

다중 학습 알고리즘을 이용한 평면형 병렬 매니플레이터의 Fuzzy 논리 제어

Fuzzy Logic Control of a Planar Parallel Manipulator using Multi Learning Algorithm

송낙윤, 조 황
(Nak-Yun Song and Whang Cho)

Abstract : A study on the improvement of tracking performance of a 3 DOF planar parallel manipulator is performed. A class of adaptive tracking control scheme is designed using self tuning adaptive fuzzy logic control theory. This control scheme is composed of three classical PD controller and a multi learning type self tuning adaptive fuzzy logic controller set. PD controller is tuned roughly by manual setting a priori and fuzzy logic controller is tuned precisely by the gradient descent method for a global solution during run-time, so the proposed control scheme is tuned more rapidly and precisely than the single learning type self tuning adaptive fuzzy logic control scheme for a local solution. The control performance of the proposed algorithm is verified through experiments.

Keywords: fuzzy logic control, planar parallel manipulator, multi learning algorithm

1. 서론

대부분의 산업현장에서 사용되고 있는 매니플레이터(manipulator)는 각 링크의 연결상태가 개회로구조(open loop structure)를 이루고 있다. 개회로구조를 이루는 매니플레이터는 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 병렬 매니플레이터는 강성이 높고, 하중용량(load capacity)이 크며, 우수한 위치정밀도를 가지고 있어 고정밀 작업에 적합하다. 대표적인 병렬 메카니즘을 지니는 매니플레이터에는 항공기 시뮬레이터로 고안된 공간형 6자유도 스투어트 플랫폼(Stewart platform)이 있으며[1], 새로운 병렬 매니플레이터를 개발하기 위해 스투어트 플랫폼에 대한 많은 연구가 계속 진행되고 있다 [2]-[6]. 또한 최근 평면형 3자유도 병렬 매니플레이터에 관한 연구도 상당수 보고되고 있다[7]-[14].

병렬 매니플레이터는 직렬 매니플레이터에 비해 구조적 특성에서 유발되는 고도의 비선형성과 불확실성으로 인해 제어 알고리즘의 개발에 어려움이 있으며 그것으로 인해 설계가 편리한 고전적 선형 PID 제어가 실제로 많이 사용되어 왔다. 그러나 고전적 선형 제어기법은 시스템의 비선형성을 완전히 극복하는 것에 한계가 있으므로 이를 해결하기 위한 새로운 제어기법에 관한 연구가 많이 진행되고 있다. 2 DOF 병렬 매니플레이터를 위한 병렬제어기법[15]과 스투어트 플랫폼 시스템을 위한 추적 제어연구[16]가 보고된바 있으나 이 제어방법들은 동력

학 시스템 파라미터에 대한 정확한 정보를 사전에 미리 전제로 한 것이다. 현실적으로는 동력학 시스템 파라미터에 대한 정보가 미지수일 경우 그러한 불확실성을 극복할 수 있는 적절한 제어기를 설계하기가 쉽지 않다. 이러한 문제를 해결하기 위한 한 방법으로 불확실성의 한계를 포함하도록 제어이득을 설정하는 강인 제어방법(robust control scheme)[17]이 있으며, 또 다른 대안으로는 적응규칙에 의해 제어이득이 조절되는 적응 제어방법(adaptive control scheme)[18]이 있다.

본 연구에서는 정확한 동력학 모델식을 얻기 어려운 병렬 매니플레이터를 위한 적응 제어방법의 한 분야로서 최근 들어 추리능력과 학습능력으로 인해 비선형 시스템의 제어에 많이 응용되고 있는 STAFLC(Self Tuning Adaptive Fuzzy Logic Controller)[19]-[22]를 이용해, 병렬 매니플레이터의 구동관절이 주어진 기준궤도를 더욱 정밀하게 추적할 수 있도록 제어시스템을 설계하였다. 설계된 제어시스템은 세 개의 고전적 PDC(Proportional Derivative Controller)와 하나의 MLA(Multi Learning Algorithm)에 의해 조절되는 STAFLC 세트로 구성된다. MLA는 하나의 구동관절의 오차만을 최소화시키기 위해 제어이득의 지역해(Local Solution)를 찾는 기존의 SISO(Single Input Single Output) 시스템에 적용되던 SLA(Single Learning Algorithm)를 MIMO(Multi Input Multi Output) 시스템의 구조에 적합하게 확장한 형태이다. MLA는 모든 구동관절들의 오차를 동시에 최소화시킬 수 있는 제어이득의 전역해(global solution)를 찾게 되기 때문에 SLA에 비해 시스템의 추적제어 성능이나 정밀도 면에서 우수한 특성을 갖게된다.

II. 병렬 매니플레이터의 구조

그림 1에서 보는 바와 같이 실험에 사용된 평면형 병렬 매니플레이터는 기저판(base platform)과 이에 평행

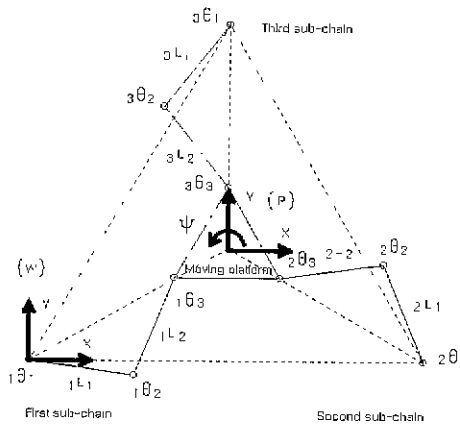


그림 1. 평면형 병렬 매니퓰레이터의 구조.
Fig. 1. Architecture of the planar parallel manipulator.

한 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 (${}_1\theta_1, {}_2\theta_2, {}_3\theta_3$)도 정삼각형이 되도록 대칭적으로 배치한다. 여섯 개의 링크길이를 모두 0.1 [m]로 하고 내부의 이동판정삼각형의 한 변의 길이를 0.1 [m]로 하고 외부의 기저판정삼각형의 한 변의 길이를 0.372 [m]로 정하였다

이 병렬 매니퓰레이터의 말단효과관치는 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].

$$m = \eta(l - j - 1) + \sum_{i=1}^j f_i - I_d \quad (1)$$

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

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

즉, 이 시스템에 의해 얻을 수 있는 세 개의 자유도는 이동판의 중심점에 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 부속체의 제일 관절계(first joint frame)와 일치한다.

이 병렬 매니퓰레이터의 출력점의 3자유도를 구현하기 위해서는 최소 세 개의 관절에만 구동액츄에이터를 가지면 된다. 나머지 여섯 개의 관절은 자유관절(free joint)이 된다. 매니퓰레이터 자체에 가해지는 하중을 최

소화하기 위해 세 개의 구동액츄에이터는 모두 기저판과 부속체인이 연결되는 첫 번째 관절 (${}_1\theta_1, {}_2\theta_2, {}_3\theta_3$)에 장착한다. 즉, 각 부속체의 제일 관절계의 원점에 장착한다.

이후부터 그림 1의 형상일 때를 출력점의 기준위치로 한다. 즉 $x=0[m], y=0[m], \psi=0^\circ$ 이다.

대부분의 병렬 매니퓰레이터는 여러 개의 직렬 부속체인으로 이루어지며 이러한 상호구속된 구조는 기구학 모델과 동역학 모델이 매우 복잡하여 많은 계산시간이 요구될 뿐 만 아니라 동역학 효과를 무시하는 경우에도 직렬 매니퓰레이터의 경우와는 달리 기구학적 구속조건으로 인해 비교적 높은 정밀도를 가지며 또한 높은 강성을 나타내므로 일반적인 병렬 매니퓰레이터의 경우 동역학 모델에 근거한 제어방식은 잘 적용되지 않고 있다. 실제로 대부분의 스튜어트 플랫폼 시스템은 강력한 유압식 미끄럼 구동관절을 활용하기 때문에 시스템의 동역학 효과를 무시하여도 단순한 선형 제어기법만으로 상대적으로 높은 정밀도를 나타낼 수 있다 그러나 동역학의 효과를 무시한 경우 거칠고 큰 동작에는 유용하지만 고도의 정밀도를 요구하는 정교하고 미세한 작업에는 한계성이 존재하는 문제가 발생한다.

본 연구에서는 이러한 한계성을 극복하기 위해 실시간 학습을 통해 병렬 매니퓰레이터의 역동역학 모델을 학습함으로써, 사전에 미리 정확한 동역학 시스템 파라미터들의 정보 없이도 정교하고 미세한 작업이 가능한 제어시스템을 설계하였다. 설계된 제어시스템에서는 동역학 해석이 필요 없으므로 III장에서 기구학 해석만을 수행하였다.

III. 기구학의 해석

1. 역방향기구학의 해석

역방향기구학 문제는 출력점의 위치와 방위가 주어졌을 때, 각 관절들의 변위를 계산하는 것이다. r 번째 직렬부속체에서 기저판으로부터 n 번째 관절변수를 ${}_r\theta_n$ 이라 정하고 r 번째 직렬부속체의 n 번째 링크의 길이를 ${}_rL_n$ 이라 정한다. 먼저 제일 관절계를 기준으로 하고 이동판의 중심점을 출력점 (x, y, ψ) 으로 하는 첫 번째 직렬부속체 하나에 대한 데나비트-하텐버그 링크인자(Denavit-Hartenberg link parameters)는 표 1과 같다[23].

이 표에 의한 변환행렬을 이용해 구해진 정방향기구학은 다음 세 개의 (3), (4), (5)로 표현된다[24]. 이동판

표 1. 첫 번째 직렬부속체의 데나비트-하텐버그 링크인자.

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

j	α_{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	${}_1\theta_3$

정삼각형의 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 (3), (4), (5)를 연립방정식의 형태로 정리하여 풀이하면 다음의 해를 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. (8)에 의해 (6)은 중복해를 갖지만 링크들간의 상호간섭을 피하기 위해 (8)에서 + 부호만을 선택하기로 한다. 세 개의 직렬부속체인은 각각 독립적인 역방향기구학식으로 표현될 수 있다. 그러므로 다른 두 개의 직렬부속체인의 역방향기구학식은 똑같은 형의 수식에 입출력변수만 바꾸어 줌으로써 구할 수 있다. 첫 번째 직렬부속체인에 대해 구해진 역방향기구학관계식을 다음 식으로 표현할 때,

$${}_1\phi = f({}_1p) \quad (15)$$

여기서

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

$${}_1p = [x \quad y \quad \Psi]^T \quad (17)$$

두 번째 직렬부속체인에 대한 역방향기구학관계식은

$${}_2\phi = f({}_2p) \quad (18)$$

이고, 여기서

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

$${}_2p = [x - d_{x12} \quad y - d_{y12} \quad \Psi + \frac{2}{3}\pi]^T \quad (20)$$

(20)에서 d_{x12} 는 첫 번째 직렬부속체인의 제일 관절계에 기준한 두 번째 직렬부속체인의 제일 관절계의 x방향

변위이고 d_{y12} 는 첫 번째 직렬부속체인의 제일 관절계에 기준한 두 번째 직렬부속체인의 제일 관절계의 y방향 변위이다. 그리고 세 번째 직렬부속체인에 대한 역방향기구학관계식은

$${}_3\phi = f({}_3p) \quad (21)$$

이고, 여기서

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

$${}_3p = [x - d_{x13} \quad y - d_{y13} \quad \Psi + \frac{4}{3}\pi]^T \quad (23)$$

(23)에서 d_{x13} 은 첫 번째 직렬부속체인의 제일 관절계에 기준한 세 번째 직렬부속체인의 제일 관절계의 x방향 변위이고 d_{y13} 은 첫 번째 직렬부속체인의 제일 관절계에 기준한 세 번째 직렬부속체인의 제일 관절계의 y방향 변위이다.

II장에서 제시한 외부의 기저판정삼각형의 크기를 고려할 때, $d_{x12} = 0.3732[m]$, $d_{y12} = 0[m]$, $d_{x13} = 0.1866[m]$, $d_{y13} = 0.3232[m]$ 이다.

2 정방향기구학의 해석

정방향기구학 문제는 각 관절들의 변위가 주어졌을 때, 출력점의 위치와 방향을 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. 병렬 매니플레이터에 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 방향이 계산된다.

실험에 사용된 평면형 병렬 매니플레이터는 아홉 개의 관절중 기저판에 연결된 세 개의 구동관절 $\phi_o = ({}_1\theta_1, {}_2\theta_1, {}_3\theta_1)$ 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 정방향기구학 (3), (4), (5)를 다른 두 개의 직렬부속체인으로 확장시키고 이를 통해 얻어진 아홉 개의 식을 이용해서 다음과 같이 구하였다.

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

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

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

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

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

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

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 다음과 같다.

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

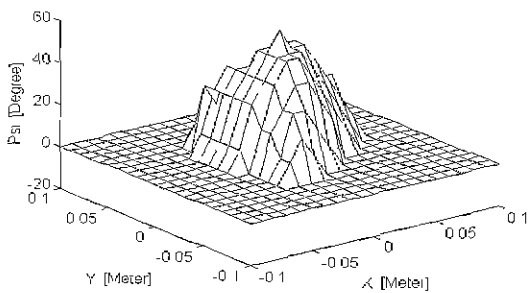
여기서 $J(\phi_r) \in R^{6 \times 6}$ 이다. 그리고 추정할 변수 X 과 구속방정식 C 가 다음과 같을 때

$$X = [{}_1\theta_1 \quad {}_1\theta_3 \quad {}_2\theta_2 \quad {}_2\theta_3 \quad {}_3\theta_2 \quad {}_3\theta_3]^T \quad (31)$$

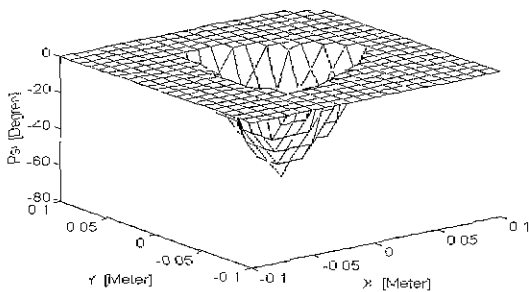
$$C = [C_1 \quad C_2 \quad C_3 \quad C_4 \quad C_5 \quad C_6]^T \quad (32)$$

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

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



(a) Psi_counterclockwise



(a) Psi_clockwise

그림 2. 평면형 병렬 매니퓰레이터의 작업공간
Fig. 2. Workspace of the planar parallel manipulator.

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

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

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

IV. 제어시스템의 설계

1. 제어시스템의 구성

세 개의 구동관절을 갖는 병렬 매니퓰레이터를 위한 제어시스템은 세 개의 PDC와 그것에 각각 병렬로 연결된 FLC(Fuzzy Logic Controller)로 구성되며, 각각의 FLC는 STAA(Self Tuning Adaptive Algorithm)에 의해 그 제어이득이 on-line으로 실시간 조정된다 여기서 STAFCLC가 학습하는데 걸리는 시간을 최소화시키기 위해, 미리 PDC로 시스템에서 요구되는 제어이득을 대략 설정하고 제어이득의 나머지 부족분만을 STAFCLC로 정밀하게 튜닝하게 된다. PDC의 제어이득이 정확하게 설정될수록 STAFCLC가 부담해야 할 부분이 상대적으로 작아지므로 학습에 걸리는 시간도 단축된다

2. Fuzzy 논리 제어기 (FLC)

세 개의 FLC의 입력벡터로 사용될 오차벡터 E 와 오차변화벡터 CE 를 각각 다음과 같이 정의하였다.

$$E = \phi_{a,des} - \phi_{a,act} = [e_1, e_2, e_3]^T \quad (34)$$

$$CE = \frac{E}{t_a} = [ce_1, ce_2, ce_3]^T \quad (35)$$

여기서 $\phi_{a,des}$ 는 구동관절에 대한 기준입력각도이고 $\phi_{a,act}$

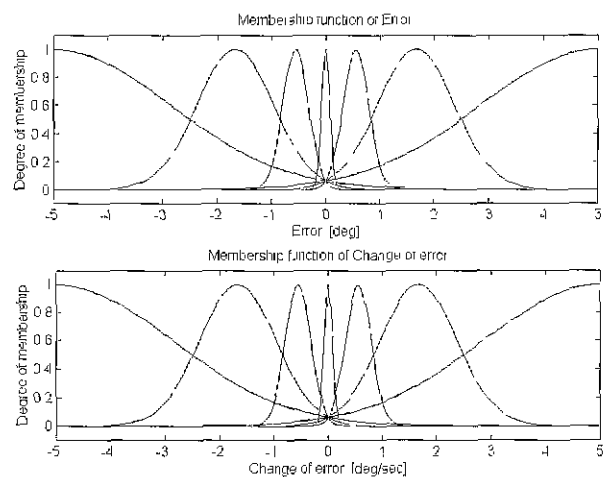


그림 3. 퍼지입력의 소속함수.
Fig. 3. Membership function of fuzzy input.

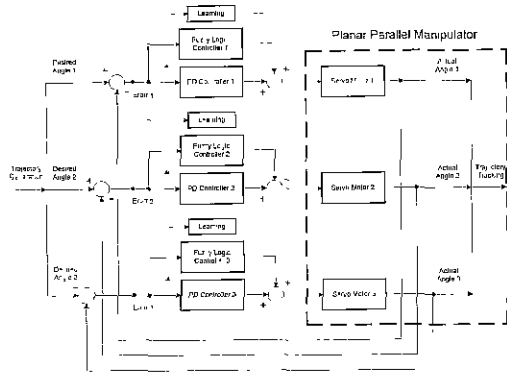


그림 4. SLA를 이용한 제어시스템.
Fig. 4. Control system using SLA.

는 구동관절의 출력각도이고 t_d 는 샘플링시간의 간격이다. 그리고 FLC의 출력벡터 U 는 다음과 같다.

$$U = [u_1, u_2, u_3]^T \quad (36)$$

각 FLC는 퍼지화, 규칙기반, 퍼지추론, 비퍼지화의 네 부분으로 구성된다. 퍼지화 부분은 크리스프(crisp) 입력을 퍼지입력으로 변환시키며 가우시안 퍼지화기(gaussian fuzzifier)를 사용하였다. 두 개의 입력변수 e 와 ce 에 대한 가우스형 소속함수(membership function)는 그림 3과 같이 정의하였다

규칙기반 부분은 퍼지추론에 사용되는 기본규칙들을 IF-THEN문으로 제공하며 다음과 같이 정의하였다.

$$\text{Rule } (k) : \text{ IF } e \text{ is } A^k \text{ and } ce \text{ is } B^k \text{ THEN } u \text{ is } C^k \quad (37)$$

여기서 $k=1,2,\dots,49$ 는 규칙의 개수이다. 각 FLC에서 e, ce 와 A^k, B^k 는 퍼지입력변수들과 그에 해당하는 퍼지값들이고, u 와 C^k 는 퍼지출력변수와 그에 해당하는 퍼지값이다. 출력퍼지값은 퍼지 싱글톤(fuzzy singleton)으로 정의하였다. 퍼지추론 부분은 퍼지논리를 이용하여 퍼지입력으로부터 퍼지출력을 추론하며 프로덕트 추론법(product inference method)을 사용하였다.

$$w^k = \mu_{A^k}(e) \cdot \mu_{B^k}(ce) \quad (38)$$

비퍼지화 부분은 추론의 결과로부터 제어신호로 사용될 정상화된 값을 계산하며 중심평균법(center average method)을 사용하였다.

$$u = \frac{\sum_{k=1}^{49} w^k C^k}{\sum_{k=1}^{49} w^k} \quad (39)$$

여기서 u 는 서보모터에 가해지는 제어신호가 된다.

3. 자기조정 적응 알고리즘 (STAA)

3.1 단일 학습 알고리즘 (SLA)

각 FLC의 출력변수에 대한 퍼지값 C^k 는 오차역전파법(error backpropagation method)에 근거한 경사감소법(gradient descent method)으로 on-line상에서 실시한

조정된다. FLC함수 F 를 (40)이라 하고 학습시킬 목표치를 G 라 할 때

$$F = \frac{N}{D} = \frac{\sum_{k=1}^{49} w^k C^k}{\sum_{k=1}^{49} w^k} \quad (40)$$

최소화시킬 SLA의 목적함수 J_{SLA} 는 오차와 오차변화를 함께 고려하여 다음 식으로 정의하였다.

$$J_{SLA} = \frac{1}{2} \left(\lambda + \frac{d}{dt} \right) [F - G]^2 \quad (41)$$

여기서 $\lambda > 0$ 는 오차변화에 대한 오차의 가중치다. 목적함수 J_{SLA} 의 출력퍼지값 C^k 에 대한 변화율을 이용해서 델타함수 δ^k 를 구하면 다음과 같다 연쇄규칙(chain rule)을 적용하면

$$\delta^k = \frac{\partial J_{SLA}}{\partial C^k} \quad (42)$$

$$= \frac{\partial J_{SLA}}{\partial F} \frac{\partial F}{\partial N} \frac{\partial N}{\partial C^k} \quad (43)$$

$$= \left(\lambda + \frac{d}{dt} \right) [F - G] \frac{\partial F}{\partial N} \frac{\partial N}{\partial C^k} \quad (44)$$

여기서

$$\frac{\partial F}{\partial N} \frac{\partial N}{\partial C^k} = \frac{w^k}{\sum_{k=1}^{49} w^k} \quad (45)$$

이므로 δ^k 는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\delta^k = \left(\lambda + \frac{d}{dt} \right) [\varepsilon] \frac{w^k}{\sum_{k=1}^{49} w^k} \quad (46)$$

(46)에서 매니플레이터의 역동력학 모델을 학습하기 위해 학습오차 ε 을 제어오차 e 로 치환하면 다음과 같다.

$$\delta^k = - \left(\lambda + \frac{d}{dt} \right) [e] \frac{w^k}{\sum_{k=1}^{49} w^k} \quad (47)$$

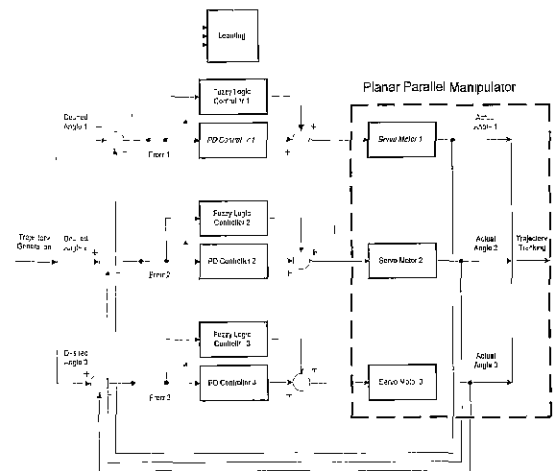


그림 5. MLA를 이용한 제어 시스템.
Fig. 5. Control system using MLA.

결과적으로 δ^k 를 역전파시켜 J_{SLA} 를 감소시키는 방향으로 C^k 를 갱신하게 된다.

$$C^k(t+1) = C^k(t) - \alpha \delta^k(t) \quad (48)$$

여기서 $\alpha > 0$ 는 학습률(learning rate)이고 t 는 샘플링 시간이다. t 가 무한대로 갈 때 C^k 가 수렴하기 위해서는 $\delta^k = 0$ 이 되어야 한다.

3.2 다중 학습 알고리즘 (MLA)

MLA에서는 세 개의 구동관절 $\phi_a = ({}_1\theta_1, {}_2\theta_1, {}_3\theta_1)$ 에 대한 각각의 오차와 오차변화를 모두 함께 고려함으로써 구동관절들 간의 상호간섭에 의한 오차의 확산을 방지하도록 설계되었다. 이 경우 하나의 구동관절에 외란이 발생하면 세 개의 FLC가 일시에 조절되면서 외란을 억제하게 되므로, SLA에서 부속체인들 간의 상호간섭으로 외란이 전파된 후 각 FLC가 독자적으로 조절되면서 전체의 공동해를 찾는 경우보다 학습속도와 외란의 억제능력이 우수해진다.

세 개의 FLC함수 $F_i, i=1,2,3$ 를 (49)라 하고 학습시킬 세 개의 목표치를 $G_i, i=1,2,3$ 라 할 때

$$F_i = \frac{N_i}{D_i} = \frac{\sum_{k=1}^{49} w_i^k C_i^k}{\sum_{k=1}^{49} w_i^k}, \quad i=1,2,3 \quad (49)$$

최소화시킬 MLA의 목적함수 J_{MLA} 는 세 개의 오차와 세 개의 오차변화를 모두 함께 고려하여 다음 식으로 정의하였다.

$$J_{MLA} = \frac{1}{2} \left(\lambda + \frac{d}{dt} \right) \sum_{i=1}^3 [F_i - G_i]^2 \quad (50)$$

여기서 $\lambda > 0$ 는 오차변화에 대한 오차의 가중치다. 목적함수 J_{MLA} 의 i 번째 출력피드백 C_i^k 에 대한 변화율을 이용해서 i 번째 델타함수 δ_i^k 를 구하면 다음과 같다. 연쇄규칙을 적용하면

$$\delta_i^k = \frac{\partial J_{MLA}}{\partial C_i^k} \quad (51)$$

$$= \frac{\partial J_{MLA}}{\partial F_i} \frac{\partial F_i}{\partial N_i} \frac{\partial N_i}{\partial C_i^k} \quad (52)$$

$$= \left(\lambda + \frac{d}{dt} \right) \sum_{i=1}^3 [F_i - G_i] \frac{\partial F_i}{\partial N_i} \frac{\partial N_i}{\partial C_i^k} \quad (53)$$

여기서

$$\frac{\partial F_i}{\partial N_i} \frac{\partial N_i}{\partial C_i^k} = \frac{w_i^k}{\sum_{k=1}^{49} w_i^k} \quad (54)$$

이므로 δ_i^k 는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\delta_i^k = \left(\lambda + \frac{d}{dt} \right) \sum_{i=1}^3 [\epsilon_i] \frac{w_i^k}{\sum_{k=1}^{49} w_i^k} \quad (55)$$

(55)에서 매니플레이터의 역동력학 모델을 학습하기 위



그림 6. 실험장치.
Fig. 6. Experimental setup.

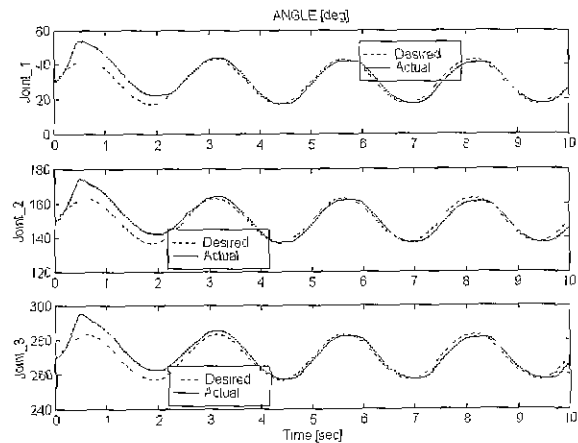


그림 7. SLA를 이용한 경우에 ϕ_a 의 변화 ($\lambda=1, \alpha=0.95$).
Fig 7. Variation of ϕ_a in case of using SLA ($\lambda=1, \alpha=0.95$).

해 i 번째 학습오차 ϵ_i 을 i 번째 제어오차 e_i 로 치환하면 다음과 같다.

$$\delta_i^k = - \left(\lambda + \frac{d}{dt} \right) \sum_{i=1}^3 [e_i] \frac{w_i^k}{\sum_{k=1}^{49} w_i^k} \quad (56)$$

결과적으로 δ_i^k 를 역전파시켜 J_{MLA} 를 감소시키는 방향으로 C_i^k 를 갱신하게 된다.

$$C_i^k(t+1) = C_i^k(t) - \alpha_i \delta_i^k(t), \quad i=1,2,3 \quad (57)$$

여기서 $\alpha_i > 0$ 는 i 번째 학습률이고 t 는 샘플링시간이다.

V. 실험

1. 실험장치의 구성

실험장치는 그림 6에 나타난 것과 같이 IBM PC Pentium-MMX 200Mhz, ISA slot card, I/O interface board, power driver 그리고 세 개의 DC servo motor/encoder가 구동관절에 장착된 평면형 병렬 매니플레이터로 구성되었다. 16비트 ISA slot card를 통해 IBM PC와 연결되는 I/O interface board는 직접 설계제작 하였으며

구동모터들을 제어하기 위한 세 개의 PWM신호 발생회로와 세 개의 엔코더-카운터회로로 구성되었다. power driver도 직접 설계제작 하였으며 각각 양방향으로 구동되는 DC 46V 4A의 전력을 공급할 수 있는 세 개의 증폭회로로 구성되었다. DC 서보모터/엔코더는 TAMAGAWA SEIKI사의 100W급 TS1981N 146E8을 사용하였고 엔코더의 출력은 500C/T이다. 각 모터에는 1/100 감속 기어헤더를 장착하였다. 샘플링 시간은 0.01[sec]이며 하드웨어 인터럽트를 사용하였다. 제어 알고리즘은 C 프로그램으로 구현하였으며 결과그림의 출력은 MATLAB을 사용하였다. 그리고 매니플레이터의 몸체는 알루미늄 합금(aluminum alloy)으로 가공하였다.

2 실험 결과

구동관절은 회전반경이 가장 큰 위치, 즉 그림 1에서 기준좌표계 {W}를 기준으로 $\phi_a = (30^\circ, 150^\circ, 270^\circ)$ 인 위치를 시작위치로 하였다. 그리고 주어진 궤도(desired trajectory)는 진폭이 13° 이고 10[sec]동안 4번의 주기를 갖는 정현파를 입력하였다.

결과 그림에서는 구동관절 $\phi_a = ({}_1\theta_1, {}_2\theta_1, {}_3\theta_1)$ 을 $\phi_a = (\text{Joint}_1, \text{Joint}_2, \text{Joint}_3)$ 으로 표시하였다. 각 PDC

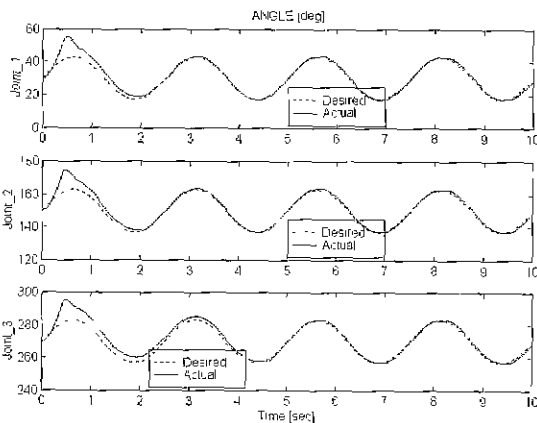


그림 8. MLA를 이용한 경우에 ϕ_a 의 변화 ($\lambda=1, \alpha=0.95$).

Fig. 8. Variation of ϕ_a in case of using MLA ($\lambda=1, \alpha=0.95$).

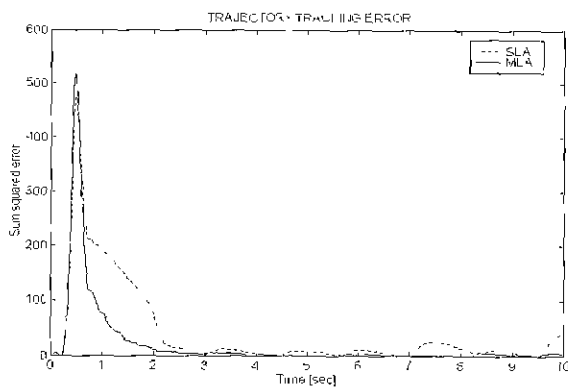


그림 9 궤도추적오차의 비교.
Fig. 9. Comparison of trajectory tracking error.

는 실험을 통해 근사적으로 비례이득 $K_p=5$, 미분이득 $K_d=1$ 로 설정하였다. 각 FLC의 C^k 는 -0.1 에서 $+0.1$ 사이의 난수값으로 초기화하였다. 평면형 병렬 매니플레이터의 구조적 특성상 대칭성을 유지하기 위해 세 개의 FLC의 제어 파라미터 λ 와 α 는 모두 동일하게 설정하였고 하나의 대표값으로 표시하였다. 그림 7은 SLA ($\lambda=1, \alpha=0.95$)를 이용한 경우의 ϕ_a 의 변화이다. 그림 8은 MLA($\lambda=1, \alpha=0.95$)를 이용한 경우의 ϕ_a 의 변화이다. 그림 9는 그림 7과 그림 8에서의 ϕ_a 의 궤도추적오차를 오차자승합(sum squared error)으로 비교한 그림이다. 그림 9에서 알 수 있듯이 SLA를 이용한 경우에 비해 MLA를 이용한 경우에는 학습중의 과도상태오차(transient state error)가 더욱 빠르고 급격하게 감소되었으며 또한 학습이후의 정상상태오차(steady state error)도 상당히 감소되었고 안정적이었다.

MLA가 SLA에 비해 학습능력과 강인성(robust)면에서 일반적으로 우월하다는 것을 입증하기 위해서는 추적 성능 개선에 대한 계량화된 수치적인 비교가 포함되어야 하며, 이를 위해 각 제어 파라미터의 설계치가 식 (58)의 ISSE(Integral Sum Squared Error)로 설정한 성능지표 함수(Performance Index)에 미치는 영향을 분석함으로써 그 결과비교를 이루고자 한다. ISSE의 수치가 작을수록 제어성능이 더 우월함을 의미한다.

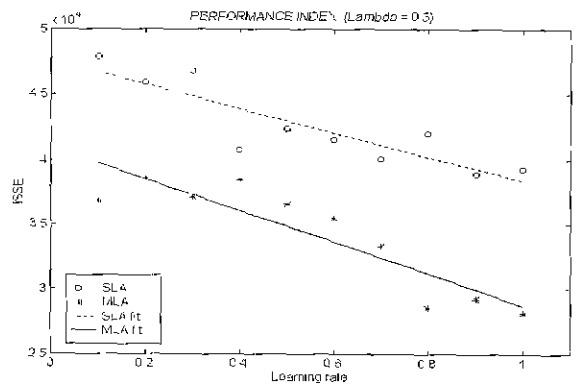


그림 10. ISSE의 비교 ($\lambda=0.5$).
Fig. 10. Comparison of ISSE ($\lambda=0.5$).

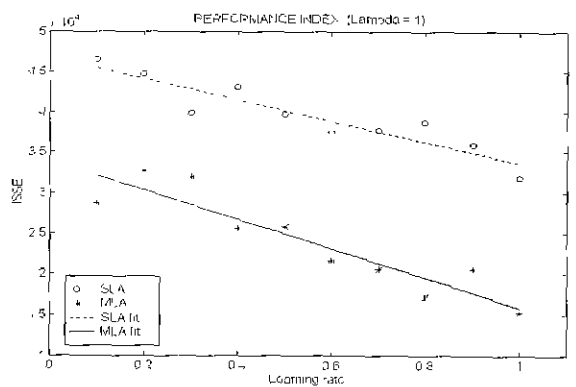


그림 11. ISSE의 비교 ($\lambda=1$).
Fig. 11. Comparison of ISSE ($\lambda=1$).

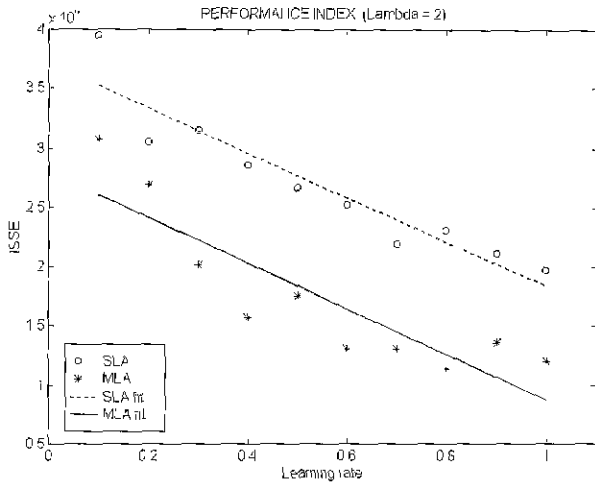


그림 12. ISSE의 비교 ($\lambda=2$).
 Fig. 12. Comparison of ISSE ($\lambda=2$).

그림 10은 $\lambda=0.5$ 일 경우, 그림 11은 $\lambda=1$ 일 경우, 그림 12는 $\lambda=2$ 일 경우에 SLA와 MLA의 학습율 α 에 대한 ISSE의 수치를 비교한 그림이다. λ 와 α 가 모두 커질수록 ISSE의 수치가 작아지는 경향을 보였으며, SLA를 이용한 경우에 비해 MLA를 이용한 경우에 ISSE의 수치가 전반적으로 작았다.

$$ISSE = \int_0^1 (e_1^2 + e_2^2 + e_3^2) dt \quad (58)$$

VI. 결론

본 연구에서는 먼저 기구학적 해석을 통해 실험에 사용된 평면형 병렬 매니퓰레이터의 출력점 3자유도를 총 9개의 관절 중 3개의 구동관절만으로 제어할 수 있음을 보였다. 그리고 최근 들어 추리능력과 학습능력으로 인해 비선형시스템의 제어에 많이 응용되고 있는 STAFLC를 이용해, 이 병렬 매니퓰레이터의 구동관절이 주어진 기준궤도를 더욱 정밀하게 추적할 수 있도록 제어 시스템을 설계하였다. 그리고 STAFLC의 학습 알고리즘으로 본 연구에서 제안된 MLA를 이용한 경우의 추적 성능의 개선효과를 입증하기 위해, 기존의 SLA를 이용한 경우에 대한 비교실험을 수행하였다.

실험결과 기존의 SLA를 이용한 경우에 비해, 본 연구에서 제안된 MLA를 이용한 경우에는 학습시간도 상당히 단축시켰고 학습중의 과도상태오차와 학습이후의 정상상태오차도 크게 감소시켰다. 그 이유는 제어시스템을 구성할 때 MIMO구조의 MLA를 이용한 STAFLC가 SISO구조의 SLA를 이용한 STAFLC에 비해 근본적으로 병렬형태를 갖는 매니퓰레이터의 제어목적에 잘 부합하였고, 액츄에이터들 간의 상호간섭이나 비선형적 특성 등 기존의 제어이득의 지역해만을 찾는 SLA로는 한계가 있는 부분을 제어이득의 전역해를 찾는 MLA로 극복할 수 있었기 때문이다.

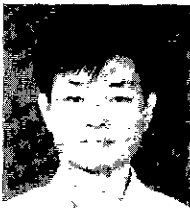
결론적으로, 본 연구에서 제안된 제어방법은 정확한 동력학모델식을 구하기 힘든 대다수의 복잡한 병렬 매니퓰레이터나 비선형시스템에 대해 적용할 경우 매우 유용

할 것으로 사료된다.

참고문헌

- [1] D. Stewart, "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] W. K. Kim, K. K. Huh, B. J. Yi, and W. Cho, "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
- [3] A. J. Patel, and K. F. Ehmann, "Volumetric error analysis of a stewart platform based machine tool," *Annals of the CIRP*, vol. 46, pp. 287-290, 1997.
- [4] D. Li, and S. E. Salcudean, "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 추계학술대회논문집 A, pp. 704-709, 1996.
- [6] D. C. H. Yang, and T. W. Lee, "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] H. R. Mohammadi Daniali, P. J. Zsombor-Murray, and J. Angeles, "Singularity analysis of a general class of planar parallel manipulators," *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1547-1552, 1995.
- [8] W. K. Kim, D. G. Kim, and B. J. Yi, "Analysis of a planar 3 degree-of-freedom adjustable compliance mechanism," *KSME Journal*, vol. 10, no. 3, pp. 286-295, 1996.
- [9] W. K. Kim, J. Y. Lee, and B. J. Yi, "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] C. Gosselin, and J. Angeles, "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, 조황, "평면형 3 자유도 병렬 메카니즘의 정밀도 특성에 관한 연구," 한국정밀공학학회 추계학술대회논문집, pp. 781-786, 1996
- [12] 김재섭, 김희국, 조황, "국소적 제어특성을 가지는 평면형 6 자유도 병렬 메카니즘의 동적 특성 분석," 제어계측·자동화·로봇학 연구회 합동학술발표회논문집, pp. 353-357, 1997.
- [13] 김희국, 조황, 김재섭, "평면형 병렬 메카니즘의 국소적 제어 특성에 관한 연구," 제어·자동화·시스

- 템공학 논문지, 제4권, 제3호, pp. 360-371, 1998.
- [14] 송낙윤, 조황, "평면 작업용 병렬 메카니즘의 특성 해석을 위한 기하학적 접근," 한국정밀공학회지, 제 15권, 제9호, pp. 158-166, 1998.
- [15] C. Nguyen, F. Pooran, and T. Premack, "Control of robot manipulator compliance," in *Recent Trends in Robotics - Modeling, Control, and Education* (M. Jamshidi, J. Luh, and M. Sha hinpoor, eds), North Holland, pp. 237-242, 1986.
- [16] G. Leuret, K. Luh, and F. Lewis, "Dynamic analysis and control of a stewart platform manipulator," *Journal of Robotic Systems*, vol. 10, no. 5, pp. 629-655, 1993.
- [17] D. Dawson, Z. Qu, F. Lewis, and J. Dorsey, "Robust control for the tracking of robot motion," *Int. J. of Control*, vol. 52, no. 3, pp. 581-595, 1990.
- [18] C. Nguyen, S. Anurazi, Z. Zhou, and C. Campbell, "Adaptive control of a stewart platform based manipulator," *Journal of Robotic Systems*, vol. 10, no. 5, pp. 657-687, 1993.
- [19] J. S. R. Jang, "Self-Learning fuzzy controllers based on temporal back propagation," *IEEE Trans. Neural Networks*, vol. 3, no. 5, pp. 714-723, 1992.
- [20] K. T. Woo, F. L. Lewis, Li-Xin Wang, and Z. X. Li, "Deadzone compensation in motion control systems using adaptive fuzzy logic control," *Proc. of the 1997 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1424-1429, 1997.
- [21] J. G. Kim, D. H. Cha, H. S. Cho, and S. H. Kim, "An auto-tuning fuzzy rule-based visual servoing algorithm for a slave arm," *Proc. of the 1995 IEEE Int. Symp. on Intelligent Control*, pp. 177-182, 1995.
- [22] Z. Kovacic, S. Bogdan, and P. Crnosija, "Design and stability of self-organizing fuzzy control of high-order systems," *Proc. of the 1995 IEEE Int. Symp. on Intelligent Control*, pp. 389-394, 1995.
- [23] J. J. Craig, *Introduction to Robotics : Mechanics and Control*, 2nd edition, Addison-Wesley, 1989.
- [24] 전용호, 송낙윤, 조황, 김희국, "4 절 메카니즘을 이용한 준정적 포복 시스템에 관한 연구," *Proc. of the 11th KACC*, pp. 924-927, 1996.



송 낙 윤

1969년 4월 30일생. 1993년 인천대 공대 전자공학과 졸업(학사). 1995년 광운대 대학원 제어계측공학과 졸업(석사). 1998년 동 대학원 박사과정 수료. 관심분야는 로봇틱스, 인공지능.



조 황

1959년 1월 7일생. 1981년 인하대 공대 기계공학과 졸업(학사). 1985년 텍사스 주립대(오스틴) 대학원 기계공학과 졸업(석사). 1989년 동 대학원 졸업(박사). 1990년-현재 광운대학교 제어계측공학과 부교수. 관심 분야는 메카트로닉스, 로봇 시스템 개발, 시스템 모델링