

평행링크 로봇을 이용한 倒立振子の 安定化 制御에 관한 研究

申 春 植¹⁾, 盧 彰 注²⁾

A Study on the Stabilization Control of Inverted Pendulum using Parallelogram Link Robot

Choon-Shik Shin, Chang-Joo Roh

Abstract

Since most powerful mathematical tools are available for linear analysis, it is desirable to make linearizing assumptions whenever a compromise can be obtained between the simplicity of analysis and accuracy of results. However it is very difficult to linearize the system with hard nonlinearity and even if linearized, it becomes a high degree equation. Therefore the attention to the new control method which dispense with the exact modeling such as neural network is often proposed for control of a hard nonlinear system like an inverted pendulum.

Unlike a general inverted pendulum moved on the cart, the suggested inverted pendulum system in this paper has a inverted pendulum on the two degree of-freedom parallelogram link derived by 2 DD(Direct Drive) motors. The two -degree of-freedom parallelogram link is controlled by a feedback control law and the pendulum is controlled by a neural network to stabilizing motion control of inverted pendulum system.

1) 한국해양대학교 대학원 박사과정 기관공학과 전기제어전공

2) 한국해양대학교 기관공학과 교수

The neural network is presented to a learning control scheme such that the stabilizing motion control performance is improved for unknown controlled object by repeated trials. The neural network produces the input force that stabilizes the inverted pendulum by learning. Learning procedure is the Back-Propagation algorithm with supervisory signal.

Simulation results have shown that the stabilizing motion control of inverted pendulum could be realized by the two-degree-of-freedom parallelogram link controlled by a feedback control law and the pendulum controlled by the proposed neural network at the same time. The effectiveness of the control rules is also demonstrated through real-time control experiments.

제 1 장 서 론

최근 고속·고정밀도의 로봇제어를 실현하기 위한 각종 액츄에이터(Actuator)가 연구 개발되고 있으며, 이러한 기대에 부응하기 위해서 개발된 것으로, 직접 구동형(Direct drive : 이하 DD) 모터는 기어를 이용한 감속기를 사용하지 않기 때문에 뒤튐(Backlash)과 불감대(Dead-zone)가 없고, 마찰이나 토크의 변화에 대해서도 영향이 적기 때문에 각종 액츄에이터로서 DD 모터를 이용하고 있다. 이 DD 모터를 이용한 DD 로봇은 구조가 간단하고 파라미터의 변동이 적으므로 고정밀도의 위치 혹은 힘 제어가 가능하다^{[1],[2]}.

일반적인 도립진자 시스템은 대차의 이동에 의해서 진자를 도립시키는 것으로 파라미터의 변동에 민감하고 진자를 도립시키기 위한 제어 알고리즘이 복잡하며, 진자의 각도 및 외란 발생시 안정화되지 못하는 결점이 있다. 그리고, 도립진자는 현대제어이론의 응용에 의해 제어할 수 있는 것으로 알려져 있다^{[3]-[5]}. 또한, 도립진자의 진자각도와 대차위치를 안정화하는 문제를 둘로 분할해서, 각각의 모델에 의해 학습제어하는 방법도 제안되고 있다^{[6],[7]}.

이 논문에서는 대차 대신에 DD 모터를 이용하여 설계·제작한 평행링크 로봇을 이용하였으며, 평행링크 로봇의 운동에 의해서 도립진자의 운동을 제어하도록 하였다. 이 시스템에서 Euler-Lagrange 방정식을 이용하여 계의 운동특성 방정식을 유도하였고^{[8],[9]}, 많은 비선형성 때문에 명확한 수학적인 모델링없이 주어진 실측 데이터를 이용하여 진자의 도립을 가능한 짧은 시간에 원하는 위치로 이동시

키는 도립진자의 안정화 제어를 위하여 신경회로망을 이용한 학습제어기를 설계하고, 도립진자의 안정화 제어에 적용하여 그 유효성을 고찰한다.

제 2 장 신경회로망의 구성

2.1 신경회로망 모델

신경회로망에 이용되는 신경세포(Neuron)의 모델은 그림2.1과 같이 다입력 1출력이고, 이것을 계층적으로 결합한 것이 신경회로망이다. 신경회로망은 일반적으로 입력층, 중간층 및 출력층으로 구성되어 질 수 있다.

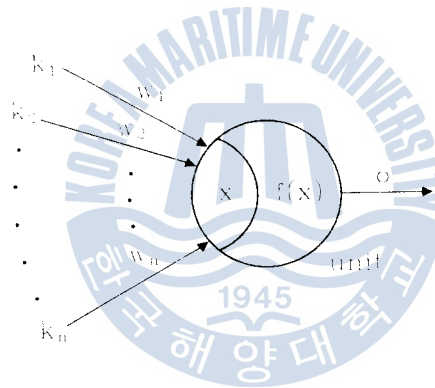


Fig. 2.1 Neuron model

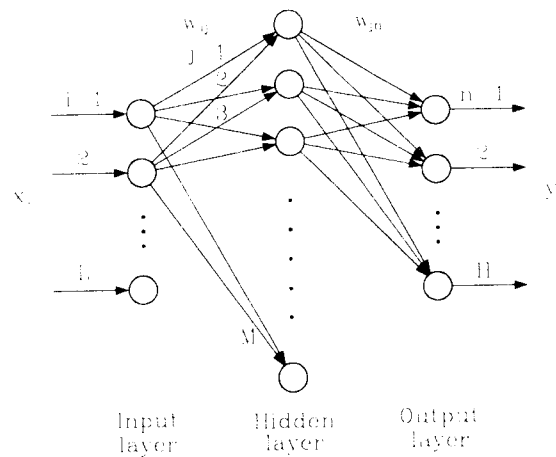


Fig. 2.2 Neural network

신경회로망은 그림2.2에 나타난 바와 같이 신경회로망의 각층 내부에서의 뉴런 (Neuron) 사이의 결합은 존재하지 않는 것으로 하며, 뉴런은 입력층으로부터 출력층을 향하여 한쪽 방향으로만 결합되는 것으로 한다. 또한 입력층의 입출력관계는 선형이며, 중간층과 출력층의 출력은 시그모이드(Sigmoid) 함수를 통과시킨 것으로, $-1 < f(x) < 1$ 의 범위의 값을 갖는 것으로 한다.

입력층, 중간층 및 출력층의 뉴런 수를 각각 L, M, H라 놓으면, 각 층의 입출력 관계는 다음과 같이 주어진다.

$$y_i = x_i \quad (2-1)$$

$$x_j = \sum_{i=1}^L w_{ij} y_i \quad (2-2)$$

$$y_j = f(x_j) \quad (2-3)$$

$$x_n = \sum_{j=1}^M w_{jn} y_j \quad (2-4)$$

$$y_n = f(x_n) \quad (2-5)$$

$$f(x) = \frac{2}{1 + e^{-x}} - 1 \quad (2-6)$$

x_i, y_i : 입력층 i번째 뉴런의 입력, 출력

x_j, y_j : 중간층 j번째 뉴런의 입력, 출력

x_n, y_n : 출력층 n번째 뉴런의 입력, 출력

w_{ij} : 입력층의 출력 y_i 와 중간층의 입력 x_j 사이의 연결강도

w_{jn} : 중간층의 출력 y_j 와 출력층의 입력 x_n 사이의 연결강도

2.2 신경회로망의 학습

신경회로망에 의한 제어기의 학습 알고리즘으로서 역전파법(Backpropagation)을 이용하였다.^[10] 역전파법은 입력층의 각 뉴런에 입력신호가 주어지면, 이 신호는

입력층과 중간층 사이의 연결강도 w_{ij} (초기치는 임의의 작은 값으로 주어진다)에 의해 변환되어 중간층에 전달되고, 다시 중간층과 출력층 사이의 연결강도 w_{jn} 에 의해 변환되어 출력층의 y_n 으로 출력하게 된다. 이 출력값과 목표값을 비교하여 중간층과 출력층사이의 연결강도를 조절한 후, 이것을 토대로 입력층과 중간층 사이의 연결강도를 조절하는 것이다. 신경회로망의 실제출력을 y_n , 목표출력을 v_n 이라 하면, 연결강도는 다음 식에 의해 조절된다.

$$w_{jn}(m+1) = w_{jn}(m) + \sum_{i,n} \eta \delta_n y_i \quad (2-7)$$

$$w_{ij}(m+1) = w_{ij}(m) + \sum_{i,j} \eta \delta_j y_i \quad (2-8)$$

여기서, m 은 학습회수(연결강도의 조절회수), η 는 학습률이며, 역전파 오차 δ_n , δ_j 는 다음과 같이 주어진다.

$$\delta_n = f'(x_n) \cdot (v_n - y_n) \quad (2-9)$$

$$\delta_j = f'(x_j) \sum_{n=1}^N \delta_n w_{jn} \quad (2-10)$$

제 3 장 평행링크 로봇을 이용한 독립진자 시스템의 구성과 해석

본 장에서는 실험장치의 개략적인 설명과 해석에 필요한 관절좌표계와 기준좌표계간의 각종변환 및 운동특성 방정식을 서술한다.

평행링크 로봇을 이용한 독립진자의 구성도는 그림3.1과 같다.

평행링크 로봇은 직렬링크 로봇과는 달리 1자유도 및 2자유도의 모터가 각각 하단부에 부착되어 있기 때문에 한쪽 모터의 무게는 또다른 모터에 대해 부하가 걸리지 않는다는 특징을 갖고 있다. 직렬링크 로봇에서는 각 링크의 선단에 모터가 부착되어 있기 때문에 모터를 지지하기 위해서는 로봇의 링크 강성을 크게 할 필요가 있으며, 이로 인해 링크 자체의 무게가 무겁게 되는 경우가 있으나, 평행링크 로봇은 모터가 하단부에 설치되어 있기 때문에 링크 수는 늘어나지만 로봇 전체의 무게를 가볍게 할 수 있다는 장점을 갖고 있다.

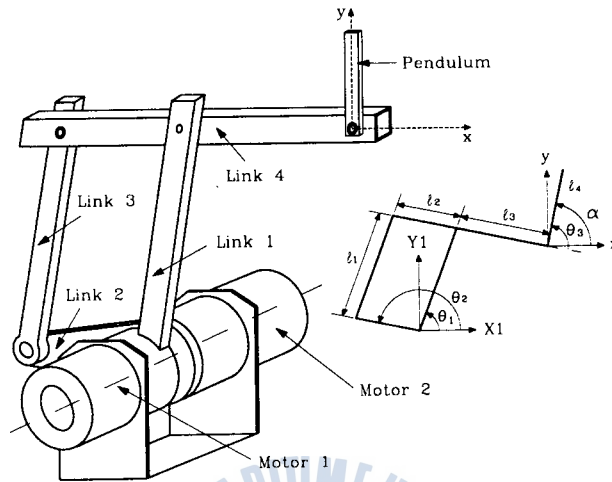


Fig. 3.1 Configuration of parallelogram robot and pendulum

3.1 도립진자 시스템의 해석

그림3.1의 도립진자 시스템에 대한 운동특성 모델은 도립진자의 힘과 변위의 관계로부터 선형화된 수학적 모델을 도입한다. 그림3.2는 그림3.1에서 도립진자를 도립시키기 위한 도립진자의 구성도이다. 따라서, Newton의 제2법칙을 적용하여 운동방정식을 구할 수 있다^[4].

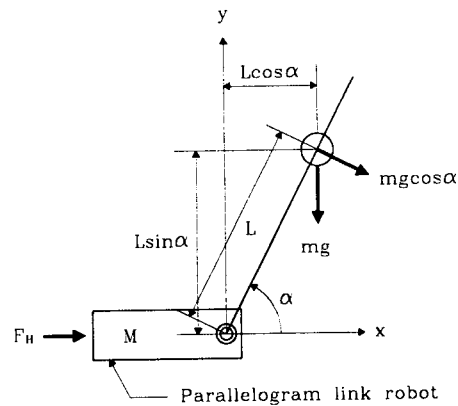


Fig. 3.2 Cartesian coordinate system of inverted pendulum system

진자에 수평으로 작용하는 힘에 대한 방정식은 다음과 같다.

$$F_H(t) = m \frac{d^2x(t)}{dt^2} + m \frac{d^2}{dt^2} L \cos \alpha(t) \quad (3-1)$$

진자에 수직으로 작용하는 힘에 대한 방정식은 다음과 같다.

$$F_V(t) = mg + m \frac{d^2}{dt^2} L \sin \alpha(t) \quad (3-2)$$

또한, 진자가 이동한 각변위는 다음과 같다.

$$LF_V(t) \cos \alpha(t) = J_m \frac{d^2\alpha(t)}{dt^2} + B_2 \frac{d\alpha(t)}{dt} + LF_H(t) \sin \alpha(t) \quad (3-3)$$

그리고, 평행링크 로봇의 운동방정식은 다음과 같다.

$$k_a k_m u(t) = M \frac{d^2x(t)}{dt^2} + B_1 \frac{dx(t)}{dt} + F_H(t) \quad (3-4)$$

식(3-1)에서 m 은 진자의 무게, $x(t)$ 는 평행링크의 팔끝위치 변위, L 은 진자의 중력 중심과 각도 센서간의 거리이고, $\alpha(t)$ 는 진자의 경사각이다. 식(3-2)에서 g 는 중력가속도이다. 식(3-3)에서 J_m 은 진자의 중력 중심에 대한 관성 모멘트이고, B_2 는 진자의 마찰계수이다. 식(3-4)에서 $k_a k_m$ 은 구동 모터와 증폭기의 전체 이득, $u(t)$ 는 증폭기의 입력전압, M 은 평행링크 로봇의 등가 무게, B_1 은 평행링크 로봇의 등가 마찰계수이다.

식(3-1), (3-2), (3-3) 및 식(3-4)를 정리하여 이론적으로 선형화된 미분방정식을 상태방정식으로 표현하면 다음과 같이 된다.

$$\begin{bmatrix} \dot{z}_1(t) \\ \dot{z}_2(t) \\ \dot{z}_3(t) \\ \dot{z}_4(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -a_1 & -a_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & a_3 & a_4 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1(t) \\ z_2(t) \\ z_3(t) \\ z_4(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ b_1 \\ 0 \\ -b_2 \end{bmatrix} u(t) \quad (3-5)$$

식(3-5)에서 $z_1(t) = x(t)$, $z_2(t) = \dot{x}(t)$, $z_3(t) = \alpha(t)$, $z_4(t) = \dot{\alpha}(t)$ 로 정의하면, $z(t) = [x(t), \dot{x}(t), \alpha(t), \dot{\alpha}(t)]$ 이고, 상태변수 $z_1(t)$, $z_2(t)$, $z_3(t)$ 및 $z_4(t)$ 를 평행링크 로봇으로 제어하기 위해서 평행링크 로봇을 이용한다.

3.2 평행링크 로봇을 이용한 도립진자 시스템의 해석

3.2.1 관절 및 기준좌표계의 설정과 운동특성 방정식 유도

그림3.1에서 관절좌표계로서 모터1과 모터2의 관절각, 그리고 각도 센서(Angle sensor)의 전위차를 관절각의 성분으로 취한다. 따라서, 관절변수는 $\theta = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3]^T$ 이다. 기준좌표계는 모터의 중심축을 z축으로 하는 직교좌표계이다. 따라서, 기준좌표계 원점에서 팔끝의 위치벡터는 $\mathbf{r} = [x \ y \ a]^T$ 이고, a 는 팔끝의 자세를 나타내는 변수이다.

또한, 2자유도의 경우에 θ, \mathbf{r} 은 각각 $\theta = [\theta_1 \ \theta_2]^T$, $\mathbf{r} = [x \ y]^T$ 이다.

기준좌표 원점에서 팔끝까지의 위치좌표 \mathbf{r} 은 관절변수 θ 를 변수로 하는 매니퓰레이터의 운동특성 방정식 $\Lambda(\theta)$ 로 다음과 같이 정의된다.

$$\mathbf{r} = \Lambda(\theta) \quad (3-6)$$

기준좌표 x, y 는 식(3-6)과 그림3.1에서 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \Lambda(\theta) = \begin{bmatrix} \ell_1 \cdot \cos \theta_1 - \ell_3 \cdot \cos \theta_2 \\ \ell_1 \cdot \sin \theta_1 - \ell_3 \cdot \sin \theta_2 \end{bmatrix} \quad (3-7)$$

따라서, 식(3-7)로부터 관절좌표계가 주어질 때 기준좌표계로의 변환을 행할 수가 있다.

역운동특성 방정식 $\Lambda^{-1}(\mathbf{r})$ 은 기준좌표계의 원점에서 \mathbf{r} 의 함수로서 관절좌표 θ 를 나타낸 것으로, 다음과 같다.

$$\theta = \Lambda^{-1}(\mathbf{r}) \quad (3-8)$$

자코비안 행렬 \mathbf{J} 를 이용하면 관절변수 θ 와 팔끝위치 \mathbf{r} 의 미소변위의 관계는 다음과 같이 나타내어진다.

$$d\mathbf{r} = \mathbf{J}d\theta \quad (3-9)$$

또한, 관절좌표계에서의 속도와 팔끝위치의 속도와의 관계는 다음과 같다.

$$\dot{\mathbf{r}} = \mathbf{J}\dot{\theta} \quad (3-10)$$

즉, 모터1과 모터2에서 읽어 들이는 관절좌표계의 각위치 θ 는 식(3-9)에 의해서 기준좌표계의 팔끝위치의 벡터 \mathbf{r} 로 변환되고, 각속도 $\dot{\theta}$ 는 식(3-10)에서 기준좌표계의 팔끝위치 이동속도 $\dot{\mathbf{r}}$ 로 변환된다.

3.2.2 2자유도 매니플레이터의 운동특성 방정식

매니플레이터의 운동특성 방정식을 유도하기 위하여 다음의 Euler-Lagrange 방정식을 이용한다^[6].

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{H}(\boldsymbol{\theta})\ddot{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{f}_o(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}) \quad (3-11)$$

여기서, $\boldsymbol{\tau}$ 는 회전관절에서의 발생토크, 우변의 제1항은 관성행렬, $\mathbf{f}_o(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}})$ 는 비선형력(원심력, 코리올리력 및 중력의 합계)으로 주어진 항이다.

그림3.1에서 도립진자 부분을 제외하고, 식(3-11)을 이용하여 2자유도 평행링크 매니플레이터의 운동특성 방정식을 계산한다.

$$\boldsymbol{\tau} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} \quad (3-12)$$

$$\mathbf{H}(\boldsymbol{\theta}) = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{bmatrix} \quad (3-13)$$

따라서, H_{11} , H_{12} , H_{21} 및 H_{22} 는 다음과 같다.

$$H_{11} = m_1 \ell_{c1}^2 + m_3 \ell_{c3}^2 + m_4 \ell_{c1}^2 + I_1 + I_3 \quad (3-14)$$

$$H_{12} = H_{21} = (m_3 \ell_2 \ell_{c3} - m_4 \ell_1 \ell_{c4})c_{1-2} \quad (3-15)$$

$$H_{22} = m_2 \ell_{c2}^2 + m_3 \ell_2^2 + m_4 \ell_{c4}^2 + I_2 + I_4 \quad (3-16)$$

여기서, $I_i(i=1,2,3,4)$ 는 i 관절축 주위의 관성모멘트를 나타내며, ℓ_{ci} 는 관절 i 에서의 링크 무게중심까지의 길이이고, m_i 는 링크 i 의 무게를 나타낸다.

또한, 식(3-11)에서 비선형력으로 주어지는 $\mathbf{f}_o(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}})$ 는 다음과 같다.

$$\mathbf{f}_o(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}) = \begin{bmatrix} \frac{\partial H_{12}}{\partial \theta_2} \dot{\theta}_2^2 + \frac{\partial P}{\partial \theta_1} \\ \frac{\partial H_{12}}{\partial \theta_1} \dot{\theta}_1^2 + \frac{\partial P}{\partial \theta_2} \end{bmatrix} \quad (3-17)$$

여기서, $\frac{\partial H_{jk}}{\partial \theta_i}$ 는

$$\frac{\partial H_{12}}{\partial \theta_1} = \frac{\partial H_{21}}{\partial \theta_1} = (m_3 \ell_2 \ell_{c3} - m_4 \ell_1 \ell_{c4})(c_1 s_2 - s_1 c_2) \quad (3-18)$$

$$\frac{\partial H_{12}}{\partial \theta_2} = \frac{\partial H_{21}}{\partial \theta_2} = (m_3 \ell_2 \ell_{c3} - m_4 \ell_1 \ell_{c4})(s_1 c_2 - c_1 s_2) \quad (3-19)$$

가 된다. 또한, g 를 중력가속도라 할 때 위치에너지 $\frac{\partial P}{\partial \theta_i}$ 는

$$\frac{\partial P}{\partial \theta_1} = g c_1 (m_1 \ell_{c1} + m_3 \ell_{c3} + m_4 \ell_1) \quad (3-20)$$

$$\frac{\partial P}{\partial \theta_2} = g c_2 (m_2 \ell_{c2} + m_3 \ell_2 - m_4 \ell_{c4}) \quad (3-21)$$

가 된다. 2자유도 평행링크의 경우 $\dot{\theta}_i, \dot{\theta}_j (i \neq j)$ 의 항으로 표현된 코리올리력은 작용하고 있지 않음을 알 수 있다. 그러므로, 평행링크 매니플레이터는 직렬링크 매니플레이터에 비해 비선형항을 줄일 수 있는 장점을 가지고 있다.

제 4 장 안정화 제어 알고리즘

4.1 독립진자 실현을 위한 정성적 지식

2자유도 평행링크 로봇에 의해 구동되는 독립진자 시스템의 제어목표는 어느 일정 높이를 가진 수평방향에 팔끝을 이동시켜 진자를 안정화(즉, 도립)시키고, 로봇의 팔끝을 수평으로 원하는 위치에 이동시키는 것이다. 고의로 로봇이 진자를 목표위치로 향해 넘어지는 목표각도를 넘어지는 각 α_d 라 부른다. 로봇의 작업좌표는 초기위치 $\mathbf{r} = [x, y, \alpha]^T$ 이고, 목표위치 $\mathbf{r}_t = [x_t, y_t, \alpha_t]^T$ 이다. 또한, 어떤 거

리 이상에서는 진자가 넘어지지 않도록 각을 일정하게 한다. 이 각도를 최대 넘어지는 각 α_{dmax} 라고 한다. 이상의 팔끝위치와 목표위치의 간격과 진자의 넘어지는 각의 관계를 시그모이드곡선에 의해 표현하면 다음과 같다.

$$\alpha_d = \alpha_{dmax} \left[1 - \frac{2}{1 + e^{\frac{a(x-x_t)}{a(x-x_t)}}} \right] + \frac{\pi}{2} \quad (4-1)$$

그러므로, 넘어지는 각을 최대로 조정하는 파라미터는 a 와 α_{dmax} 이다. 이 두 개의 파라미터를 조정해서 진자의 독립상태를 고찰하였다. 진자가 넘어지는 속도는 다음과 같다.

$$\dot{\alpha}_d = \alpha_{dmax} \frac{2ae^{\frac{a(x-x_t)}{a(x-x_t)}}}{[1 + e^{\frac{a(x-x_t)}{a(x-x_t)}}]^2} \cdot \dot{x} \quad (4-2)$$

식(4-1)과 식(4-2)에서 진자에 관한 값 α_d , $\dot{\alpha}_d$ 는 모두 로봇의 팔끝위치 x 와 목표위치 x_t 와의 위치에만 관계하고, 진자의 상태량 α , $\dot{\alpha}$ 와는 무관하다.

4.2 독립진자의 안정화 제어 알고리즘

평행링크 로봇에 의해 구동되는 독립진자 시스템에서 진자의 운동특성을 좌우하는 것은 진자를 지지하는 로봇의 팔끝위치에 놓여진 팔끝의 가속도이다. x 방향의 이동가속도를 이용하여 로봇의 팔끝위치 r 을 목표위치 r_t 에 도달하도록 한다. 실제위치 x 와 목표위치 x_t 와의 편차 벡터 $q = [x - x_t, \dot{x}, \alpha, \dot{\alpha}]^T$ 이고, 제어 목표 $q_d = [0, 0, \pi/2, 0]^T$ 이다. 팔끝위치 r 과 목표위치 r_t 에서 진자를 독립시키기 위해서 팔끝위치의 x 방향으로 시간에 대한 속도의 변화량 즉, 지령가속도 $u_x [m/s^2]$ 를 출력시키도록 한다. 이것을 신경회로망으로 구성된 구성도는 그림4.1과 같고, 학습제어 알고리즘이라 부른다.

그림4.1에서 입력층 앞에 정규화 유니트를 설정하고 있지만, 이것은 신경회로망을 구성하는 뉴런의 시그모이드함수의 값이 $-1 \sim 1$ 이기 때문에 입력층으로 입력하는 상태량을 $-1 \sim 1$ 로 변환하는 것이다. 또한, 역으로 출력층에서의 출력을 역정규화 유니트에서 정수를 곱해 물리량으로 변환하고 있다.

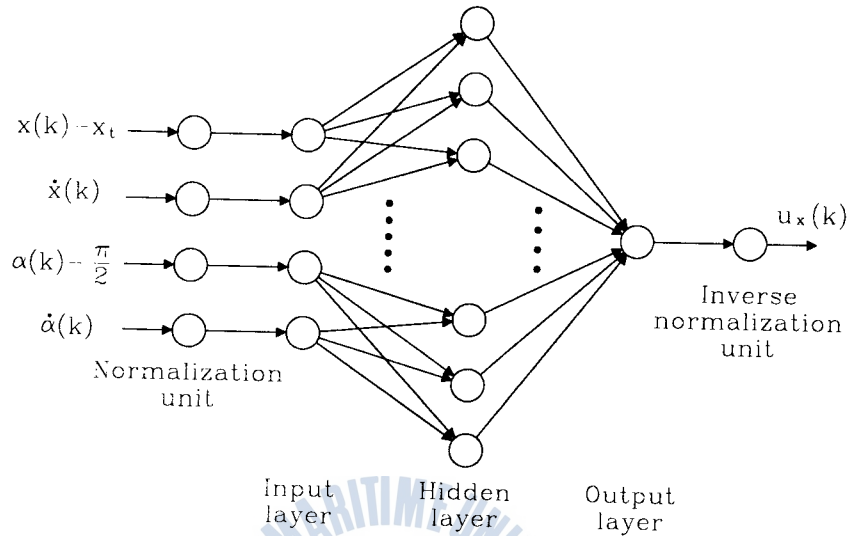


Fig. 4.1 Learning control algorithm of inverted pendulum

신경회로망을 제어기에 응용할 때에 문제가 되는 것은 교사신호를 어떻게 생성시킬 것인가 하는 것이다. 이때, 인간이 경험적으로 습득한 운동 요령을 몇 가지 형태의 정량적인 것으로 변환시켜, 이것을 교사신호로 사용하는 것이 유효하다.

평행링크 로봇에 의해 구동되는 도립진자 시스템에서 진자를 도립시키기 위한 안정화 제어 알고리즘은 앞장에서 유도한 운동특성 방정식을 기초로 하고 있다. 주어진 최종목표치와는 별도로 진자의 각도 및 각속도 (α , $\dot{\alpha}$)의 일시적인 가상목표치를 각각 식(4-1)과 식(4-2)로 둔다. 그리고, 안정화 제어 알고리즘은 각 시점에 있어 주어진 가상목표치 (α_d , $\dot{\alpha}_d$)와 진자의 상태량 (α , $\dot{\alpha}$)과 일치하도록 하는 지령가속도 u_x 를 출력하도록 학습한다. 그러므로, 진자의 각도와 각속도 (α , $\dot{\alpha}$)와 가상목표치 (α_d , $\dot{\alpha}_d$)로부터 지령가속도 u_x 의 교사신호 u_t 는 다음 식으로 구해진다. 여기서, k_{pv} 와 k_{dv} 는 비례정수이다.

$$u_t = u_{t1} + u_{t2} = k_{pv}(\alpha_d - \alpha) + k_{dv}(\dot{\alpha}_d - \dot{\alpha}) \quad (4-3)$$

이 교사신호를 사용한 제어 알고리즘의 학습은 u_t 를 0에 접근하도록 신경회로망을 이용하여 학습을 행한다. 2자유도 평행링크 로봇과 도립진자 시스템의 구성도는 그림4.2와 같다.

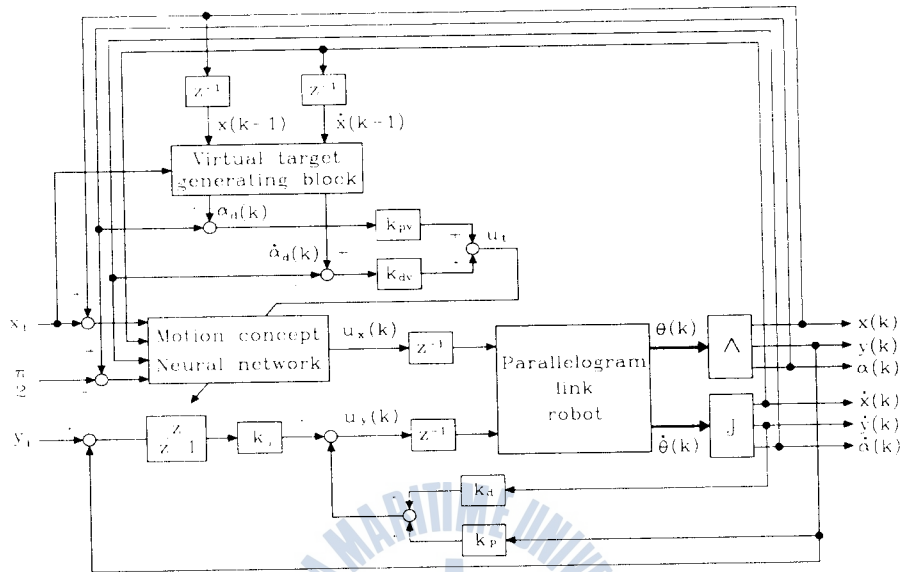


Fig. 4.2 Stabilization control system of pendulum using robot

제 5 장 실험 및 고찰

사진1은 평행링크 로봇과 도립진자를 구성하는 전체 실험장치를 나타낸다.

그림5.1은 실험에 사용하는 평행링크 로봇을 구동원으로 하는 도립진자의 시스템으로 제어장치와 주변장치의 구성을 나타낸다. 2자유도 평행링크 로봇의 구동부는 최대회전수 2.4[rps]인 Yokogawa precision(주)의 DD 모터를 2개 사용하였으며, 평행링크부는 알루미늄 사각파이프를 사용하여 제작하였다. 또한 진자는 Carbon 봉을 사용하여 실험을 행하였으며, 진자의 넘어지는 각도를 측정하는 각도 센서는 Copal 전자(주)의 J50S를 사용하였다.

실험 방법으로는 초기위치 $(x, y) = (0.0[m], 0.0[m])$ 인 상태로 평행링크를 이동시키고, 진자는 초기위치 $\alpha = \pi/2[\text{rad}]$ 인 상태로 도립시킨다. 다음, 목표위치로 이동하기 위하여 교차신호 u_t 를 가상목표생성부에 의해서 생성하고, 신경회로망을 통하여 지령가속도 u_x 를 출력한다. 또한, 목표위치로 진자가 도립상태를 유지하면서 이동할 수 있도록 진자의 각을 진자의 최대 넘어지는 각 α_{dmax} 의 범위를 벗어나지 않도록 x축의 지령가속도 u_x 를 조절하며, y축은 초기위치를 유지하기 위

해서 피드백제어를 행한다.

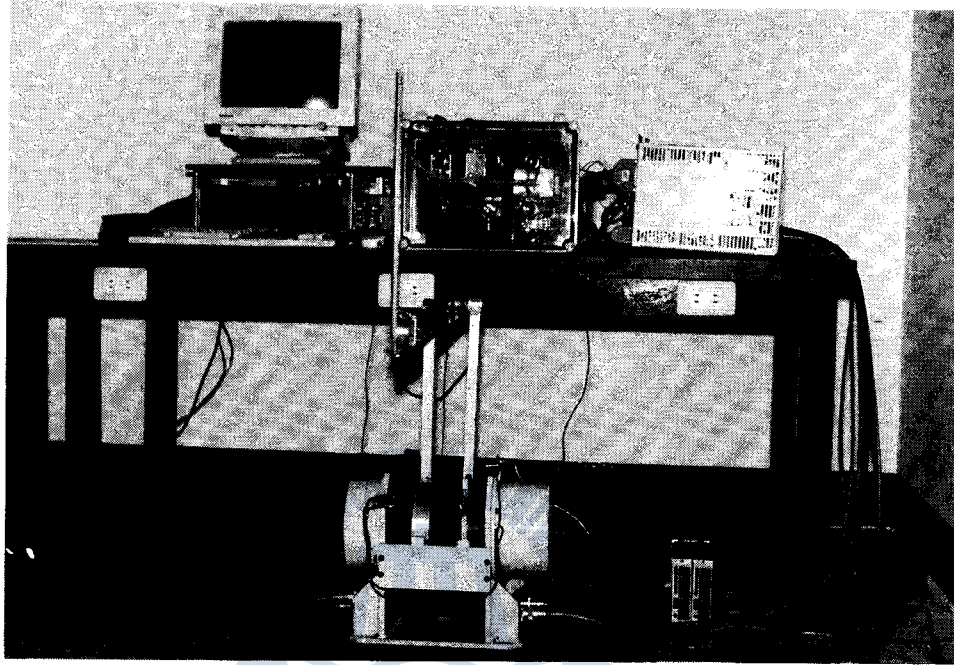


Photo 1 Configuration of experimental apparatus

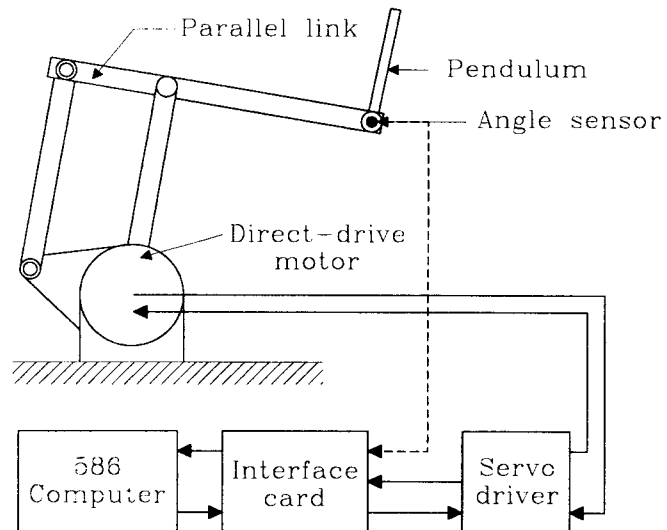


Fig.5.1 Configuration of experimental apparatus

교사신호 생성 파라미터는 $k_{pv} = 15$, $k_{dv} = 25$ 로 하였으며, 1회의 도립진자의 실행은 최대 샘플링수를 1,500으로 하였다. 그 밖의 신경회로망의 파라미터는 입력층 4뉴런, 중간층 8뉴런 및 출력층 1뉴런을 사용하였으며, 학습률 η 는 0.2 그리고, 신경회로망의 초기 연결강도는 0.05로 하였다. 각 gain 값은 $k_p = 80$, $k_i = 20$, $k_d = 15$ 이다. 한편, 안정화 제어의 시그모이드 곡선의 경사 $a = 15$ 이고, 최대 경사각 $\alpha_{dmax} = 10^0$ 이다.

제한한 안정화 제어가 원하는 제어(운동)를 하는 지를 실험에 의해서 고찰한다. 그리고, 초기위치 $(x, y, \alpha) = (0.0[m], 0.0[m], \pi/2[rad])$ 에서 진자의 도립상태를 유지하게 진자의 길이 $\ell_p = 0.4[m]$ 및 진자의 무게 $m = 0.1[Kg]$ 의 경우의 실험을 행하였다.

그림5.2에서 (a)는 평행링크 로봇 팔끝의 x축 위치, (b)는 평행링크 로봇 팔끝의 y축위치, (c)는 진자의 각도 $\alpha(\alpha(0) = 0^\circ)$ 이고, (d)는 신경회로망의 출력인 지령가속도 u_x 를 나타낸다.

그림5.2(a)에서 x축이 진동을 하는 것은 진자가 도립상태를 유지하기 위해서 지령가속도 u_x 가 변화하는 것이지만, 초기위치에서 안정하게 도립상태를 유지하고 있다. 그림5.2(b)는 y축이 0으로 일정하게 유지되고 있다. 그림5.2(c)에서 진자의 각도 α 는 넘어짐 운동이 정의 방향으로 이루어졌기 때문에 정의 값이 된다. 즉, 진자의 각도는 x축의 이동과 관련이 있다. 또한, 그림5.2(d)의 u_x 는 x축의 위치와 진자의 각도를 제어하기 위해 신경회로망으로부터 출력된 지령가속도이다. 따라서, 진자의 길이가 짧은 경우에는 진자의 넘어지는 속도가 빠르므로 진자의 각도 및 신경회로망의 출력 u_x 에 대한 응답의 진폭은 커지지만 초기위치에서 진자를 도립시키는 목적은 달성할 수 있었다.

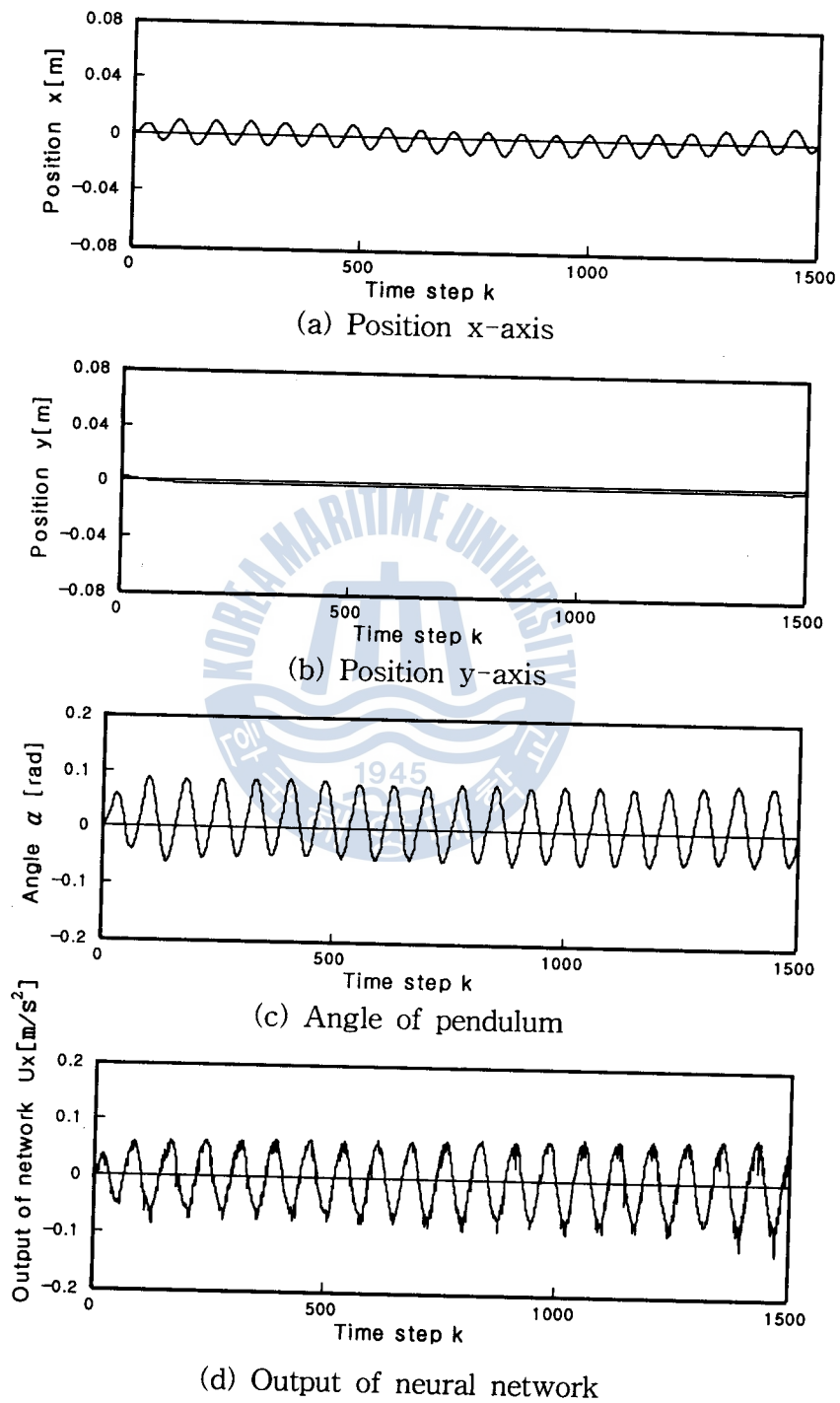


Fig. 5.2 Response of pendulum $\ell_p = 0.4[\text{m}]$, $m = 0.1[\text{Kg}]$

제 6 장 결 론

일반적으로 대차와 진자로 구성되는 도립진자 시스템에서 도립진자 시스템이 갖는 여러 가지 기계적인 문제점(벨트의 신장, 바퀴의 슬립등)을 개선하기 위해서 2자유도 평행링크 로봇을 대차로 이용하였다. 이 시스템에서 평행링크 로봇은 Euler-Lagrange 방정식으로, 도립진자 시스템에 대해서는 동적모델링 시스템으로 각각 운동특성 방정식을 유도하였다. 또한, 이 운동특성 방정식에는 여러 가지 비선형성을 가지고 있으므로 명확한 수학적 모델링을 하기 힘들다. 따라서, 수학적 모델링을 행하지 않고, 주어진 실측 데이터를 이용한 학습으로 진자의 도립을 가능한 짧은 시간에 원하는 위치로 제어를 행할 수 있는 안정화 제어 알고리즘을 유도하였으며, 실험을 통해서 다음의 결론을 얻었다.

- (1) 학습에 따른 데이터의 축적을 토대로 진자가 목표위치를 향하여 이동하기 위한 넘어지는 각도와 각속도를 발생시키는 가상목표치 생성부, 진자를 안정하게 도립시키기 위한 조작량을 출력하는 신경회로망, 그리고 평행링크 로봇의 팔끝위치를 일정하게 유지시키기 위한 피드백 제어기로 구성된 도립진자의 안정화 제어 알고리즘을 제안하였다.
- (2) 제안한 안정화 제어 알고리즘을 이용하여 평행링크 로봇을 이용한 도립진자 실험에 적용하였다. 그 결과, 신경회로망을 이용하여 진자의 안정화 도립을 위한 수평방향의 조작량을 생성함으로써 제어대상에 대한 모델링이 불필요함을 확인하였다.
- (3) 습득한 학습 요령을 이용함으로써, 제어대상에 대한 파라미터의 수정없이 제어목표를 달성하는 빠른 적응력 및 강인성을 확인할 수 있었다.
- (4) 따라서, 제안한 안정화 제어 알고리즘을 이용하면 다른 산업 제어시스템에도 적용이 가능하리라 사료된다.

앞으로의 연구과제로는 진자를 도립시키기 위한 평행링크 로봇의 수직방향의 세어를 피드백제어 대신에 신경회로망을 이용하는 문제와 한정된 메모리에서 샘플

플링 수를 보다 많이 늘림으로서 오랜 시간동안 진자를 독립시킬 수 있는 알고리즘의 개발 등이 향후 연구과제로 남아 있다.

참 고 문 헌

- [1] Hwang, Y. Y. and Todo, I., "Cooperative Control of Two Direct-Drive Robots Using Neural Network", JSME Int. Journal(C), Vol. 37, No. 2, pp. 335-341, 1994.
- [2] 高瀬國克, "DD 로봇의 制御", 日本ロボット學會誌, Vol. 5, No. 1, pp. 55-60, 1987.
- [3] Chung Choo Chung, John Hauser, "Nonlinear Control of a Swinging Pendulum", Automatica, Vol. 31, No. 6, pp. 851-862, 1995.
- [4] 朴英式, "倒立振子 시스템의 最適 安定化 制御에 관한 研究", 동아대학교 대학원 전자공학과 박사학위논문, 1989.
- [5] Qipeng Wei, W. P. Dayawansa, W. S. Levine, "Nonlinear Controller for an Inverted Pendulum Having Restricted Travel", Automatica, Vol. 31, No. 6, pp. 841-850, 1995.
- [6] 態谷, 秋田, 和田, "ニューラルネットワークを用いた倒立振子系の學習制御", 第9回日本ロボット學會學術講演會豫稿集, pp. 365-368, 1991.
- [7] 態谷, 秋田, 和田, "ニューラルネットワーク群を用いた倒立振子の學習制御", 日本機械學會 FANシンポジウム講演論文集, pp. 111-112, 1991.
- [8] 강철구, 권인소, 윤중선, 정완균, "로봇 동역학과 제어", 회중당, 1994.
- [9] 이대길, 최상민, "로보틱스 입문", 홍릉과학출판사, 1991.
- [10] Rumelhart. D. E., Hinton. G. E. and Williams. R. J., "Learning Internal Representation by Error Propagation", Parallel Distributed Processing, Vol. 1, MIT Press, pp. 318-362, 1986.