 항을 구할 수 있다.

로봇의 구동 시스템을 이상적인 선형의 시스템이라 가정한다면 입력전압과 모터 토크와의 관계도 상수에 의한 선형적인 관계로 표현된다. 로봇팔의 동역학만 고려하고 구동 시스템은 선형 시스템이라 가정하여 상수의 이득으로 토크와 입력전압의 관계를 계산한 피드포워드항과 팔과 구동 시스템의 동역학적 모델을 함께 고려하여 입력전압을 계산한



(a) Error of the joint



(b) Error of second joint

Fig. 7 Trajectory tracking errors for the three control methods

피드포워드항을 추가한 새로운 전압명령은 각각 다음과 같은 형태로 표현된다.

$$V_{com\ i} = K_i r_{di} + V_{PID\ i} \quad (18)$$

$$V_{com\ i} = V_{cf} + V_{PID\ i} \quad (19)$$

### 2.3 제어기의 실험적 평가

모델에 기초한 제어에서는 보다 정확한 동역학적 보상을 할수록 좋은 제어성능을 보인다.<sup>(7)</sup> Fig. 7은 PID 제어를 적용하였을 때와 두가지 피드포워드 제어방법을 적용하였을 때의 제적추종오차를 동시에 보이고 있다. Fig. 7은 여러가지 실험 제적에 대한 결과를 대표할 수 있는 일반적인 결과로써 동역학적 모델을 제어입력에 더한 방법이 단순한 PID 제어방법만을 이용한 경우보다 세배이상 오차가 줄어 제어성능이 향상되었음을 알 수 있다. 또한 팔과 구동 시스템의 동역학적 모델 모두를 고려한 피드포워드 제어(feedforward method 2)가 팔의 동역학적 모델만을 고려한 피드포워드 제어(feedforward method 1)보다 더 작은 오차를 보이며 제적을 추종하고 있음을 알 수 있다. 결과에서 볼 수 있듯이 피드포워드 제어는, 보다 정확한 동역학적 보상항이 들어갈수록 제어성능이 향상되며, 또한 최종 위치 오차보다는 제적추종 오차를 줄이는 데 더 큰 효과가 있음을 알 수 있다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 KIRO-3 로봇의 팔에 대한 동역학적 모델과 매개변수를 구했고, 구동 시스템의 모델을 구성하고 실험을 통해 미지의 매개변수를 추정하였다. 그리고 실제의 로봇 시스템의 동적거동을 동역학적 모델을 이용한 시뮬레이션 결과와 비교하여 동역학적 모델에 대한 타당성을 검증하였다.

전형적인 PID 제어방법과 검증된 모델을 피드포워드 제어방법에 적용하여 제어성능을 비교해 본 결과 피드포워드 제어방법이 PID 제어방법보다 세배이상 작은 제적추종 오차를 보였고, 피드포워

드 제어방법 중에서도 팔과 구동 시스템의 동역학적 모델을 모두 고려한 경우가 로봇팔의 동역학적 모델만을 고려한 경우보다 향상된 제적추종성능을 보였다.

본 연구에서는 모델 매개변수의 불확실성이나 외란등의 영향으로부터 기인하는 제적추종 오차에 대한 대책으로 PID 제어를 사용하였는데, 이에 더욱 능동적으로 대처할 수 있도록 H<sub>∞</sub>이론을 이용한 제어기 설계를 연구중에 있다.

## 참고문헌

- (1) 광윤근, 이대길 외 9명, 1989 "직접구동방식 로봇의 개발과 그 응용에 관한 연구(I~V)," 과학기술처.
- (2) Lee, D. G, Kim, K. S. and Kwak, Y. K., 1991, "Manufacturing of a SCARA Type Direct-Drive Robot with Graphite Fiber Epoxy Composite Material," *Robotica*, Vol. 9, pp. 219~229.
- (3) Kang, C. G., Kano, W. W., Boals, M. and Horowitz, R., 1988 "Modeling, Identification and Simulation of a Two Link SCARA Manipulator," *Winter Annual Meeting of ASME*.
- (4) Asada, H. and Youcef-Toumi, K., 1987, "Direct-Drive Robots Theory and Paractice," MIT Press, pp. 20~42 & pp. 141~155.
- (5) Hairi-Yazdi, M. R., 1991, "Design and Control of a Direct Drive Robot for Assembly Applications," Ph. D Thesis, Univ. of London, London.
- (6) Press, W. H., Flannery, B. P., Teukolsky, S. A. and Vetterling, W. T., 1988, *Numerical Recipes in C*, Cambridge Univ. Press, pp. 569~597.
- (7) An, C. H. Atkenson, C. G. Griffiths, J. D. and Hollerbach, J. M., 1989, "Experimental Evaluation of Feed-forward and Computed Torque Control," *IEEE Trans. on Robotics & Automation*, Vol. 5, No. 3, pp. 368~373.