

〈論 文〉

시간지연제어기법을 이용한 로봇의 혼합(위치/힘) 제어에 관한 연구

장평훈* · 박병석** · 박주이**

(1994년 4월 4일 접수)

A Study on Hybrid(Position/Force) Control of Robot Using Time Delay Control

P. H. Chang, B. S. Park and J. Y. Park

Key Words : Hybrid Control(혼합제어), Force Control(힘제어), Time Delay Control(시간지연 제어)

Abstract

Robot position/force control has been a difficult task owing to the interaction between a robot and an environment with a rather high stiffness. In addition to the dynamic instability, the interaction causes the following problem: 1) chattering at steady-state, 2) dynamic coupling effect of robot, and 3) performance degradation due to a tilted environment. To solve the problem, the Time Delay Control(TDC), which has been known to be quite robust to plant uncertainties and disturbances, has been applied. In conjunction to TDC, the following three ideas were also used: 1) To reduce the amplitude of the chattering at the steady state, a novel scheme was adopted to enhance the resolution of A/D conversion for the force sensor. 2) To reduce the dynamic coupling, a trajectory type position command was tried on a comparative basis to the step command, as well as a more accurate mass matrix was used instead of the constant mass matrix. 3) And finally to improve the performance in the tilted environment, force derivatives instead of position derivatives were used in the TDC law. Computer simulations and experiments resulted in obvious improvements on the quality of the hybrid control, thereby clearly demonstrating the effectiveness of TDC with the proposed ideas.

1. 서 론

로봇이 작업을 하기 위해서는 환경과의 상호작용이 요구된다. 이러한 상호작용은 환경과의 비접촉, 접촉 상태로 나눌 수 있다. 비접촉작업인 경우에는 위치제어(position control)가 주로 요구되며, 용접(welding), 도장(painting) 등의 생산공정에 널리

이용되고 있다. 그리고 접촉작업에서는 혼합 제어(hybrid control), 즉 위치제어와 힘제어(force control)가 모두 요구되며, 로봇과 환경의 강한 상호작용에 의해 불안정한 양상을 띠거나 응답이 나쁜 경우가 많다.

많은 연구를 통하여,^(1~4) 혼합제어시 불안정한 주요원인은 동역학적 불안정성이라는 사실이 드러났다. 동역학적 불안정성은 환경의 강성(stiffness)이 감쇠(damping)에 비해 매우 큰 값을 갖기 때문에 나타나는 현상이다. 그리고 안정화하기 위해서

*정회원, 한국과학기술원 정밀공학과

**한국과학기술원 정밀공학과

감쇠량을 증가하거나, 강성이 작은 힘센서를 사용할 것, 그리고 제어기의 입력경로에 저주파필터를 첨가할 것 등을 제안하였다. 이 외에도 로봇의 관절 및 팔의 유연성, 구동기(actuator)의 대역폭 한계, 힘센서 강성, 그립(grip)강성, 구동기어의 백래쉬, 베어링 마찰 등이 안정성에 영향을 주는 요인이다.⁽²⁾ 이러한 로봇-환경의 불확실성 및 비선형성에 의한 영향을 줄이기 위해서는, 널리 쓰이는 제어기법(PD, PID 등)⁽⁵⁾보다는 강인제어(robust control)기법이 요구된다.

강인제어기법으로는 슬라이딩모드제어(sliding mode control: SMC),⁽⁶⁾ 시간지연제어(time delay control: TDC),⁽⁷⁾ 외란 및 환경관측기(disturbance & environment observer)^(8,9) 등이 있다. 슬라이딩모드 제어기법은 외란 및 비선형성에는 강인한 성능을 보이지만, 불연속적인 입력에 의한 떨림(chattering)이 발생하는 단점이 있다. 그리고 시간지연제어기법은 상태변수를 제한(feedback)하는 루프와 플랜트의 불확실성을 제거하기 위한 부가적 루프로 구성되어 있으며, 여러 플랜트에서 강인한 제어성능이 확인되었다.^(7,10~12) 그리고 외란 및 환경관측기는 시간지연제어와 근본적으로 유사한 개념이며 구조도 거의 같다.

Fedele⁽¹³⁾는 상기한 강인제어중에서 SMC를 혼합제어에 적용하여 안정한 응답을 얻었다. 그리고 환경의 기울어짐이 힘제어 방향에 외란으로 작용한다는 사실을 밝혔으며, 이 영향을 줄이기 위해 제어법칙에 적분항을 첨가하였다. 하지만 환경의 기울어짐에 의한 영향을 완전히 보상하지는 못하였으며, 정상상태에서의 떨림(chattering)의 크기가 컸다. 그리고 환경강성이 큰 경우에 대한 연구는 없었다. Kim⁽¹²⁾은 TDC를 혼합제어에 적용하여 안정함을 보였으며, PID 제어기법에 비해 로봇-환경 시스템의 불확실성과 비선형성에 강인함을 보였다. 하지만 정상상태에서의 떨림의 크기가 컸고, 환경강성이 큰 경우에는 과잉응답이 생겼다. 그리고 Lasky⁽¹⁴⁾는 환경에 굴곡이 있는 경우에 힘방향으로 과잉응답이 생김을 살펴보았다. Komada^(8,9)는 외란 및 환경관측기 기법을 힘제어 및 혼합제어에 적용하여 안정한 응답을 얻었다. 하지만 정상상태의 떨림의 크기가 컸으며, 로봇 단말의 위치방향의 움직임에 의하여 힘방향의 응답이 저하되었다.

본 연구에서는 혼합제어에 TDC를 적용하였고, 상기한 문제점 — (1) 정상상태에서의 떨림, (2) 동

역학적 결합에 의한 영향, (3) 환경의 굴곡이나 기울어짐에 의한 영향 — 의 해결을 위한 방안을 제시하였다. 또한, 제시된 방안을 이용하여 실험 및 모의 실험을 수행한 결과 더욱 안정하고 향상된 응답을 얻을 수 있었다. 지금까지 힘/위치제어의 실험을 행한 예는 드문데, 본 연구에서는 실제 실험을 수행함으로써 힘/위치제어 분야에 실용적인 측면의 기여를 하는데 그 의의를 두고자 한다.

논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 TDC를 혼합제어에 적합한 알고리즘으로 바꾸고, 3장에서는 전체 시스템의 안정성을 살핀다. 4장에서는 정상상태에서의 떨림의 크기를 줄이기 위하여, 힘센서에 있는 A/D변환기의 분해능 조절방법을 제시한다. 5장에서는 로봇의 동역학적 결합에 의한 영향을 살펴보고, 보상방안으로 위치명령으로 계단파(step)대신 궤적(trajecory)입력을 주거나, 제어법칙에서 상수관성행렬 대신 정확한 관성행렬을 사용할 것을 제안한다. 6장에서는 환경의 굴곡이나 기울어짐의 영향을 살펴보고, 보상방안으로 제어법칙에서 위치대신 힘신호의 미분값을 사용할 것을 제안한다. 그리고 제안한 방법들의 효과를 실험을 통하여 확인한다.

2. 혼합제어를 위한 시간지연제어 알고리즘

여기서는 일반적인 TDC 알고리즘을 바탕으로 혼합제어에 적합한 알고리즘을 유도한다.⁽¹²⁾ 일반적인 로봇의 동역학식은 작업공간에서 다음과 같이 표현된다.

$$F_u = M_x(\theta) \ddot{x} + V_x(\theta, \dot{\theta}) + G_x(\theta) + F_{ext} \quad (1)$$

여기서, $x \in \mathbb{R}^n$ 와 $\theta \in \mathbb{R}^m$ 는 각각 작업공간 및 관절공간 상태변수이다. 그리고 $F_u \in \mathbb{R}^n$, $M_x \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $V_x \in \mathbb{R}^n$, $G_x \in \mathbb{R}^n$, $F_{ext} \in \mathbb{R}^n$ 는 각각 힘벡터, 관성행렬, 원심력과 코리올리력, 중력, 환경(environment)으로부터 받는 힘을 나타낸다. 식(1)의 동역학식을 알기 위해서는, 로봇과 환경의 파라미터를 정확히 알아야 한다. 그래서 여기서는 로봇-환경을 정확히 모델링하지 않고서도 동역학을 알기 위하여, 다음과 같은 범위를 갖는 상수관성행렬 \bar{M}_x 를 도입한다.⁽¹⁵⁾

$$\bar{M}_x = \alpha I, \quad 0 < \alpha < 2\rho \quad (2)$$

여기서, α 는 상수이고, $I \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 는 단위행렬을, 그

리고 ρ 는 $M_x(\theta)$ 의 최소고유값(minimum eigenvalue)을 나타낸다. 식(1)과 (2)로부터 로봇의 동역학식을 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$F_u = \bar{M}_x \ddot{x} + [M_x(\theta) - \bar{M}_x] \dot{x} + V_x(\theta, \dot{\theta}) + G_x(\theta) + F_{ext} \quad (3)$$

불확실성 $H(\theta, x, \dot{x}, \ddot{x})$ 를 $H(\theta, x, \dot{x}, \ddot{x}) = [M_x(\theta) - \bar{M}_x] \dot{x} + V_x(\theta, \dot{\theta}) + G_x(\theta) + F_{ext}$ 라고 정의하면, 식(3)은 다음과 같이 바꿀 수 있다.

$$F_u = \bar{M}_x \ddot{x} + H(\theta, x, \dot{x}, \ddot{x}) \quad (4)$$

시간지연 L 이 충분히 작다면, 임의의 시간 t 에서의 $H(\theta, x, \dot{x}, \ddot{x})$ 는 다음식에 의해서 추정할 수 있다.

$$H(\theta, x, \dot{x}, \ddot{x}) = F_u(t) - \bar{M}_x \ddot{x}(t) \approx F_u(t-L) - \bar{M}_x \ddot{x}(t-L) \quad (5)$$

여기서, L 은 일반적으로 제어기의 표본 시간에 해당하며 매우 작다. 식(5)를 (4)에 대입하면 힘벡터는 다음과 같게 된다.

$$F_u = \bar{M}_x \ddot{x} + F_u(t-L) - \bar{M}_x \ddot{x}(t-L) \quad (6)$$

식(6)에 나타난 것처럼 상수관성행렬을 도입함으로써, 로봇의 정확한 관성행렬값을 모르더라도 범위만 대략적으로 알면 로봇-환경의 동역학을 알 수 있다.

그리고 힘과 위치가 다음과 같은 오차 동역학(error dynamics)을 가지도록 한다.

· 힘오차 동역학

$$(\ddot{F}_d - \ddot{F}) + K_{vf}(\dot{F}_d - \dot{F}) + K_f(F_d - F) = 0 \quad (7)$$

· 위치오차 동역학

$$(\ddot{x}_d - \ddot{x}) + K_v(\dot{x}_d - \dot{x}) + K_p(x_d - x) = 0 \quad (8)$$

여기서, $F_d \in \mathbb{R}^n$ 와 $F \in \mathbb{R}^n$ 는 각각 원하는 힘입력과 힘응답이고, $x_d \in \mathbb{R}^n$ 와 $x \in \mathbb{R}^n$ 는 각각 원하는 위치입력과 위치응답이다. 그리고 $K_{vf} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 와 $K_f \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 는 각각 힘 미분이득과 비례이득이고, $K_v \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 와 $K_p \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 는 각각 위치 미분이득과 비례이득이다. 그런데 환경의 감쇠가 강성에 비해 매우 작은 경우에, 로봇말단과 환경의 접촉력 F 와 로봇말단의 변위 x 는 다음과 같은 관계가 있다. (16)

$$F = K_e(x - x_e) \quad (9)$$

여기서, K_e 는 환경의 강성을, x_e 는 환경의 위치를

나타낸다.

식(6)~(9)를 이용하면 다음과 같은 시간지연 제어법칙이 유도된다.

$$F_u = \bar{M}_x S [\ddot{x}_d + K_v(\dot{x}_d - \dot{x}) + K_p(x_d - x)] + \bar{M}_x (I - S) [K_e^{-1} \ddot{F}_d + K_{vf} K_e^{-1} (\dot{F}_d - \dot{F}) + K_f K_e^{-1} (F_d - F)] + F_u(t-L) - \bar{M}_x [S \ddot{x}(t-L) + (I - S) K_e^{-1} \dot{F}(t-L)] \quad (10)$$

$$\tau_u = J^T F_u \quad (11)$$

여기서, S 는 선택행렬(selection matrix)^(17,18)을, J 는 자코비안행렬을 나타낸다. 그리고 F_u 와 τ_u 는 각각 작업공간(task space)과 관절공간(joint space)에서의 제어입력을 나타낸다. 그리고 K_e 의 역행렬이 존재하지 않는 경우에는 의사역행렬을 이용한 다.

그런데 힘을 측정하는 센서는 일반적으로 잡음이 많고 응답속도가 느린 경우가 많으므로, 힘신호의 미분값을 사용하는 대신 위치신호의 미분값을 사용하기 위하여 식(9)와 (10)의 관계를 이용하면 다음과 같은 제어입력이 유도된다.

$$F_u = \bar{M}_x S [\ddot{x}_d + K_v(\dot{x}_d - \dot{x}) + K_p(x_d - x)] + \bar{M}_x (I - S) [\dot{x}_d + K_{vf}(\dot{x}_d - \dot{x}) + K_f K_e^{-1} (F_d - F)] + F_u(t-L) - \bar{M}_x [S \dot{x}(t-L) + (I - S) \dot{x}(t-L)] \quad (12)$$

식(10)과 (12)는 힘과 위치를 측정하는 센서의 성능에 따라 선택해서 사용할 수 있다. 최근에는 센서의 고주파잡음에 대한 민감성을 줄이고, 비구조화된 불확실성(unstructured uncertainty)에 대한 안정성을 높이기 위해, TDC의 입력경로(input path)에 저주파필터(19)를 사용하는 방법이 제안되었다. 저주파필터를 첨가한 TDC법칙을 블록선도로 나타내면 Fig. 1과 같다.

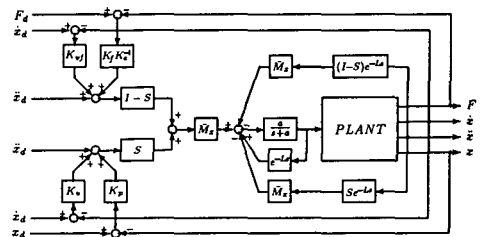


Fig. 1 Block diagram of the hybrid control with TDC

3. 혼합제어 시스템의 안정성

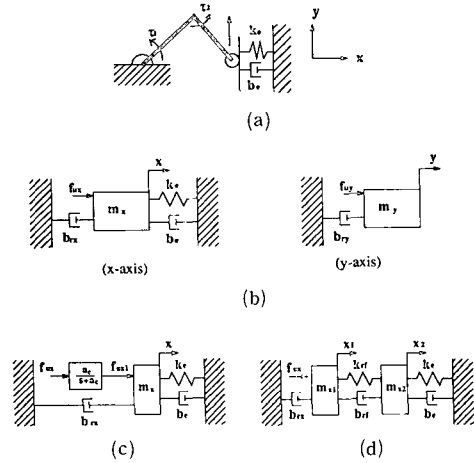
로봇의 관절 및 팔의 유연성, 액추에이터의 대역폭 한계, 힘센서 및 그리프의 강성 등은 전체 응답에 큰 영향을 미치지 않기 때문에, 모델링에서 제외하는 경우가 많다. 여기서는 강체모델과, 액추에이터의 대역폭을 포함한 경우, 그리고 유연모델에 대하여 안정성을 검토한다.

그러나, 로봇 환경 시스템은 동역학적으로 결합되었으므로 해석적인 방법으로 안정성을 고찰하기는 어렵다. 한편 Eppinger⁽²⁾는 Fig. 2의 (a)의 동역학적 결합된 2자유도 로봇모델을 (b)의 비결합 단순 선형모델로 치환하였다. 로봇의 자세가 많이 변하지 않으므로, 로봇의 관성값을 로봇말단에서의 유효질량으로 바꾸어 선형화하더라도 큰 문제가 없으리라 생각된다. 여기서는 이러한 2자유도 비결합 단순 선형 모델을 이용하여 안정성을 정성적으로 살펴보기로 한다. 그리고 y방향(위치방향)의 시스템은 안정하므로, x방향(힘방향)의 시스템만을 고려하기로 한다.

3.1 강체모델

Fig. 2의 (b)에 있는 강체모델(rigid body model)의 동역학식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 f_{ux} &= m_x \ddot{x} + b_{rx} \dot{x} + b_e \dot{x} + k_e x \\
 &= \frac{1}{k_e} (m_x \ddot{f} + b_{rx} \dot{f} + b_e \dot{f} + k_e f) \quad (13)
 \end{aligned}$$



(a) 2-link robot
 (b) Equivalent rigid body model in the operational space
 (c) Equivalent rigid body model with actuator dynamics
 (d) Flexibility included model

Fig. 2 Simplified linear dynamic model of 2 D. O. F. robot in the operational space

여기서, f_{ux} 는 로봇에 가하는 힘음, m_x 와 b_{rx} 는 각각 로봇의 유효 질량과 감쇠를 나타내며, 구체적인 값은 Table 1에 있다. 그리고 b_e 와 k_e 는 각각 환경의 감쇠와 강성을 나타낸다. 힘제어 방향의 시간 지연제어법칙은 식(14)와 같다.

$$f_{ux} = \frac{\bar{m}_x}{k_e} [\ddot{f}_d + k_{vf} (\dot{f}_d - \dot{f}) + k_f (f_d - f)]$$

Table 1 Parameters used in Nyquist plot

Rigid model	With actuator dynamics	Flexibility included model
$m_x = 10 \text{ kg}$	$m_x = 10 \text{ kg}$	$m_{x1} = 16 \text{ kg}, m_{x2} = 4 \text{ kg}$
$\bar{m}_x = 10 \text{ kg}$	$\bar{m}_x = 10 \text{ kg}$	$\bar{m}_x = 6 \text{ kg}$
$b_{rx} = b_e = 0$	$b_{rx} = b_e = 0$	$b_{rx} = b_e = 0$
$k_e = 100,000 \text{ N/m}$	$k_e = 100,000 \text{ N/m}$	$k_e = 100,000 \text{ N/m}$
		$b_{r1} = 300 \text{ N} \cdot \text{sec/m}$ $k_{r1} = 500,000 \text{ N/m}$
	$a_c = 600 \text{ rad/sec}$	$a_c = 600 \text{ rad/sec}$
	$a = 400 \text{ rad/sec}$	$a = 400 \text{ rad/sec}$
$k_{vf} = 60, k_f = 900$	$k_{vf} = 60, k_f = 900$	$k_{vf} = 60, k_f = 900$

$$+ f_{ux}(t-L) - \frac{\bar{m}_x}{k_e} \ddot{f}(t-L) \quad (14)$$

여기서, \bar{m}_x 는 x 방향의 상수질량을 나타낸다. 식 (13)과 (14)를 라플라스변환한 후 $\frac{F(s)}{F_d(s)}$ 를 구하면 다음과 같다.

$$\frac{F(s)}{F_d(s)} = \frac{\bar{m}_x(s^2 + k_{vs} + k_f)}{(1 - e^{-Ls})(m_x s^2 + b_{rx}s + b_e s + k_e) + \bar{m}_x(s^2 e^{-Ls} + k_{vs} + k_f)} \quad (15)$$

위 식으로부터 특성방정식은 다음과 같다.

$$1 + G(s) = 0 \quad (16)$$

$$G(s) = -\frac{m_x s^2 + b_{rx}s + b_e s + k_e - \bar{m}_x s^2}{m_x s^2 + b_{rx}s + b_e s + k_e + \bar{m}_x(k_{vs} + k_f)} e^{-Ls} \quad (17)$$

위의 $G(s)$ 의 나이퀴스트선도는 Fig. 3의 (a)에 나타나 있다. 그림에 있는 것처럼 $(-1, 0)$ 을 감싸지 않으므로 시스템은 안정하다. 즉, 로봇을 강체로 모델링한 경우, 안정성에 문제가 없음을 보여준다.

3.2 구동기의 대역폭을 포함한 경우

여기서는 플랜트의 불확실성의 하나인 액추에이터의 대역폭을 강체모델에 포함한 경우의 안정성을 살펴보기로 한다. 액추에이터를 포함한 모델은 Fig. 2의 (c)에 있으며 동역학식은 다음과 같다.

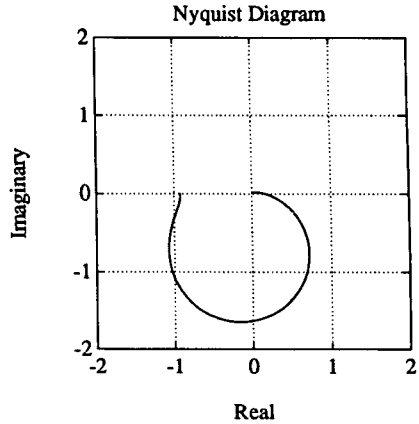
$$\begin{aligned} a_c f_{ux} &= f_{ux1} + a_c f_{ux1} \\ f_{ux1} &= m_x \ddot{x} + b_{rx} \dot{x} + b_e x + k_e x \end{aligned} \quad (18)$$

여기서, a_c 는 액추에이터의 대역폭을 나타낸다. 그리고 f_{ux} , f_{ux1} 은 각각 액추에이터의 원하는 토크 및 실제 토크를 나타낸다. 강체모델에서와 같은 방법으로 $G(s)$ 를 구하면 다음과 같다.

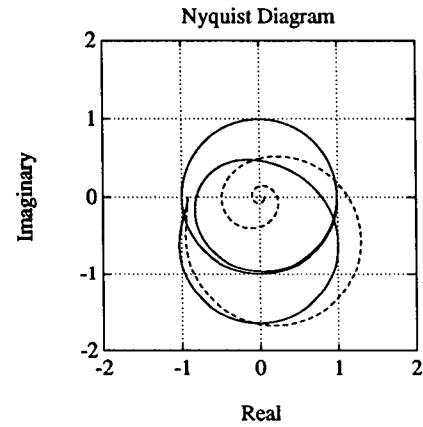
$$G(s) = \frac{(m_x s^2 + b_{rx}s + b_e s + k_e) \frac{s + a_c}{a_c} - \bar{m}_x s^2}{(m_x s^2 + b_{rx}s + b_e s + k_e) \frac{s + a_c}{a_c} + \bar{m}_x(k_{vs} + k_f)} e^{-Ls} \quad (19)$$

$G(s)$ 의 나이퀴스트선도는 Fig. 3의 (b)에 있다. $(-1, 0)$ 을 지나므로 시스템은 경계안정(marginally stable)하다.

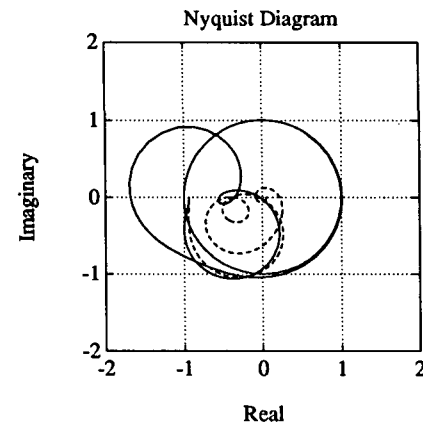
위의 경계안정한 시스템을 안정하게 하기 위해서, Fig. 1과 같이 TDC의 입력 경로에 저주파필터(low pass filter)⁽¹⁹⁾를 추가하기로 한다. 저주파필터가 포함된 제어법칙은 다음과 같다.



(a) Rigid body model



(b) Rigid body model with actuator dynamics



(c) Flexibility included model

- : Without low-pass filter
- - - : With low-pass filter
- : Without low-pass filter
- - - : With low-pass filter

Fig. 3 Nyquist plots of the control system with TDC under three conditions :

$$F_{ux}(s) = \left\{ \frac{\bar{m}_x}{k_e} [(s^2 + K_{vs}s + K_f) F_d(s) - (s^2 e^{-Ls} + k_{vs}s + k_f) F(s)] + e^{-Ls} F_{ux}(s) \right\} \frac{a}{s+a} \quad (20)$$

여기서, a 는 저주파필터의 대역폭(bandwidth)을 나타낸다. 식(18)과 (20)을 이용하여 $G(s)$ 를 구하면 다음과 같다.

$$G(s) = \frac{[(m_x s^2 + b_{rx}s + b_e s + k_e) \frac{s+a}{ac} - \bar{m}_x s^2]}{(m_x s^2 + b_{rx}s + b_e s + k_e) \frac{s+a}{ac} \frac{s+a}{a} + \bar{m}_x (K_{vs}s + K_f)} e^{-Ls} \quad (21)$$

식(21)의 나이퀴스트선도는 Fig. 3의 (b)에 있다. $(-1, 0)$ 을 감싸지 않으므로 시스템은 안정하다. 즉, 액추에이터의 대역폭을 고려한 경우에도 제어 시스템은 안정함을 알 수 있다.

그리고 이러한 로봇-환경 시스템을 단순모델로 바꾸어서 해석하는 방법은 2자유도 로봇뿐만 아니라 일반적인 로봇에도 적용할 수 있으리라 생각된다.

3.3 유연모델

여기서는 로봇의 관절 및 팔의 유연성을 포함한 유연모델(flexibility model)에 대한 안전성을 살펴보기로 한다. Fig. 2의 (d)에 있는 유연모델의 동역학식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} f_{ux} &= m_{x1} \ddot{x}_1 + b_{rf}(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + k_{rf}(x_1 - x_2) + b_{rx} \dot{x}_1 \\ 0 &= m_{x2} \ddot{x}_2 + b_{rf}(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + k_{rf}(x_2 - x_1) + b_e \dot{x}_2 + k_e x_2 \end{aligned} \quad (22)$$

여기서, k_{rf} 와 b_{rf} 는 각각 유연강성과 유연감쇠를 나타낸다. 그리고 $G(s)$ 를 구하면 다음과 같다.

$$G(s) = \frac{A - \bar{m}_x s^2}{A \frac{s+a}{a} + \bar{m}_x (k_{vs}s + k_f)} e^{-Ls} \quad (23)$$

$$A = \frac{(m_{x1}s^2 + b_{rx}s + b_{rf}s + k_{rf})(m_{x2}s^2 + b_{rf}s + b_e s + k_e) - b_{rf}s - k_{rf}}{b_{rx}s + b_{rf}s + k_{rf}} \quad (24)$$

식(23)에서 $\frac{s+a}{a}$ 부분을 포함하면 저주파필터가 첨가되고, 제외하면 저주파필터가 첨가되지 않는다. $G(s)$ 의 나이퀴스트선도는 Fig. 3의 (c)에 있다. 그림에 나타난 것처럼 저주파필터를 첨가한 TDC

를 혼합제어에 적용시 안전성에 문제가 별로 없음을 말해준다.

그리고 이러한 로봇-환경 시스템을 단순모델로 바꾸어서 해석하는 방법은 2자유도 로봇뿐만 아니라 일반적인 로봇에도 적용할 수 있으리라 생각된다.

4. 정상상태에서의 응답 향상

지금까지의 힘제어 및 혼합제어에 대한 실험결과들을 살펴보면, 정상상태에서의 떨림의 크기가 대체로 크다. 그리고 이러한 정상상태의 떨림은 힘센서의 분해능과 밀접한 관련이 있으며, 위치제어에서도 역시 정상상태의 떨림크기가 위치측정센서의 분해능에 좌우됨을 확인하였다. 여기서는 실험을 통하여 혼합제어시 정상상태에서의 떨림과 힘센서의 분해능사이의 관계를 살펴보고, 힘센서의 A/D 변환기의 분해능을 조절하여 떨림크기를 줄이는 방법을 제안하고 그 결과를 확인한다.

4.1 실험장치

실험에 사용되는 로봇은 스카라형 평면 2자유도 로봇이며, 실험장치는 Fig. 4에 있다. 그리고 로봇의 사양은 Table 2에 있다. 구동장치는 BLDC모터이고 감속기로 하모닉 드라이브(harmonic drive)

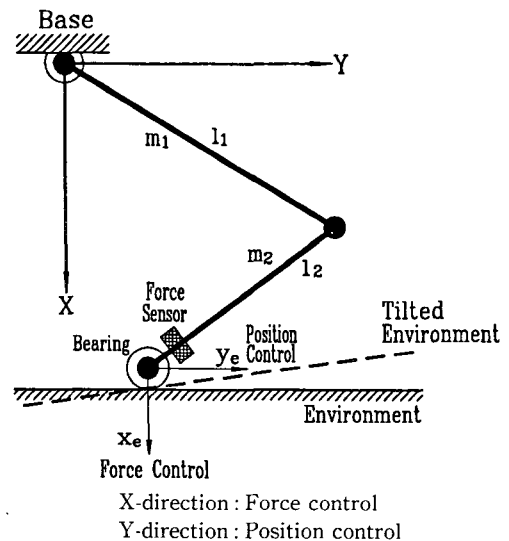


Fig. 4 Schematic diagram of the experimentation system for the Position/Force control

Table 2 Dimension of robot

Arm No.	Mass	Length	Reduction ratio
Arm 1	11.17 kg	35 cm	100 : 1
Arm 2	6.87 kg	28.5 cm	80 : 1

가 사용되었다. 그리고 각변위를 측정하기 위해, 각각의 모터에 4096 pulse/rev의 분해능을 가진 레졸버(resolver)가 장착되어 있다. 힘을 측정하는 장치로는 Lord사의 힘/토크센서를 사용되며, 분해능을 0.278 N(1 oz)이고 응답속도는 100 Hz이다. 센서에는 센서제작회사에서 장착된 저주파필터가 사용되었는데, 필터를 거친 후의 신호의 노이즈 크기는 0.278 N이다.

환경은 약 35,000 N/m의 작은 강성을 가진 실리콘고무와, 약 15,000 N/m의 큰 강성을 가진 알루미늄을 사용하였다. 그리고 제어시스템은 본 실험실에서 제작한 범용제어기⁽²⁰⁾를 사용하며, 표본주파수(sampling frequency)는 250 Hz로 하였다.

선택행렬 S 와 이득값은 다음과 같다.

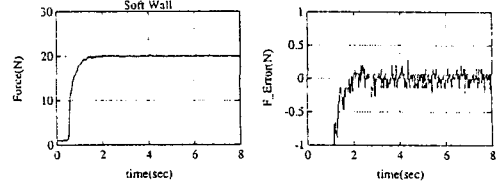
$$S = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \bar{M}_x = \begin{bmatrix} \alpha & 0 \\ 0 & \alpha \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$K_{vf} = \begin{bmatrix} 2\zeta_f \omega_f & 0 \\ 0 & 2\zeta_f \omega_f \end{bmatrix}, \quad K_f = \begin{bmatrix} \omega_f^2 & 0 \\ 0 & \omega_f^2 \end{bmatrix} \quad (26)$$

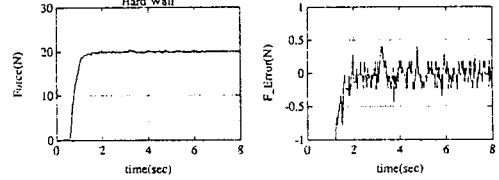
$$K_{vp} = \begin{bmatrix} 2\zeta_p \omega_p & 0 \\ 0 & 2\zeta_p \omega_p \end{bmatrix}, \quad K_p = \begin{bmatrix} \omega_p^2 & 0 \\ 0 & \omega_p^2 \end{bmatrix} \quad (27)$$

로봇의 x, y 방향의 동역학적 비결합(dynamic decoupling) 되도록 선택행렬과 이득값의 비대각선 성분을 모두 0으로 하였다. 하지만 로봇자체의 동역학이 서로 결합되었기 때문에 이러한 방법을 쓰더라도 완전히 비결합되지는 않으며, 자세한 내용은 5장에서 다룬다.

\bar{M}_x 의 값은 실험으로 추정된 $M_x(\theta)$ 값의 최소 고유값으로부터 정하였다. 즉, 각 링크를 독립적으로 움직여 각각의 관성모멘트를 구하고, 이미 알고 있는 각 관절의 동작범위로부터 $M_x(\theta)$ 값의 최소 고유값을 구한다. 그런데, 실제 실험에서는 제어입력이 토크가 아닌 모터 드라이브의 토크지령 전압이다. 그러므로 실험으로부터 추정된 링크파라미터는 관성모멘트를 토크상수로 나눈 값이다. 실험에 의하면 각 모터에서 측정된 관성모멘트는 1축이 $0.005 \frac{\text{kgm}^2\text{V}}{\text{N}}$ 이고 2축이 $0.004 \frac{\text{kgm}^2\text{V}}{\text{N}}$ 이다. 이 값



(a) Soft wall



(b) Hard wall

Fig. 5 Experimental result of force control by using TDC: when step input is applied to both a hard wall and a soft wall

과 x, y 의 동작범위 안에서 $\rho(M_x(\theta))$ 를 구하면 2.12×10^{-7} 이다. 따라서 실험에서는 $\alpha = 1 \times 10^{-7}$ 으로 정하였다.

4.2 실험결과

여기서는 2장에서 유도한 TDC법칙과 실험장치를 이용하여 실험한다. 힘센서의 분해능이 나쁘고 응답속도가 느리므로, 제어법칙에서 힘신호 대신 위치신호의 미분값을 이용하는 식(12)를 사용하기로 한다. 힘 명령값을 20(N), 위치 명령값을 초기 위치(100 mm)로 준 경우의 실험결과가 Fig. 5에 있다. 그림에 나타난 것처럼 과잉응답(overshoot) 없이 대체로 우수한 응답을 보이고 있다. 즉 TDC가 로봇-환경의 비선형성, 불확실성을 충분히 보상함을 알 수 있다.

정상상태의 응답을 살펴보면, 환경의 강성에 상관없이 거의 일정한 크기로 떨리고 있음을 볼 수 있다. 이 크기는 힘센서의 분해능의 2~3배에 해당하는 값이다. 그리고 위치제어에서도 정상상태의 떨림은 위치측정센서의 분해능과 밀접한 관련이 있음을 살펴보았다. 이러한 사실로 미루어 보아 정상상태의 떨림을 줄이기 위해서는, 힘센서의 분해능 향상 및 잡음방지가 요구된다.

4.3 힘센서에 포함된 A/D변환기의 분해능 조절

앞의 실험결과를 살펴보면, 과도상태에서는 응답의 변화량이 크고 정상상태에서는 변화량이 매우

작다. 그리고 센서의 사양을 살펴보면, 측정범위가 큰 센서는 분해능이 나쁘며 측정범위가 작을수록 분해능이 우수하다. 이러한 센서의 특징을 이용하여 과도상태에서는 측정범위를 크게 하고, 정상 상태에서는 측정범위를 줄이는 대신 분해능을 향상하여 보다 향상된 응답을 얻고자 한다. 구체적인 계획은 Fig. 6에 있다.

힘센서, 포텐쇼미터(potentiometer)와 같이 A/D 변환기를 사용하는 센서는, 아날로그신호를 증폭한 다음 A/D변환 후 증폭비만큼 줄임으로써 분해능을 향상할 수 있다. 그리고 증폭기(Op-Amp)와 A/D변환기의 작동범위의 한계(operating limit)로 인한 증폭비의 제한을 없애고, 센서의 기준점을 조절하기 위해, 변환기에서 나온 아날로그 신호에 한 표본시간 이전의 값을 오프셋(offset)으로 준다. 이러한 방법을 블록선도로 나타내면 Fig. 7과 같다.

그리고 응답의 오차와 속도의 오차가 일정값보다 작으면 정상상태로 간주하여, 변환기에서 나온 아날로그 신호를 증폭함으로써 센서의 측정범위를 줄이는 대신 A/D변환기의 넓은 범위를 사용하여 분

해능을 향상한다. 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\text{If } (|F_a - F| < C_1 \text{ AND } |\dot{F}_a - \dot{F}| < C_2) \\ \text{Then enhance resolution} \quad (25)$$

여기서, C_1 과 C_2 는 상수를 나타내며 적절히 선정한다. 외란으로 인하여 시스템의 변화량이 큰 경우에는 $|F_a - F|$ 또는 $|\dot{F}_a - \dot{F}|$ 의 값이 커지므로 다시 측정범위가 큰 상태에서 작동하게 된다.

그런데 변환기에서 나오는 아날로그신호를 증폭할 경우에 잡음(noise)도 같이 증폭된다. 하지만 Fig. 7의 sig+와 sig- 신호는 같은 환경에 있어서 동상(common mode)의 잡음이 많으므로, 두 신호를 차동형(differential mode)으로 A/D변환하면 잡음을 대부분 줄일 수 있다. 결과는 Table 3에 있으며, 증폭비를 크게함에 따라 분해능은 증가하지만 잡음은 항상 분해능의 2배임을 알 수 있다. 또한 힘센서의 응답 속도도 100(Hz)에서 250(Hz)로 증가하였다.

스트레인게이지(strain gauge), LVDT 등은 힘센서와 마찬가지로 차동형(differential mode)으로 사용하므로, 제안한 방법으로 분해능을 조절하고 또한 잡음을 줄일 수 있다.

4.4 성능이 향상된 힘센서를 이용한 실험결과

A/D변환기의 분해능을 임의로 조절할 수 있는 힘센서를 실험에 적용하기로 한다. 힘 명령값을 20(N), 위치 명령값을 초기 위치로 준 경우의 실험 결과가 Figs. 8, 9에 있다. 그림에 나타난 것처럼 힘센서가 과도상태에서는 증폭비가 작게(측정범위

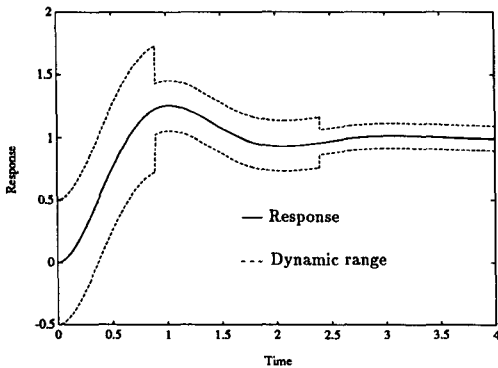


Fig. 6 Adaptive adjustment of dynamic range according to the response

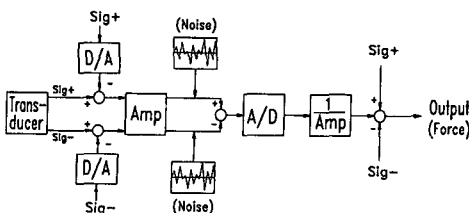


Fig. 7 The schematic block diagram of adaptive adjustment device for the A/D converter

Table 3 Noise according to amplification ratio

Amp. ratio	Range	Resolution	Noise(measured)
1	350 N	0.278 N	0.278×2 N
2.5	140 N	$\frac{0.278}{2.5}$ N	$\frac{0.278}{2.5} \times 2$ N
5	70 N	$\frac{0.278}{5}$ N	$\frac{0.278}{5} \times 2$ N
10	35 N	$\frac{0.278}{10}$ N	$\frac{0.278}{10} \times 2$ N
20	17.5 N	$\frac{0.278}{20}$ N	$\frac{0.278}{20} \times 2$ N
40	8.75 N	$\frac{0.278}{40}$ N	$\frac{0.278}{40} \times 2$ N

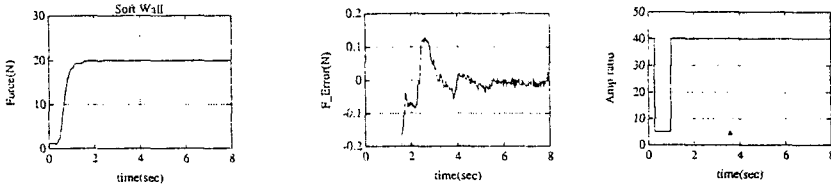


Fig. 8 Experimental result of force control by using adaptive adjustment scheme in conjunction to TDC, when a step input is applied to a soft wall

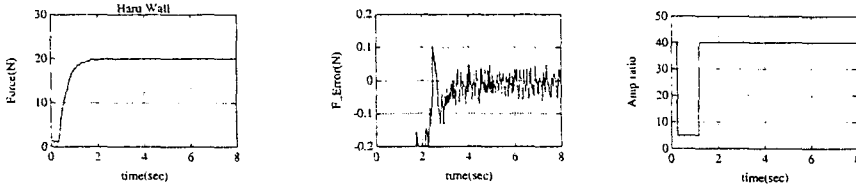


Fig. 9 Experimental result of force control by using adaptive adjustment scheme in conjunction to TDC, when a step input is applied to a hard wall

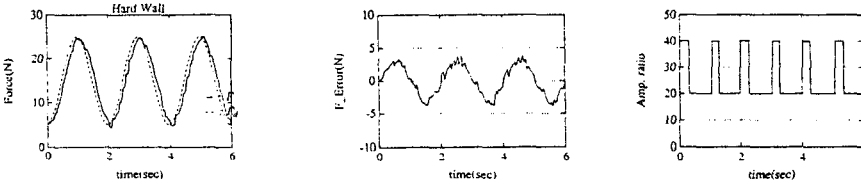


Fig. 10 Experimental result of force control by using adaptive adjustment scheme in conjunction to TDC, when a sinusoidal input is applied to a hard wall

가 크게), 정상상태에서는 증폭비가 크게(측정범위가 작게) 작동함을 볼 수 있다. 또한 Fig. 5와 마찬가지로 오버슈트(overshoot)가 없다. 정상상태의 응답을 살펴보면 환경의 강성이 작은 경우는 약 8배정도, 강성이 큰 경우는 약 5배 정도로 떨림의 크기가 줄어들었다. 즉 힘센서의 A/D변환기의 분해능을 적절히 조절하여 정상상태에서의 응답을 향상시킬 수 있다. 그리고 힘센서의 성능이 향상되었으므로 식(10)과 같이 힘신호의 미분값을 사용하더라도 무방하며, 실험결과는 Figs. 8, 9와 유사하였다.

그리고 Fig. 10은 힘입력을 정현파로 준 경우이다. 역시 오차가 크면 측정범위가 크게, 오차가 작으면 측정범위가 작게 작동함을 볼 수 있다. 즉 이러한 힘센서의 A/D변환기의 분해능 조절방법은 다양한 입력에 적용될 수 있음을 보여준다.

5. 동역학적 결합

5.1 동역학적 결합에 의한 영향

여기서는 로봇의 동역학적 결합(dynamic coupl-

ing)과 혼합제어에 미치는 영향에 대해서 살펴보기로 한다. 2자유도 로봇의 동역학식은 작업공간(task space)에서 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} f_{ux} \\ f_{uy} \end{pmatrix} = M_x(\theta) \begin{pmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \end{pmatrix} + V_x(\theta, \dot{\theta}) + G_x(\theta) + F_{ext} \quad (29)$$

여기서, $M_x(\theta)$ 는 부록에 있는 것처럼 2×2 행렬이다. 그리고 $V_x(\theta, \dot{\theta})$, $G_x(\theta)$, F_{ext} 는 벡터이다. 식(29)을 살펴보면 $M_x(\theta)$ 의 비대각선 성분에 의해서 \ddot{x} 와 \ddot{y} 가 각각 상호간에 영향을 준다. 이와 같은 로봇의 동역학적 결합에 의한 영향을 실험을 통하여 살펴보기로 한다. 힘 명령값을 20(N), 위치 명령값을 200(mm)의 계단파 입력으로 주었을 때의 실험 결과가 Fig. 11에 있다. 그림에 나타난 것처럼 힘응답이 별로 좋지 않으며, 이 현상은 로봇의 동역학적 결합으로 인하여 \ddot{y} 가 x 방향의 동역학에 영향을 주어서 나타난다. 그리고 동역학적 결합은 로봇자체의 동역학에 의해 발생하므로, 혼합제어에서 선택행렬(selection matrix)⁽²¹⁾을 쓰더라도

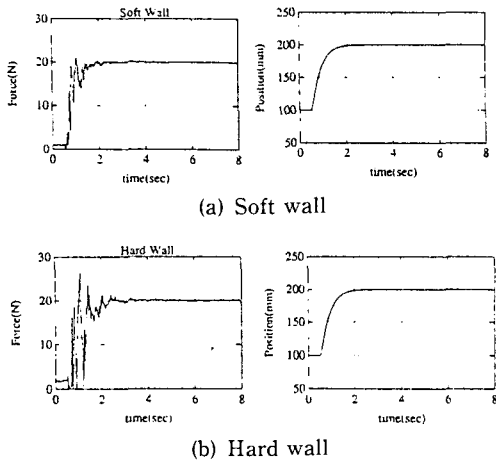


Fig. 11 Experimental result of Position/Force by using TDC, when Position/Force step input are applied both a soft wall

도 그림에 나타난 것처럼 완전히 보상할 수는 없다.

그리고 이러한 동역학적 결합에 의한 영향은 혼합제어 뿐만 아니라 위치제어에서도 나타난다. 특히 혼합제어에서는 환경의 강성에 의하여 위치 제어보다도 그 영향이 증폭되며, 강성이 클수록 영향도 크게 나타난다.

5.2 동역학적 결합의 보상

여기서는 로봇의 동역학적 결합에 의한 영향을 줄이고자 한다. 우선 \dot{y} 의 크기를 작게 하면 그만큼 x 방향의 동역학에 주는 영향을 줄일 수 있으므로 향상된 응답을 얻을 수 있다. \dot{y} 의 크기가 작을 때 힘제어를 한 경우는 Fig. 12에 있다. Fig. 11에 비하여 과잉응답이 많이 줄어들었음을 알 수 있다. 그리고 \dot{y} 의 크기가 작도록 위치명령을 제적 함수로 준 경우의 실험결과가 Fig. 13에 있다. 정상 상태에 도달하는 시간은 길지만, 역시 과잉응답이 많이 줄어들었음을 알 수 있다.

다른 방법으로는 제어법칙에서, 상수관성행렬 대신 로봇의 정확한 관성값을 사용하는 것이다.^(21,22) \bar{M}_x 를 사용하면 동역학적 결합을 보상하지 못하지만, $M_x(\theta)$ 를 사용하면 로봇의 관성행렬($M_x(\theta)$)의 비대각 성분에 의한 동역학적 결합을 대부분 보상한다. 여기서는 이 방법을 모의실험에 적용해 보기로 한다. \bar{M}_x 와 $M_x(\theta)$ 를 사용한 경우의 모의 실험결과는 Fig. 14에 있다. 상수관성행렬을 사용한

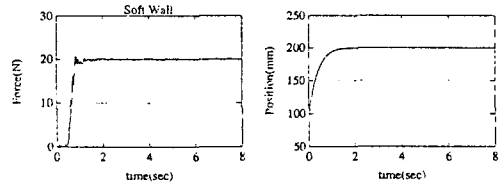


Fig. 12 Experimental result of Position/Force control by using TDC. A force step input is applied to a soft wall, when the e-e moves with low acceleration

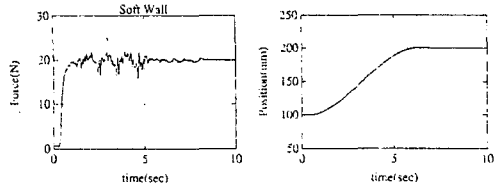
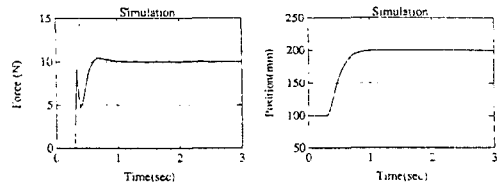
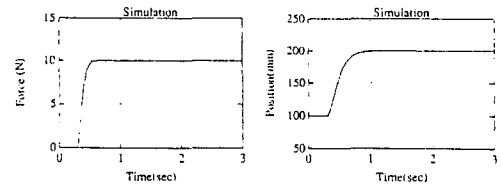


Fig. 13 Experimental result of Position/Force control by using TDC. A force step input is applied to a soft wall, when the e-e moves smoothly.



(a) When \bar{M}_x , a constant inertia matrix(an approximate one), is used



(b) When $M_x(\theta)$ (a more accurated one) is used

Fig. 14 Simulation results of Position/Force control by using TDC.

경우에는 동역학적 결합에 의해 응답이 나빠지만, 정확한 $M_x(\theta)$ 값을 사용함으로써 동역학적 결합을 충분히 보상함을 알 수 있다. 하지만 실제 로봇의 $M_x(\theta)$ 값을 정확히 알기란 매우 어렵다. 그리고 로봇의 파라미터를 정확히 알더라도 $M_x(\theta)$ 가 로봇의 위치의 함수이므로, 실시간으로 구해야 하며 계산량이 많아지는 단점이 있다.

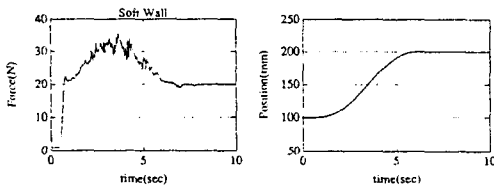
6. 환경이 기울어진 경우

6.1 환경의 기울어짐에 의한 '영향'

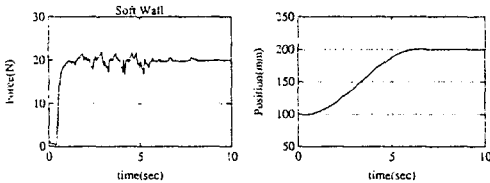
로봇이 환경과 상호작용을 하는 경우에, 환경에 굴곡이 있거나 환경이 기울어진 경우가 있다. 이러한 환경의 굴곡이나 기울어짐은 주위에서 쉽게 접할 수 있으므로, 이러한 경우의 영향을 살펴보고 그 영향을 최소로 줄이는 대책이 요구된다. 여기서는 Fig. 4와 같이 기울어진 환경(tilted environment)에 대해서 살펴보기로 한다. 사용자는 환경이 기울어지지 않았다고 가정하고 혼합제어를 한다. 그런데 실제 환경은 Fig. 4의 점선과 같이 기울어져 있으므로, 로봇말단을 $-x_e$ 방향으로 움직이려고 한다. 따라서 동역학적 결합과 기울어진 환경에 의한 외란이 동시에 존재하게 된다. 이러한 영향을 실험을 통해서 살펴보기로 하자. 환경이 약 6° 기울어진 경우에 대하여 식(30)의 제어법칙에 대한 실험 결과가 Fig. 15(a)에 있다.

$$f_{ux} = \bar{m}_x [\ddot{x}_a + k_{vf}(\dot{x}_a - \dot{x}) + \frac{k_f}{k_e}(f_a - f)] + f_{ux}(t-L) - \bar{m}_x \ddot{x}(t-L) \quad (30)$$

그림에 나타난 것처럼 위치방향으로 변위가 있는 경우에는 과잉응답이, 정지한 경우에는 과잉응답이



(a) TDC response using position derivative in tilted environment



(b) TDC response using force derivative in tilted environment

Fig. 15 Experimental results of Position/Force control when a force step input is applied to a tilted wall while the e-e is moving along the wall

있다. 즉 기울어진 환경이 힘방향에 외란으로 작용하여 응답을 저하한다.

6.2 기울어진 환경의 보상

앞에서 혼합제어시 기울어진 환경이 힘제어 방향에 외란으로 작용하여, 응답이 저하됨을 살펴보았다. Fedele⁽¹³⁾는 이러한 기울어진 환경에 의한 외란을 보상하기 위해, 제어법칙에 적분항을 첨가할 것을 제안하였다. 하지만 환경의 기울어짐에 의한 영향을 완전히 보상하지는 못하였고, 오히려 적분항에 의하여 제어가 복잡해진 단점이 있다. 여기서는 이러한 외란을 보상하기 위하여 위치 대신 힘의 미분값을 사용하기로 한다. 4장에서 힘센서의 분해능을 향상하였고 응답속도도 빨라졌으므로, 힘신호의 미분값을 사용하더라도 별로 어려움이 없다. 제어법칙은 식(31)와 같다.

$$f_{ux} = \frac{\bar{m}_x}{k_e} [\ddot{f}_a + k_{vf}(\dot{f}_a - \dot{f}) + k_f(f_a - f)] + f_{ux}(t-L) - \frac{\bar{m}_x}{k_e} \ddot{f}(t-L) \quad (31)$$

그리고 실험결과는 Fig. 15(b)에 있다. 환경이 기울어지지 않은 경우와 마찬가지로 큰 과잉 응답이 없음을 알 수 있다. 즉 환경의 기울어짐에 의한 외란을 충분히 보상한다.

이 사실은 다음과 같이 설명할 수 있다. 위치 미분값을 사용하는 기법은 $\dot{x}_a - \dot{x} = 0$, 즉 로봇말단을 한 위치에 유지하려는 성질을 가진다. 따라서 기울어진 환경과 같은 위치 외란을 별로 보상하지 못한다. 그리고 힘 미분값을 사용하는 방안은 $\dot{f}_a - \dot{f} = 0$, 즉 로봇말단과 환경과의 상호작용력을 일정하게 유지하려는 성질을 가진다. 따라서 기울어진 환경과 같은 위치 미분값을 사용하는 경우에는, 로봇말단이 기울어진 환경과 같은 위치 외란을 충분히 보상한다. 구체적으로 살펴보면 다음과 같다. 식(30)과 같이 위치 미분값을 사용하는 경우에는, 로봇말단이 기울어진 환경을 따라 움직이면 \dot{x} 가 음(-)의 값을 가지므로 제어입력 f_{ux} 을 증가시킨다. 그러나 식(31)과 같이 힘 미분값을 사용하는 경우에는, 로봇말단이 기울어진 환경을 따라 움직이면 \dot{f} 가 양(+)의 값을 가지지 않기 위해서는 f_{ux} 를 줄여야 한다. 그래서 \dot{x} 값을 사용하면 큰 과잉응답이 생기고, \dot{f} 값을 사용하면 기울어짐 환경에 의한 외란을 충분히 보상한다. 이러한 위치 대신 힘 미분값을 사용하는 방법은 TDC뿐만 아니

라, PD, PID 등의 감쇠항을 포함하는 제어기에는 모두 적용할 수 있다.

7. 결 론

본 논문에서는 혼합(위치/힘) 제어시 우수한 응답을 얻기 위하여 다음과 같은 연구를 행하였다. 혼합제어를 위한 TDC 알고리즘을 유도하였으며, 로봇을 강체로 모델링한 경우와, 액추에이터의 대역폭을 포함한 경우, 그리고 유연모델에 대하여 제어시스템이 안정함을 확인하였다. 그리고 혼합 제어에서 일반적으로 나타나는 문제점들을 다음과 같은 방법으로 해결하였다.

(1) 정상상태에서의 힘응답은 힘센서의 분해능과 밀접한 관계가 있음을 살펴보았다. 그리고 힘센서에 있는 A/D변환기의 분해능을 적절히 조절함으로써, 정상상태의 응답을 향상하였다.

(2) 로봇의 동역학적 결합과 그 영향을 살펴보았다. 그리고 위치방향의 가속도의 크기를 작게하거나, 제어법칙에서 \bar{M}_x 대신 $M_x(\theta)$ 를 사용하여 동역학적 결합을 보상하였다.

(3) 환경의 기울어짐이 힘방향에 외란으로 작용하여 응답이 저하됨을 살펴보았다. 그리고 제어법칙에서 \dot{x} , \ddot{x} 대신 $\frac{F}{k_e}$, $\frac{\dot{F}}{k_e}$ 를 사용하여, 환경의 기울어짐에 의한 외란을 보상하였다.

그리고 제안한 방법들이 모의실험과 실험을 통하여 매우 효과적임을 확인하였다. 제어기의 표본시간을 줄여서 로봇-환경 시스템의 불확실성 H 를 정확히 추정하고, 상수관성행렬 대신 로봇의 정확한 관성값을 사용하면, 더욱 우수한 응답을 얻을 수 있다.

부 록

일반적인 회전관절(revolute joint)형 2자유도 로봇의 동역학식은 관절 공간과 작업 공간에서 다음과 같이 표현된다.

· 관절공간(joint space)

$$\tau_u = M(\theta) \ddot{\theta} + V(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta)$$

· 작업공간(task space)

$$F_v = M_x(\theta) \ddot{x} + V_x(\theta, \dot{\theta}) + G_x(\theta)$$

여기서, $M(\theta)$, $V(\theta, \dot{\theta})$, $G(\theta)$ 와 $M_x(\theta)$, $V_x(\theta, \dot{\theta})$,

$G_x(\theta)$ 는 다음과 같다.

$$M(\theta) = \begin{pmatrix} m_2 l_2^2 + 2m_2 l_1 l_2 c_2 + (m_1 + m_2) l_1^2 & m_2 l_2^2 + m_2 l_1 l_2 c_2 \\ m_2 l_2^2 + m_2 l_1 l_2 c_2 & m_2 l_2^2 \end{pmatrix}$$

$$V(\theta, \dot{\theta}) = \begin{pmatrix} -m_2 l_1 l_2 s_2 \dot{\theta}_2^2 - 2m_2 l_1 l_2 s_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \\ m_2 l_1 l_2 s_2 \dot{\theta}_1^2 \end{pmatrix}$$

$$M_x(\theta) = J^{-T}(\theta) M(\theta) J^{-1}(\theta)$$

$$V_x(\theta, \dot{\theta}) = J^{-T}(\theta) [V(\theta, \dot{\theta}) - M(\theta) J^{-1}(\theta) \dot{j}(\theta) \dot{\theta}]$$

$$G_x(\theta) = J^{-T}(\theta) G(\theta)$$

참고문헌

- (1) An, Chae H. and Hollerbach, John M., 1987, "Dynamic Stability Issues in Force Control of Manipulators," In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 890~896.
- (2) Eppinger, Steven D., 1988, "Modeling Robot Dynamic Performance for Endpoint Force Control," PhD thesis, MIT.
- (3) Qian, H. P. and Schutter, J. De, 1992, "Introducing Active Linear and Nonlinear Damping to Enable Stable High Gain Force Control in case of Stiff Contact," In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1374~1379.
- (4) Qian, H. P. and Schutter, J. De, 1992, "The Role of Damping and Low Pass Filtering in the Stability of Discrete Time Implemented Robot Force Control," In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1368~1373.
- (5) Volpe, Richard and Khosla, Pradeep, 1992, "An Experimental Evaluation and Comparison of Explicit Force Control Strategies for Robotic Manipulators," In *Proceeding of ACC*, pp. 758~764.
- (6) Hung, John Y., Gao, Weibing and Hung, James C., 1993, "Variable Structure Control: A Survey," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 40, No. 1, pp. 2~22.
- (7) Youcef-Toumi, K. and Ito, Osamu, 1990, "A Time Delay Controller for Systems with Unknown Dynamics," *ASME Journal of Dynamics Systems, Measurement, and Control*, Vol. 112, pp. 133~141.

- (8) Komada, Satochi, Nomura, Koichi, Ishida, Muneaki, and Hori, Takamasa, 1993, "Robust Force Control Based on Compensation for Parameter Variations of Dynamic Environment," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 40, No. 1, pp. 89~95.
- (9) Komada, Satochi, Ohnishi, Kouhei, and Hori, Takamasa, 1991, "Hybrid Position/Force Control of Robot Manipulators Based on Acceleration Controller," *In IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 48~55.
- (10) Chang, P. H. and Lee, J. W., 1993, "An Observer Design for Time-Delay Control and Its Application to DC Servo Motor," *In Proceedings of the American Control Conference*.
- (11) Chin, S. M., Chang, P. H., and Lee, C. O., 1993, "Application of Time Delay Control for an Electrohydraulic Servo System," *In Proceedings of the International Conference for Fluid Power*.
- (12) Kim, D. S., 1993, "Force Control of 2-Link Manipulator Using TDC," Master's thesis, KAIST.
- (13) Fedele, Almerico, Fioretti, Antonio, and Ulivi, Giovanni, 1992, "Implementation of a Hybrid Force-Position Controller using Sliding Mode Techniques," *In IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2126~2133.
- (14) Lasky, T. A. and Hsia, T. C., 1991, "On Force-Tracking Impedance Control of Robot Manipulators," *In IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 274~280.
- (15) Hsia, T. C. and Gao, L. S., 1990, "Robot Manipulator Control using Decentralized Linear Time-invariant Time-delayed Joint Controllers," *In IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2070~2075.
- (16) Khatib, Oussama and Burdick, Joel, 1986, "Motion and Force Control of Robot Manipulators," *In IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1381~1386.
- (17) Mason, M., 1978, "Compliance and Force Control for Computer Controlled Manipulators," Master's thesis, MIT.
- (18) Raibert, M. and Craig, J., 1981, "Hybrid Position/Force control of Manipulators," *ASME Journal of Dynamics Systems, Measurement, and Control*, Vol. 102, pp. 126~133.
- (19) Lee, J. W. and Chang, P. H., 1993, "Stability/Robustness of TDC for SISO Systems with Significant Unmodelled Dynamics," *In Proceedings of the KSME Autumn Annual Meeting*, pp. 271~276.
- (20) Park, J. Y., 1993, "Implementation of Universal Robot Controller and Application to Redundant Robot," Master's thesis, KAIST.
- (21) Khatib, Oussama, 1987, "A Unified Approach for Motion and Force Control of Robot manipulators: The Operational Space Formulation," *IEEE Journal of Robotics and Automation*, Vol. RA-3, No. 1, pp. 43~53.
- (22) Bona, B. and Indri, M., 1992, "Exact Decoupling of the Force-Position Control using the Operational Space Formation," *In IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1394~1398.