

## 평면형 병렬 매니플레이터의 내부 특이형상 해석 및 적응 퍼지논리제어 구현

### Internal Singular Configuration Analysis and Adaptive Fuzzy Logic Control Implementation for a Planar Parallel Manipulator

송낙윤, 조황  
(Nak-Yun Song and Whang Cho)

**Abstract** : Parallel manipulator is suitable for the high precise task because it than has higher stiffness, larger load capacity and more excellent precision, due to the closed-loop structure, than serial manipulator. But the controller design for parallel manipulator is difficult because the parallel manipulator has both the complexity of structure and the interference of actuators. The precision improvement of parallel manipulator using a classical linear control scheme is difficult because the parallel manipulator has the tough nonlinear characteristics. In this paper, firstly, the kinematic analysis of a parallel manipulator used at the experiments is performed so as to show the controllability. The analysis of internal singular configuration of the workspace is performed using the kinematic isotropic index so as to show the limitation of control performance of a simple linear controller with fixed control gains. Secondly, a control scheme is designed by using an adaptive fuzzy logic controller so that active joints of the parallel manipulator track more precisely the desired input trajectory. This adaptive fuzzy logic controller is often used for the control of nonlinear system because it has both the inference ability and the learning ability. Lastly, the efficiency of designed control scheme is demonstrated by the real-time control experiments with IBM PC interface logic H/W and S/W of my own making. The experimental results was a success

**Keywords** : planar parallel manipulator, internal singular configuration, adaptive fuzzy logic control

#### I. 서론

현재 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]. 그러나 병렬 매니플레이터는 그 구조의 복잡성과 액츄에이터들 간의 상호간섭으로 인해 제어시스템의 설계가 쉽지 않고, 비선형적 특성이 강하게 나타나므로 기존의 선형 제어방법으로는 정밀도 향상에 어려움이 있다.

본 연구에서는 먼저 실험에 사용된 병렬 매니플레이터

에 대해 기구학적 해석을 수행하여 제어가능성을 보였으며, 기구학적 등방성지수를 이용하여 작업공간의 내부 특이형상(singular configuration)을 해석함으로써 이 병렬 매니플레이터에 대해 고정된 제어이득을 갖는 단순한 선형제어기를 적용할 경우에는 제어성능의 한계성이 존재하게 됨을 보였다. 그리고 최근 들어 추리능력과 학습능력으로 인해 비선형시스템의 제어에 많이 응용되고 있는 자기조정 적응 퍼지논리제어기[15]-[18]를 이용하여, 병렬 매니플레이터의 구동관절이 주어진 기준입력궤적을 더욱 정밀하게 추적할 수 있도록 제어시스템을 설계하였다. 그리고 설계된 제어시스템의 효과를 입증하기 위해 기존의 제어시스템들과 직접 비교실험을 수행하였다.

#### II. 병렬 매니플레이터의 구조

그림 1에서 보는 바와 같이 실험에 사용된 평면형 병렬 매니플레이터는 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 직렬부속체인의 기저판에 연결된 첫 번째 관절들( ${}_1\theta_1, {}_2\theta_1, {}_3\theta_1$ )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 0.3732[m]로 정하였다.

이 병렬 매니플레이터의 말단효과장치는 이동판의 중심점에 부착할 수 있으며 중심점은 3자유도의 작업공간으로

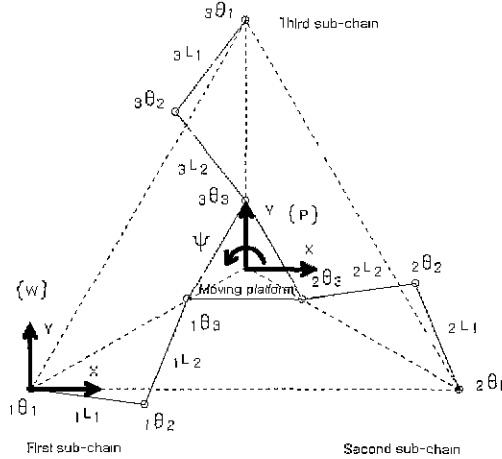


그림 1. 평면형 병렬 매니퓰레이터의 구조.

Fig. 1. Architecture of the planar parallel manipulator.

한정된다. 즉 이동판의 중심점이 출력점이 된다. 이것은 자유도판별식의 일반형태(general form of mobility criterion)에 의해 다음과 같이 증명된다[6].

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

여기서  $m$ 은 로봇의 유효자유도,  $\eta$ 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  $(x, y, \psi)$ 이다. 여기서 기준직각좌표계는 첫 번째 부속체인의 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 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 제일 관절계의 원점에 장착한다.

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

### III. 기구학의 해석

#### 1. 역방향기구학의 해석

역방향기구학 문제는 출력점의 위치와 방위가 주어졌을

때, 각 관절들의 변위를 계산하는 것이다.  $r$ 번째 직렬부속체인에서 기저판으로부터  $n$ 번째 관절변수를  ${}_r\theta_n$ 이라 정하고  $r$ 번째 직렬부속체인의  $n$ 번째 링크의 길이를  ${}_rL_n$ 이라 정한다. 먼저 제일 관절계를 기준으로 하고 이동판의 중심점을 출력점  $(x, y, \psi)$ 으로 하는 첫 번째 직렬부속체인 하나에 대한 데나비트-하텐버그 링크인자(Denavit-Hartenberg link parameters)는 표 1과 같다[19].

표 1. 첫 번째 직렬부속체인의 데나비트-하텐버그 링크인자.

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

$j$	$\alpha_{j-1}$	$a_{j-1}$	$d_j$	$\theta_j$
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 정방향기구학은 다음 (3), (4), (5)로 표현된다[20]. 이동판정삼각형의 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 상호 간섭을 피하기 위해 (8)에서 + 부호만을 선택하기로 한다. 세 개의 직렬부속체인은 각각 독립적인 역방향기구학 식으로 표현될 수 있다. 그러므로 다른 두 개의 직렬부속 체인의 역방향기구학식은 똑같은 형의 수식에 입출력변수 만 바꾸어 줌으로써 구할 수 있다. 첫 번째 직렬부속체인 에 대해 구해진 역방향기구학관계식을 다음 식으로 표현 할 때

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

여기서

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

$${}_1p = [x \quad y \quad \psi]^T \tag{17}$$

두 번째 직렬부속체인에 대한 역방향기구학관계식은

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

이고, 여기서

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

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

(20)에서  $d_{x12}$ 는 첫 번째 직렬부속체인의 제일 관절계에 기준한 두 번째 직렬부속체인의 제일 관절계의  $x$ 방향 변위이고  $d_{y12}$ 는 첫 번째 직렬부속체인의 제일 관절계에 기준한 두 번째 직렬부속체인의 제일 관절계의  $y$ 방향 변 위이다 그리고 세 번째 직렬부속체인에 대한 역방향기구 학관계식은

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

이고, 여기서

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

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

(23)에서  $d_{x13}$ 은 첫 번째 직렬부속체인의 제일 관절계에 기준한 세 번째 직렬부속체인의 제일 관절계의  $x$ 방향 변위이고  $d_{y13}$ 은 첫 번째 직렬부속체인의 제일 관절계에 기준한 세 번째 직렬부속체인의 제일 관절계의  $y$ 방향 변 위이다.

II 장에서 제시한 외부의 기저판정삼각형의 크기를 고려 할 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 방위를 계산하는 것이다. 병렬구조에서는 직렬부속체인들 간의 관절변위가 서로 상호구속되어 있으 므로 간단한 문제가 아니다. 이 문제는 보통 닫힌형태의 해(closed form solution)를 갖지 않기 때문에 반복적인 수치해석의 방법이 요구되며 다수해(multiple solution)를 가 질 수 있다. 본 연구에서는 비선형대수식의 해를 구하는

수치해석법 중 뉴턴-랩슨 기법(Newton Raphson technique)을 사용하였다. 병렬 매니퓰레이터에 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 직렬부속 체인의 정방향기구학식에 의해 출력점의 위치와 방위가 계산된다

실험에 사용된 평면형 병렬 매니퓰레이터는 아홉 개의 관절중 기저판에 연결된 세 개의 구동관절  $\phi_a = ({}_1\theta_1, {}_2\theta_1, {}_3\theta_1)$ 에만 구동용 서보모터/엔코더를 장착해야 하 므로, 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

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

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

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

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

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

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

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 다음 (30)과 같다.

$$J(\phi) = \begin{bmatrix} \frac{\partial C_1}{\partial \theta_1} & \frac{\partial C_1}{\partial \theta_2} & \frac{\partial C_1}{\partial \theta_3} & \frac{\partial C_1}{\partial \theta_4} & \frac{\partial C_1}{\partial \theta_5} & \frac{\partial C_1}{\partial \theta_6} \\ \frac{\partial C_2}{\partial \theta_1} & \frac{\partial C_2}{\partial \theta_2} & \frac{\partial C_2}{\partial \theta_3} & \frac{\partial C_2}{\partial \theta_4} & \frac{\partial C_2}{\partial \theta_5} & \frac{\partial C_2}{\partial \theta_6} \\ \frac{\partial C_3}{\partial \theta_1} & \frac{\partial C_3}{\partial \theta_2} & \frac{\partial C_3}{\partial \theta_3} & \frac{\partial C_3}{\partial \theta_4} & \frac{\partial C_3}{\partial \theta_5} & \frac{\partial C_3}{\partial \theta_6} \\ \frac{\partial C_4}{\partial \theta_1} & \frac{\partial C_4}{\partial \theta_2} & \frac{\partial C_4}{\partial \theta_3} & \frac{\partial C_4}{\partial \theta_4} & \frac{\partial C_4}{\partial \theta_5} & \frac{\partial C_4}{\partial \theta_6} \\ \frac{\partial C_5}{\partial \theta_1} & \frac{\partial C_5}{\partial \theta_2} & \frac{\partial C_5}{\partial \theta_3} & \frac{\partial C_5}{\partial \theta_4} & \frac{\partial C_5}{\partial \theta_5} & \frac{\partial C_5}{\partial \theta_6} \\ \frac{\partial C_6}{\partial \theta_1} & \frac{\partial C_6}{\partial \theta_2} & \frac{\partial C_6}{\partial \theta_3} & \frac{\partial C_6}{\partial \theta_4} & \frac{\partial C_6}{\partial \theta_5} & \frac{\partial C_6}{\partial \theta_6} \end{bmatrix} \tag{30}$$

여기서  $J(\phi) \in R^{6 \times 6}$ 이다. 그리고 추정할 변수  $X$ 와 구속 방정식  $C$ 가 다음과 같을 때

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

$$C = [C_1 \quad C_2 \quad C_3 \quad C_4 \quad C_5 \quad C_6]^T \tag{32}$$

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 (3), (4), (5)에 의해 출력 점의 위치와 방위를 구할 수 있다.

3. 작업공간의 내부 특이형상

$r$ 번째 부속체인 출력변수벡터  $p$ 와 관절변수벡터  $\phi$ 간의 일차미분관계식은 다음과 같다.

$$\dot{p} = J_r(\phi) \cdot \dot{\phi}, \quad r=1,2,3 \quad (34)$$

여기서  $\dot{p} = [\dot{x} \ \dot{y} \ \dot{\psi}]^T$ 이고  $\dot{\phi} = [\dot{\theta}_1 \ \dot{\theta}_2 \ \dot{\theta}_3]^T$ 이다. 그리고  $J_r(\phi) \in R^{3 \times 3}$ 이다. 각 부속체인 일차미분계수인 자코비안행렬  $J_r(\phi)$ 이 비특이(nonsingular)할 때 역관계식은 다음과 같다.

$$\dot{\phi} = J_r^{-1}(\phi) \dot{p}, \quad r=1,2,3 \quad (35)$$

(35)로부터 구동앵츄에이터가 장착된 각 부속체인 첫 번째 관절변수들로 이루어진 벡터  $\phi_a = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3]^T$ 를 구동입력벡터라고 할 때, 입출력벡터의 미분관계식은 다음과 같이 유도된다[21].

$$\dot{\phi}_a = J^{-1}(\phi_a) \dot{p} \quad (36)$$

여기서

$$J^{-1}(\phi_a) = \begin{bmatrix} \text{first row of } J^{-1}(\phi_a) \\ \text{second row of } J^{-1}(\phi_a) \\ \text{third row of } J^{-1}(\phi_a) \end{bmatrix} \quad (37)$$

$$= \begin{bmatrix} \text{first row of } J^{-1}(\phi_1) \\ \text{first row of } J^{-1}(\phi_2) \\ \text{first row of } J^{-1}(\phi_3) \end{bmatrix} \quad (38)$$

(36)의 역관계식은 다음과 같다.

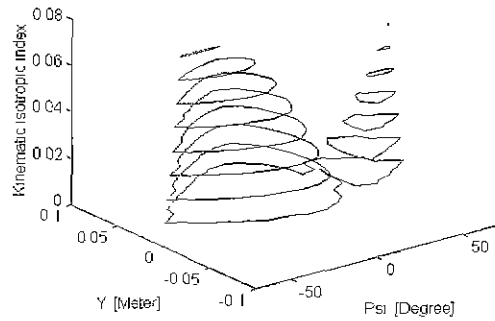
$$\dot{p} = J(\phi_a) \dot{\phi}_a \quad (39)$$

여기서  $J(\phi_a) \in R^{3 \times 3}$ 이다. 결과적으로 (39)는 구동입력관절과 출력점의 자코비안관계식이 된다.

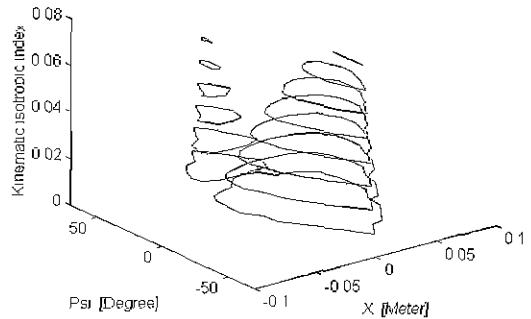
병렬 매니퓰레이터의 이상적인 특성중의 하나는 그 출력점이 작업공간 내의 임의의 위치에서 모든 방향으로 균등한 입출력속도 및 힘전달특성을 갖는 것이다. 다시 말하면, 임의의 방향으로부터의 외력에 대해 균등한 관절토크를 발생시키는 전달특성을 갖는 것이다. 이것은 최대/최소 특이치(singular value)의 비율인 조건수(condition number)[22]와 역관계인 기구학적 등방성지수(kinematic isotropic index)[5][11] (40)을 조사함으로써 알 수 있다.

$$\sigma_{KI} = \frac{\sigma_{\min}[J(\phi_a)]}{\sigma_{\max}[J(\phi_a)]} \quad (40)$$

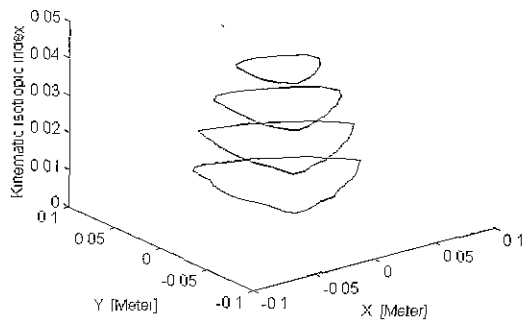
등방성지수가 단위값에 가까울수록 균등한 전달특성을 의미하며, 작아질수록 불균등한 전달특성을 의미한다.



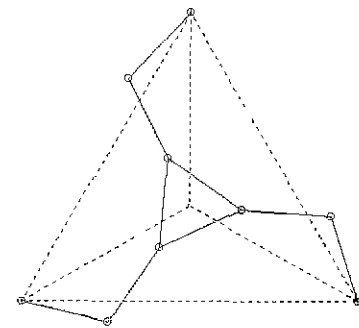
(a) X=0[Meter]



(b) Y=0[Meter]



(c) psi=0[Degree]



(d) Singular configuration(X=0[m],Y=0[m],Psi=25[deg])

그림 2. 평면형 병렬 매니퓰레이터의 특이형상.  
Fig. 2. Singular configuration of the planar parallel manipulator.

그림 2의 (a)는  $x=0[m]$ 로 고정했을 때  $y$ 와  $\psi$ 에 대

한  $\sigma_{KI}$ 의 변화, (b)는  $y=0[m]$ 로 고정했을 때  $\psi$ 와  $x$ 에 대한  $\sigma_{KI}$ 의 변화, (c)는  $\psi=0^\circ$ 로 고정했을 때  $y$ 와  $x$ 에 대한  $\sigma_{KI}$ 의 변화, (d)는  $x=0[m]$ ,  $y=0[m]$ ,  $\psi=25^\circ$ 일 때 발생하는 특이형상의 모양이다.

그림 2를 분석하면 (c)에서 출력점의 회전이 없을 때는 작업공간 내부에 특이형상이 발생하지 않는다는 것을 알 수 있고, (a)와 (b)에서 출력점의 최대 회전변위는  $-60^\circ$ 에서  $+60^\circ$ 까지 가능하지만 출력점이  $x=0[m]$ ,  $y=0[m]$ ,  $\psi=+25^\circ$ 일 경우에는 작업공간 내부에 회전이 불가능한 특이형상이 존재하게 된다는 것을 알 수 있다.  $\psi=+25^\circ$ 에서 특이형상이 생기는 이유는 (8)에 의해 (6)이 중복해를 갖지만 링크들간의 상호간섭을 피하기 위해 (8)에서  $+$  부호만을 선택했기 때문이다. 만약 (8)에서  $-$  부호를 선택하면  $\psi=-25^\circ$ 에서 특이형상이 발생하게 된다.

결론적으로 출력점의 위치를  $x=0[m]$ ,  $y=0[m]$ 에 고정하고 회전각만을 변화시키면 작업공간 내부에서  $\psi=+25^\circ$ 에 근접할수록 부속체인들 간의 상호간섭으로 인해 출력점의 순응성(compliance)이 나빠진다는 것을 알 수 있다. 이것은 병렬구조를 갖는 매니플레이터들에서 흔히 발생하는 문제점이며 고정된 제어이득을 갖는 단순한 선형 제어기법으로는 해결할 수 없는 출력의 왜곡현상을 야기 시킨다.

**IV. 제어시스템의 설계**

그림 3에서 보듯이 제안된 제어시스템은 세 개의 PD제어기와 그것에 각각 병렬로 연결된 퍼지논리제어기로 구성되며, 각각의 퍼지논리제어기는 자기조정 적응 알고리즘(self tuning adaptive algorithm)에 의해 그 파라미터가 on-line으로 실시간 조정된다. 이후부터 PD제어기(Proportional Derivative Controller)를 PDC라 표기하고 퍼지논리제어기(Fuzzy Logic Controller)를 FLC라 표기하고 자기조정 적응 퍼지논리제어기(Self Tuning Adaptive Fuzzy Logic Controller)를 STAFLC라 표기한다.

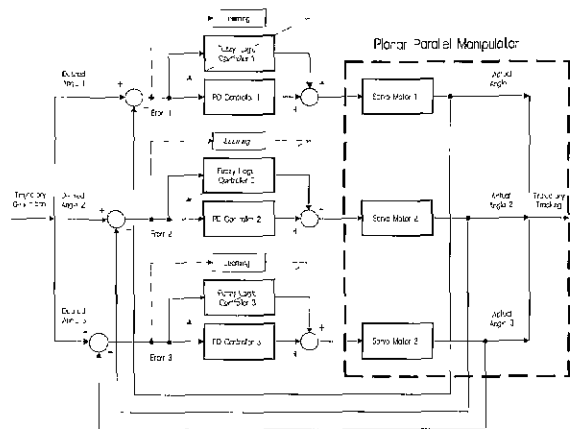


그림 3. 제안된 제어방법의 블록선도.  
Fig. 3. Block diagram of the proposed control scheme.

PDC는 시행착오를 통해 수작업으로 설계되므로 매니플레이터의 모든 형상에 대해 완벽한 제어이득을 선정하는 것은 불가능하며 또한 지루한 작업이다. 그리고 STAFLC는 추리능력과 학습능력을 모두 가지고 있어서 비선형적 특성이 강한 매니플레이터의 제어에는 유리하나 실시간으로 학습하기 위해서는 어느 정도 시간이 소요된다.

본 논문에서 제안된 제어방법은 STAFLC가 학습하는데 걸리는 시간을 최소화시키기 위해, 미리 PDC로 시스템에서 요구되는 이득을 대략 설정하고 이득의 나머지 부족분만을 STAFLC로 정밀하게 튜닝하는 것이다. PDC의 이득이 정확하게 설정될수록 STAFLC가 부담해야 할 부분이 상대적으로 작아지므로 학습에 걸리는 시간도 단축된다.

**1. PD제어기**

병렬 매니플레이터는 직렬 매니플레이터에 비해 구조적 특성에서 유발되는 고도의 비선형성과 복잡성으로 인해 제어 알고리즘의 개발에 어려움이 있으며, 그것으로 인해 설계 및 구현이 편리한 고전적 선형 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. 본 연구에서는 이러한 이유에서 대표적 선형 제어기인 PDC를 기준으로 선택하고 그 제어성능의 한계를 극복할 수 있는 새로운 제어기법을 연구하고자 한다.

세 개의 PDC는 모두 동일하게 설계하였으므로 이 절에서는 하나의 PDC에 대해서만 서술하기로 한다. PDC의 구조는 그림 4와 같으며, 비례이득  $K_p$ 와 미분이득  $K_d$ 는 실험을 통해 대략적으로  $K_p=5$ 와  $K_d=1$ 로 설정하였다. 휴어리스틱(heuristic) 방법으로  $K_p$ 와  $K_d$ 의 이득을 정밀하게 조정할수록  $\phi_a$ 의 추적성능은 조금 더 양호한 결과를 보이지만, 본 연구에서는 새로운 제어기법을 이용하여 고전적 선형 제어기의 다소 부정확한 제어성능을 개선할 수 있음을 증명하는 것이 목적이므로  $K_p$ 와  $K_d$ 의 이득을 다소 개선의 여지가 있는 수준으로 설정하였다.

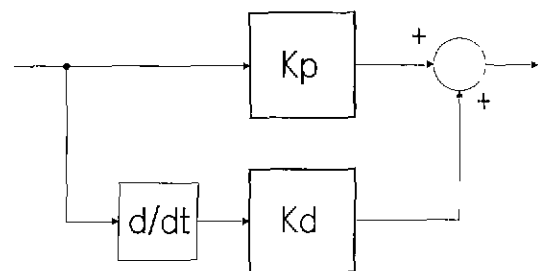


그림 4. PD 제어기.  
Fig. 4. PD controller.

**2. 퍼지논리제어기**

세 개의 FLC의 입력벡터로 사용될 오차벡터  $E$ 와 오차 변화벡터  $CE$ 를 각각 다음과 같이 정의하였다.

$$E = \phi_{a,des} - \phi_{a,act} = [e_1 \ e_2 \ e_3]^T \quad (41)$$

$$CE = \frac{E(t) - E(t-1)}{t_d} = [ce_1 \quad ce_2 \quad ce_3]^T \quad (42)$$

여기서  $\phi_{u,des}$ 는 구동관절에 대한 기준입력각도이고  $\phi_{a,act}$ 는 구동관절의 출력각도이고  $t_d$ 는 샘플링시간의 간격이다. 그리고 FLC의 출력벡터  $U$ 는 다음과 같다.

$$U = [u_1 \quad u_2 \quad u_3]^T \quad (43)$$

세 개의 FLC는 모두 동일하게 설계하였으므로 이 절에서는 하나의 FLC에 대해서만 서술하기로 한다. 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 5와 같이 정의하였다.

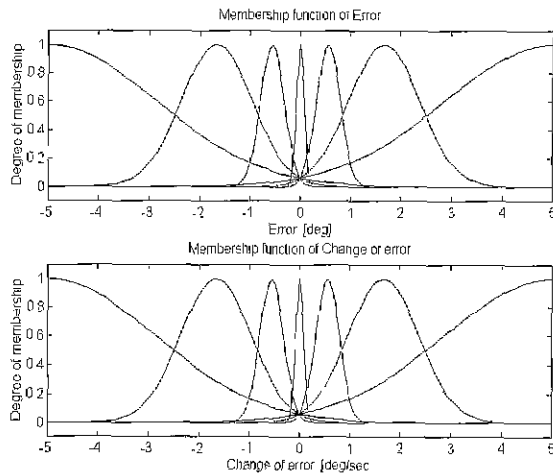


그림 5. 퍼지입력의 소속함수  
Fig. 5. Membership function of fuzzy input.

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

$$\begin{aligned} \text{Rule}(k) : & \text{ IF } e \text{ is } A^k \text{ and } ce \text{ is } B^k \\ & \text{ THEN } u \text{ is } C^k \end{aligned} \quad (44)$$

$k=1, 2, \dots, 49$

여기서 규칙의 개수는 49이며,  $Rule(k)$ 는  $k$ 번째 규칙을 의미한다. 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.

$$w^k = \mu_{A^k}(e) \cdot \mu_{B^k}(ce) \quad (45)$$

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

$$u = \frac{\sum_{k=1}^{49} w^k C^k}{\sum_{k=1}^{49} w^k} \quad (46)$$

여기서  $u$ 는 서보모터에 가해지는 제어신호가 된다.

### 3. 자기조정 적응 알고리즘

세 개의 FLC는 모두 동일하게 설계하였으므로 이 절에서는 하나의 자기조정 적응 알고리즘에 대해서만 서술하기로 한다. 각 FLC의 출력변수에 대한 퍼지값  $C^k$ 는 오차 역전파법(error backpropagation method)에 근거한 경사 감소법(gradient descent method)으로 on-line상에서 실시간 조정된다. FLC함수  $F$ 를 (47)이라 하고 학습시킬 목표치를  $F_o$ 라 할 때

$$F = \frac{N}{D} = \frac{\sum_{k=1}^{49} w^k C^k}{\sum_{k=1}^{49} w^k} \quad (47)$$

최소화시킬 목적함수  $J$ 는 오차와 오차변화를 함께 고려하여 다음 식으로 정의하였다.

$$J = \frac{1}{2} \left( \lambda + \frac{d}{dt} \right) [F - F_o]^2 \quad (48)$$

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

$$\delta^k = \frac{\partial J}{\partial C^k} \quad (49)$$

$$= \frac{\partial J}{\partial F} \frac{\partial F}{\partial C^k} \quad (50)$$

$$= \left( \lambda + \frac{d}{dt} \right) [F - F_o] \frac{\partial F}{\partial C^k} \quad (51)$$

여기서

$$\frac{\partial F}{\partial C^k} = \frac{w^k}{\sum_{k=1}^{49} w^k} \quad (52)$$

이므로  $\delta^k$ 는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\delta^k = \left( \lambda + \frac{d}{dt} \right) [F - F_o] \frac{w^k}{\sum_{k=1}^{49} w^k} \quad (53)$$

만약 PDC의 제어이득이 정확하다면 제어오차  $e$ 는 0이 되지만, 부정확하다면 제어이득의 나머지 부족분에 비례하여 제어오차  $e$ 가 발생하게 된다. 그러므로 제어오차  $e$ 를 최소화시키는 방향으로 FLC의 학습이 진행된다면 이로 인해 제어이득의 나머지 부족분이 보상되게 된다. 이러한 이유로 (53)에서 학습오차  $\varepsilon$ 에 제어오차  $e$ 를 대입하면 다음과 같다

$$\delta^k = - \left( \lambda + \frac{d}{dt} \right) [e] \frac{w^k}{\sum_{k=1}^{49} w^k} \quad (54)$$

결과적으로  $\delta^k$ 를 역전파시켜  $J$ 를 감소시키는 방향으로  $C^k$ 를 갱신하게 된다.

$$C^k(t+1) = C^k(t) - \alpha \delta^k(t) \quad (55)$$

여기서  $\alpha > 0$ 는 학습율이고  $t$ 는 샘플링시간이다.  $t$ 가 무한대로 갈 때  $C^k$ 가 수렴하기 위해서는  $\delta^k = 0$ 이 되어야 한다.

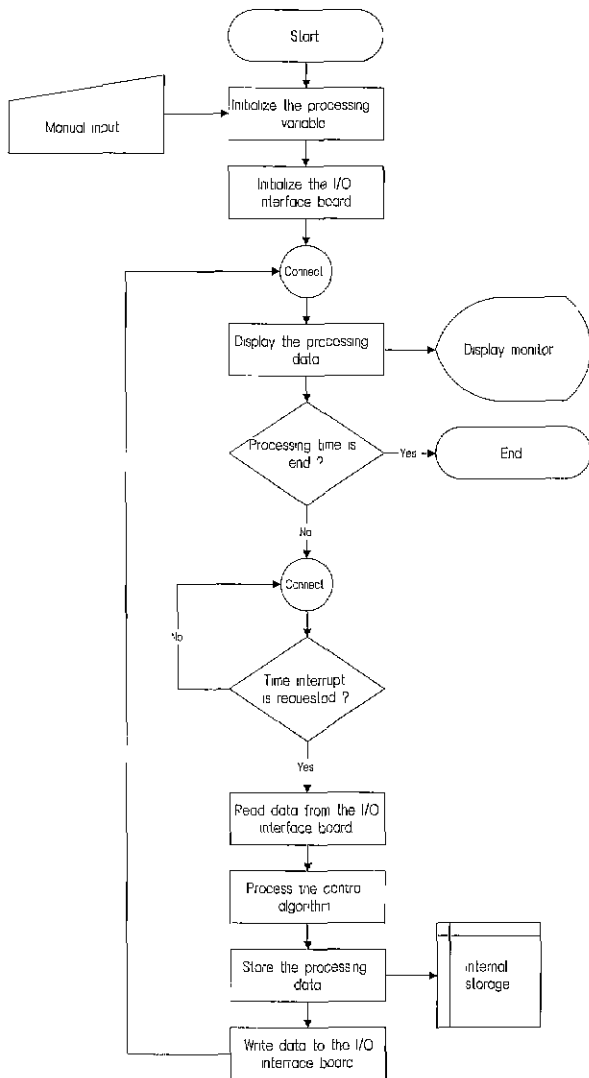


그림 6. 제어 프로그램의 순서도.  
Fig. 6. Flowchart of the control program.

### V. 실험

#### 1. 실험장치의 구성

실험장치는 그림 7에 나타낸 것과 같이 IBM PC Pentium-MMX 200Mhz, ISA slot card, I/O interface board, power driver 그리고 세 개의 DC servo motor/encoder가 구동관제에 장착된 평면형 병렬 매니플레이터로 구성되었다. ISA slot card는 16비트용으로 직접 설계제작 하였으며 data addressing 및 bus buffer 회로로 구성되었다. I/O interface board도 직접 설계제작 하였으며 구동모터들을 제어하기 위한 세 개의 PWM신호 발생

회로와 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 TS1981N146E8을 사용하였고 엔코더의 출력은 500 C/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.

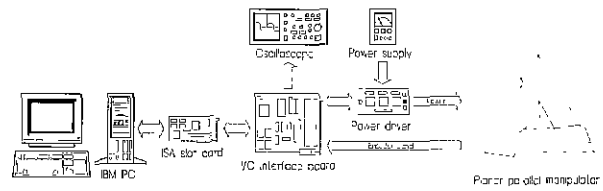


그림 7. 실험장치의 개략도.  
Fig. 7. Schematic diagram of the experimental setup.

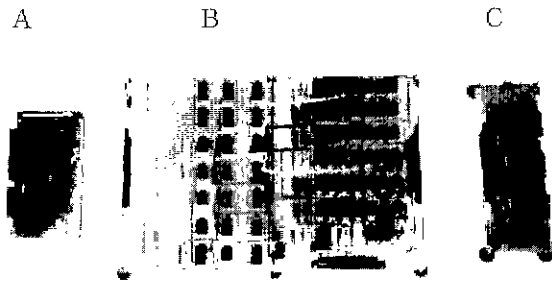


그림 8. (A) ISA 슬롯 카드, (B) I/O 인터페이스 보드, (C) 파워 드라이버.  
Fig. 8. (A) ISA slot card. (B) I/O interface board. (C) Power driver.

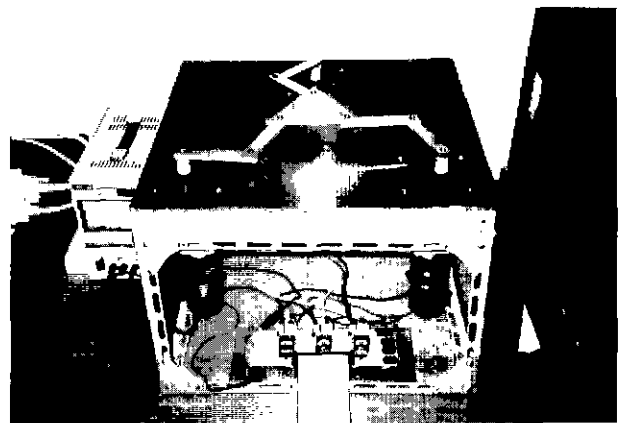


그림 9. 평면형 병렬 매니플레이터.  
Fig. 9. The planar parallel manipulator.

2. 실험 결과

일반적으로 병렬 매니플레이터를 제어할 경우, 뉴턴-랩슨 기법 등의 수치해석법으로 정방향기구학의 해를 계산하게 되면 실용적으로 충분한 만큼 정밀한 계산오차의 한계를 만족시키기까지 상당히 많은 계산량이 요구되기 때문에, 실시간 제어를 구현하기 위해서는 작업공간차원의 기준입력궤적(desired input trajectory)을 미리 구동관절차원의 기준입력궤적으로 환산한 후 구동관절을 제어하게 된다[23]. 이 때 작업공간차원의 추적성능을 확실하게 보장하기 위해서 구동관절차원의 추적성능이 더욱 중요하게 되며, 본 실험에서는 출력점의 측정이 아니라 구동관절 엔코더 신호의 계산치에 의한 추적결과(tracking result)를 이용하여 구동관절차원의 추적성능 개선을 목적으로 하였다.

구동관절은 회전반경이 가장 큰 위치 즉 그림 1에서 기준좌표계  $\{W\}$ 를 기준으로  $\phi_a = (30^\circ, 150^\circ, 270^\circ)$ 인 위치를 시작위치로 하였으며, 기준입력궤적으로는 진폭이  $13^\circ$  이고 10[sec] 동안 4번의 주기를 갖는 정현파를 사용하였다.

결과그림에서는 구동관절  $\phi_a = (\theta_1, \theta_2, \theta_3)$ 을  $\phi_a = (\text{Joint}_1, \text{Joint}_2, \text{Joint}_3)$ 으로 표시하였다. 평면형 병렬 매니플레이터의 구조적 특성상 대칭성을 유지하기 위해 세 개의 제어기의 제어 파라미터들은 모두 동일하게 설정하였고 하나의 대표값으로 표시하였다. 그림 10은  $K_p=5, K_d=1$ 로 정한 PDC만을 사용한 경우의  $\phi_a$ 의 변화이다. 그림 11은  $C^k$ 를  $-0.1$ 에서  $+0.1$  사이의 난수값으로 초기화하고  $\lambda=1, \alpha=0.95$ 로 정한 STAFLC만을 사용한 경우의  $\phi_a$ 의 변화이다. 그림 12는 그림 10에서의 동일한 조건의 PDC와 그림 11에서의 동일한 조건의 STAFLC를 병렬로 함께 사용한 경우, 즉 PDC+STAFLC를 사용한 경우의  $\phi_a$ 의 변화이다.

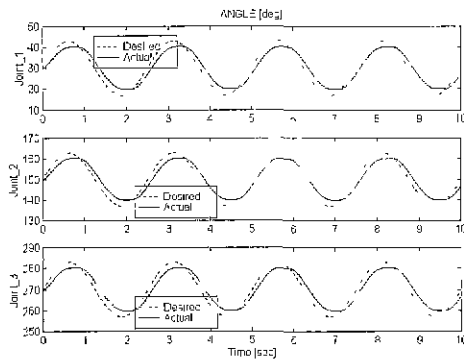


그림 10. PDC를 사용한 경우의  $\phi_a$ 의 변화.  
Fig. 10. Variation of  $\phi_a$  in case of using PDC.

결과적으로 PDC만을 사용한 경우에는 전 구간에 걸쳐 지속적으로 일정한 정상상태오차(steady state error)가 존재하였고, STAFLC만을 사용한 경우에는 시간이 지나 학습이 이루어질수록 점차 추적성능이 양호해졌으나 정상상태오차가 불안정하였다. 그러나 PDC+STAFLC를 사용

한 경우에는 STAFLC만을 사용한 경우에 비해 학습중의 과도상태오차(transient state error)의 최대 피크치가 약 60%로 감소되었고 학습에 걸린 소요시간도 약 70%로 감소되었으며 또한 학습이후의 정상상태오차는 PDC만을 사용한 경우에 비해 현저히 감소되었고 안정된 모습을 보여 추적성능이 개선되었음을 분명히 보였다.

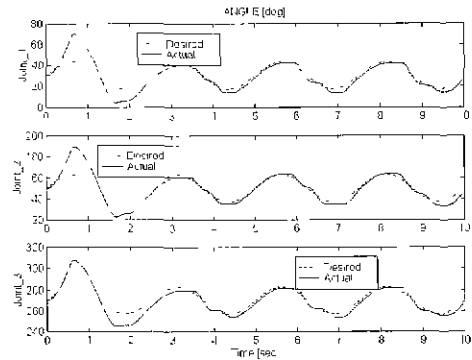


그림 11. STAFLC를 사용한 경우의  $\phi_a$ 의 변화.  
Fig. 11. Variation of  $\phi_a$  in case of using STAFLC.

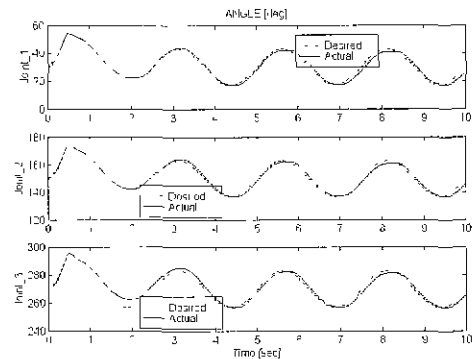


그림 12. PDC+STAFLC를 사용한 경우의  $\phi_a$ 의 변화.  
Fig. 12. Variation of  $\phi_a$  in case of using PDC+STAFLC.

실시간 제어에서 초기 학습오차를 고려할 때 단조롭지(monotonic) 않은 기준입력궤적에 대한 추적결과를 보여 주어야 본 연구의 목적인 학습시간 단축 및 추적성능 개선에 대한 신뢰성이 높아질 수 있다. 이를 위해 정현파 기준입력궤적이 아닌 무작위(random)한 기준입력궤적에 대한 제어 결과를 첨부한다. 그림 13은  $K_p=5, K_d=1$ 로 정한 PDC만을 사용한 경우의  $\phi_a$ 의 변화이다. 그림 14는  $C^k$ 를  $-0.1$ 에서  $+0.1$  사이의 난수값으로 초기화하고  $\lambda=1, \alpha=1.5$ 로 정한 STAFLC만을 사용한 경우의  $\phi_a$ 의 변화이다. 무작위한 기준입력궤적일 경우에는 정현파 기준입력궤적일 경우에 비해 학습을  $\alpha$ 가 약간 큰 값을 가져야 양호한 학습이 이루어졌다. 그림 15는 그림 13에서의 동일한 조건의 PDC와 그림 14에서의 동일한 조건의 STAFLC를



병렬로 함께 사용한 경우, 즉 PDC+STAFLC를 사용한 경우의  $\phi_a$ 의 변화이다.

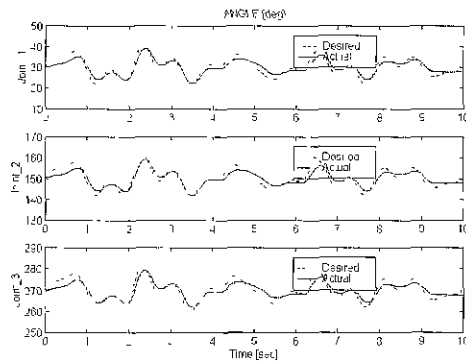


그림 13. PDC를 사용한 경우의  $\phi_a$ 의 변화.  
Fig. 13. Variation of  $\phi_a$  in case of using PDC

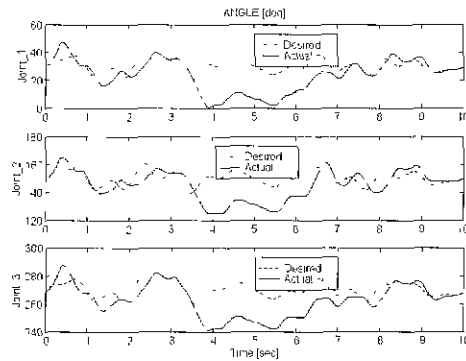


그림 14. STAFLC를 사용한 경우의  $\phi_a$ 의 변화.  
Fig. 14. Variation of  $\phi_a$  in case of using STAFLC.

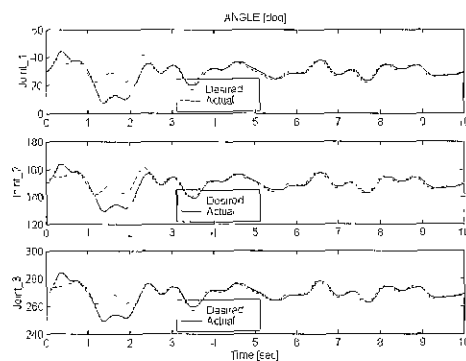


그림 15. PDC+STAFLC를 사용한 경우의  $\phi_a$ 의 변화.  
Fig. 15. Variation of  $\phi_a$  in case of using PDC+STAFLC.

결과는 그림 10, 그림 11, 그림 12에서와 비슷한 양상을 보였으며, PDC+STAFLC를 사용한 경우가 STAFLC만을 사용한 경우에 비해 학습시간이 단축되었으며 학습된 후에는 PDC만을 사용한 경우에 비해 기준입력궤적을 더욱 정밀하게 추적하였다. 이로 인해 본 연구의 목적인 학습시

간 단축 및 추적성능 개선에 대한 신뢰성을 확인할 수 있었다.

### VI. 결론

본 연구에서는 먼저 기구학적 해석을 통해 실험에 사용된 평면형 병렬 매니플레이터의 출력점 3자유도를 총 9개의 관절 중 3개의 구동관절만으로 제어할 수 있음을 보였으며, 기구학적 등방성지수를 이용하여 작업공간의 내부 특이형상을 해석함으로써 이 병렬 매니플레이터에 대해 고정된 제어이득을 갖는 단순한 선형제어기를 적용할 경우에는 제어성능의 한계성이 존재하게 됨을 보였다. 그리고 최근 들어 추리능력과 학습능력으로 인해 비선형시스템의 제어에 많이 응용되고 있는 STAFLC를 이용하여, 이 병렬 매니플레이터의 구동관절이 주어진 기준입력궤적을 더욱 정밀하게 추적할 수 있도록 제어시스템을 설계하였다. 그리고 제안된 PDC+STAFLC를 사용한 경우의 추적성능의 개선효과를 입증하기 위해, 선형 PDC만을 사용한 경우와 기존의 STAFLC만을 사용한 경우에 대한 비교실험을 수행하였다.

실험결과 선형 PDC만을 사용한 경우에는 지속적인 고정된 정상상태오차가 존재하였으며, 기존의 STAFLC만을 사용한 경우에는 학습이 진행될수록 정상상태오차는 점차 감소되었지만 학습을 위해 어느 정도 소요시간이 필요했다. 그러나 본 연구에서 제안된 PDC+STAFLC를 사용한 경우에는 학습시간도 상당히 단축시켰고 학습중의 과도상태오차와 학습이후의 정상상태오차도 크게 감소시켰다 그 이유는 매니플레이터의 제어에서 요구되는 대략적 이득을 미리 PDC편에서 제공하였고 이득의 나머지 다소 부정확한 부족분만을 STAFLC편에서 실시간 학습을 통해 정밀하게 조절해 주었기 때문이다.

### 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," *KSMIE Journal*, vol. 9, no. 4, pp. 462-471, 1995.
- [3] A. J. Patel, and K. F. Ehmman, "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, 조황, "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, Trans., and Automation in Design*, vol. 110, pp. 35-41, 1988.
- [11] 김재섭, 김희국, 조황, "평면형 3 자유도 병렬 메카니즘의 정밀도 특성에 관한 연구," 한국정밀공학회 추계학술대회논문집, pp. 781-786, 1996.
- [12] 김재섭, 김희국, 조황, "국소적 제어특성을 가지는 평면형 6 자유도 병렬 메카니즘의 동적 특성 분석," 제어계측·자동화·로봇공학 연구회 합동학술발표회 논문집, pp. 353-357, 1997.
- [13] 김희국, 조황, 김재섭, "평면형 병렬 메카니즘의 국소적 제어 특성에 관한 연구," 제어·자동화·시스템공학 논문지, 제4권, 제3호, pp. 360-371, 1998.
- [14] 송낙윤, 조황, "평면 작업용 병렬 메카니즘의 특성 해석을 위한 기하학적 접근," 한국정밀공학회지, 제15권, 제9호, pp. 158-166, 1998.
- [15] J. S. R. Jang, "Self-learning fuzzy controllers based on temporal back propagation", *IEEE Trans. on Neural Networks*, vol. 3, no. 5, pp. 714-723, 1992.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] J. J. Craig, *Introduction to Robotics : Mechanics and Control*. 2nd edition, Addison-Wesley, 1989.
- [20] 전용호, 송낙윤, 조황, 김희국, "4 절 메카니즘을 이용한 준정적 포복 시스템에 관한 연구," *Proc. of the 11th KACC*, pp. 924-927, 1996
- [21] R. A. Freeman and D. Tesar, "Dynamic modeling of serial and parallel mechanism/robotics systems, part I - methodology, part II - application," *Proc. of the 20th ASME Mechanism Conf.*, vol. 15-2, pp. 7-21, 1988
- [22] Y. Nakamura, *Advanced Robotics : Redundancy and Optimization*, Addison-Wesley, 1991.
- [23] D. H. Kim, J. Y. Kang, and K. I. Lee, "Nonlinear robust control design for a 6 dof parallel robot," *KSME Int. J.*, vol. 13, no. 7, pp. 557-568, 1999.



송 낙 윤

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

크로프로세서 응용.



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. 관심분야는 메카트로닉스, 로봇 시스템 개발, 시스템 모델링.

측공학과 부교수. 관심분야는 메카트로닉스, 로봇 시스템 개발, 시스템 모델링.