

인공신경망을 이용한 병렬로봇의 정밀한 추적제어

송낙윤*, 조황**

Precise Tracking Control of Parallel Robot using Artificial Neural Network

Nak-Yun Song*, Whang Cho**

ABSTRACT

This paper presents a precise tracking control scheme for the proposed parallel robot using artificial neural network. This control scheme is composed of three feedback controllers and one feedforward controller. Conventional PD controller and artificial neural network are used as feedback and feedforward controller respectively. A backpropagation learning strategy is applied to the training of artificial neural network, and PD controller outputs are used as target outputs. The PD controllers are designed at the robot dynamics based on inter-relationship between active joints and moving platform. Feedback controllers insure the total stability of system, and feedforward controller generates the control signal for trajectory tracking. The precise tracking performance of proposed control scheme is proved by computer simulation.

Key Words : Artificial neural network (인공신경망), Parallel robot (병렬로봇), Precise tracking control (정밀한 추적제어)

1. 서론

대부분의 산업현장에서 사용되고 있는 로봇(robot)은 각 링크의 연결상태가 개회로구조(open loop structure)를 이루고 있다. 개회로구조를 이루는 로봇은 낮은 강성으로 인해 큰 동적하중을 필요로 하는 작업에 적용할 수 없으며, 특히 각 링크에서 발생한 오차가 말단효과장치(end-effector)에 누적되어 정밀한 위치결정을 하기에는 한계가 있다. 이에 비해 각 링크의 연결상태가 폐회로구조(closed loop structure)를 이루는 병렬로봇은 강성이 높고, 하중용량(load capacity)이 크며, 우수한 위치정밀도를 가

지고 있어 고정밀 작업에 적합하다. 대표적인 병렬 메카니즘을 지니는 로봇에는 Stewart가 항공기 시뮬레이터로 고안한 공간형 6자유도 스튜어트 플랫폼(Stewart platform)이 있으며,⁽¹⁾ 새로운 형태의 병렬로봇을 개발하기 위해 스튜어트 플랫폼에 대한 많은 연구가 계속 진행되고 있다.⁽²⁻⁶⁾ 또한 최근 평면형 3자유도 병렬로봇에 관한 연구도 상당수 보고되고 있다.⁽⁷⁻¹³⁾ 그러나 병렬로봇은 그 구조의 복잡성과 액추에이터들 간의 상호간섭으로 인해 제어시스템의 설계가 쉽지 않고, 비선형적 특성이 강하게 나타나므로 기존의 제어방법으로는 정밀도 향상에 어려움이 있다.

* 광운대학교 제어계측공학과

** 광운대학교 제어계측공학과 및 광운대학교 신기술연구소

본 연구에서는 최근 들어 학습능력으로 인해 로봇제어에 많이 응용되고 있는 인공신경망을 이용하여, 제안된 병렬로봇⁽⁷⁻¹¹⁾이 주어진 기준궤도를 더욱 정밀하게 추적(tracking)할 수 있도록 제어시스템을 설계하고자 한다.

2. 병렬로봇의 구조

Fig.1에서 보는 바와 같이 제안된 평면작업용 병렬로봇은 기저판(base platform)과 이에 평행한 면을 움직이는 이동판(moving platform)을 세 개의 직렬부속체인(sub chain)으로 연결한 구조이다. 각 직렬부속체인은 세 개의 회전관절(revolute joint)과 두 개의 링크(link)로 구성되어 있다. 이동판은 정삼각형의 형태이며, 세 개의 직렬부속체의 기저판에 연결된 첫 번째 관절들 ($1\theta_1, 2\theta_1, 3\theta_1$)도 정삼각형이 되도록 대칭적으로 배치한다. 여섯 개의 링크 길이를 모두 $0.1m$ 로 하고 내부의 이동판정삼각형의 한 변의 길이를 $0.1m$ 로 하고 외부의 기저판정삼각형의 한 변의 길이를 $0.3732m$ 로 정하였다.

이 병렬로봇의 말단효과장치는 이동판의 중심점에 부착할 수 있으며 중심점은 3자유도의 작업공간으로 한정된다. 즉 이동판의 중심점이 출력점이 된다. 이것은 자유도판별식의 일반형태(general form of mobility criterion)에 의해 다음과 같이 증명된다.⁽⁶⁾

$$F = \lambda(l - j - 1) + \sum_i f_i - I_d \quad (1)$$

여기서 F 는 로봇의 유효자유도, λ 는 로봇이 작용하는 공간의 자유도 (공간운동일 때는 $\lambda=6$, 평면운동일 때는 $\lambda=3$), l 은 기저판을 포함하는 링크들의 수, j 는 관절들의 수, f_i 는 i 번째 관절의 자유도, I_d 는 무효자유도를 나타낸다. 제안된 병렬로봇에 대해서는 $\lambda=3$ 이고 $l=8$ 이고 $j=9$ 이고 $f_i=1$ 이고 $I_d=0$ 이므로 다음과 같다.

$$F = 3(8 - 9 - 1) + (9 \times 1) - 0 = 3 \quad (2)$$

즉, 이 시스템에 의해 얻을 수 있는 세 개의 자

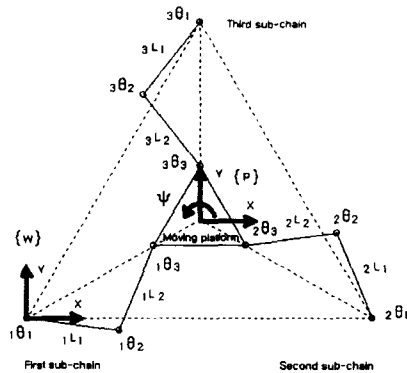


Fig. 1 Architecture of the proposed parallel robot

유도는 이동판중심점에 고정된 직각좌표계 $\{P\}$ 가 기준직각좌표계 $\{W\}$ 에 대해 가지는 평면상의 위치와 방위(position and orientation)이다. 즉 (x, y, Ψ) 이다. 여기서 기준직각좌표계는 첫 번째 부속체인의 제일관절계(first joint frame)와 일치한다.

제안된 병렬로봇의 출력점의 3자유도를 구현하기 위해서는 최소 세 개의 관절에만 구동액츄에이터를 가지면 된다. 나머지 여섯 개의 관절은 자유관절(free joint)이 된다. 로봇 자체에 가해지는 하중을 최소화하기 위해 세 개의 구동액츄에이터는 모두 기저판과 부속체인이 연결되는 첫 번째 관절 ($1\theta_1, 2\theta_1, 3\theta_1$)에 장착한다. 즉, 각 부속체인의 제일관절계의 원점에 장착한다.

이후부터 Fig.1의 형상일 때를 출력점의 기준위치로 한다. 즉 $x=0m, y=0m, \Psi=0^\circ$ 이다.

3. 기구학의 해석

3.1 역방향기구학의 해석

역방향기구학 문제는 출력점의 위치와 방위가 주어졌을 때, 각 관절들의 변위를 계산하는 것이다. r 번째 직렬부속체인에서 기저판으로부터 n 번째 관절변수를 θ_n 이라 정하고 r 번째 직렬부속체인의 n 번째 링크의 길이를 L_n 이라 정한다. 먼저 제일관절계를 기준으로 하고 이동판의 중심점을 출력점 (x, y, Ψ) 으로 하는 첫 번째 직렬부속체인 하나

에 대한 데나비트-하텐버그 링크인자 (Denavit-Hartenberg link parameters)는 Table 1과 같다.⁽¹⁴⁾

Table 1. Denavit-Hartenberg link parameters of the first serial sub-chain

j	a_{j-1}	a_{j-1}	d_j	θ_j
1	0	0	0	${}_1\theta_1$
2	0	${}_1L_1$	0	${}_1\theta_2$
3	0	${}_1L_2$	0	${}_1\theta_3$

이 표에 의한 변환행렬을 이용해 구해진 정방향 기구학은 다음 세 개의 식(3), (4), (5)로 표현된다.⁽¹⁵⁾ 이동관정삼각형의 꼭지점으로부터 중심점까지의 거리는 ${}_1L_3$ 으로 정하였다.

$$x = {}_1L_1 \cos {}_1\theta_1 + {}_1L_2 \cos ({}_1\theta_1 + {}_1\theta_2) + {}_1L_3 \cos ({}_1\theta_1 + {}_1\theta_2 + {}_1\theta_3) \quad (3)$$

$$y = {}_1L_1 \sin {}_1\theta_1 + {}_1L_2 \sin ({}_1\theta_1 + {}_1\theta_2) + {}_1L_3 \sin ({}_1\theta_1 + {}_1\theta_2 + {}_1\theta_3) \quad (4)$$

$$\Psi = {}_1\theta_1 + {}_1\theta_2 + {}_1\theta_3 \quad (5)$$

여기서 식(3), (4), (5)를 연립방정식의 형태로 정리하여 풀이하면 다음의 해(6), (9), (14)를 얻는다.

$${}_1\theta_2 = \text{Atan2}(\sin {}_1\theta_2, \cos {}_1\theta_2) \quad (6)$$

여기서

$$\cos {}_1\theta_2 = \frac{(x - {}_1L_3 \cos \Psi)^2 + (y - {}_1L_3 \sin \Psi)^2 - {}_1L_1^2 - {}_1L_2^2}{2 {}_1L_1 {}_1L_2} \quad (7)$$

$$\sin {}_1\theta_2 = \pm \sqrt{1 - \cos^2 {}_1\theta_2} \quad (8)$$

이고

$${}_1\theta_1 = \text{Atan2}(ad - bc, ac + bd) \quad (9)$$

여기서

$$a = {}_1L_1 + {}_1L_2 \cos {}_1\theta_2 \quad (10)$$

$$b = {}_1L_2 \sin {}_1\theta_2 \quad (11)$$

$$c = x - {}_1L_3 \cos \Psi \quad (12)$$

$$d = y - {}_1L_3 \sin \Psi \quad (13)$$

이고

$${}_1\theta_3 = \Psi - ({}_1\theta_1 + {}_1\theta_2) \quad (14)$$

이다. 식(8)에 의해 식(6)은 중복해를 갖지만 링크들간의 상호간섭을 피하기 위해 식(8)에서 + 부호만을 선택하기로 한다. 세 개의 직렬부속체인은 각각 독립적인 역방향기구학식으로 표현될 수 있다. 그러므로 다른 두 개의 직렬부속체인 역방향기구학식은 똑같은 형의 수식에 입출력변수만 바꾸어 줌으로써 구할 수 있다. 첫 번째 직렬부속체인에 대해 구해진 역방향기구학관계식을 다음의 식(15)로 표현할 때

$${}_1\phi = f({}_1u) \quad (15)$$

여기서

$${}_1\phi = [{}_1\theta_1 \quad {}_1\theta_2 \quad {}_1\theta_3]^T \quad (16)$$

$${}_1u = [x \quad y \quad \Psi]^T \quad (17)$$

두 번째 직렬부속체인에 대한 역방향기구학관계식은 식(18)로 표현되고

$${}_2\phi = f({}_2u) \quad (18)$$

여기서

$${}_2\phi = [{}_2\theta_1 \quad {}_2\theta_2 \quad {}_2\theta_3]^T \quad (19)$$

$${}_2u = [x - d_{x12} \quad y - d_{y12} \quad \Psi + \frac{2}{3} \pi]^T \quad (20)$$

여기서 d_{x12} 는 첫 번째 직렬부속체인의 제일관절계에 기준한 두 번째 직렬부속체인의 제일관절계의 x 방향 변위이고 d_{y12} 는 첫 번째 직렬부속체인의 제일관절계에 기준한 두 번째 직렬부속체인의

제일관절계의 y방향 변위이다.

세 번째 직렬부속체인에 대한 역방향기구학관계식은 식(21)로 표현된다.

$${}_3\phi = f({}_3u) \quad (21)$$

여기서

$${}_3\phi = [{}_3\theta_1 \quad {}_3\theta_2 \quad {}_3\theta_3]^T \quad (22)$$

$${}_3u = [x - d_{x13} \quad y - d_{y13} \quad \psi + \frac{4}{3}\pi]^T \quad (23)$$

여기서 d_{x13} 는 첫 번째 직렬부속체인에 제일관절계에 기준한 세 번째 직렬부속체인의 제일관절계의 x방향 변위이고 d_{y13} 는 첫 번째 직렬부속체인의 제일관절계에 기준한 세 번째 직렬부속체인의 제일관절계의 y방향 변위이다.

2절에서 제시한 외부의 기저판정삼각형의 크기를 고려할 때, $d_{x12} = 0.3732 \text{ m}$, $d_{y12} = 0 \text{ m}$, $d_{x13} = 0.1866 \text{ m}$, $d_{y13} = 0.3232 \text{ m}$ 이다.

3.2 정방향기구학의 해석

정방향기구학 문제는 각 관절들의 변위가 주어졌을 때, 출력점의 위치와 방위를 계산하는 것이다. 병렬구조에서는 직렬부속체인들 간의 관절변위가 서로 상호구속되어 있으므로 간단한 문제가 아니다. 이 문제는 보통 닫힌형태의 해(closed form solution)를 갖지 않기 때문에 반복적인 수치해석의 방법이 요구되며 다수해(multiple solution)를 가질 수 있다. 본 연구에서는 비선형대수식의 해를 구하는 수치해석법 중 뉴턴-랩슨 기법(Newton Raphson technique)을 사용하였다. 병렬로봇에 이 방법을 적용하기 위해서는 먼저 모든 직렬부속체인들에 포함된 구동관절 대 자유관절간의 구속방정식(constraint equation)을 구하고, 그것의 자코비안행렬(Jacobian matrix)을 구해야 한다. 그리고 뉴턴-랩슨 식에 의해 모든 직렬부속체인들에 포함된 구동관절들의 변위에 구속된 자유관절들의 변위가 구해지면, 결과적으로 하나의 직렬부속체인의 정방향기구학식에 의해 출력점의 위치와 방위가 계산된다.

제안된 병렬로봇은 아홉 개의 관절중 기저판에 연결된 세 개의 구동관절 $\phi_a = ({}_1\theta_1, {}_2\theta_1, {}_3\theta_1)$

에만 구동용 서보모터/엔코더를 장착해야 하므로, 나머지 여섯 개의 자유관절변위 $\phi_f = ({}_1\theta_2, {}_1\theta_3, {}_2\theta_2, {}_2\theta_3, {}_3\theta_2, {}_3\theta_3)$ 는 이 세 개의 엔코더에서 얻어진 정보를 이용해서 추정(estimate)해야 한다. 이를 위한 여섯 개의 구속방정식은 첫 번째 직렬부속체인의 정방향기구학식(3), (4), (5)를 다른 두 개의 직렬부속체인으로 확장시키고 이를 통해 얻어진 아홉 개의 식을 이용해서 다음과 같이 구하였다.

$$C_1 = {}_1L_1c_{11} + {}_1L_2c_{11,12} + {}_1L_3c_{11,12,13} - {}_2L_1c_{21} - {}_2L_2c_{21,22} - {}_2L_3c_{21,22,23} - d_{x12} = 0 \quad (24)$$

$$C_2 = {}_1L_1c_{11} + {}_1L_2c_{11,12} + {}_1L_3c_{11,12,13} - {}_3L_1c_{31} - {}_3L_2c_{31,32} - {}_3L_3c_{31,32,33} - d_{x13} = 0 \quad (25)$$

$$C_3 = {}_1L_1s_{11} + {}_1L_2s_{11,12} + {}_1L_3s_{11,12,13} - {}_2L_1s_{21} - {}_2L_2s_{21,22} - {}_2L_3s_{21,22,23} - d_{y12} = 0 \quad (26)$$

$$C_4 = {}_1L_1s_{11} + {}_1L_2s_{11,12} + {}_1L_3s_{11,12,13} - {}_3L_1s_{31} - {}_3L_2s_{31,32} - {}_3L_3s_{31,32,33} - d_{y13} = 0 \quad (27)$$

$$C_5 = {}_1\theta_1 + {}_1\theta_2 + {}_1\theta_3 - {}_2\theta_1 - {}_2\theta_2 - {}_2\theta_3 + \frac{2}{3}\pi = 0 \quad (28)$$

$$C_6 = {}_1\theta_1 + {}_1\theta_2 + {}_1\theta_3 - {}_3\theta_1 - {}_3\theta_2 - {}_3\theta_3 + \frac{4}{3}\pi = 0 \quad (29)$$

여기서 $c_{11,12,13}$ 은 $\cos({}_1\theta_1 + {}_1\theta_2 + {}_1\theta_3)$ 이고 $s_{11,12,13}$ 은 $\sin({}_1\theta_1 + {}_1\theta_2 + {}_1\theta_3)$ 이다. 이를 이용하여 자코비안행렬을 구하면 식(30)과 같다.

$$J(\phi_f) = \begin{bmatrix} \frac{\partial C_1}{\partial {}_1\theta_2} & \frac{\partial C_1}{\partial {}_1\theta_3} & \frac{\partial C_1}{\partial {}_2\theta_2} & \frac{\partial C_1}{\partial {}_2\theta_3} & \frac{\partial C_1}{\partial {}_3\theta_2} & \frac{\partial C_1}{\partial {}_3\theta_3} \\ \frac{\partial C_2}{\partial {}_1\theta_2} & \frac{\partial C_2}{\partial {}_1\theta_3} & \frac{\partial C_2}{\partial {}_2\theta_2} & \frac{\partial C_2}{\partial {}_2\theta_3} & \frac{\partial C_2}{\partial {}_3\theta_2} & \frac{\partial C_2}{\partial {}_3\theta_3} \\ \frac{\partial C_3}{\partial {}_1\theta_2} & \frac{\partial C_3}{\partial {}_1\theta_3} & \frac{\partial C_3}{\partial {}_2\theta_2} & \frac{\partial C_3}{\partial {}_2\theta_3} & \frac{\partial C_3}{\partial {}_3\theta_2} & \frac{\partial C_3}{\partial {}_3\theta_3} \\ \frac{\partial C_4}{\partial {}_1\theta_2} & \frac{\partial C_4}{\partial {}_1\theta_3} & \frac{\partial C_4}{\partial {}_2\theta_2} & \frac{\partial C_4}{\partial {}_2\theta_3} & \frac{\partial C_4}{\partial {}_3\theta_2} & \frac{\partial C_4}{\partial {}_3\theta_3} \\ \frac{\partial C_5}{\partial {}_1\theta_2} & \frac{\partial C_5}{\partial {}_1\theta_3} & \frac{\partial C_5}{\partial {}_2\theta_2} & \frac{\partial C_5}{\partial {}_2\theta_3} & \frac{\partial C_5}{\partial {}_3\theta_2} & \frac{\partial C_5}{\partial {}_3\theta_3} \\ \frac{\partial C_6}{\partial {}_1\theta_2} & \frac{\partial C_6}{\partial {}_1\theta_3} & \frac{\partial C_6}{\partial {}_2\theta_2} & \frac{\partial C_6}{\partial {}_2\theta_3} & \frac{\partial C_6}{\partial {}_3\theta_2} & \frac{\partial C_6}{\partial {}_3\theta_3} \end{bmatrix} \quad (30)$$

여기서 $J(\phi_f) \in R^{6 \times 6}$ 이다. 그리고 추정할 변수 X와 구속방정식 C가 다음과 같을 때

$$X = [{}_1\theta_2 \quad {}_1\theta_3 \quad {}_2\theta_2 \quad {}_2\theta_3 \quad {}_3\theta_2 \quad {}_3\theta_3]^T \quad (31)$$

$$C = [C_1 \quad C_2 \quad C_3 \quad C_4 \quad C_5 \quad C_6]^T \quad (32)$$

반복회수의 한계와 오차의 한계를 정하면 뉴턴-랩슨 식(33)의 반복적 수치계산에 의해 X 가 추정된다.

$$X_{new} = X - J^{-1}(\phi_f) \cdot C \quad (33)$$

X 가 추정되면 결과적으로 아홉 개의 관절중 세 개의 구동관절의 변위만을 측정하여도 식(3), (4), (5)에 의해 출력점의 위치와 방위를 구할 수 있다.

Fig.2는 병렬로봇 출력점의 작업공간(workspace)을 나타낸 것이다. 즉, Fig.1의 형상일 때를 출력점 (x, y, Ψ) 의 기준위치 $(0m, 0m, 0^\circ)$ 로 정할 때, 출력점을 기준위치에서 x, y 방향으로 각각 $-0.1m$ 에서 $+0.1m$ 까지 $0.01m$ 간격으로 변화시키면서 Ψ 의 반시계방향 최대회전각 및 시계방향 최대회전각의 변화를 계산하여 나타낸 그림이다.

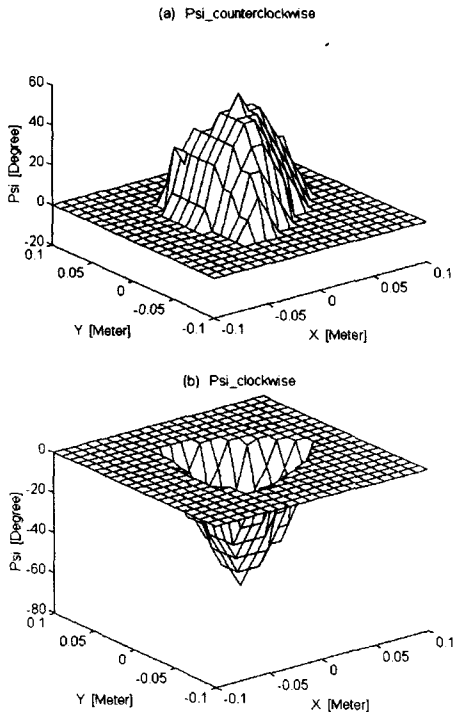


Fig. 2 Workspace of the parallel robot

4. 동력학의 해석

현재 병렬로봇의 모델을 수학적으로 표현하기 위한 가장 체계적인 방법으로는, 먼저 간단하게 개방된 기구학적 연쇄관계의 측면에서 시스템의 부분적 모델링을 수행하고, 그 다음 가능한 모든 일반화된 입력좌표계의 다양한 집합들의 상관관계에 기구학적 구속조건과 시스템의 회로패쇄의 개념을 이용하여 목적인 기준좌표계집합의 측면에서 합성된 전체적 모델을 구하는 것이다.

일반적으로 로봇 매니퓰레이터의 모델링 방법에는 에너지 측면을 고려한 라그랑지 방법(Lagrangian method)과 힘과 회전력 측면을 고려한 뉴턴-오일러 방법(Newton-Euler method)등이 있다. 본 연구에서는 Freeman등이 6자유도 스튜어트 플랫폼과 같은 병렬메카니즘의 동력학모델링을 목적으로 개발한 G-H 방법(G-H method)을 이용하였다.⁽¹⁶⁾

4.1 부분적 모델링

4.1.1 부분적 정방향모델링

제일관절계를 기준으로 하고 이동판의 중심점을 출력으로 할 때, 이동판을 제외한 나머지 세 개의 직렬부속체인에 대한 정방향동력학모델식은 다음의 식(34)와 같이 표현된다.

$${}_rT_\phi = [{}_rI_{\phi\phi}^*]_r\ddot{\phi} + {}_r\dot{\phi}^T [{}_rP_{\phi\phi\phi}^*]_r\dot{\phi} \quad (34)$$

$r = 1, 2, 3$

여기서 ${}_r\phi = [{}_r\theta_1, {}_r\theta_2, {}_r\theta_3]^T$ 는 r 번째 직렬부속체인의 입력관절변위벡터이고, $[{}_rI_{\phi\phi}^*] \in R^{3 \times 3}$ 와 $[{}_rP_{\phi\phi\phi}^*] \in R^{3 \times 3 \times 3}$ 는 각각 r 번째 직렬부속체인의 관성행렬과, 코리올리스터 및 원심력행렬이고, ${}_rT_\phi = [{}_r\tau_1, {}_r\tau_2, {}_r\tau_3]^T$ 는 r 번째 직렬부속체인의 각 관절의 구동토크벡터이다. 그리고 세 개의 직렬부속체인을 제외한 이동판에 대한 정방향동력학모델식은 식(35)와 같이 표현된다.

$${}_pT_\phi = [{}_pI_{\phi\phi}^*]_p\ddot{\phi} + {}_p\dot{\phi}^T [{}_pP_{\phi\phi\phi}^*]_p\dot{\phi} \quad (35)$$

여기서 ${}_p\phi = [x, y, \Psi]^T$ 는 이동판의 중심점

에서의 입력변위벡터이고, $[_p I_{\phi\phi}^*] \in R^{3 \times 3}$ 와 $[_p P_{\phi\phi\phi}^*] \in R^{3 \times 3 \times 3}$ 는 각각 이동판의 관성행렬과, 코리올리스력 및 원심력행렬이고, $_p T_\phi = [f_x \ f_y \ \tau_\psi]^T$ 는 이동판의 구동력벡터이다.

4.1.2 부분적 역방향모델링

가상일의 원리(principle of virtual work)를 적용하여 이동판을 제외한 세 개의 직렬부속체인의 역방향동력학모델식을 유도하면 식(36)과 같다.

$${}_r T_u = [{}_r I_{uu}^*] {}_r \ddot{u} + \sum_{r=1,2,3} {}_r \dot{u}^T [{}_r P_{uuu}^*] {}_r \dot{u} \quad (36)$$

여기서 ${}_r u = [{}_r x \ {}_r y \ {}_r \psi]^T$ 는 r 번째 직렬부속체인의 출력변위벡터이고, $[_r I_{uu}^*] \in R^{3 \times 3}$ 와 $[_r P_{uuu}^*] \in R^{3 \times 3 \times 3}$ 는 각각 r 번째 직렬부속체인의 반력에 대한 관성행렬과, 코리올리스력 및 원심력행렬이고, ${}_r T_u = [{}_r f_x \ {}_r f_y \ {}_r \tau_\psi]^T$ 는 r 번째 직렬부속체인의 출력점에서의 구동토크에 대한 반력벡터이다. 그리고 세 개의 직렬부속체인을 제외한 이동판에 대한 역방향동력학모델식은 식(37)과 같이 유도된다.

$$_p T_u = [_p I_{uu}^*] _p \ddot{u} + _p \dot{u}^T [_p P_{uuu}^*] _p \dot{u} \quad (37)$$

여기서 $_p u = [x \ y \ \psi]^T$ 는 이동판의 중심점에서의 출력변위벡터이고, $[_p I_{uu}^*] \in R^{3 \times 3}$ 와 $[_p P_{uuu}^*] \in R^{3 \times 3 \times 3}$ 는 각각 이동판의 반력에 대한 관성행렬과, 코리올리스력 및 원심력행렬이고, $_p T_u = [f_x \ f_y \ \tau_\psi]^T$ 는 이동판의 출력점에서의 구동력에 대한 반력벡터이다.

4.2 전체적 모델링

4.2.1 전체적 역방향모델링

제안된 병렬로봇의 이동판과 세 개의 직렬부속체인은 이동판의 중심점을 공통의 출력점으로 공유하기 때문에, 이 공통점을 기준으로 하여 전체적 역방향동력학식을 다음의 식(38)과 같이 합성한다.

$$T_u = [I_{uu}^*] \ddot{u} + \dot{u}^T [P_{uuu}^*] \dot{u} \quad (38)$$

여기서

$$[I_{uu}^*] = [_p I_{uu}^*] + \sum_{r=1}^3 [_r I_{uu}^*] \quad (39)$$

$$[P_{uuu}^*] = [_p P_{uuu}^*] + \sum_{r=1}^3 [_r P_{uuu}^*] \quad (40)$$

4.2.2 전체적 정방향모델링

최종적으로, 구동관절 $\phi_a = [{}_1\theta_1 \ {}_2\theta_1 \ {}_3\theta_1]^T$ 을 입력변위벡터로 하는 전체적 정방향동력학식은 가상일의 원리를 이용하여 식(41)과 같이 유도된다.

$$T_a = [I_{aa}^*] \ddot{\phi}_a + \dot{\phi}_a^T [P_{aaa}^*] \dot{\phi}_a \quad (41)$$

이렇게 구해진 전체적 정방향동력학식(41)을 제어기 설계의 기본모델식으로 사용하였다.

5. 제어기의 설계

5.1 복합 제어구조

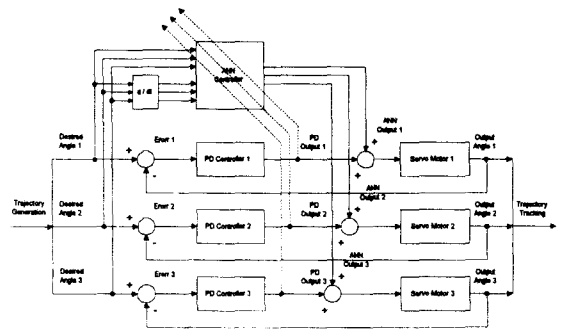


Fig. 3 Block diagram of the precise tracking control scheme

인공신경망은 임의의 비선형함수를 학습하여 근사화 하는 특성을 가지고 있다. 이를 비선형시스템의 제어기로 이용하면 선형제어기로 해결하기 어려웠던 한계를 극복할 수 있다. 그러나 인공신경망은 학습하는데 어느정도 시간이 걸리고, 지역최소

해(local minimum solution)의 문제점에 의한 학습결과와 신뢰성등의 이유로 독립적인 제어기로 사용하기에는 부적합하다. 그리고 선형제어기는 로봇의 동력학을 선형화 하여 사용하지만 모든 형상에 대하여 외란을 임계감쇠로 응답하는 고정이득을 선정하는 것은 불가능하다. 그러므로 이러한 두 제어기의 단점을 상호 보완하고 우수한 성능을 얻기 위해 Fig.3에 나타낸 것과 같이 선형 PD제어기는 피드백 제어기로 두고 인공신경망 제어기는 피드포워드 제어기로 두는 복합 제어구조를 사용하였다.

이후부터 인공신경망 제어기를 ANN제어기로 표기한다.

5.2 인공신경망 제어기

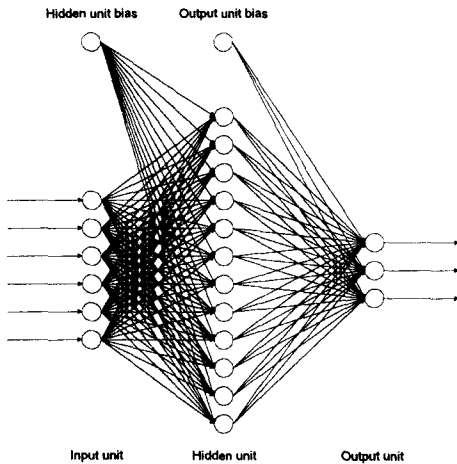


Fig. 4 Artificial neural network used as feed-forward controller

본 연구에서는 ANN제어기로 Fig.4에 나타낸 입력층, 은닉층, 출력층으로 구성된 다층신경망구조를 사용하였으며 학습방법으로는 오차역전파법(error backpropagation method)을 사용하였다. 이 학습방법의 수학적 기초는 신경망 출력신호의 오차자승을 최소화시키는 경사감소법(gradient descent method)이다. 즉 목표출력 t 와 신경망출력 y 사이의 오차 E 를 식(42)와 같이 정의할 때

$$E = \frac{1}{2} \sum_k \{t_k - y_k\}^2 \quad (42)$$

E 의 가중치에 대한 변화율을 이용해서 구한 델타함수 δ 를 출력층으로부터 단계적으로 역전파시켜 오차를 감소시키는 방향으로 각층의 가중치를 갱신하게 된다.

ANN제어기의 학습목표는 결국 병렬로봇의 역동력학을 학습하는 것이다. ANN제어기가 역동력학을 충분히 학습하면, 이 제어기의 출력만으로 병렬로봇의 기준궤도를 추적할 수 있는 제어신호를 생성하게 되고 PD제어기는 외란 이나 작은 출력오차에 대해 시스템의 전체 안정도를 보장하는 역할을 하게된다.

ANN제어기의 입력층에는 병렬로봇의 세 개의 구동관절에 대한 기준위치, 기준속도를 입력으로 하기 위해 6개의 뉴런을 사용하였고, 은닉층은 12개의 뉴런을 사용하였으며, 출력층에는 세 개의 구동관절에 대한 제어신호를 출력하기 위한 3개의 뉴런을 사용하였다. 은닉층의 활성화함수는 양극 시그모이드 함수(bipolar sigmoid function)를 사용하였고 출력층은 순선형 함수(pure linear function)를 사용하였다. ANN제어기를 학습시킬 목표출력값은 세 개의 PD제어기의 출력신호를 사용하였다. 즉, ANN제어기는 모든 PD제어기의 출력이 최소화 되도록 학습이 이루어진다.

6. 시뮬레이션

시뮬레이션은 MATLAB 프로그램으로 수행하였다. 이후의 그림에서는 병렬로봇의 구동관절 $\phi_a = [{}_1\theta_1 \quad {}_2\theta_1 \quad {}_3\theta_1]^T$ 를 $\phi_a = [a_1 \quad a_2 \quad a_3]^T$ 로 표시하였다. 병렬로봇의 파라미터들은 Table 2와 같다.

Table 2. parameters of the parallel robot

	Length [m]	Mass [kg]	Moment of Inertia [kg · m ²]
Link @	0.1	4.22E-2	1.4067E-4
Moving Platform	0.1 (one side)	1.492E-1	1.0282E-4

샘플링 시간은 0.01 sec 이다. 사용된 PD제어기의 비례이득은 $K_p = \text{diag}[100 \quad 100 \quad 100]$ 이고 미분이득은 $K_d = \text{diag}[2 \quad 2 \quad 2]$ 이다. Fig.5는 기

준입력으로 사용할 궤도생성(trjectory generation)을 위해 병렬로봇의 출력변위를 1 sec 동안 $u=[0m \ 0m \ 0^\circ]^T$ 에서

$u=[0.02m \ 0.02m \ 20^\circ]^T$ 로 이동시키는 모습이다. Fig.6은 PD제어기만 사용했을 때의 구동관절의 각도변화이고 Fig.7은 이 PD제어기의 출력을 목표출력으로 하여 ANN제어기를 25000번 학습시킨 결과이다. 학습은 off-line으로 이루어졌다. Fig.8은 ANN제어기와 PD제어기를 함께 사용했을 때의 구동관절의 각도변화이고 Fig.9는 그 때의 ANN제어기의 출력이고 Fig.10은 그 때의 PD제어기의 출력이고 Fig.11은 그 때의 ANN제어기와 PD제어기의 출력을 합한 결과출력이다. 그리고 Fig.12는 Fig.6과 Fig.8에서의 궤도추적오차를 비교한 그림이다.

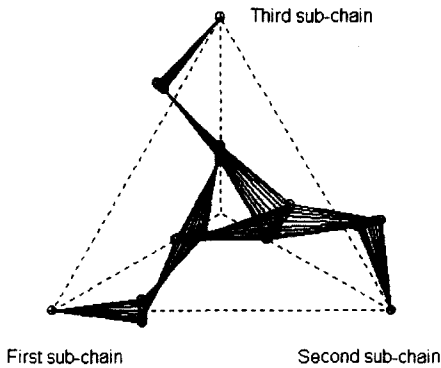


Fig. 5 Trajectory generation of the parallel robot

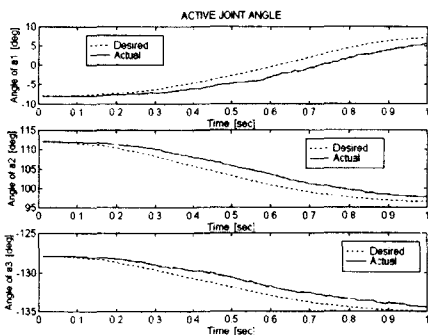


Fig. 6 Active joint angle in PD control

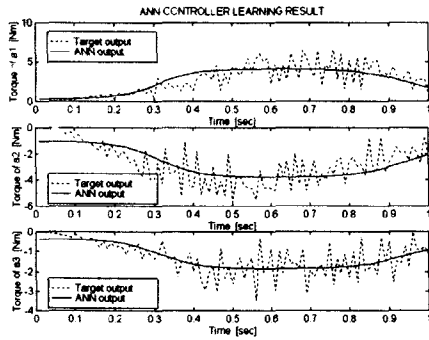


Fig. 7 Result of ANN controller learning

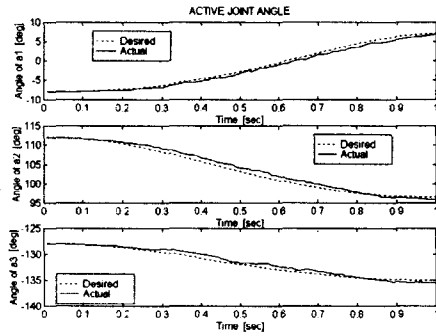


Fig. 8 Active joint angle in ANN+PD control

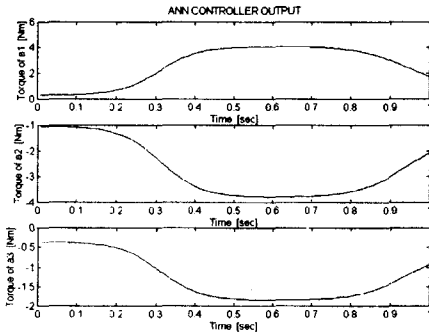


Fig. 9 ANN controller output in ANN+PD control

7. 결론

본 연구에서는 제안된 병렬로봇에 대해 기구학적/동력학적 해석을 체계적으로 수행하였고, 인공신경망을 이용하여 제안된 병렬로봇이 주어진 기준궤도를 정밀하게 추적할 수 있도록 제어시스템을 설계하였다. 그리고 제어성능을 검증하기 위해 PD 제어기만을 사용한 경우와 ANN제어기와 PD제어기를 복합적으로 사용한 경우에 대해 그 결과를 비교하였다. Fig.6에서 보듯이 PD제어기만을 사용한 경우에는 실제 구동관절의 각도가 기준궤도에서 크게 벗어나 있었으나 Fig.7에서 보듯이 이 PD제어기의 출력을 ANN제어기로 학습시킨 후에 다시 병렬로봇에 복합적으로 적용한 결과 Fig.8에서 보듯이 기준궤도를 더욱 정밀하게 추적하는 것을 확인할 수 있었다.

제어시스템을 구성할 때 MIMO(multi-input multi-output)구조의 ANN제어기와 SISO(single-input single-output)구조의 PD제어기를 복합적으로 사용함으로써 근본적으로 병렬형태를 갖는 로봇의 제어 목적에 잘 부합하였고, 액츄에이터들 간의 상호간섭이나 비선형적 특성 등 기존의 PD제어기만으로는 한계가 있는 부분을 극복할 수 있었다.

본 연구의 결과는 큰 하중용량과 고도의 위치정밀도가 요구되는 자동차산업 등의 조립로봇에 매우 유용할 것으로 사료된다. 향후 연구과제는 실험을 통하여 제안된 제어기를 입증하는 것이다. 실시간 학습제어가 가능하기 위해서는 초고속 연산처리능력을 갖는 컴퓨터와 인공신경망을 보다 빠르게 전역최소해(global minimum solution)에 수렴시키는 학습 알고리즘이 요구된다. 현재 이 부분에 대한 연구가 계속 진행되고 있다.

참고문헌

1. Stewart, D., "A platform with six degrees of freedom," Proc. of Institution of Mechanical Engineers, Vol. 180, Pt. 1, No. 15, pp. 371-386, 1965-66.
2. Kim, W. K., Huh, K. K., Yi, B. J., and Cho, W., "Optimal Synthesis of a Wrist-Type 6 Degree-of-Freedom Force/Torque Sensor Using Stewart Platform Structure," KSME Journal, Vol. 9, No. 4, pp. 462-471, 1995.

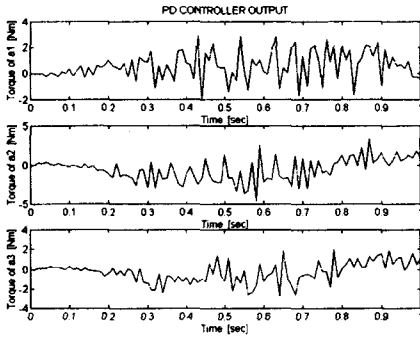


Fig. 10 PD controller output in ANN+PD control

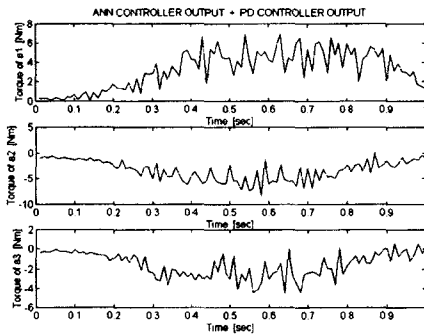


Fig. 11 Summation of ANN controller output and PD controller output in ANN+PD control

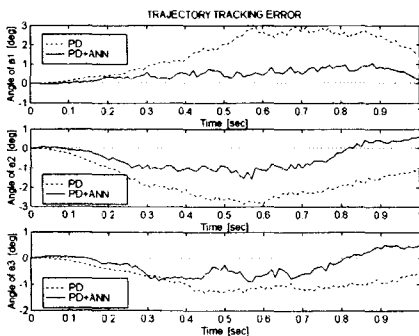


Fig. 12 Trajectory tracking error

3. Patel, A. J., and Ehmann, K. F., "Volumetric Error Analysis of a Stewart Platform Based Machine Tool," *Annals of the CIRP*, Vol. 46, pp. 287-290, 1997.
4. Li, D., and Salcudean, S. E., "Modeling, Simulation, and Control of a Hydraulic Stewart Platform," *Proc. of the 1997 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 3360-3366, 1997.
5. 김희국, 이준용, 조 황, "미끄럼 구동 관절을 가지는 3 자유도 병렬형 메카니즘의 기구학적 특성 분석," *대한기계학회 추계학술대회는문집 A*, pp. 704-709, 1996.
6. Yang, D. C. H., and Lee, T. W., "Feasibility Study of a Platform Type of Robotic Manipulators from a Kinematic Viewpoint," *Trans. of the ASME J. of Mechanisms, Transmission, and Automation in Design*, Vol. 106, pp. 191-198, 1984.
7. Mohammadi Daniali, H. R., Zsombor-Murray, P. J., and Angeles, J., "Singularity Analysis of a General Class of Planar Parallel Manipulators," *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1547-1552, 1995.
8. Kim, W. K., Kim, D. G., and Yi, B. J., "Analysis of a Planar 3 Degree-Of-Freedom Adjustable Compliance Mechanism," *KSME Journal*, Vol. 10, No. 3, pp. 286-295, 1996.
9. Kim, W. K., Lee, J. Y., and Yi, B. J., "Analysis for a Planar 3 Degree-of-Freedom Parallel Mechanism with Actively Adjustable Stiffness Characteristics," *KSME Int. J.*, Vol. 11, No. 4, pp. 408-418, 1997.
10. Gosselin, C., and Angeles, J., "The Optimum Kinematic Design of a Planar Three-degree-of-freedom Parallel Manipulator," *Trans. of the ASME J. of Mechanism, Transmission, and Automation in Design*, Vol. 110, pp. 35-41, 1988.
11. 김재섭, 김희국, 조 황, "평면형 3 자유도 병렬 메카니즘의 정밀도 특성에 관한 연구," *한국정밀공학회 추계학술대회는문집*, pp. 781-786, 1996.
12. Pennock, G. R., and Kassner, D. J., "The Workspace of a General Geometry Planar Three-Degree-of-Freedom Platform-Type Manipulator," *J. of Mechanical Design*, Vol. 115, pp. 269-276, 1993.
13. 김재섭, 김희국, 조 황, "국소적 제어특성을 가지는 평면형 6 자유도 병렬 메카니즘의 동적 특성 분석," *제어계측 · 자동화 · 로봇틱스 연구회 합동학술발표회논문집*, pp. 353-357, 1997.
14. Craig, J. J., *Introduction to Robotics : Mechanics and Control*, 2nd edition, Addison-Wesley, 1989.
15. 전용호, 송낙윤, 조 황, 김희국, "4 절 메카니즘을 이용한 준정적 포복 시스템에 관한 연구," *Proc. of the 11th KACC*, pp. 924-927, 1996.
16. Freeman, R. A., and Tesar, D., "Dynamic Modeling of Serial and Parallel Mechanisms/Robotic Systems, Part I -Methodology, Part II-Applications," *Proc. of the 20th ASME Mechanisms Conf.*, Vol. 15-2, pp. 7-21, 1988.