

<논 문>

학습제어기를 이용한 직접구동형 로봇의 힘제어

황 용 연*

(1996년 9월 18일 접수)

Force Control of the Direct-Drive Robot Using Learning Controller

Yeong-Yeun Hwang

Key Words : Robotics(로봇공학), Automatic Control(자동제어), Force Control(힘제어), Learning Control(학습제어), Direct-Drive Robot(직접구동 로봇)

Abstract

Direct-drive robots are suitable to the position and force control with high accuracy, but it is difficult to design a controller because of the system's nonlinearity and link-interactions. This paper is concerned with the study of the force control of direct-drive robots. The proposed algorithm consists of feedback controllers and a neural network. After the completion of learning, the output of feedback controller is nearly equal to zero, and the neural network controller plays an important role in the control system. Therefore, the optimum retuning of parameters of feedback controllers is unnecessary. In other words, the proposed algorithm does not require any knowledge of the controlled system in advance. The effectiveness of the proposed algorithm is demonstrated by the experiment on the force control of the parallelogram link-type direct-drive robot.

1. 서 론

현재 산업용 로봇에 의한 자동화는 대부분 단순한 위치반복작업에 의존하고 있으나, 로봇의 활용분야가 조립, 연마, 귀따기(deburring)작업 등으로 확대됨에 따라 위치제어만으로는 충분하지 못하며, 주위 환경과의 접촉작업, 또는 여러 가지 구속조건에 능동적으로 적응할 수 있는 힘제어에 대한 연구개발의 요구가 높아지고 있다. 이러한 새로운 요구에 부응하기 위해서는 로봇의 기구학적 구조, 액츄에이터, 센서, 제어용컴퓨터 등 하드웨어의 설계를 근본적으로 재검토하여 새로운 아이디어를 창출할 수 있는 지속적인 연구개발이 필요하다. 특히, 액츄에이터와 동력전달장치는 로봇의 정밀도 및 속도

를 직접적으로 좌우하기 때문에 과감한 개선이 필요하다.

최근 다기능, 고속 로봇에의 가능성을 겨냥하여 개발된 직접구동(direct-drive : 이하 DD)방식의 액츄에이터, 즉 DD모터가 실용화단계에 들어서고 있다. DD모터는 기어 혹은 하모닉 드라이브에 의한 감속장치를 사용하지 않기 때문에 백래시나 히스테리시스가 없고, 마찰이나 토크변화도 매우 작기 때문에 액츄에이터로서 DD모터를 이용한 DD로봇은 고정밀도의 위치 혹은 힘제어가 가능하다. 또한, 동력전달장치의 탄성변형이 적기 때문에 토크 제어의 동적 응답면에서도 뛰어나다고 할 수 있다.

DD모터를 이용한 기구의 역사는 오래되었으며, 소형의 고속 저토크의 것은 오래 전부터 음향이나 영상기기 혹은 자기디스크 등 정밀기기의 구동장치로서 이미 실용화되어 있다. 그러나, DD모터가 로

*회원, 부경대학교 제어계측공학과

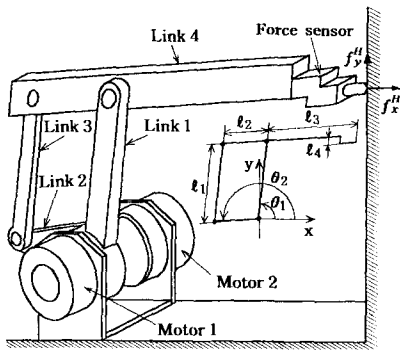


Fig. 1 Direct-drive robot with a force sensor

봇의 구동용으로 이용되기 시작한 것은 최근의 일로서, 저속 고토크, 경량, 고정밀도 등의 성능을 만족할 만한 모터가 개발된 이후라 할 수 있다. 이러한 DD모터로 제작된 DD로봇에 대한 연구는 Asada에 의한 다관절 DD로봇⁽¹⁾을 비롯하여, Master DD로봇⁽²⁾, 2대의 DD로봇에 의한 협조제어,⁽³⁾ SCARA형 DD로봇⁽⁴⁾ 등 DD로봇의 실용화를 위해 꾸준히 계속되고 있다. 한편 로봇의 힘제어에 대한 연구는 자연구속과 인위적구속이라는 기하학적 구속조건을 부여하여, 위치 및 힘의 하이브리드 제어 기법의 기초를 확립한 연구⁽⁵⁾를 비롯하여, 다수의 로봇팔에 의한 대상물의 힘제어⁽⁶⁾로봇 핸드에 의한 파지력제어,⁽⁷⁾ 외란토크 옵서버를 이용한 공압 매니플레이터의 힘제어⁽⁸⁾ 등의 연구가 계속되고 있다.

DD모터를 사용한 로봇은 감속기가 없기 때문에, 로봇 선단에 가해지는 힘이 직접 모터축에 전달된다. 이 때문에 DD로봇은 힘제어에 적합하지만, 한편으로는 대상물의 변화에 민감하기 때문에 세어의 설계가 쉽지 않으며, 자세나 운동에 의한 링크 상호간의 간섭과 중력 등 비선형 특성이 현저하게 나타난다. 또한 로봇의 힘제어 시스템은 대상물과의 상호작용을 동반하는 제어 시스템이므로 시스템 전체의 피드백 루프내에 제어 대상물의 동특성이 포함되어 있다. 따라서 대상물의 동특성이 변화함에 따라 제어능력이 떨어지는 문제점이 있다.

본 논문에서는 로봇 선단에서 구속면에 대한 접촉힘을 제어하기 위해 제어대상에 대한 자세한 지식을 필요로 하지 않는 신경회로망으로 구성된 학습제어 알고리즘을 제안하였다. 그리고, 제안한 제어알고리즘을 본 연구실에서 직접 제작한 힘센서 부착 평행링크 DD로봇에 적용하여, 강성이 서로

다른 제어 대상물에 대한 힘제어 실험을 통해 제안한 학습제어 알고리즘의 유효성을 확인하였다.

2. 직접구동형 로봇

Fig. 1은 2대의 DD모터를 사용하여 제작한 평행링크 DD로봇의 개략도이다. 링크 선단에는 힘제어를 위해 제작한 2자유도 힘센서가 부착되어 있다. 이것은 직렬링크기구와는 달리 제1자유도 및 제2자유도의 모터가 각각 하단부에 부착되어 있기 때문에, 한쪽 모터의 질량은 또다른 모터에 대해 부하가 걸리지 않는다는 특징을 갖고 있다. 직렬링크기구에서는 각 링크의 선단에 모터가 부착되어 있기 때문에, 모터를 지지하기 위해서는 로봇의 링크강성을 크게 할 필요가 있으며, 이로 인해 링크 자체의 질량이 부검게 되는 경우가 있으나, 평행링크로봇은 모터가 하단부에 설치되어 있기 때문에, 링크수는 늘어나지만 로봇 전체의 질량을 가볍게 할 수 있다는 장점을 갖고 있다.

2.1 평행링크 로봇의 동역학

회전관절을 갖는 다자유도 로봇의 동역학 방정식은 일반적으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tau = M(\theta) \ddot{\theta} + H(\theta, \dot{\theta}) + G(\theta) \quad (1)$$

여기서, τ 는 회전관절에서의 발생토크, 우변의 제1항은 관성행렬, 제2항은 원심력 및 코리올리력벡터, 제3항은 중력벡터를 나타내며, θ , $\dot{\theta}$ 및 $\ddot{\theta}$ 는 관절각, 각속도, 각각속도벡터를 나타낸다. 다자유도 로봇의 동역학 방정식을 평행링크 로봇에 적용하면, 다음과 같은 2자유도 평행링크 로봇의 동역학 방정식을 얻을 수 있다.

$$\tau_1 = M_{11} \ddot{\theta}_1 + M_{12} \ddot{\theta}_2 + H_{12} \dot{\theta}_2^2 + G_1 \quad (2)$$

$$\tau_2 = M_{21} \ddot{\theta}_1 + M_{22} \ddot{\theta}_2 - H_{12} \dot{\theta}_1^2 + G_2 \quad (3)$$

여기서, I_i 를 i 관절축 주위의 관성모멘트, l_i 를 링크 i 의 길이, l_{ci} 를 관절 i 에서 링크질량중심까지의 길이, g 를 중력가속도라 할 때, M_{ij} , H_{ij} 및 G_i ($i=1, 2, j=1, 2$)는 다음과 같다.

$$M_{11} = I_1 + m_1 l_{c1}^2 + I_3 + m_3 l_{c3}^2 + m_4 l_1^2 \quad (4)$$

$$M_{12} = M_{21} = (m_3 l_2 l_{c3} - m_4 l_1 l_{c4}) \cos(\theta_1 - \theta_2) \quad (5)$$

$$M_{22} = I_2 + m_2 l_{c2}^2 + I_4 + m_4 l_{c4}^2 + m_3 l_2^2 \quad (6)$$

$$H_{12} = (m_4 l_1 l_{c4} - m_3 l_2 l_{c3}) \sin(\theta_1 - \theta_2) \quad (7)$$

$$G_1 = g \cos \theta_1 (m_1 l_{c1} + m_3 l_{c3} + m_4 l_1) \quad (8)$$

$$G_2 = g \cos \theta_2 (m_2 l_{c2} + m_3 l_2 - m_4 l_{c4}) \quad (9)$$

식 (2), (3)에서 알 수 있듯이 2자유도 평행링크 로봇의 경우, $\dot{\theta}_i \dot{\theta}_j (i \neq j)$ 항으로 표현되는 코리올리력이 작용하지 않음을 알 수 있다. 그러므로 이와 같은 평행링크구조는 직렬링크구조에 비해 비선형항을 줄일 수 있는 장점을 갖고 있다.

2.2 DD모터의 운동방정식

DD모터의 관성을 \mathbf{J} , 점성마찰계수를 \mathbf{B} , 쿨롱마찰을 \mathbf{F} 라 하면, DD모터의 운동방정식은 일반적으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{J}\ddot{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{B}\dot{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{F}(\dot{\boldsymbol{\theta}}) \quad (10)$$

여기서, \mathbf{J} 및 \mathbf{B} 는 다음과 같이 정의한다.

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} J_1 & 0 \\ 0 & J_2 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} B_1 & 0 \\ 0 & B_2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

또한 모터의 쿨롱마찰 \mathbf{F} 는 동마찰토크를 f_a , 최대 정지마찰토크를 f_s 라 하면, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{F}(\dot{\boldsymbol{\theta}}) = \begin{cases} f_a & (\dot{\theta} > 0) \\ -f_a & (\dot{\theta} < 0) \\ \tau & (\dot{\theta} = 0 \text{ and } \tau \leq f_s) \end{cases} \quad (13)$$

2.3 평행링크 DD로봇의 운동방정식

평행링크 로봇의 동역학 방정식인 식 (1)과 DD모터의 운동방정식인 식 (10)으로부터 다음과 같은 평행링크 DD로봇 전체의 운동방정식을 얻을 수 있다.

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{R}(\boldsymbol{\theta})\ddot{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{B}\dot{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{V}(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}) + \mathbf{F}(\dot{\boldsymbol{\theta}}) \quad (14)$$

여기서, $\mathbf{R}(\boldsymbol{\theta})$ 및 $\mathbf{V}(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}})$ 는 다음과 같이 정의한다.

$$\mathbf{R}(\boldsymbol{\theta}) = \mathbf{M}(\boldsymbol{\theta}) + \mathbf{J} \quad (15)$$

$$\mathbf{V}(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}) = \mathbf{H}(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}) + \mathbf{G}(\boldsymbol{\theta}) \quad (16)$$

식 (14)에서 우변의 제1항은 관성항, 제2항은 점성항, 제3항은 원심력, 중력 등을 포함한 비선형항, 제4항은 쿨롱마찰항을 나타낸다. 관성모멘트는 θ 의 함수로 되어 있으므로 모터 구동각도에 의존하여 변화한다는 것을 알 수 있다. 또한 원심력, 중력 등의 비선형 외란도 각 모터의 동작상태에서

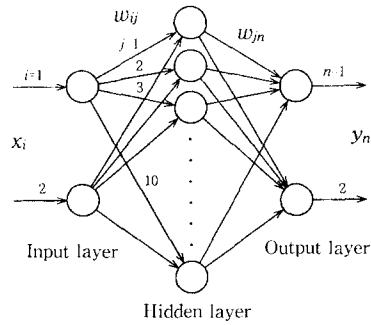


Fig. 2 Neural network

로 영향을 미친다. 이것으로부터 각 모터가 비독립적으로 서로 간섭한다는 것을 알 수 있다. 종래의 감속기부착 모터를 이용한 로봇, 예를 들어 감속비가 b 인 모터의 경우 관성모멘트는 $1/b^2$ 로 되며, 외란 토크는 $1/b$ 로 감소하기 때문에 모터 상호간의 간섭이나 비선형성의 영향을 무시할 수 있었지만, DD로봇은 이러한 모터 상호간의 간섭이나 비선형성이 모터축에 직접 반력(외란)으로 작용한다.

3. 제어기의 구성

3.1 신경회로망의 구성

본 논문에서 이용한 신경회로망은 Fig. 2에 표시한 것처럼 입력층, 중간층, 출력층의 3층 구조로 되어 있다. 각층 내부에서의 뉴론(neuron) 사이의 결합은 존재하지 않는 것으로 하며, 뉴론은 입력층으로부터 출력층을 향하여 한쪽 방향으로만 결합되는 것으로 한다. 또한 입력층의 입출력관계는 선형이며, 중간층과 출력층의 출력은 시그모이드 함수를 통과시킨 것으로, $-1 < f(x) < 1$ 의 범위의 값을 취하는 것으로 한다. 입력층, 중간층, 출력층의 뉴론 수를 각각 L, M, H 라 놓으면, 각 층의 입출력관계는 $i(=1, 2, \dots, L), j(=1, 2, \dots, M), n(=1, 2, \dots, H)$ 에 대해, 다음과 같은 식으로 정의한다.

$$y_i = x_i \quad (17)$$

$$x_j = \sum_{i=1}^L w_{ij} y_i \quad (18)$$

$$y_j = f(x_j) \quad (19)$$

$$x_n = \sum_{j=1}^M w_{jn} y_j \quad (20)$$

$$y_n = f(x_n) \quad (21)$$

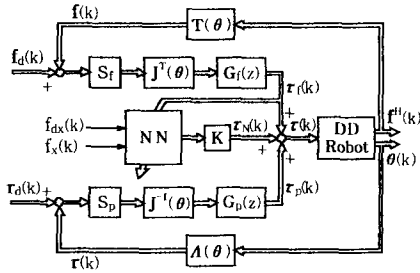


Fig. 3 Force control of the DD robot

$$f(x) = \frac{2}{1 + e^{-x}} - 1 \quad (22)$$

x_i, y_i : 입력층 i 번째 뉴런의 입력, 출력
 x_j, y_j : 중간층 j 번째 뉴런의 입력, 출력
 x_n, y_n : 출력층 n 번째 뉴런의 입력, 출력
 w_{ij} : y_i 와 x_j 사이의 결합하중
 w_{jn} : y_j 와 x_n 사이의 결합하중

3.2 신경회로망에 의한 학습

신경회로망에 의한 제어기의 학습 알고리즘으로서 오차 역전파법을 이용하였다. 입력층의 각 뉴런에 입력신호가 주어지면, 이 신호는 입력층과 중간층사이의 결합하중 w_{ij} 에 의해 변화되어 중간층에 전달되고, 또다시 중간층과 출력층사이의 결합하중 w_{jn} 에 의해 변화되어 출력층의 신호 y_n 으로 출력하게 된다. 오차 역전파법은 출력값과 원하는 목표값을 비교하여, 그 차이를 줄여나가는 방향으로 각 결합하중의 값을 역순으로 조절, 즉 중간층과 출력층사이의 결합하중을 조절한 후, 이것을 토대로 입력층과 중간층사이의 결합하중을 조절하는 것이다. 신경회로망의 실제 출력을 y_n , 목표 출력을 v_n 이라 하면, 결합하중은 다음 식에 의해 조절된다.

$$w_{jn} = \sum_{n=1}^H \eta \delta_n y_j \quad (23)$$

$$w_{ij} = \sum_{j=1}^M \eta \delta_j y_i \quad (24)$$

여기서 η 는 학습률이며, δ_n, δ_j 는 다음과 같이 주어진다.

$$\delta_n = (1 - y_n^2) \cdot (v_n - y_n) \quad (25)$$

$$\delta_j = 0.5(1 - y_j^2) \sum_{n=1}^H \delta_n w_{jn} \quad (26)$$

3.3 DD로봇의 운동학 및 역운동학 함수

Fig. 3에 제안한 DD로봇의 힘제어기를 나타낸

다. Fig. 1의 DD로봇에서, 힘센서 끝부분의 위치를 \mathbf{r} 이라 하면, \mathbf{r} 은 운동학 함수 $\mathbf{A}(\boldsymbol{\theta})$ 를 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{r} = \mathbf{A}(\boldsymbol{\theta}) \quad (27)$$

여기서, l_i 를 Fig. 1에 나타낸 링크길이 ($l_1=0.4$ m, $l_2=0.2$ m, $l_3=0.545$ m, $l_4=0.062$ m)라 할 때, \mathbf{r} , $\boldsymbol{\theta}$ 및 $\mathbf{A}(\boldsymbol{\theta})$ 는 다음과 같이 정의한다.

$$\mathbf{r} = [r_x \ r_y]^T \quad (28)$$

$$\boldsymbol{\theta} = [\theta_1 \ \theta_2]^T \quad (29)$$

$$\mathbf{A}(\boldsymbol{\theta}) = \begin{bmatrix} l_1 \cos \theta_1 - l_3 \cos \theta_2 - l_4 \sin \theta_2 \\ l_1 \sin \theta_1 - l_3 \sin \theta_2 + l_4 \cos \theta_2 \end{bmatrix} \quad (30)$$

센서좌표계를 기준으로 한 구속면과의 접촉힘 \mathbf{f}^H 를 좌표변환행렬 $\mathbf{T}(\boldsymbol{\theta})$ 에 의해 로봇 하단부의 직각좌표계로 변환하면 다음과 같다.

$$\mathbf{f} = \mathbf{T}(\boldsymbol{\theta}) \mathbf{f}^H \quad (31)$$

여기서, \mathbf{f} 및 $\mathbf{T}(\boldsymbol{\theta})$ 는 다음과 같이 정의한다.

$$\mathbf{f} = [f_x \ f_y]^T \quad (32)$$

$$\mathbf{T}(\boldsymbol{\theta}) = \begin{bmatrix} -\cos \theta_2 & \sin \theta_2 \\ -\sin \theta_2 & -\cos \theta_2 \end{bmatrix} \quad (33)$$

위치제어 및 힘제어의 선택행렬을 각각 $\mathbf{S}_p, \mathbf{S}_f$ 라 하면, 목표위치 \mathbf{r}_d 와 실제위치 \mathbf{r} 과의 오차, 목표 접촉힘 \mathbf{f}_d 와 실제 접촉힘 \mathbf{f} 와의 오차는, Jacobian 행렬 $\mathbf{J}(\boldsymbol{\theta})$ 를 이용하여 관절좌표계를 기준으로 한 관절 각변위 $\Delta\boldsymbol{\theta}$ 및 토크변화량 $\Delta\boldsymbol{\tau}$ 로 다음과 같이 각각 변환시킬 수 있다.

$$\Delta\boldsymbol{\theta} = (\mathbf{r}_d - \mathbf{r}) \mathbf{S}_p \mathbf{J}^{-1}(\boldsymbol{\theta}) \quad (34)$$

$$\Delta\boldsymbol{\tau} = (\mathbf{f}_d - \mathbf{f}) \mathbf{S}_f \mathbf{J}^T(\boldsymbol{\theta}) \quad (35)$$

여기서, $\mathbf{J}(\boldsymbol{\theta})$, \mathbf{S}_p 및 \mathbf{S}_f 는 다음과 같다.

$$\mathbf{J}(\boldsymbol{\theta}) = \begin{bmatrix} -l_1 \sin \theta_1 & l_3 \sin \theta_2 - l_4 \cos \theta_2 \\ l_1 \cos \theta_1 & -l_3 \cos \theta_2 - l_4 \sin \theta_2 \end{bmatrix} \quad (36)$$

$$\mathbf{S}_p = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (37)$$

$$\mathbf{S}_f = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (38)$$

신경회로망의 출력을 $\boldsymbol{\tau}_N$, 힘제어기의 출력을 $\boldsymbol{\tau}_f$, 위치제어기의 출력을 $\boldsymbol{\tau}_p$ 라 하면, 제어대상인 로봇의 조작량 $\boldsymbol{\tau} = [\tau_1 \ \tau_2]^T$ 는 다음과 같이 주어진다. 단, τ_1 은 x 방향의 조작량이고, τ_2 는 y 방향의 조작량이다.

$$\tau = \tau_f + \tau_p + \tau_N \quad (39)$$

Fig. 3의 전달함수 행렬은 다음과 같이 정의한다.

$$G_p(z) = \begin{bmatrix} G_{px}(z) & 0 \\ 0 & G_{py}(z) \end{bmatrix} \quad (40)$$

$$G_f(z) = \begin{bmatrix} G_{fx}(z) & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (41)$$

여기서, K_P 를 비례 게인(gain), K_D 를 미분 게인이라 하면, $G_{px}(z)$, $G_{py}(z)$, $G_{fx}(z)$ 는 각각 다음과 같이 정의한다.

$$G_{px}(z) = G_{py}(z) = K_P + K_D(1 - z^{-1}) \quad (42)$$

$$G_{fx}(z) = K_f^p + K_f^d(1 - z^{-1}) \quad (43)$$

3.4 학습제어기에 의한 DD로봇의 힘제어

신경회로망에 있어서 각층의 뉴론수는 힘센서 선단과 구속면과의 목표 접촉힘 f_{dx} , 실제 접촉힘 f_x 를 입력층의 입력신호로 하므로, 입력층은 2개로 하였다. 또한 중간층은 10개이며, 출력층은 2개이다. 신경회로망의 출력 y_n 을 제어대상인 로봇의 조작량으로 취하기 위해 정수 K 를 이용한다.

$$\tau_N = K y_n \quad (44)$$

최초 1회 실행은 피드백제어기만으로 힘제어가 실행되며, 2회 이후의 조작량 τ 는 피드백제어기의 출력 τ_f 와 신경회로망의 출력 τ_N 의 합으로 주어진다. 이 때의 τ_f 를 오차신호로 하여, 이 오차신호가 0에 가까워지도록 각 샘플링 시점마다 결합하중을 수정해 나간다. 학습의 초기단계에서는 오차가 크기 때문에 피드백제어기가 주제어기가 되며, 따라서 신경회로망의 출력은 0에 가깝다. 그러나 학습이 진행됨에 따라 오차가 작게 되며, 신경회로망에 의한 학습제어기가 주제어기로 바뀌게 된다. 본 논문에서 제안한 제어알고리즘은 피드백제어기에 신경회로망에 의한 학습제어기를 첨가시킨 것으로 학습에 의해 제어기의 성능이 향상되는 특징을 갖고 있다.

4. 실험

4.1 DD모터 및 Interface의 구성

Fig. 4에 DD모터 신호계의 개략을 나타냈다. DD모터는 Yokogawa precision(주)의 DM1045-B로서 정격출력 380 W, 최대토크 45 N·m, 최대회전

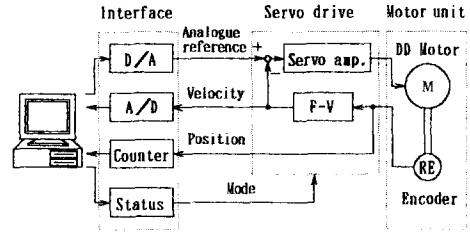


Fig. 4 Signal system of the DD motor

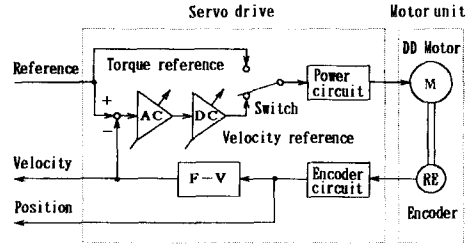


Fig. 5 Servo drive

수 2.4 rps이다. 모터의 회전각도에 해당하는 펄스열을 발생하는 Rotary encoder는 모터 1회전 당 655,360펄스를 발생한다. 서보 드라이브내에 있는 서보증폭기는 속도증폭기와 전력회로로 구성되어 있으며, Interface에서 출력되는 지령전압에 대한 모터의 구동전압을 공급한다. D/A 변환기는 서보 드라이브에 아날로그 지령전압을 출력하며, 출력전압의 최대 가변범위는 ± 5 V이다. A/D 변환기는 F-V 변환기로부터 나오는 속도신호나 증폭기의 출력신호를 디지털신호로 변환하여 586 컴퓨터에 입력시킨다. 입력범위는 ± 5 V이며, 분해능은 12비트이다. Counter는 Encoder로부터의 펄스열을 계수하여 16비트의 위치신호를 만들고, 이를 컴퓨터에 입력시켜 모터 구동각을 계산한다. Status는 컴퓨터로부터의 출력신호중, 서보 ON 및 서보 OFF의 변환, 서보증폭기의 비례 및 적분 동작의 변환, 서보증폭기 최대 DC게인의 변환 등을 실행한다.

DD모터의 구동방식은 Fig. 5에 나타낸 것과 같이, 토크구동방식과 속도구동방식의 2가지 방법의 전환이 가능하다. 속도구동방식의 경우, 최대 속도 입력전압 범위는 ± 6 V이며, 이때 최대속도의 범위는 ± 2.4 rps 이다.

4.2 힘센서와 제어대상

로봇 선단에서의 접촉힘을 측정하기 위해 제작한 2자유도 힘센서는 Fig. 6에 나타낸 것처럼, 스트레인 게이지(strain gauge)가 부착된 인칭동 평판과

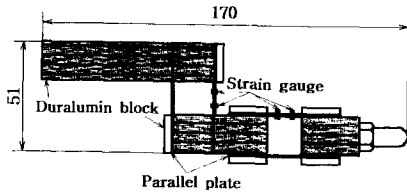


Fig. 6 Force sensor

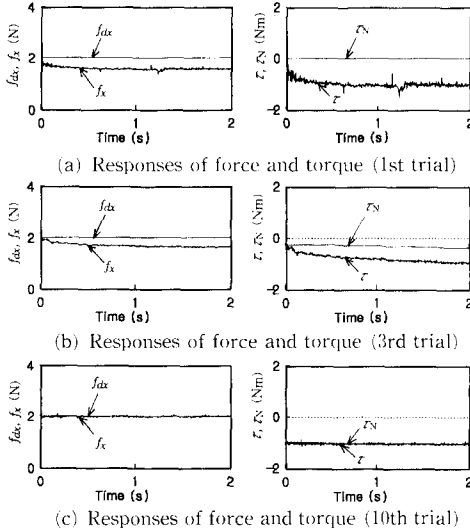


Fig. 7 Experimental results for object 1

이를 지지하는 부재평판(duralumin)의 조합으로 제작되었다. 스트레인 게이지는 4장을 각 평판의 앞쪽과 뒷쪽에 각각 2장씩 부착하였다. 센서 선단에 하중이 작용하면, 스트레인 게이지는 변형을 일으키며, 이것은 Bridge 회로, 증폭기 및 A/D 변환기를 통해 전압 값으로 컴퓨터에 입력된다. 이 전압 값은 미리 특성시험을 통해 측정해 놓은 힘과 전압과의 함수관계를 이용하여, 직각좌표계에 의한 x, y 방향의 힘성분으로 분리검출된다. 센서의 질량은 0.25 Kg이며, 정격하중 $\pm 10N$, 최대하중은 $\pm 15N$ 이다.

힘제어 대상물은 강성이 자기 다른 2가지(Object 1 : styrofoam, Object 2 : 강철판)를 사용하였으며, 대상물을 고정시킨 상태에서 로봇 선단을 접촉시켜 일정한 접촉힘을 제어하도록 하였다. 샘플링 주기는 5 ms, 총 샘플링수는 400이다. 피드백제어기의 게인값은 제어가 충분히 안정되도록 하는 범위 내에서 적당한 값을 선택하였다. $K_p=200$, $K_D=10$, $K_f=1.5$, $K_b=0.2$, 신경회로망의 학습률 $\eta=$

0.1, 결합하중의 초기값은 -0.1 에서 $+0.1$ 사이의 임의의 값을 이용하였다.

힘제어에 들어가기 전의 초기동작은 로봇 선단을 x방향으로 천천히 구속면을 향해 접근시킨다. 이때 로봇 선단이 구속면에 접촉하여, 센서로부터 검출되는 접촉힘이 2 N이 되면 즉시 힘제어에 들어간다. Fig. 7~Fig. 10에 나타난 실험결과는 모두 초기동작을 끝낸 이후의 것이다.

4.3 실험결과

Fig. 7(a)는 object 1(styrofoam)에 대해 최초 1회 실행했을 때, 즉 피드백제어기만을 이용했을 때의 응답이다. 왼쪽 그림은 목표 접촉힘 f_{ax} 와 실제 센서로부터 검출된 응답 f_x 를 나타내며, 학습효과를 알아보기 위해 적당한 피드백 게인을 사용하였기 때문에, 목표값에 크게 못 미치고 있다. 오른쪽 그림은 신경회로망의 출력 τ_N 과 로봇의 실제 조작량 τ 를 나타낸다. 조작량은 τ_1 과 τ_2 가 있으나, x방향의 힘을 제어하기 때문에 y방향의 조작량 τ_2 는 매우 작으므로 생략하였다. 1회 실행시에는 피드백 제어기만을 이용하기 때문에 신경회로망의 출력 τ_N 은 0이다. Fig. 7(b)는 3회 실행하였을 때의 응답이며, Fig. 7(c)는 10회 실행시켰을 때의 응답이다. Fig. 7(c)의 오른쪽 그림에 나타냈듯이, τ_N 과 τ 가 일치하고 있다. 이것은 신경회로망의 출력이 로봇 조작량과 일치함을 보여 주는 것으로, 피드백 제어기의 출력 τ_f 가 0에 가깝다는 것을 뜻한다. 즉 신경회로망에서 로봇 조작량을 직접 생성함으로써, 신경회로망이 주제어기로서의 역할을 하고 있다는 것을 의미한다.

Fig. 8은 object 2(강철판)에 대한 실험결과이며, 이 때의 목표 접촉힘은 3 N이다. 이것은 object 1에 비해 고강성이므로, 초기 진동성분에 의해 목표 값에 도달하는 시간이 object 1과 차이가 있으나 비교적 양호한 결과를 얻을 수 있었다. Fig. 8(b)는 힘제어 실행도중, 외란을 가했을 때의 응답을 나타낸다. 외란이 인가되었을 경우에는 신경회로망의 출력 τ_N 은 τ 와 일치하지는 않으나, 외란이 인가된 이후에도 목표값을 벗어나지 않고 학습이 정상적으로 진행되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 9는 학습이 진행되는 동안, 접촉힘에 대한 평균자승오차 $\bar{\sigma}^2$ 의 변화를 나타낸다. Fig. 9(a)는 Fig. 7, Fig. 9(b)는 Fig. 8(a)에 나타난 각각의 실험결과에 의한 것으로, 1회 실행(피드백제어)했을

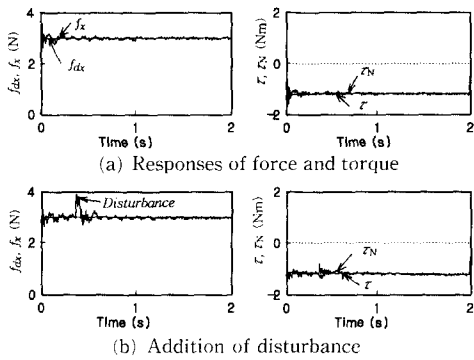


Fig. 8 Experimental results for object 2 (10th trial)

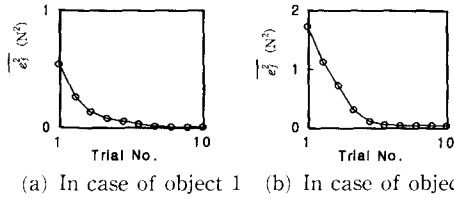


Fig. 9 Learning process

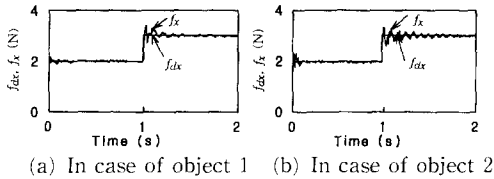


Fig. 10 Responses to changes of force (10th trial)

때를 포함하여, 2회 실행 이후의 학습에 의한 $\bar{\sigma}_f^2$ 의 변화를 나타낸다. 즉 피드백제어기만을 이용했을 때에 비해 신경회로망을 이용했을 경우, 학습에 의해 평균자승 오차가 현저히 작아짐을 알 수 있다. $\bar{\sigma}_f^2$ 은 총 샘플링수를 N 이라 놓고, 다음과 같이 정의한다.

$$\bar{\sigma}_f^2 = \frac{\sum_{k=1}^N \{ f_{dx}(k) - f_x(k) \}^2}{N} \quad (45)$$

Fig. 10은 힘제어 실행도중, 목표 접촉힘을 2 N에서 3 N으로 변화시켰을 때의 응답으로서, 10회 학습한 후의 응답을 나타낸다. 목표값이 변화된 초기에는 진동하고 있으나 그 이후에는 목표값에 접근함을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문은 로봇 선단을 이용한 주변 환경과의 접

촉힘 제어에 대한 연구로서, 신경회로망을 이용한 학습제어 알고리즘을 제안하였으며, 직접구동형 로봇에 적용하여, 강성이 서로 다른 대상물에 대한 일정한 힘제어 실험을 통해 제안한 알고리즘의 유효성을 확인하였다. 제안한 알고리즘은 피드백제어기에 신경회로망에 의한 학습제어를 첨가시킨 것으로, 학습에 의해 제어기의 성능이 향상되는 특징을 가지고 있다. 특히 강성이 높은 대상물에 대한 힘제어에서도 양호한 실험결과를 얻을 수 있었다. 또한 신경회로망에 의한 학습제어기가 주제어기의 역할을 함으로써, Jacobian행렬과 좌표변환 행렬을 포함한 로봇의 실제 조작량이 신경회로망에 의해 생성된다는 것을 알 수 있었다. 따라서 제안한 알고리즘은 피드백제어기에 대한 세밀한 조정이 필요 없으며, 이로 인해 미리 제어대상에 대해서도 자세한 지식을 갖고 있지 않아도 된다는 잇점이 있다고 할 수 있다.

참고문헌

- (1) Asada, H. and Kanade, T., 1983, "Design of Direct-Drive Mechanical Arms," *ASME, Journal of Vibration, Acoustics, Stress and Reliability in Design*, Vol. 105, No. 3, pp. 312~316.
- (2) 平井成興, 佐藤知正, 1987, "다이렉트·드라이브 마스터·마니퓰레이터(その製作と性能測定)," *日本ロボット學會誌*, 5卷, 1號, pp. 14~17.
- (3) Hwang, Y. Y. and Todo, I., 1994, "Cooperative Control of Two Direct-Drive Robots Using Neural Networks," *JSME Int. Journal(C)*, Vol. 37, No. 2, pp. 335~341.
- (4) 홍윤식, 강봉수, 김수현, 박기환, 권윤근, 1996, "직접구동 평면 다관절 로봇의 동역학적 모델에 따른 피드포워드 제어의 실험적 평가," *대한기계학회논문집(A)*, 제20권, 제1호, pp. 146~153.
- (5) Mason, M. T., 1981, "Compliance and Force Control for Computer Controlled Manipulators," *IEEE Trans, on System, Man and Cybernetics*, Vol. SMC-II, No. 6, pp. 418~432.
- (6) Yoshikawa T. and Zheng X. Z., 1990, "Coordinated Dynamic Hybrid Position/Force Control for Multiple Robot Manipulators Handling One Constrained Object," *Japan U. S. A Symposium*

- on Flexible Automation, -A Pacific Rim Conference-, pp. 401~407.
- (7) Hwang, Y. Y. and Todo, I., 1992, "Movement of an Object by the Manipulating Force of a Jointed Elastic Robot Hand with Two Fingers and Four Degrees of Freedom," *JSME Int. Journal (C)*, Vol. 35, No. 2, pp. 245~251.
- (8) 박정규, 노리츠구 토시로, 1996, "공압 매니퓰레이터의 강인 힘제어," 대한기계학회논문집(A), 제20권, 제2호, pp. 540~552.