

# 신경회로망을 이용한 더블 팬터그래프형 매니플레이터의 기구학적 제어

## Kinematic Control of Double Pantograph Type Manipulator Using Neural Network

김성철 (창원대 대학원), 정원지 (창원대), 홍대선 (창원대), 신중호 (창원대)

S. C. Kim(Graduate School, Changwon National Univ.), W. J. Chung(Changwon National Univ.),

D. S. Hong(Changwon National Univ.), J. H. Shin(Changwon National Univ.)

### ABSTRACT

In general, pantograph type manipulators are used for carrying heavy payloads with positional accuracy. In this paper, a double pantograph type manipulator, activated by two slider joints, is studied for applying to fuel handling machine in atomic power plants. In order to realize the stable horizontal movement of a heavy fuel rod with good positional accuracy, methods for allocating slider and finding constant joint rates are proposed. In addition, the static deflection of the proposed mechanism was studied using transfer-stiffness matrix method. A neural network control algorithm which compensates static deflections is explored with computer simulations.

**Key Words** : Double Pantograph Mechanism(더블 팬터그래프 기구), Transfer-Stiffness Matrix Method(TSMM) Horizontal Position Control(수평위치 제어), Neural Network Control(신경회로망 제어)

### 1. 서론

산업용 로봇은 현재 다양한 분야에서 생산성 향상과 인간이 할 수 없는 위험한 작업이나 특수한 목적을 위해 사용되어지고 있으며 그 응용분야에 따라 적절한 구조가 선택되어야 한다. 일반적으로 무거운 물체의 핸들링과 정밀한 위치제어를 위하여 구조적으로 큰 강성을 갖는 팬터그래프형 매니플레이터가 많이 사용되어지고 있다.<sup>1,2</sup>

본 연구는 원자로 노심안에서 연료봉을 교환하기 위한 메카니즘중에서 매니플레이터 말단부의 수평위치 제어부분을 다루었다. 이를 위하여 본 연구에서는 팬터그래프를 두 개 사용한 더블 팬터그래프형 매니플레이터 모델을 제안하였으며 이에 대한 기구학적 그리고 정역학적 해석과 더불어 일정한 각속도로 수평이동 하기 위한 방법들과 신경회로망을 통한 위치제어 방법을 제시하고자 한다.

### 2. 2-자유도 링크 시스템에 대한 수평위치 제어

#### 2.1 일반적인 2-자유도 링크해석

2-자유도를 갖는 매니플레이터의 말단부가 x축과 수평으로 이동하도록 위치를 제어하기 위해서는 말단부의 위치에 대한 링크각( $\theta_1, \theta_2$ )을 역기구학을 사용하여 매번 풀어야 하며 그에 해당하는 값만큼 각속도를 조정해 주어야 한다. 그러나 만일, 링크의 각속도가 일정하다면 동일한 각속도로 매니플레이터를 움직일 수 있으므로 시스템의 안정성과 제어에 유리할 것이다. 다음 그림은 일반적인 2-자유도 링크시스템을 나타낸 것이다.

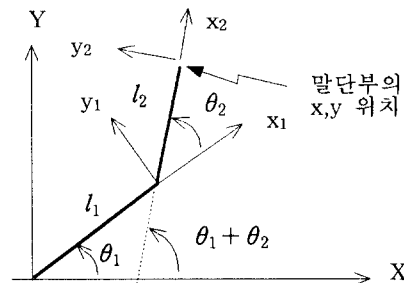


Fig.1 General Two-DOF Link System

적교공간에서의 말단부의 위치 및 속도와 관절공간에서의 관절변위 및 관절속도와의 관계식은 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 c_1 + l_2 c_{12} \\ l_1 s_1 + l_2 s_{12} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -l_1 s_1 - l_2 s_{12} & -l_2 s_{12} \\ l_1 c_1 + l_2 c_{12} & l_2 c_{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서,  $x, y$ : 말단부의 위치  $\dot{x}, \dot{y}$ : 말단부의 속도  
 $\theta_1, \theta_2$ : 관절변위  $\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2$ : 관절속도  
 $c_1$ :  $\cos(\theta_1)$   $s_1$ :  $\sin(\theta_1)$   
 $c_{12}$ :  $\cos(\theta_1 + \theta_2)$   $s_{12}$ :  $\sin(\theta_1 + \theta_2)$  이다

## 2.2 두 링크의 길이가 같은 경우의 수평이동

말단부가 수평으로 이동한다면 식(2)에서  $\dot{y}$ 는 0이 되므로  $\dot{\theta}_1$ 과  $\dot{\theta}_2$ 의 관계식은 다음과 같이 된다.

$$\dot{\theta}_2 = - \left( \frac{l_1 c_1}{l_2 c_{12}} + 1 \right) \dot{\theta}_1 \quad (3)$$

여기서,  $\dot{\theta}_1$ 과  $\dot{\theta}_2$ ,  $l_1$ 과  $l_2$ 가 일정한 값을 가진다면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{c_1}{c_{12}} = - \frac{l_2}{l_1} \left( 1 + \frac{\dot{\theta}_2}{\dot{\theta}_1} \right) = constant \quad (4)$$

만일,  $\dot{\theta}_2 = -2\dot{\theta}_1$ ,  $l_1 = l_2$ 이라고 하면

$$c_1 = c_{12} \quad \text{즉,} \quad \cos(\theta_1) = \cos(\theta_1 + \theta_2) \quad (5)$$

이 되며  $\theta_2 = -2\theta_1$ 이어야 한다. 따라서  $l_1 = l_2$ ,

$\dot{\theta}_2 = -2\dot{\theta}_1$ 일 때 말단부는 항상  $x$ 축 선상에서 수평으로 이동하게 된다.

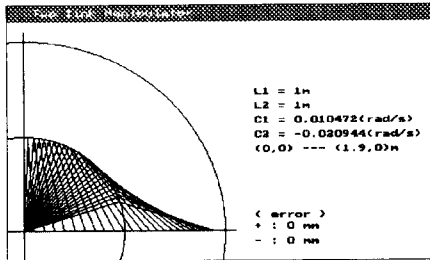


Fig 2. Movement of End Effector ( $l_1 = l_2$ )

## 2.3 두 링크의 길이가 서로 다른 경우의 수평이동

두 링크의 길이가 서로 다른 경우에는 두 링크의 길이가 같을 때 사용한 각속도비( $\dot{\theta}_2 = -2\dot{\theta}_1$ )로 움직일 경우 두 링크길이 비( $l_2/l_1$ )가 클수록 오차가 크게 나타난다. 따라서, 최소한의 오차를 갖고 수평으로 이동할 수 있는 새로운 각속도를 찾아야 하며 본 연구에서 사용한 알고리즘은 다음과 같다.

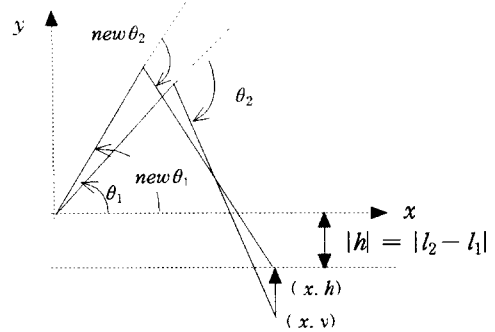


Fig 3. New Position on Horizontal Line

수평위치점인  $(x, h)$ 에서의 새로운 각속도는 다음식을 통해서 얻게 된다.

$$new \dot{\theta}_i = \dot{\theta}_i + (new \theta_i - \theta_i) / time \quad (6)$$

여기서,  $i=1,2$ 이며  $\dot{\theta}_i$ : 초기각속도  $new \dot{\theta}_i$ : 새로운각속도  
 $time$ : 시간(sec) 이다.

Table 1. Initial Joint Rates & New Joint Rates

초기각속도를 사용		새로 구한 각속도를 사용	
$l_1=1.0, l_2=1.2, h=-0.2$ m		$l_1=1.0, l_2=1.2, h=-0.2$ m	
$\dot{\theta}_1=0.010472, \dot{\theta}_2=-0.020944$		$\dot{\theta}_1=0.0111135, \dot{\theta}_2=-0.02108171$	
x2	y2	x2	y2
1.839668	-0.205769	1.839836	-0.200538
1.774294	-0.210974	1.774581	-0.200880
1.704057	-0.215601	1.704413	-0.201053
1.629148	-0.219637	1.629527	-0.201085
1.549775	-0.223071	1.550128	-0.201002
1.466154	-0.225894	1.466437	-0.200830
1.378514	-0.228097	1.378684	-0.200592
1.287095	-0.229675	1.287112	-0.200312
1.192149	-0.230624	1.191974	-0.200013
1.093935	-0.230941	1.093535	-0.199713
0.992723	-0.230624	0.992065	-0.199434
0.888790	-0.229676	0.887848	-0.199191
0.782421	-0.228097	0.781170	-0.199000
0.673907	-0.225894	0.672329	-0.198875
0.563546	-0.223072	0.561626	-0.198829
0.451640	-0.219638	0.449368	-0.198870
0.338497	-0.215602	0.335866	-0.199007
0.224425	-0.210975	0.221435	-0.199246
0.109739	-0.205770	0.106392	-0.199590

시뮬레이션을 수행한 결과 초기 각속도를 사용한 경우 수평위치  $h$ 에서  $-y$ 방향으로 최대  $31\text{ mm}$  정도 오차가 발생하지만 수정된 각속도를 사용한 경우에는 최대  $\pm 1.2\text{ mm}$ 로 상당히 에러가 줄어드는 것을 알 수 있다.

### 3. 더블 팬터그래프형 매니퓰레이터의 수평위치제어

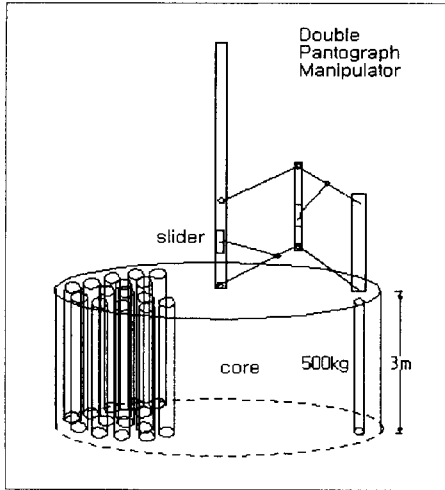


Fig. 4. Work of Double Pantograph Manipulator

제안된 더블 팬터그래프형 매니퓰레이터는 유연한 위치제어가 가능하다는 장점이 있으며 서보모터에 의한 각 변위를 통하여 말단부의 위치를 제어하는 보통의 매니퓰레이터와는 달리 이 경우는 두 개의 슬라이더를 통하여 말단부의 위치를 제어하게 되어 있다. 이것은 매니퓰레이터의 말단부에 최대  $500\text{ kg}$ 의 하중이 부과되기 때문에 부하하중이 낮을 때 주로 쓰이는 일반적인 서보모터를 사용할 경우 모터 자체의 무게를 고려하지 않을 수 없기 때문이다.

#### 3.1 시스템 매개변수의 최적값 결정

말단부에서의 위치 정밀도를 높이기 위해서는 슬라이더의 위치 정밀도를 높여야 하며 이를 위해서는 슬라이더가 움직일 수 있는 이동거리를 최대한 크게 해야 한다. 두 슬라이더의 최대 이동거리가 매니퓰레이터가 완전히 접했을 때 부터 수평으로 완전히 펼쳤을 때 까지 이동한 거리라고 하면 다음식을 통해 얻을 수 있다

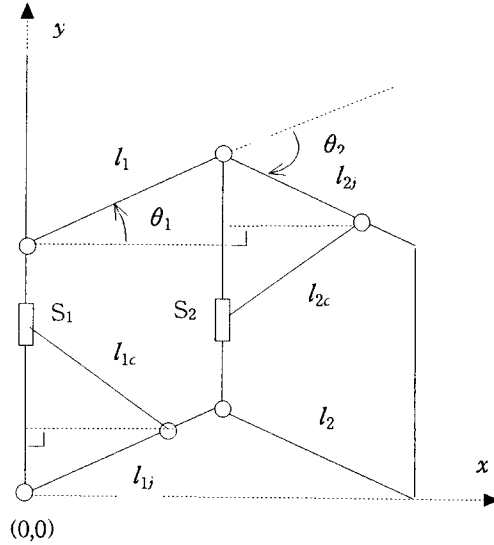


Fig 5. Kinematic Details of Manipulator

$$\begin{aligned} \max \bar{S}_1 &= (l_{1c} + l_{1j}) - \sqrt{l_{1c}^2 - l_{1j}^2} \\ &= (l_{1c} + l_{1j}) - \sqrt{(l_{1c} - l_{1j})(l_{1c} + l_{1j})} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \max \bar{S}_2 &= (l_{2c} + l_{2j}) - \sqrt{l_{2c}^2 - l_{2j}^2} \\ &= (l_{2c} + l_{2j}) - \sqrt{(l_{2c} - l_{2j})(l_{2c} + l_{2j})} \end{aligned} \quad (8)$$

여기서,  $\max \bar{S}_1$ 는 슬라이더  $S_1$ 의 최대이동거리  
 $\max \bar{S}_2$ 는 슬라이더  $S_2$ 의 최대이동거리.

슬라이더의 최대 이동거리는  $l_{1c}, l_{2c}$ 와  $l_{1j}, l_{2j}$ 에 관계하므로  $l_{1c}, l_{2c}$ 는 작을수록  $l_{1j}, l_{2j}$ 는 클수록 최대 이동거리는 커진다는 것을 알 수 있다.

Table 2. System Parameters      단위: m

$l_{1c}, l_{2c}$	$l_{1j}, l_{2j}$	$\max \bar{S}_1, \max \bar{S}_2$
0.9	0.3	0.3515
1.5	"	0.3303
2.0	"	0.3226
0.9	0.5	0.6517
1.5	"	0.5858
2.0	"	0.5635
0.9	0.8	1.2877
1.5	"	1.0371
2.0	"	0.9669
0.9	0.9	1.8000
1.5	"	1.2000
2.0	"	0.9000

### 3.2 말단부에서의 처짐해석

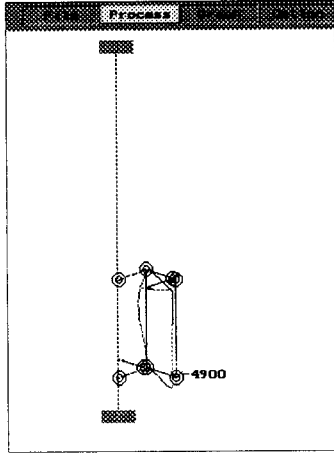


Fig 6. Deflection of Double Pantograph Manipulator

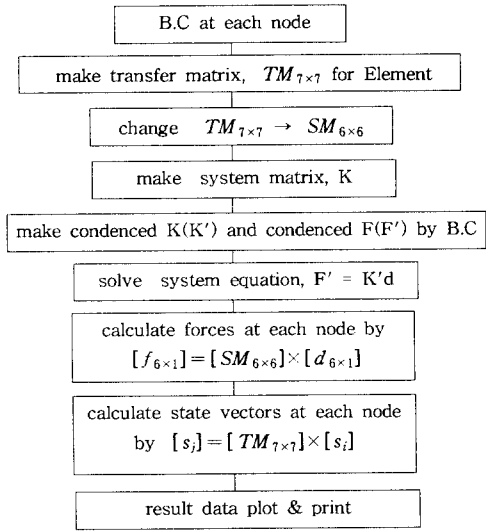


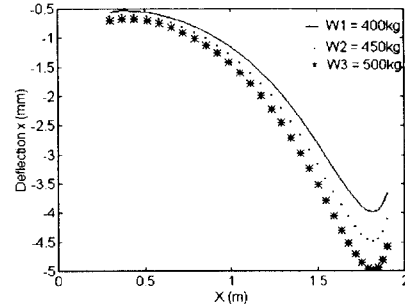
Fig 7. Transfer-Stiffness Matrix Method

정밀한 수평위치 제어를 위해서는 말단부에서의 부하하중에 따른 처짐량까지 고려하여 수평으로 이동할 수 있도록 두 슬라이더에서 그 처짐량만큼을 보상해 주어야 한다. 우리가 설계하려는 더블 팬터그래프형 매니퓰레이터는 말단부에 최대 500kg의 하중이 작용하므로 그로 인한 처짐을 고려하지 않을 수 없다. 따라서 Transfer-Stiffness Matrix Method를 이용하여 제안된 메커니즘을 해석하기 위한 프로그램을 개발하였다. 이를 이용하면 각 노드와 노드 사이의 중간지점에서의 처짐변위와 그 지점에 작용하는 힘을 계산할 수 있다. Fig 8은 말단부에 세 중

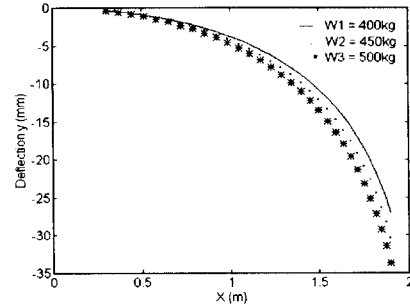
류의 부하하중(400,450,500kg)이 작용할 때 말단부의  $x$ 위치에 대한  $x, y$ 방향으로의 처짐변위를 나타낸 것이며 각 경우에 대해 31개씩의 샘플링 데이터를 사용하였다. 이 시스템에 사용된 물성치는 Table 3과 같으며 더블 팬터그래프의 수직요소 세개는 2번을 나머지 요소들은 모두 1번을 사용하였다.

Table 3. Class of Elements

element class	Area ( $mm^2$ )	$I_z$ ( $mm^4$ )	$E$ ( $N/mm^2$ )
1	2.120575E+3	5.964117E+5	200E+3
2	5.026548E+3	4.272566E+6	200E+3



(a) Deflection  $x$



(b) Deflection  $y$

Fig 8. Deflection Displacement

### 4. 신경회로망을 이용한 수평위치 제어

신경회로망은 시스템의 실제 입력과 출력 데이터들간의 관계를 학습함으로써 역기구학을 푸는 것과 같은 시스템에 대한 복잡한 계산과정을 수행하지 않아도 되며 부하하중의 변동이나 외란에 대해서도 상당히 유연한 위치제어를 할 수 있게 한다.<sup>(34)</sup> 따라서, 신경회로망을 통하여 앞서 제안한 메커니즘의 말단부의 수평위치 제어를 수행하기 위해서는 슬라이더의 위치와 말단부의 위치를 언어 신경회로망에 인가해야 한다. 그러나 본 연구에서 제안한 메커니즘은 아직 개념설계중에 있으므로 실제 데이터가 아닌 지금까지의 계산과정을 통하여 얻은 데이터를 사용하

여 학습하였다.

다음은 두 링크의 길이가 같은 경우에 있어서 말단부에 세 종류의 부하하중 ( $weight=0.3, 0.4, 0.5$ 톤)이 작용할 경우에 말단부의  $x$ 위치와 슬라이더의 이동거리  $\overline{S_1}, \overline{S_2}$ 와의 데이터를 가지고 학습하였다. 여기서,  $weight$ 는 부하하중의 종류이며 각각에 대하여 10개씩의 샘플 데이터를 얻어서 학습하였다.

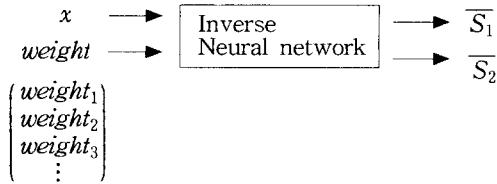


Fig 9. Input and Output of Neural Network

Table 4. Learning Result of Neural Network

$x$	$weight$	실제 출력값	목표값 ( $\overline{S_1}, \overline{S_2}$ )
0.300	0.500	-0.000270	0.003183 0.000000 0.000000
0.500	0.500	0.033589	0.039528 0.034568 0.039039
0.700	0.500	0.086264	0.095890 0.089044 0.097986
0.900	0.500	0.164456	0.178922 0.165516 0.178931
1.100	0.500	0.270687	0.290304 0.267450 0.285337
1.300	0.500	0.401529	0.425109 0.400612 0.422971
1.500	0.500	0.564855	0.590330 0.575679 0.602509
1.700	0.500	0.826711	0.852420 0.815833 0.847135
1.900	0.500	1.200070	1.224596 1.197305 1.233060
0.300	0.400	0.000601	0.001418 0.000000 0.000000
0.500	0.400	0.035184	0.037442 0.035445 0.038135
0.700	0.400	0.088909	0.093467 0.090786 0.096165
0.900	0.400	0.168334	0.176077 0.168157 0.176226
1.100	0.400	0.275534	0.286845 0.270950 0.281709
1.300	0.400	0.406679	0.420958 0.405034 0.418483
1.500	0.400	0.570060	0.586198 0.580951 0.597089
1.700	0.400	0.832756	0.850750 0.821982 0.840811
1.900	0.400	1.203980	1.225683 1.204269 1.225775
0.300	0.300	0.001536	-0.000349 0.000000 0.000000
0.500	0.300	0.036776	0.035271 0.036333 0.037232
0.700	0.300	0.091398	0.090789 0.092574 0.094372
0.900	0.300	0.171775	0.172700 0.170800 0.173496
1.100	0.300	0.279550	0.282500 0.274490 0.278085
1.300	0.300	0.410523	0.415516 0.409456 0.413950
1.500	0.300	0.573074	0.579943 0.586269 0.591662
1.700	0.300	0.834288	0.844635 0.828168 0.834460
1.900	0.300	1.203570	1.222450 1.211311 1.218498

본 연구에서는 신경회로망에서 많이 사용되는 역전파 알고리즘을 사용하였으며<sup>6)</sup> 이 알고리즘에서 사용된 시그모이드 함수는 입력값을 0~1의 범위로 만들어 버리기 때문에 원하는 결과값을 얻기 위하여 정규화(normalize)와 역정규화(unnormalize)를 수행하는 과정을 중간단계에 포함시켰다. 정규화는 기대되는 출력값들을 최대값에 대하여 0~1사이의 범위로 바꾸는 과정이며 역정규화는 반대로 신경회로망에서 나온 출력값을 우리가 원하는 값으로 바꾸는 과정이다.

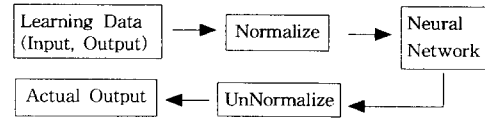


Fig 10. Normalize and UnNormalize Process

여기서 사용된 신경회로망은 입력층과 출력층에 각각 2개, 두 개의 중간층에 각각 6개씩의 뉴런을 사용하였으며 학습율은 0.003, 모멘텀항은 0.03이며 반복횟수는 4997번이다. 이 경우 두 슬라이더 모두 최대 약 1cm의 에리내에서 학습되었다.

## 5. 결론

본 연구에서는 더블 팬터그래프형 매니플레이터에 대한 설계와 수평위치 제어를 위한 방법들이 제시되었다. 첫째, 두 링크 길이가 같은 경우와 다를 경우에 두 링크가 일정한 각속도로 움직이면서 말단부가 안정적인 수평이동을 할 수 있게 되는 각속도를 찾는 방법을 얻었다. 둘째, 제안된 매니플레이터의 위치정밀도를 높이기 위하여 슬라이더가 최대로 이동할 수 있도록 최적설계를 하였다. 셋째, 정밀한 위치제어를 위하여 말단부에 하중이 작용할 경우에 처짐변위를 해석하는 프로그램을 개발하였다. 마지막으로 하중의 변동에 대해서 유연한 수평위치 제어를 수행하기 위하여 각 하중에 대한 슬라이더 위치와 말단부의 위치 데이터를 신경회로망에 인가하여 학습함으로써 보다 유연한 수평위치 제어가 가능함을 보였다.

## 참고 문헌

- McKerrow, P. J., "Introduction to Robotics", Addison-Wesley, 1993.
- 정백기, "팬터그래프형 로봇 아암의 제어", 중앙대학교 박사학위 논문, 1995
- SUN-YUAN KUNG and JENQ-NENG HWANG, "Neural Network Architectures for Robotic Applications", IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS AND AUTOMATION, VOL.5,NO.5,OCTOBER 1989.
- Ken-ichi TANAKA, Masako SHIMIZU and Kazuo TSUCHIYA, "A Solution to an Inverse Kinematics Problem of a Redundant Manipulator Using Neural Networks", Elsevier Science Publishers B.V., 1991
- KMK 정보산업연구원 역, C++ 파워 프로그래밍 neural network & Fuzzy Logic, 삼각형, 1997