

# 로봇의 디버링 작업이나 표면 광택작업을 위한 새로운 힘제어 기술 개발

## New Robot Force Control Technique for Deburring and Polishing Process

정 슬  
(Seul Jung)

**Abstract** : In this paper, a new impedance force control method for deburring and polishing process is proposed. The proposed method is robust to deal with unknown environment stiffness as unknown well as environment location. An adaptive technique is used to minimize the force error occurred due to unknown environment surface profile. A robust position control algorithm based on time-delayed information is used to cancel out uncertainties in robot dynamics. A three link robot manipulator is used to demonstrate performances of the proposed control on deburring and polishing tasks. Stability analysis for the adaptive control is presented and its results are confirmed by simulations.

**Keywords** : impedance force control, robot manipulator, stability, adaptive control, deburring, polishing

### I. 서론

최근에는 생산 공정이 점차 자동화됨에 따라 생산공정에서 로봇의 역할이나 기여도가 점점 중요해지고 있는 실정이다. 로봇을 제어하는 기술도 물건을 옮기는 단순한 위치제어에서 벗어나 힘과 위치를 동시에 제어하는 복잡하고도 세련된 방향으로 요구되어 진다. 대표적인 힘제어를 적용한 예를 보면, 로봇을 사용하는 부품조립, 디버링, 광택작업, 그라인딩, 부품 삽입, 핸들 돌리기, 로봇끼리의 상호작용 등이 있다 최근 미국 NASA에서는 인공 위성과 같은 속도로 지구 주위를 돌며 고장난 위성을 수리하는 로봇을 연구 중으로, 이 경우 로봇과 인공위성의 접촉시에 정확한 위치제어 및 힘제어를 필요로 한다.

로봇을 응용한 디버링 작업은 힘제어의 한 대표적인 예로서 일반 산업 공정, 특히 주물 생산 공정이나 절삭 가공 후의 뒤처리 공정으로 많이 쓰인다. 로봇을 사용해서 대상(주물)의 거친 표면을 부드럽게 하려면 적당한 힘을 대상 표면에 가한 상태로 대상의 표면을 따라 움직이면서 로봇 팔 끝에 부착되어 있는 도구로 표면을 가공한다 [1]. 로봇 팔 끝이 대상과의 접촉을 계속 유지시키면서 대상이 일정한 힘을 받도록 조절한다. 이때에 로봇은 주어진 경로를 추종하게 되는데 로봇과 대상사이의 접촉으로 생기는 힘을 제어하는 것이 필요하다.

힘제어에서 로봇이 대상을 누르는 힘의 크기는 로봇이 주어진 경로(reference trajectory)에 얼마만큼 도달했는가에 정해지므로, 제어하려는 힘의 크기는 로봇 팔 끝의 위치를 적당하게 제어함으로써 조절된다.

힘제어에는 다양한 기술[2]-[20]이 있지만 대표적인 힘제어 방법으로는 임피던스 제어 방식[4]과 하이브리드 힘제어 방식[5]들이 주류를 이룬다. 임피던스 제어 방식은 힘과

위치를 직접 제어하는 것이 아니라 로봇 팔 끝의 위치와 대상으로부터의 반영된 힘과의 동적 관계를 조절함으로써 힘을 간접적으로 제어한다. 그러나 이 방법은 원하는 힘을 직접 기준 입력으로 설정하지 못하는 단점이 있다[4]. 반면에, 하이브리드 힘제어 방식에서는 힘을 제어할 수 있는 방향과 위치를 제어할 수 있는 방향을 선택 행렬을 사용하여 미리 정하므로 원하는 힘과 위치를 직접 설정하여 추종하도록 제어할 수 있으나, 로봇과 대상 사이의 동적인 상관 관계를 무시함으로써 나타나는 힘의 과도응답을 제어하지 못하는 단점이 있다[5]. 임피던스 제어 방식과 하이브리드 제어 방식의 이점을 고려한 제어 방식으로 하이브리드 임피던스 제어 방식이 제안된 바 있다 [6][7].

기존의 임피던스 힘제어를 사용해서 디버링 작업을 하려면 로봇 팔 끝에 부착된 디버링 도구가 전체 로봇 동적 모형에 미치는 영향과 대상(주물)의 강성도(stiffness)와 위치(location) 등에 관한 정확한 사전 정보가 있어야만 원하는 힘을 제어하는 디버링 작업을 효과적으로 수행할 수 있다. 그렇지만, 이러한 정보들을 미리 알기도 어렵고 정확하게 측정하기가 어렵기 때문에 어느 정도의 측정오차를 허용하는 한도 내에서 디버링 작업을 잘 할 수 있는 강인한 힘제어 기술이 필요하다. 이 논문에서 제안하는 방식은 먼저 내부루프 제어에서 외란 제거(disturbance rejection) 알고리즘[10][11][22]을 사용하여 로봇 모형과 마찰력 등의 동적 불확실성을 보상하여 위치 제어를 정확하게 하도록 한다. 외부루프 제어에서는 대상의 강성도를 알 필요 없이 측정된 힘과 로봇의 팔 끝 위치로 강성도를 인식하는 경로 조정 알고리즘을 사용하여 원하는 힘을 추종하도록 한다[12]. 이 방식은 입력으로 힘을 설정할 수 있기 때문에 힘을 추종할 수는 있지만 대상의 위치를 정확하게 알지 못하면 힘추종에 오차가 생긴다.

따라서, 본 논문에서는 부정확한 대상의 위치 측정에서 생기는 힘추종 오차를 줄이기 위해 새로운 적응제어 방식을 사용한다. 적응변수의 크기에 따라 안정성과 성능이 좌

접수일자 1999. 11. 8., 수정완료 : 2000. 4. 27.

정 슬 충남대학교 메카트로닉스공학과

※ 본 논문은 학술진흥재단에서 1997년도 신진과제로 지원하여 연구하였습니다

우되므로 안정성과 수렴도를 이론적으로 분석하여 모의실험을 통해 검증한다. 3축 로봇의 모델로 시뮬레이션함으로써 제안하는 적응제어 알고리즘의 성능을 검증하고자 한다. 로봇의 모델은 PUMA 560로봇의 모델을 사용하여 실제적인 작업 환경을 시뮬레이션 하였다. 로봇의 동적 불확실성과 대상의 위치 및 강성에 대한 불확실성 등을 구성하여 모의실험을 수행하였다. 그 결과, 대상의 강성도와 위치를 정확하게 모르고 로봇의 동력학을 정확하게 보상하지 않는 열악한 상황에서 힘제어의 결과는 매우 만족스럽게 나타났다.

**II. 임피던스 힘제어 방식의 문제점**

임피던스(Impedance) 힘제어 방식[1]은 Salisbury의 강성제어(stiffness control) 방식[2]의 연장으로 Hogan의 전 초적 연구 이후에 많은 연구가 되어 왔고, 계속적으로 연구되고 있는 대표적인 힘제어 방식의 하나이다. 임피던스 힘제어 방식의 장점은 로봇 팔 끝과 대상과의 동적 관계를 고려하므로 접촉시에 힘의 응답을 제어할 수 있고, 단점은 팔 끝의 힘을 직접 조절하는 것이 아니라 임피던스 함수에 의해 간접적으로 조절되기 때문에 원하는 힘을 정확하게 추종하는 것이 어렵다는 것이다. 또한 힘제어는 위치제어에 의해 영향을 받으므로 로봇 동력학의 불확실성을 보상하여 위치제어를 정확하게 하는 것이 중요하다.

**1. 동적 모형과 비선형 불확실성의 보상**

관절이  $n$ 인 로봇의 동적 방정식은 다음과 같다.

$$D(q)\ddot{q} + H(q, \dot{q}) = \tau - \tau_e \tag{1}$$

$D(q)$ 는  $n \times n$  관성 행렬을 나타내고,  $H(q, \dot{q})$ 는  $n \times 1$  코리올리스힘, 원심력과 중력 벡터를 나타내고,  $q, \dot{q}, \ddot{q}$ 는 각각  $n \times 1$  관절의 각, 각속도, 각가속도 벡터를 나타내고,  $\tau$ 는  $n \times 1$  토크 벡터. 그리고  $\tau_e$ 는  $n \times 1$  외부의 토크 벡터를 나타낸다. 관절 공간의 속도를 직교공간의 속도로 변환하기 위해서는 자코비안 행렬을 통해 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{q} = J^{-1} \dot{X} \tag{2}$$

여기서  $X$ 는 직교좌표의 위치 및 오리엔테이션 벡터이고  $J$ 는 자코비안 행렬이다.

(2)를 미분하면 각가속도를 얻는다.

$$\ddot{q} = J^{-1}(\ddot{X} - \dot{J}\dot{q}) \tag{3}$$

(2)와 (3)을 (1)에 대입하고 정리하면 직교 공간에서의 로봇 동적 모형을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$D^*(X)\ddot{X} + H^*(X, \dot{X}) = F - F_e \tag{4}$$

$D^* = J^T D J^{-1}$ 는 직교 공간에서의 관성 행렬,  $H^* = J^T H - D^* \dot{J} J^{-1} \dot{X}$ 는 직교공간에서의 코리올리스힘, 원심력과 중력을 나타내고,  $F$ 는 실제 힘,  $F_e$ 는 외부로부터의 힘을 나타낸다. (4)는 비선형이고 각 관절이 서로 연관되어 있기

때문에 선형화하고 분리시켜 제어한다.

실제적으로 힘제어는 직교 공간에서 이루어지므로 (4)로부터 직교 공간에서의 제어법칙을 고려해 보면 다음과 같다.

$$F = \hat{D}^* V + \hat{H}^* + F_e \tag{5}$$

여기에서  $\hat{D}^*$ 와  $\hat{H}^*$ 는 각각  $D^*$ 와  $H^*$ 의 평가치(estimation)이다.

제어입력  $V$ 는 다음과 같이 설정한다.

$$V = \dot{X}_r + M^{-1}(B \dot{E} + K E - F_e) \tag{6}$$

여기서  $E = X_r - X$ ,  $X_r$ 은 주어진 경로이고,  $X$ 는 실제 경로이다. 또한  $M$ 은 관성 행렬,  $B$ 는 댐핑 행렬,  $K$ 는 강성 행렬이고  $F_e$ 는 외부로부터의 힘으로 힘센서에 의해 측정된다 실제 로봇 동적 방정식 (4)와 로봇의 모델 방정식 (5),(6)을 대입하면 다음과 같은 방정식이 유도된다.

$$F_e + \Delta_M = M \dot{E} + B \dot{E} + K E \tag{7}$$

여기서  $\Delta_M = D^* - \hat{D}^*$ ,  $\Delta H^* = H^* - \hat{H}^*$ 일 때  $\Delta_M = \hat{D}^{*-1} [D^* \dot{X} + \Delta H^*]$ 로 로봇의 동적 불확실성을 나타낸다.

임피던스 제어 방법을 사용하여 힘제어를 정확하게 하려면 로봇 모형과 대상에 대한 사전 정보가 필요하다. 임피던스 제어 방식은 로봇의 모형을 근거로 하는 토크 계산 방식을 기본으로 하기 때문에 (7)의 로봇 모형의 불일치에서 오는 불확실성이 보상되지 않으면 힘제어를 잘 할 수 없다.

(7)에서 보여진 것처럼 힘제어 방식들의 수행 능력은 로봇 동적 모형의 정확도와 대상의 불확실성들에 따라 좌우된다 실제로는 로봇 동적 모형을 정확하게 구할 수가 없기 때문에 모형의 오차가 생기고 마찰력이나 백래쉬(backlash) 등과 같은 비선형 요소들과 알지 못하는 디버링 도구의 영향이 존재하기 때문에 정확한 위치 제어 수행을 저해한다. 이러한 위치 제어의 오차는 결국 힘제어의 오차를 초래하기 때문에 그에 대한 보상이 필요하다 [15][16]

(7)에서 불확실성  $\Delta_M$ 가 보상되어지면, 힘이 제어되는 방향에서의 임피던스 함수는 다음과 같이 이상적인 형태로 나타날 수 있다.

$$F_e = M \dot{E} + B \dot{E} + K E \tag{8}$$

정상상태(steady state)에서  $F_e = K E = K(X_r - X)$ 이므로 주어진 경로  $X_r$ 과 강성이득  $K$ 를 정함에 따라서 힘의 크기가 결정됨을 알 수 있다. 주어진 경로  $X_r$ 은 원하는 힘  $F_e$ , 대상의 강성도  $K_e$ , 대상의 위치  $X_e$ , 그리고 강성 이득  $K$  등의 값들을 정확하게 알아야 만 미리 계산을 할 수 있다 이처럼 임피던스 제어에서는 임피던스 매개 변수를 대상에 맞게 선택하여 주어진 경로를 조절함으로써 원하는 힘을 간접적으로 조절하게 된다.

2. 대상의 불확실성 보상

(8)의 임피던스 제어 방식은 원하는 힘을 따라가도록 기준입력을 설정할 수 없기 때문에 로봇이 도달해야 할 경로  $X_r$ 를 미리 지정해야 하는데 다음 식을 통해 계산할 수 있다

$$X_r = X_e + \Delta X_r = X_e + K_{eff}^{-1} F_d, \quad K_{eff}^{-1} = K^{-1} + K_e^{-1} \quad (9)$$

여기서  $F_d$ 는 원하는 힘이고,  $K_e$ 는 대상의 강성도이며  $K$ 는 원하는 임피던스 강성이득(stiffness gain)으로 사용자가 정한다.  $F_d$ 와  $K$ 는 사용자가 정할 수 있지만  $K_e$ 나  $X_e$ 는 사용자가 쉽게 정할 수 없다. 따라서,  $X_e$ 의 값을 얻기 위한 시각 센서의 도움 없이 힘제어의 수행 능력을 향상시키기 위해서는 정확한 대상의 강성도  $K_e$ 의 정보와 대상의 위치  $X_e$ 의 정보가 필요하다.

III. 힘추종 제어 방식

힘추종 임피던스 힘제어 방식은 원하는 힘을 입력으로 설정하는 하이브리드 힘제어 방식의 이점을 갖출 뿐만 아니라, 대상의 강성도와 위치에 대한 지식이 없을 경우에도 로봇의 모형 오차와 마찰력 또는 알지 못하는 하중 등의 불확실성을 보상한다.

1. 힘을 추종할 수 있는 힘제어 기술

간단하게 (8)의 원하는 임피던스 함수를 벡터나 행렬이 아닌 스칼라로 나타내면 아래와 같다

$$f_e = m \ddot{e} + b \dot{e} + ke \quad (10)$$

여기서  $e = x_r - x$ 이고  $m, b, k$ 는 각각 관성, 댐핑, 강성의 임피던스 변수들이다. (9)에서 경로 조절 입력을 스칼라로 바꾸면 다음과 같다.

$$\Delta x_r = \frac{f_d}{k_{eff}} \quad (11)$$

통합 강성은 관성 이득  $k$ 와 대상의 강성  $k_e$ 의 합성 형태인  $k_{eff} = \frac{kk_e}{k+k_e}$ 로 정의된다.

(11)을 사용하면 (9)의 목표 경로는 다음과 같다.

$$x_r = x_e + \Delta x, \quad \dot{x}_r = \dot{x}_e + \Delta \dot{x}_r, \quad \ddot{x}_r = \ddot{x}_e + \Delta \ddot{x}_r \quad (12)$$

목표 경로  $x_r, \dot{x}_r, \ddot{x}_r$ 을 (10)에 대입하고 정리하면 다음과 같다.

$$f_e = m \ddot{\epsilon} + b \dot{\epsilon} + k\epsilon + m \Delta \ddot{x}_r + b \Delta \dot{x}_r + k \Delta x_r \quad (13)$$

여기서  $\epsilon = x_e - x$ 로 새로운 오차로 정의된다. (13)은 대상의 위치, 실제 위치의 차이, 그리고 힘과의 관계 방정식을 나타낸다.

(11)과 (12)를 (13)에 대입해서 정리하면 아래와 같다.

$$f_e = m \epsilon + b \dot{\epsilon} + k\epsilon + kf_d \left( \frac{1}{k_e} + \frac{1}{k} \right) + m \Delta \ddot{x}_r + b \Delta \dot{x}_r \quad (14)$$

$\Delta \dot{x}_r, \Delta \ddot{x}_r$  도 (11)을 미분해서 구할 수 있지만 미분한 값은 일반적으로 잡음을 많이 포함하므로 간단히 하여  $\Delta \dot{x}_r = \Delta \ddot{x}_r = 0$ 이라 놓는다. 대상을 간단한 스프링 시스템이라 가정하면  $f_e = k_e(x - x_e)$  부터 대상의 강성도를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$k_e = -\frac{f_e}{\epsilon} \quad (15)$$

(15)를 (14)에 대입하여 정리하면 아래의 힘추종 제어법칙을 얻게 된다.

$$f_e = m \dot{\epsilon} + b \epsilon + ke \left( 1 - \frac{f_d}{f_e} \right) + f_d \quad (16)$$

(16)의 힘추종 제어법칙을 살펴보면 대상의 강성도 값을 알 필요가 없고, 원하는 힘  $f_d$ 를 직접 설정하여 조절할 수 있는 새로운 힘추종 임피던스 함수이다. (16)에서처럼 직접 원하는 힘을 설정해서 제어하면 어느 정도 대상의 위치 오차에서 생기는 힘의 오차를 감소시켜 준다[9]. 따라서, 대상의 위치  $x_e$ 를 정확하게 모르더라도 힘제어를 잘 수행할 수 있다.

(16)을 살펴보면 비선형 함수이기 때문에 정상 상태(steady state)에서 두 개의 해를 취한다. 정상 상태에서 (16)은 다음과 같이 표현된다.

$$f_e = k \epsilon \left( 1 - \frac{f_d}{f_e} \right) + f_d \quad (17)$$

(17)의 양변에  $f_e$ 를 곱하면  $f_e$ 에 관한 이차식을 얻는다.

$$f_e^2 - (k \epsilon - f_d) f_e + k \epsilon f_d = 0 \quad (18)$$

(18)의 두 해는 다음과 같이 얻어진다.

$$f_e = k \epsilon \quad \text{또는} \quad f_e = f_d \quad (19)$$

대상의 위치가 정확하면 (19)의  $f_e = k\epsilon$ 는 (15)와 같아야 하므로  $f_e = k\epsilon = -k_e \epsilon$ 가 성립해야 하지만  $k, k_e$ 는 모두 양수이므로  $k = -k_e$ 는 성립할 수 없다. 따라서  $f_e = k\epsilon$ 는 해가 될 수 없다. 결과적으로 (19)는 유일해인  $f_e = f_d$ 만을 항상 취하게 된다. 하지만 이 경우는 대상의 위치  $x_e$ 가 정확하게 측정되었을 경우에만 유효하게 된다.

2. 대상의 위치를 모를 경우 힘의 분석

만약 대상의 위치  $x_e$ 가 정확하지 않다면 (18)은 다음과 같이 바뀐다.

$$f_e^2 - (k \epsilon' + f_d) f_e + k \epsilon' f_d = 0 \quad (20)$$

(20)은 다음의 두 해를 갖게 된다.

$$f_e = k \epsilon' \quad \text{또는} \quad f_e = f_d \quad (21)$$

이 경우에는 대상 위치의 불확실성에 의해 해가 다르게 선택되므로 이에 대한 분석이 필요하다 대상의 위치가 정확하지 않을 경우에 (16)은 다음과 같이 표현된다.

$$\ddot{\epsilon}' + \frac{1}{m} (b \epsilon' + k \epsilon' \left( 1 - \frac{f_d}{f_e} \right) + f_d - f_e) = 0 \quad (22)$$

여기서  $\epsilon' = x_e - x + \delta x_e$ 이다. (15)로부터 다음과 같은 힘의 관계식을 얻을 수 있다.

$$\epsilon' = -\frac{f_e}{k_e} + \delta x_e, \quad \dot{\epsilon}' = -\frac{\dot{f}_e}{k_e} + \delta \dot{x}_e, \quad \ddot{\epsilon}' = -\frac{\ddot{f}_e}{k_e} + \delta \ddot{x}_e \quad (23)$$

(23)을 (22)에 대입하여 힘  $f_e$ 의 함수로 표현하면 다음과 같다

$$\begin{aligned} \ddot{f}_e + \frac{b}{m} \dot{f}_e + \frac{k}{m} f_e (1 - \frac{f_d}{f_e}) - \frac{kk_e}{m} \delta x_e (1 - \frac{f_d}{f_e}) \\ + k_e \frac{(f_e - f_d)}{m} - k_e \delta \ddot{x}_e - \frac{b}{m} k_e \delta \dot{x}_e = 0 \end{aligned} \quad (24)$$

(24)를 힘  $f_e$ 의 식으로 다시 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \ddot{f}_e + \frac{b}{m} \dot{f}_e + \frac{k+k_e}{m} f_e + \frac{kk_e f_d \delta x_e}{mf_e} \\ = k_e \delta \ddot{x}_e + \frac{1}{m} (kf_d + kk_e \delta x_e + f_d k_e + bk_e \delta \dot{x}_e) \end{aligned} \quad (25)$$

대상의 표면이 힘제어 방향과 수직하고 평평하다고 하면  $\delta \ddot{x}_e = \delta \dot{x}_e = 0$ 라 들 수 있고 (25)를 다음과 같이 간단히 할 수 있다

$$\begin{aligned} \ddot{f}_e + \frac{b}{m} \dot{f}_e + \frac{k+k_e}{m} f_e + \frac{kk_e f_d \delta x_e}{mf_e} \\ = \frac{1}{m} (kf_d + kk_e \delta x_e + f_d k_e) \end{aligned} \quad (26)$$

(26)은 비선형이므로 (21)의 두 해 중  $f_e = f_d$ 일 경우의 상태방정식을 구하면 다음과 같다. 상태  $y_1 = f_c$ 이고  $y_2 = \dot{f}_e$ 라 하면 (26)은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} y = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{k+k_e}{m} + \frac{kk_e \delta x_e}{m} f_d \frac{1-b}{m} \end{bmatrix} y \\ + \frac{1}{m} (kk_e \delta x_e + (k+k_e)f_d) \end{aligned} \quad (27)$$

(27)에서 시스템의 특성방정식을 구하면 다음과 같다.

$$\det(sI - A) = s^2 + \frac{b}{m} s + \frac{k+k_e}{m} - \frac{kk_e \delta x_e}{mf_d} = 0 \quad (28)$$

(28)이 안정하기 위한 조건을 구해보면 다음과 같다.

$$0 < \frac{b}{m} \text{ 과 } \delta x_e < \frac{f_d}{k_{eff}} \quad (29)$$

마찬가지로 다른 해  $f_e = k\epsilon'$ 에서 특성방정식을 구하면 다음과 같다.

$$s^2 + \frac{b}{m} s + \frac{k+k_e}{m} - \frac{(k+k_e)f_d}{mk_{eff}\delta x_e} = 0 \quad (30)$$

(30)의 안정할 조건을 구하면 다음과 같다.

$$0 < \frac{b}{m} \text{ 과 } \delta x_e > \frac{f_d}{k_{eff}} \quad (31)$$

따라서 원하는 힘추종을 하기 위해서 대상의 위치 불확실성은 (31)의 조건을 만족하여야 한다. (29)과 (31)에서 나

타난 것처럼 불확실성이  $\frac{f_d}{k_{eff}}$ 보다 크게 되면 원하는 힘  $f_e = k\epsilon'$ 을 추종하게 된다. 대상이 단단하여 강성이 크면 (11)로부터  $k_{eff} \sim k$ 로 간략화 할 수 있고, (29)는 다음과 같이 가정될 수 있다.

$$\delta x_e < \frac{f_d}{k} \quad (32)$$

실제적으로 원하는 힘추종을 하기 위해 (32)에 나타난 것처럼 불확실성의 최대값을 알 수 있지만 그 영역을 만족해야 하는 제약이 수반된다. 따라서 다음 장에서는 더욱 이러한 조건이 필요 없는 간단하며 강인한 힘제어 기술을 제안하고자 한다.

#### IV. 적응 임피던스 힘제어

위의 힘추종 임피던스 함수는 기존의 임피던스 방식에 비해 힘추종 면에서 훨씬 성능이 뛰어나다. 하지만, 비선형이라는 점때문에 대상의 위치 정보의 정확성에 따라 원하는 힘을 제어할 수 있기도 하고 또는 원하는 다른 값을 취하기도 하기 때문에 제약이 있다. 따라서, 이 장에서는 간단하며 오직 한 값  $f_c = f_d$ 를 취하는 새로운 힘제어 기법을 제안 하고자 한다.

(16)으로부터 힘제어 방향의 임피던스 강성이득을  $k=0$ 로 하여 무한의 컴프라이언스를 주면, 다음과 같이 비선형 부분을 간단히 없앨 수 있다.

$$f_e - f_d = m \ddot{\epsilon} + b \dot{\epsilon} \quad (33)$$

(15)로부터 힘  $f_e = -k_e \epsilon$ 로 표현이 되기 때문에 (33)은 다음과 같은 이차방정식으로 표현할 수 있다.

$$-f_d = m \ddot{\epsilon} + b \dot{\epsilon} + k_e \epsilon \quad (34)$$

(34)는  $-f_d$ 가 forcing function인 오차  $\epsilon$ 에 대한 이차 방정식으로 점근적으로 안정함을 알 수 있다. 실제로 물체의 강성  $k_e$ 를 정확하게 모르더라도 정상상태에서  $f_e = f_d$ 이므로 안정한 상태이다. 이상적인 순간 응답을 얻기 위해서는  $k_e$ 의 근사치에 기초하여 적당한 이득  $m$ 과  $b$ 를 선택할 수 있다. 예를 들어, 로봇이 힘제어를 수행할 경우, 오버슈트가 없는 응답을 선호한다. 힘 응답이 임계제동이나 과제동(over-damped)을 나타내도록 하려면 댄핑 이득 값을 아래와 같이 설정하면 된다.

$$b \geq 2\sqrt{mk_e} \quad (35)$$

만약 대상의 위치  $x_e$ 가 정확하지 않다면, 즉 대상의 위치에 불확실성이 있다면 유일해  $f_e = f_d$ 는 안정성을 보장할 수 없다. 그러한 점들을 분석하고 보상하기 위하여 적응제어 방식을 사용하여 대상의 위치에서 오는 불확실성에 의한 힘의 오차를 최소화시킨다

실제적인 경우를 고려하면 대상의 위치를 정확하게 측정하기는 어렵다. 대상은 항상 위치 측정값  $x'_e$ 와  $x_e$ 의 불확실성  $\delta x_e = x'_e - x_e$ 를 가지고 있다고 하자.  $\epsilon' = \epsilon +$

$\delta x_e$ 로 정의하고, (33)에서 불확실성을 가진 식으로 바꾸기 위해  $\varepsilon$ 를  $\varepsilon'$ 으로 대체하면 다음과 같이 된다.

$$m\ddot{\varepsilon}' + b\dot{\varepsilon}' = f_e - f_d \quad (36)$$

$\delta x_e$ 는 제어 설계자에 의해 어느 정도 설정될 수 있는 대상 위치의 부정확성이다.  $\delta x_e$ 는 대상의 안쪽 또는 바깥쪽에 설정될 수 있으나, 접촉이 항상 이루어지도록 하기 위하여 그림 3과 7에서 보여진 것처럼 항상  $\delta x_e > 0$ 이 되도록 대상 위치  $x'_e$ 를 안쪽으로 과대 측정한다[8][9].

$x_e$ 가 상수이고  $x'_e$ 도  $x'_e - x_e > 0$ 을 만족하는 상수이면, 즉 대상의 모양이 평평한 표면이라면 정확한 힘의 추종이 쉽게 성취되는 것을 볼 수 있다.

이 경우에 (36)은  $\dot{x}'_e = \ddot{x}'_e = 0$ 이기 때문에 다음과 같이 된다.

$$m\ddot{x} + b\dot{x} = f_d - f_e \quad (37)$$

그러므로 정상상태(steady state)에서는 유일한 해인  $f_e = f_d$ 를 얻게 된다.

그렇지만  $f_e$ 와  $x_e$ 가 시간에 따라 변할 때, (37)에 나타난 것처럼 힘추종 오차가 발생된다. 즉, 힘은  $f_e = f_d - m\ddot{x} - b\dot{x}$ 로 원하는 힘을 추종하지 못한다. 즉 대상의 모양이 평면이 아닐 경우에 가장 간단하게 대상의 위치를 가정하는 방법은 대상의 형태를 평면으로 가정하고  $x_e =$  상수,  $\dot{x}'_e = 0$ 으로 설정하는 것이다. (37)에 나타난 힘의 오차  $m\ddot{x} + b\dot{x}$ 를 제거하기 위해 아래와 같은 힘의 오차에 따라 실시간으로 조절되어지는 간단한 적응제어방식을 사용한다.

$$m\dot{\varepsilon}' + b(\dot{\varepsilon}' + w) = f_e - f_d \quad (38)$$

여기서  $w(t)$ 는 힘의 오차함수로 다음과 같다.

$$w(t) = \omega(t-h) + \eta \frac{f_d(t-h) - f_e(t-h)}{b}, \eta > 0 \quad (39)$$

$\eta$ 는 적응이득이고  $h$ 는 제어기의 샘플링 시간이다. 적응이득  $\eta$ 는 응답의 수렴속도와 정확성에 영향을 미치므로 이득 값에 따라 성능이 달라지게 된다. (39)를 보면 힘의 오차가 커짐에 따라 보상하는 값이 커짐을 알 수 있다. 적응변수  $\eta$ 의 역할은 보상의 속도에 영향을 미치므로 크게 설정하면 빨리 수렴하고 작게 설정하면 천천히 수렴한다. 그러나 너무 크게 설정하면 불안정하게 된다. 다음절에서 안정된 접촉 공간에서의 힘추종에 대한 적응 이득의 영역을 이론적으로 조사한다.

**V. 적응 제어 안정성과 수렴**

적용 법칙 (39)가 (38)에서 제어 루프로 쓰여질 때 새로운 제어법칙이 안정한지 조사해야 한다.

$f_e = -k_e \varepsilon$ 를 (38)에 대입하면 다음과 같다.

$$m\dot{\varepsilon}(t)' + b\varepsilon(t)' + k_e\varepsilon(t) + b\omega(t) = -f_d \quad (40)$$

(39)를 (40)에 대입하면 다음과 같다.

$$m\varepsilon(t)' + b\varepsilon(t)' + k_e\varepsilon(t) + b\omega(t-h) + \eta k_e\varepsilon(t-h) = -(f_d(t) + \eta f_d(t-h)) \quad (41)$$

(41)을 힘오차에 대한 방정식으로 만들기 위해  $f_e = k_e(x - x_e)$  관계로부터 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$x = x_e + \frac{f_e}{k_e}, \dot{x} = \dot{x}_e + \frac{\dot{f}_e}{k_e}, \ddot{x} = \ddot{x}_e + \frac{\ddot{f}_e}{k_e} \quad (42)$$

(42)의  $x, \dot{x}, \ddot{x}$ 를 (41)에 대입하면 다음과 같은 이차 힘 오차 방정식이 유도된다

$$-m\dot{f}_e - b\dot{f}_e + bk_e\omega(t-h) + k_e(f_d - f_e) = -mk_e\delta\dot{x}_e - bk_e\delta\ddot{x}_e - \eta k_e(f_d(t-h) - f_d(t-h)) \quad (43)$$

$m\dot{f}_e, b\dot{f}_e$ 를 (43)의 양변에 더한 뒤 정리하면 다음과 같다.

$$m(f_d - f_e) + b(f_d - f_e) + bk_e\omega(t-h) + k_e(f_d - f_e) = m(f_d - k_e\delta x_e) + b(f_d - k_e\delta x_e) - \eta k_e(f_d(t-h) - f_d(t-h)) \quad (44)$$

힘의 오차를  $\varepsilon_f(t) = f_d(t) - f_e(t)$ 라 정의하고 (44)를 다시 표현하면 다음과 같다.

$$m\dot{\varepsilon}_f(t) + b\varepsilon_f(t) + k_e(\varepsilon_f(t) + b\omega(t-h) + \eta\varepsilon_f(t-h)) = m(f_d - k_e\delta x_e) + b(f_d - k_e\delta x_e) \quad (45)$$

와 같이 된다.

$w$  시리즈의 한정된 샘플  $k$  원소를 고려하면 (45)에서  $b\omega(t-h)$ 는 다음과 같다.

$$b\omega(t-h) = b\omega(t-(k-1)h) + \eta\varepsilon_f(t-(k-1)h) + \dots + \eta\varepsilon_f(t-2h) \quad (46)$$

(46)에서  $w(t-(k-1)h) = 0$ 과 같이 초기 값이 0이라 가정하고 (45)와 (46)를 결합하면 다음과 같다.

$$m\dot{\varepsilon}_f + b\varepsilon_f + k_e\varepsilon_f + \eta k_e(\varepsilon_f(t-(k-1)h) + \dots + \varepsilon_f(t-h)) = m\dot{f}_d + b\dot{f}_d - mk_e\delta\dot{x}_e - bk_e\delta\ddot{x}_e \quad (47)$$

생성된 힘  $\bar{f}_e = k_e\delta x_e$ 는 대상 위치의 측정오차에 기인한다고 새롭게 정의하고 (46)을  $\bar{f}_e$ 로 대체하면 다음과 같다.

$$m\dot{\varepsilon}_f + b\varepsilon_f + k_e\varepsilon_f + \eta k_e(\varepsilon_f(t-(k-1)h) + \dots + \varepsilon_f(t-h)) = m\dot{f}_d + b\dot{f}_d - m\bar{f}_e - b\bar{f}_e \quad (48)$$

새로운 오차  $\bar{\varepsilon}_f = f_d - \bar{f}_e$ 를 정의하고 (48)에 대입하면 다음 식을 얻을 수 있다

$$m\dot{\bar{\varepsilon}}_f + b\bar{\varepsilon}_f + k_e\bar{\varepsilon}_f + \eta k_e(\bar{\varepsilon}_f(t-(k-1)h) + \dots + \bar{\varepsilon}_f(t-h)) = m\dot{\bar{\varepsilon}}_f + b\bar{\varepsilon}_f \quad (49)$$

(49)를 라플라스 변환하면 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\frac{\bar{\varepsilon}_f(s)}{\varepsilon_f(s)} = \frac{ms^2 + bs}{ms^2 + bs + k_e + k_e\eta(e^{-(k-1)hs} + \dots + e^{-hs})} \quad (50)$$

전달함수 (50)의 안정도는 특성 방정식에 의해서 결정된다.

$$ms^2 + bs + k_e + k_e\eta(e^{-(k-1)hs} + \dots + e^{-hs}) = 0 \quad (51)$$

샘플링은 일반적으로 빠르므로  $0 < kh < 1$  일 때  $|e^{-hs}| < 1$

이기 때문에 (51)에서 급수의 합은 다음과 같이 근사값으로 나타낼 수 있다.

$$e^{-(k-1)hs} + \dots + e^{-hs} = \sum_{n=1}^k e^{-hns} = \frac{1-e^{-hks}}{1-e^{-hs}} - 1 \cong \frac{e^{-hs}}{1-e^{-hs}} \quad (52)$$

$k$ 가 크면  $e^{-k} \approx 0$ 으로 근사화할 수 있기 때문이다. 급수의 합 (52)를 (51)에 대입하여 유도하면 다음과 같다.

$$ms^2 + bs + k_e + k_e \eta \left( \frac{e^{-hs}}{1-e^{-hs}} \right) = 0 \quad (53)$$

$h \ll 1$  일 경우에 샘플링이 빠를 때  $e^{-hs}$ 는 Taylor 시리즈 확장에 따라  $e^{-hs} \approx 1 - hs$ 로 접근되어질 수 있다. (53)을 Taylor 시리즈 확장을 가지고 다시 배열하여 유도하면

$$hms^3 + bhs^2 + k_e h(1-\eta)s + k_e \eta = 0 \quad (54)$$

이 된다. (54)가 안정하기 위한 조건들을 구하면 다음의 조건들을 찾을 수 있다. 이득은 양수로 취해져서  $m, b, h > 0$  때문에  $c_1$ 과  $c_0$ 는 다음을 만족해야 한다.

$$c_1 = \frac{bk_e h^2(1-\eta) - h\eta m k_e}{bh} > 0$$

$$c_0 = \eta k_e > 0 \quad (55)$$

(55)를 정리하여 안정도 조건을 만족시키는  $\eta$ 의 영역을 다음과 같이 구한다.

$$0 < \eta < \frac{bh}{bh+m} \quad (56)$$

(56)에서 보듯이 적용이득  $\eta$ 는 샘플링 시간과 임피던스의 관성 이득  $m$ 과 댐핑이득  $b$ 와 관련이 있음을 알 수 있다. 적용이득을 크게 하면 힘오차의 수렴은 빠르지만 너무 크게 하면 불안정해지므로 (56)의 안정도 범위 내에서 설정하여야 한다. 또한 최적의 힘추종 결과를 얻기 위해서는 (56)의 범위 안에서 적용이득의 값이 최적화로 설정되어야 한다. 이론적으로 구한 (56)의 안정도 범위를 검증하기 위해 다양한 방법으로 모의실험을 행한다. 그러나 로봇 모형 자체에 불확실성이 있으면 위치제어에 오차가 생기게 되고 이러한 조인트 공간에서의 오차는 직교 공간에서의 힘오차에 영향을 미치게 된다. 위치제어의 문제점을 해결하기 위해 시간지연방식을 사용하여 로봇의 동적 모델의 불확실성을 보상하는 강인한 위치제어 방식을 사용하고자 한다.

**V. 동적 불확실성을보장하기 위한 내부 제어**

로봇 모델의 오차와 불확실성을 보상하기 위해서는 잘 알려진 강인한 위치 제어알고리즘을 사용한다. 강인 위치 제어 알고리즘은 토크계산방식의 단순화된 형태로서 간단하고 안전성이 보장되기 때문에 강인(robust)한 제어 방식의 한 종류로 로봇 제어[10][11]뿐만 아니라 모터 제어[21]

에도 널리 적용되고 있다. 특히, 토크계산 방식에서 알지 못하는 하중이 로봇 팔 끝에 달려 있다면 불확실성에 의해 위치를 추종하는 수행 능력이 떨어지게 되는데, 강인 위치 제어 알고리즘은 이를 보상한다. 강인 위치제어 알고리즘의 기본적인 이론은 바로 전 추출 시간에서의 로봇 방정식의 정보를 이용하여 불확실성을 없애는 것이다. 추출 시간이 빠르면 빠를수록 정확하게 보상을 할 수 있다. 최근에는 DSP(Digital Signal Processing)칩의 발달로 많은 연산량을 빠르게 처리한다. 잘 알려진 토크계산 제어방식처럼 로봇의 모델이 필요한 역동력학(inverse dynamics)을 때 샘플링마다 계산해야하는 경우에도 빠르게 처리하여 실제적으로 사용되고 있다. 이처럼 강건 위치제어는 간단하고 성능이 좋으며 실제로 사용할 수 있는 장점이 있다. 그림 1에 나타난 것처럼 로봇을 제어하기 위한 제어 법칙은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tau = \hat{D}U + \hat{H} + \tau_e \quad (57)$$

로 나타낸다.  $\hat{D}$ 과  $\hat{H}$ 는 각각  $D$ 와  $H$ 의 모델값이다. 제어 입력  $U$ 는 다음과 같이 나타낸다.

$$U = \ddot{q} \quad (58)$$

(1)과 (57)(58)을 연립하여 풀면 다음과 같다.

$$\hat{H} = (D - \hat{D}) \ddot{q} + H \quad (59)$$

(57)과 (58)로부터 모델  $\hat{H}$ 를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{H}(t) = \tau(t) - \hat{D}(t) \ddot{q}(t) - \tau_e \quad (60)$$

(60)은 같은 샘플링 시간의 값을 계산해야 하므로 계산이 불가능함을 알 수 있다. 하지만 짧은 시간의 샘플링 시간  $h$ 를 사용하여 이전의 값을 저장했다가 사용하면  $H(t) \approx H(t-h)$ 으로 나타낼 수 있다.

따라서 (60)으로부터 실제 얻을 수 있는 모델  $\bar{H}(t)$ 는 다음과 같이 이전의 정보를 사용해서 대략적인 값으로 나타낼 수 있다.

$$\bar{H}(t) = H(t-h) = \tau(t-h) - \bar{D} \ddot{q}(t-h) - \tau_e(t-h) \quad (61)$$

여기서  $\bar{D} = D(t-h)$ 이다. 그러므로, 새로운 제어법칙은 (57)을 이용하면 아래와 같다.

$$\tau = \hat{D}U + \bar{H} + \tau_e \quad (62)$$

조인트 공간에서의 제어 입력  $U$ 는 직교 공간에서의 제어 입력과 다음과 같은 관계로 나타낼 수 있다.

$$U = \dot{q} = J^{-1}(\dot{X} - J\dot{q}) \quad (63)$$

(63)을 (62)에 대입하면 제어법칙은 다음과 같다.

$$\tau = \hat{D}J^{-1}(\dot{X} - J\dot{q}) + \bar{H} + \tau_e \quad (64)$$

강인한 힘추종 임피던스 제어 방식 (38)로부터  $\dot{X}$ 는 아래와 같다.

$$\dot{X} = \dot{X}'_e + M^{-1}(F_d - F_e + B(\dot{E}' + W)) \quad (65)$$

여기서 적응제어법칙은

$$W(t) = W(t-k) + \eta B^{-1}(F_d(t-k) - F_e(t-k)) \quad (66)$$

새로운 제어 방식의 구조는 내부루프와 외부루프를 구별하여 그림 1에 나타나 있다.

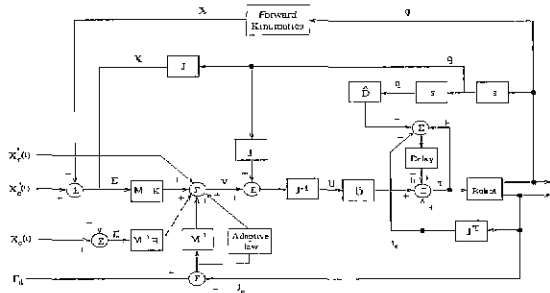


그림 1. 능동 강성 힘제어 방식의 구조.  
Fig. 1. Adaptive force control structure.

**VII. 모의실험 결과**

1. 표면 광택 작업을 위한 힘추종  
시뮬레이션을 위한 로봇의 모델로 그림2에 보여진 링크가 셋인 회전 로봇을 사용하였다. 로봇 팔에 대한 힘추종 수행의 모의실험 변수는 PUMA 560 팔의 처음 세 링크의 값들을 사용하였다. 또한 강인 위치제어의 수행능력을 모의실험하기 위하여 세 번째 링크에는 질량을 알 수 없는 절삭도구인 10kg의 하중이 달려 있고, 각 관절에는 쿨롬(Coulomb) 마찰력 그리고 viscous 마찰 힘  $\tau_i(\dot{q}) = 5.0 \text{sgn}(\dot{q}) + 8.0\dot{q}$ 을 (67)과 같은 불확실성이 있다고 가정하였다.

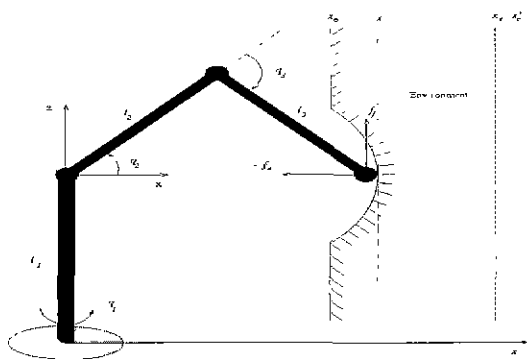


그림 2. 로봇과 대상과의 힘제어 환경.  
Fig. 2. Robot and environment.

대상의 위치에 대한 불확실성을 나타내기 위해 대상의 표면을 그림 3에 나타난 것처럼 시간에 따라 변하는 사인파 모양으로 하였다. 대상 표면은 평평한 평면이 아닌 굴곡이 있는 곡선이다. 따라서 정확한 대상의 모양을 알지 못하므로 대상의 위치를 대략적으로 추정하는 것이 필요하다. 따라서 정확한 대상의 모양을 알지 못하므로 대상의 위치를 대략적으로 추정하는 것이 필요하다.

못하므로 대략적인 대상의 위치를 대상의 안쪽으로 평평을 보여주기 위해서 대상의 강성은 다음과 같이 시간에 따라 변한다고 가정하고 시스템 수해를 모의실험하였다.

$$k_e = 40000 + 5000 \sin\left(\frac{\pi t}{2}\right) (N/m) \quad (67)$$

이 경우에 적응 임피던스 제어의 수행능력과 안정성을 검증하기 위한 샘플링 시간은  $k=5\text{msec}$ 를 사용했다.

먼저 적응변수  $\eta$ 는 (56)의 상위 경계 값인  $\eta = 0.75 = \frac{600 * 0.005}{600 * 0.005 + 1}$ 로 선택하였다.  $\eta = 0.75$ 일 경우의 힘추종 결과는 그림 3에서 나타난 것처럼 임팩트 오버슈트가 큰 진동의 형태로 좋지 않게 나타났다. 적응변수의 값이  $\eta = 0.75$ 보다 높은 값으로 선택될 경우, 즉 안정성 영역 밖의 값들도 모의실험을 했는데, 이 경우의 힘추종은 로봇 팔 끝이 대상과 계속적으로 접촉했다가 떨어지는 불안정한 형태로 나타났다. 또 다른 작업으로 안정성 영역 안에 있는 적응변수  $\eta = 0.2$ 일 때와  $0.05$ 일 경우를 모의실험했는데, 두 경우의 힘추종 결과는 그림 3에 나타난 것처럼 우수하다. 그림 3의 결과를 비교해 보면  $\eta = 0.2$ 일 경우의 힘추종 수행이  $\eta = 0.05$ 일 경우의 수행보다 우수하다는 것을 알 수 있다

그러므로 적응 이득은 더 나은 힘추종 실행을 위해 안정도 영역 안에서 최적화 되어져야 한다

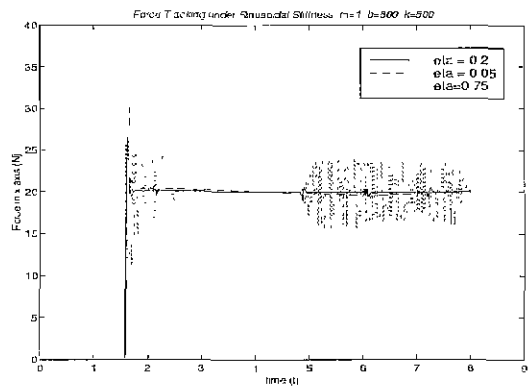


그림 3. 대상의 표면이 사인파처럼 시변할 때 다양한 적응변수들의 힘추종.

Fig. 3. Force tracking with different adaptive rates under sinusoidal environmental surface.

적응변수  $\eta = 0.05$ 일 때 위치 추종은 그림 4에 나타나 있다. 그림 4에서는 실제 대상 위치와 마찬가지로 측정된 대상 위치도 함께 나타내는데, 평면이 아닌 곡면임을 알 수 있다. 그림 4에 나타난 것처럼 곡면인 대상에서 대상의 위치를 정확하게 알지 못하므로 대상의 위치는 대상의 안쪽이 평면으로 가정된 것을 볼 수 있다. 따라서 대상의 위치를 평면으로 가정한 뒤 ( $\ddot{x}'_e = \ddot{x}_e = 0$ )에 생기는 측정 오차는 그림 3에 나타난 것처럼 적응제어에 의해 보상이

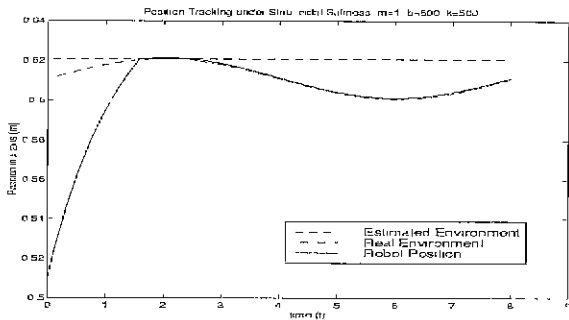


그림 4. 대상이 사인파이고  $\eta = 0.05$ 일때  $x$ 위치 추종.  
 Fig. 4. Position tracking under sinusoidal environment.

되어 힘추종을 잘하는 것을 알 수 있다.

2. 디버링 작업을 위한 힘추종

디버링 작업을 가상적으로 시뮬레이션하기 위해 그림 9에 나타난 것처럼 대상이 표면 위에 삼각형 형태의 버(burr)가 있다고 가정하였다. 앞의 시뮬레이션과 마찬가지로 디버링 작업에서도 대상의 강성은 균일하지 않다고 가정하였다. 그림 5에서는 댐핑이득이 힘응답의 오버슈트에 미치는 영향을 보여주고 있다. 댐핑이득이 (34)를 만족하도록 설정되었을 때 ( $b=400$ 일 때) 힘응답의 오버슈트가 적음을 알 수 있다. 이 모의실험에서는 버가 있을 지라도 같은 힘을 추종하도록 했다. 하지만 그림 5는 적응임피던스 방식을 사용하지 않아 버가 시작되는 곳과 끝나는 지점에서 같은 힘이 걸리지 않으므로 힘오차가 클 수 있다. 버가 시작되는 곳으로부터 버의 꼭대기까지는 기준 힘보다 더 많은 힘을 추종하고 꼭대기에서 끝나는 곳까지는 기준 힘보다 더 작은 힘을 추종한다. 이와 같은 힘추종의 문제가 생기는 이유는 버의 위치를 정확하게 모르기 때문이다.

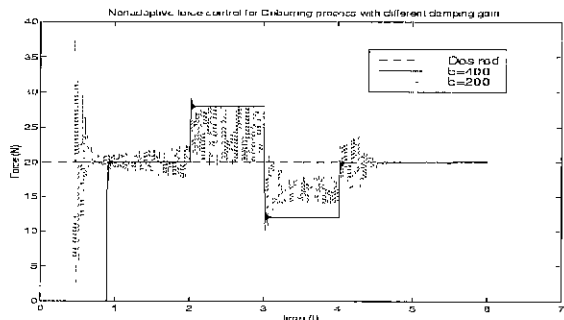


그림 5. 적응제어를 사용하지 않았을 경우의 디버링 작업.  
 Fig. 5. Deburring process without adaptive control.

이 문제를 해결하기 위해 적응임피던스 방식을 적용하였다.

그림 6은 적응 임피던스 방식을 사용한 결과이다. 그림6에서 보듯이 (55)의 안정도 범위 밖의 적응변수의 값

0.8이 선택되었을 경우에는 로봇이 대상과 계속 접촉을 시

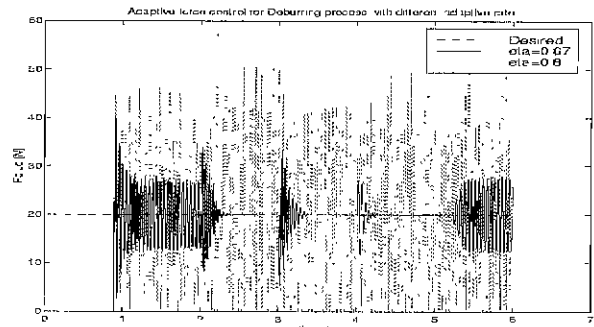


그림 6. 디버링 작업을 위한 안정영역 밖의 적응변수 를 사용한 적응제어의 힘추종.  
 Fig. 6. Force tracking with unstable adaptive rate.

도하면서 힘추종이 불안정하게 나타남을 알 수 있다. (55)에서  $\eta=0.67 = \frac{400 * 0.005}{400 * 0.005 + 1}$ 으로 설정하면 안정한 영역 안에 있으므로  $\eta=0.8$ 의 결과보다는 덜 진동하지만 만족할 만한 힘추종 결과는 아닌 것을 알 수 있다. 버가 생기는 시점과 꼭대기 지점 그리고 끝나는 지점에서 힘의 오버슈트가 생김을 알 수 있다. 이러한 힘의 오버슈트를 줄이기 위해 적응 변수의 크기를 줄여  $\eta=0.2$ 를 사용했을 경우는 그림 7에 나타난 것처럼 힘추종 결과가 매우 우수함을 알 수 있다. 적응 제어방식을 사용하지 않았을 경우와 비교해 보면 힘추종의 성능에 큰 차이가 있음을 알 수 있다. 마찬가지로  $\eta=0.05$ 인 경우의 결과도 함께 보여지지만 두 경우의 힘추종 결과를 비교하면  $\eta=0.2$ 인 경우의 힘추종 결과가 매우 우수함을 알 수 있으며 오차의 수렴속도가 매우 빠르고 정확함을 알 수 있다.

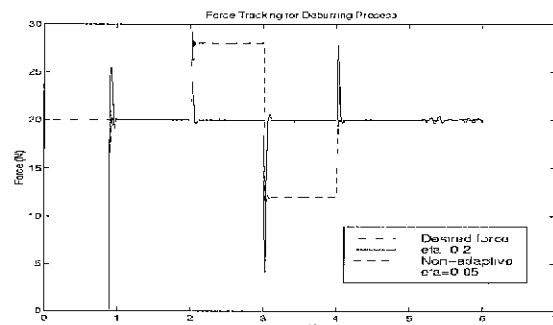


그림 7. 디버링 작업을 위한 안정범위의 적응변수를 사용한 적응제어의 힘추종.  
 Fig. 7. Force tracking with adaptive rate inside stable region.

그림 8은 힘방향에서의 버의 모양을 나타낸다. 대상의 위치를 모른다는 가정 하에 대상 안쪽을 평면으로 가정하였고 로봇이 대상 안쪽을 따라 계속적으로 움직이는 것을 볼 수 있다. 그림 9는 삼각형 버의 모양을 전체적인 방향  $x-z$  평면에서 보여주고 있다. 초기에 자유공간에 있는 로봇이 대상을 향해 움직이다가 대상과 접촉하여 로봇이



x축 방향으로 힘을 주어 누르면서 위쪽으로 움직이는 것을 알 수 있다.

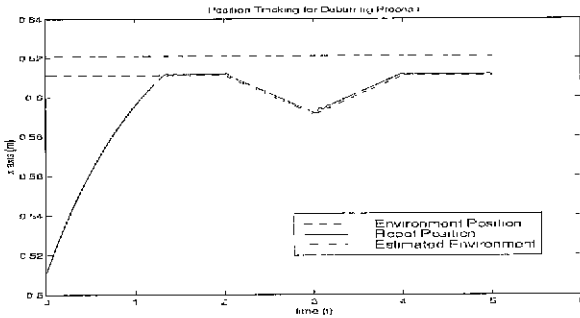


그림 8. 디버링 작업에서의 X축의 위치추종.  
Fig. 8. Position in X axis for deburring process.

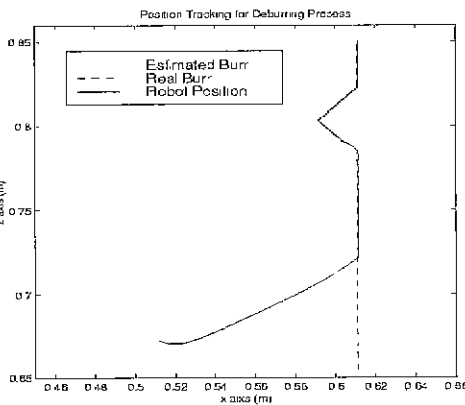


그림 9. 디버링 작업에서의 X-Z 축의 위치추종.  
Fig. 9. Position tracking for deburring process.

그림 10은 버가 시작되는 위치를 알았을 때 적용되는 힘을 달리하여 버를 없애는 상황을 나타낸다 처음에는 20N의 힘으로 조절하다가 버를 만나면 40N으로 힘을 증가시킨다. 그림에서 2초를 지나자 힘이 40N으로 증가한 이유는 버가 있을 때 더 큰 힘을 적용하여 버를 없애는 환경을 나타낸 것이다. 적응 임피던스 힘제어 방식이 힘을 추종할 수 있는 능력이 있으므로 그림 10의 결과가 가능하게 된다.

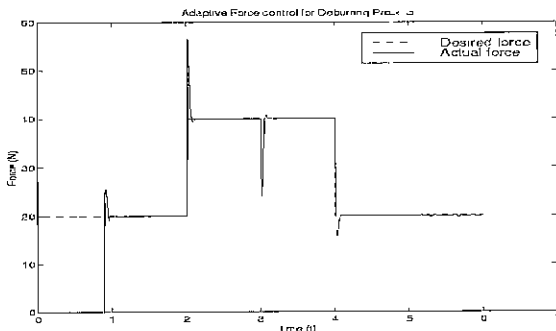


그림 10. 디버링 작업을 위한 힘추종.  
Fig. 10. Force tracking for deburring process

VI. 결론

본 논문에서는 로봇을 사용하여 디버링이나 표면광택 작업을 할 경우 필요한 새로운 힘제어 알고리즘을 제안하였다. 임피던스 힘제어 방식의 문제점과 해결 방안을 적응제어 방식으로 해결하였다. 먼저, 로봇의 동적 확실성에 의한 위치오차는 이전의 로봇 모델의 정보를 저장하였다가 현재 정보와 비교하여 불확실성을 서로 상쇄시키는 강인한 시간지연 제어방식을 사용하였다. 또한 로봇이 원하는 힘을 추종할 수 있는 힘추종 임피던스 힘제어 방식을 분석적으로 알아보았다

대상의 강성도와 위치에 무관하게 원하는 힘을 추종하는 새로운 강인한 적응 힘제어 방식을 제안하여 작업하는 대상의 강성도와 위치를 정확하게 모를 경우에 나타나는 힘의 오차를 줄였다. 적응제어 방식은 원하는 힘과 실제 힘과의 오차를 계속적으로 줄이도록 설계하여 동력학의 불확실성과 대상의 불확실성 하에서 아주 우수한 힘추종 결과를 보여 주었다. 또한 안정성과 성능에 영향을 미치는 적응 변수의 범위를 구하여 그 영역 내에서의 다양한 값의 적응변수를 모의실험을 통해 분석적으로 구한 안정성 영역과 일치함을 검증하였다.

참고문헌

- [1] T. Lasky and T. C. Hsia, "On force tracking impedance control of robot manipulators", *IEEE Conference on Robotics and Automations*, pp. 274-280, 1991
- [2] J. K. Salisbury, "Active stiffness control of a manipulator in cartesian coordinates", *19th IEEE CDC*, pp. 95-100, 1980.
- [3] D. E. Whitney, "Force feedback control of manipulator line motions", *ASME Journal. of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, pp. 91-97, June, 1977.
- [4] N. Hogan, "Impedance control : An approach to manipulator, part i, ii, iii", *ASME Journal of Dynamics Systems, Measurements, and Control*, vol. 3, pp. 1-24, 1985
- [5] M. Raibert and J. Craig, "Hybrid position/force control of manipulators", *ASME Journal. of Dynamic Systems, Measurements, and Control*, vol. 102, pp. 126-133, 1981
- [6] R. Anderson and M. W. Spong, "Hybrid impedance control of robotic manipulators", *IEEE Conference on Robotics and Automations*, pp. 1073-1080, 1987.
- [7] G. J. Liu and A. A. Goldenberg, "Robust hybrid impedance control of robot manipulators". *Proc. IEEE Conference on Robotics and Automations*, pp. 287-292, 1991.
- [8] S. Jung and T. C. Hsia, "On neural network application to robust impedance force control of robot Manipulator". *Proc. IEEE Conference*

- Robotics and Automations*, pp. 869-874, Nagoya, Japan, 1995
- [9] S. Jung and T. C. Hsia, "Neural network controller design for force control of robot manipulator", *Proc. IEEE Symposium on Intelligent Control*, pp. 11-116. Monterey, California, 1995
- [10] T. C. Hsia and L. S. Gao, "Robust manipulator control using decentralized linear time-invariant joint controllers", *Proc. of IEEE Robotics and Automations*, pp. 21-25, 1990.
- [11] T. C. Hsia, T. A. Lasky, and Z. Y. Guo, "Robust independent joint controller design for industrial robot manipulators", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 38, pp. 21-25, 1991
- [12] S. Jung and T. C. Hsia, "Neural network impedance force control of robot manipulators", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 45, no. 3, pp. 451-461, 1998
- [13] D. A. Lawrence, "Impedance control stability properties in common implementations", *Proc. IEEE Conference on Robotics and Automations*, pp. 1185-1190, 1988.
- [14] S. Vidyasagar and M. Spong, "Robot dynamics and control", John Wiley & Sons, 1989.
- [15] S. Jung and T. C. Hsia, "A study on New Neural network schemes for robot manipulator control", *Robotica*, vol 14, no. 1, pp. 7-16, 1996
- [16] S. Jung and T. C. Hsia, "A New neural network technique for robot manipulators", *Robotica*, vol. 13, pp. 477-484, 1995
- [17] R. Colbaugh, H. Seraji, and K. Glass, "Direct adaptive impedance control of robot manipulators", *Journal of Robotics Systems*, vol. 10, pp. 217-248, 1993
- [18] H. Seraji and R. Colbaugh, "Force tracking in impedance control", *Proc IEEE Conference on Robotics and Automations*, pp. 499-506, 1993.
- [19] R. Colbaugh and A. Engelmann, "Adaptive compliant motion control of manipulators : Theory and experiments", *Proc. IEEE Conference on Robotics and Automations*, pp. 2719-2726, 1994.
- [20] H. Seraji, "Adaptive admittance control : An approach to explicit force control in compliant motion", *Proc. IEEE Conference on Robotics and Automations*, pp. 2705-2712, 1994
- [21] C. M. Liaw and F. J. Lin, "A robust speed controller for induction motor drives", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 41, no. 3, pp. 308-315, June, 1994.
- [22] B. W. Drake and T. C. Hsia, "Implementation of a unified robot kinematic and inverse dynamics algorithm on a DSP chip", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 40, no. 2, 1993



#### 정 슬

1988년 웨안주립대 전기과 졸업. 1991 미국 캘리포니아대 석사, 동대학 박사 (1996). 1997년~현재 충남대학교 메카트로닉스공학과 조교수. 관심분야는 지능 제어 및 감성 공학, 로봇공학