

장애물이 있는 환경하에서 여유자유도 로봇의 지능제어 방법.

현용근, 서일홍
한양대학교 전자공학과

Intelligent Control of Redundant Manipulator in an Environment with Obstacles

Woong Keun Hyun, Il Hong Suh
Dept. of Electronic Eng.,
Hanyang University.

ABSTRACT

A neural optimization network is proposed to control the redundant robot manipulators in an environment with the obstacle. The weightings of the network are adjusted by considering both the joint dexterity and the capability of collision avoidance of joint differential motion. The fuzzy rules are proposed to determine the capability of collision avoidance of each joint. To show the validities of the proposed method, computer simulation results are illustrated for the redundant robot of the planar type with three degrees of freedom.

1. 서론

로봇 매니플레이터가 주어진 작업을 수행하는데 필요한 최소한의 자유도 이상의 자유도를 갖을때 이러한 로봇트를 여유자유도를 갖는 로봇트 매니플레이터라 한다. 이러한 로봇트는 그 여유자유도를 이용하여 장애물 회피[1,2], 관절 각속도 제한[3], 조작성능지수 증가[4], 특이자세 회피[5] 등을 할 수 있는 장점이있다.

로봇트의 여유자유도를 이용하여 작업공간 내에서 장애물을 회피하면서 주어진 궤적을 추적하는 문제를 풀기 위해서는 장애물에 대한 모델링[6,7]과 장애물과 링크간의 거리함수[8], 그리고 각 링크의 장애물간의 충돌위험 인식과 충돌위험이 있을 경우 각링크가 장애물을 피해 갈수있는 충돌회피 경로 등을 구해야 한다.

최근 이러한 문제의 해결 방법으로 작업의 우선도 (Priority) 를 정해서 여유자유도 로봇트가 주작업(Main Task)으로 궤적을 추적 하면서 부작업(Sub-task)으로 여유자유도를 이용하여 장애물을 회피 할 수 있게 하는 방법도 있다[9]. 이 경우 링크와 장애물 간의 거리를 관절각을 변수로한 Potential 함수로 표현하고 이 함수 값을 크게 하도록 여유자유도의 관절을 제어하게 되는데 일반적으로 관절 각을 변수로한 식으로 표현되는 potential 함수를 구하기가 어렵다. 한편, 관절각으로 표현되는 Potential 함수를 쓰지 않고 로봇트의 제어식 자체를 직교좌표 공간으로 투영하여 로봇트와 장애물간의 거리 함수를 직교좌표 공간에서 ∴ 현해서 장애물을 회피하는 방법도 있는 바[10], 이 경우 모든 링크가 장애물을 피한다는 보장을 할 수가 없다. 또, 장애물과 충돌 위험이 있는 링크를 구하여 첫번째 관절 부터 충돌위험이 있는 링크 까지의 관절을 장애물에서 멀리 떨어지게 되도록 제어하고 나머지 관절을 제어하여 주어진 궤적을 추적하게하는 방법[11]이 있는 바, 이 때 충돌 위험이 있는 링크가 여러개 인 경우와

충분한 여유자유도가 없는 경우에는 제어가 곤란해진다. 더우기 상기한 방법들은 자코비안과 그 의사역행렬을 사용하는 데, 관절수가 많아 질경우 그 수식을 구하기도 어려울 뿐아니라 계산시간이 많이 걸린다는 단점도 있다.

본 논문에서는 [12,13]에서 제시한 신경망 최적화 회로를 이용한 여유자유도 로봇트 제어방법에 퍼지이론을 부가 사용하여, 여유자유도 로봇트의 장애물 회피방법을 제시하고자 한다. 구체적으로, 신경망 최적화 회로를 사용하여 여유자유도 로봇트를 제어하는 바, 그 제어방법은 각 관절의 미소회전에 의한 End-Effector의 움직임을 매 순간 주어진 궤적에 대하여 수직성분과 수평성분으로 나누어, 수직성분들의 선형조합을 "0"으로 하고 수평성분의 선형조합은 매 순간 주어진 궤적의 크기와 같게 해주며 관절 각속도가 그 제한된 크기를 벗어나지 않는 범위내에서 관절 각속도에 가중치를 곱한 합의 크기가 최소가 되는 해를 구하고 가중치는 조작성능지수[12,13] 및 로봇트 링크와 장애물간의 충돌 위험 회피 기여도에 의하여 설정한 퍼지 법칙에 의해 결정되며, 충돌 위험 정도는 각 관절의 미소 회전 예의한 최소 거리의 변화율과 그 변화의 합으로써 구한다. 여기서 로봇트의 각 링크와 장애물 간의 거리는 기하학적인 방법으로 간단히 구해진다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2 장에서는 우선 신경망 최적화 회로를 이용한 여유자유도 로봇트의 제어방법을 소개한다. 그리고 그 신경망 최적화 회로를 이용한 제어 방법을 여유자유도 로봇트가 장애물을 회피하면서 주어진 궤적을 추적 할 수 있도록 특정 관절의 속도를 임의 대로 바꿀 수 있도록 수정하는 방법에 대하여 설명한다. 3 장에서는 장애물과 여유자유도 로봇트의 링크간의 충돌위험이 있을 경우 충돌을 회피하게 하기위한 관절의 선택과 그 관절의 움직임을 퍼지 법칙을 이용하여 결정 할 수 있는 방법을 설명하며, 4 장에서는 3 링크 Planar Type 여유자유도 로봇트를 대상으로 본 논문에서 제시한 방법의 타당성을 검토 하며 끝으로 5 장에서는 결론과 함께 추후과제를 논하도록 한다.

2. 신경망 최적화 회로를 이용한 여유자유도 로봇트의 제어.

여유자유도 로봇트를 제어함에 있어서 자코비안과 그 의사역행렬을 사용한 방법[9,10,11]을 사용하지 않고, 병렬처리가 가능한 신경망 최적화 회로를 이용하는 것이 가능한바[12,13], 여유자유도 로봇트의 각 관절의 미소회전에 의한 End-Effector의 움직임을 매순간 주어진 궤적에 대하여 수직성분과 수평성분으로 나누어 1) 수직성분들의 선형 조합을 "0"으로 하고, 2) 수평성분의 선형조합은 매순간 주어진 궤적의 크기와 같게 해주며 3) 관절 각속도가 그 제한된 크기를 벗어나지 않는 범위내에서 관절 각속도에 가중치를 곱한 합의 크기가 최소가

되는 해를 구함으로써 가능성을 보였다.

본절에서는 장애물 회피를 위한 구조를 위하여 상기 방법중 가중치와 각 속도 에너지를 나타내는 평가함수를 변형 시킨 방법을 기술한다. 이를 위하여 먼저 [12,13]의 방법을 간략히 기술한다.

N d.o.f.을 갖는 여유자유도 로봇트에 대하여 i 번째 관절을 미소회전시키고 나머지 관절을 고정시켰을 경우 End-Effector의 속도를 다음과 같이 6x1 벡터 Z_i 로 표현 하자.

$$Z_i = [V_i^T ; W_i^T]^T \quad (1)$$

여기서 V_i 와 W_i 는 각각 end-effector의 위치속도와 자세속도의 벡터이다. 그리고 end-effector의 주어진 궤적 속도를 6x1 벡터 Z_d 라고 할 때, Z_d 를 다음과 같이 정의하자.

$$Z_d = [V_d^T ; W_d^T]^T \quad (2)$$

V_{ci} 와 V_{si} 를 각각 i 번째 관절의 미소회전에 의한 위치벡터의 수평성분과 수직성분 벡터라하고, 역시 W_{ci} 와 W_{si} 를 각각 i 번째 관절의 미소회전에 의한 자세벡터의 수평성분과 수직성분 벡터라하면 여유자유도 로봇트의 End-Effector가 주어진 궤적을 추적하려면 1), 2) 의하여 식(3) ~ 식(6)으로 표현되는 조건들을 만족하여야 한다.

$$g_1(U) = \sum_{i=1}^N U_i V_{ci} = V_d, \quad (3)$$

$$g_2(U) = \sum_{i=1}^N U_i V_{si} = 0, \quad (4)$$

$$g_3(U) = \sum_{i=1}^N U_i W_{ci} = W_d, \quad (5)$$

그리고,

$$g_4(U) = \sum_{i=1}^N U_i W_{si} = 0. \quad (6)$$

여기서 U_i 는 i번째 관절의 미소회전에 곱해지는 가산수(multiplier)이다.

참고문헌 [12,13]에서 제안한 대로 각 관절 속도에 가중치 k_i 를 곱하여 가중치가 곱해진 관절 속도 에너지가 최소가 되게 하면서 End-Effector가 주어진 궤적을 추적하는 각속도를 제한 관절 각속도 내에서 구하는 문제는 다음과 같이 표현 할 수 있다.

문제 1.

$$\begin{aligned} & \min \sum_i k_i U_i^2 \\ & \text{subject to} \\ & g_n(U) = 0, \quad n = 1, 2, 3, 4, \\ & h_m(U) \leq 0, \quad m = 1, 2, \dots, 2N \end{aligned} \quad (7)$$

식(7)에서 k_i 는 조작성능지수[12,13]로 표현되는 가중치로서, 다음과 같이 주어진다.

$$k_i = \frac{2}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{a_{pi}}{Q_{pi}} + \frac{a_{wi}}{Q_{wi}} \right) + b_i \quad (8)$$

여기서 a_{pi} 와 a_{wi} , 그리고 b_i 는 off-set 값이고 i번째 관절의 조작성능 지수인 Q_{pi} 와 Q_{wi} 는 i번째 관절의 미소 회전에 의한 End-effector의 움직임의 주어진 궤적에 대한 수직 성분의 크기대 수평 성분의 크기로 표현 되는바, 다음과 같이 쓸수있다.

$$Q_{pi} = \| V_{ci} \| / \| V_{si} \| \quad (9)$$

$$Q_{wi} = \| W_{ci} \| / \| W_{si} \| \quad (10)$$

이 경우 Q_{pi} 와 Q_{wi} 가 크다면 그 만큼 i 번째 관절의 회전에 의한 End-effector의 움직임의 궤적을 추적하는 방향의 성분이 크게되는 것이므로 i번째관절의 회전은 End-effector가 궤적을 추적하는데 많은 기여를 하게되는 것이다.

한편 문제 1.에서 $h_m(U)$ 는 관절 각속도에 대한 제한 조건 식으로서 다음과 같이 주어진다.

$$h_m(U) = U_i - U_{imax}, \quad m = 2i - 1, \quad (11)$$

$$h_m(U) = -U_i + U_{imin}, \quad m = 2i, \quad (12)$$

식(10) 및 식(11)에서 U_{imax} 는 U_i 의 최대 제한값, U_{imin} 은 U_i 의 최소 제한값을 나타낸다.

이제 문제 1.식을 특정 관절에 대하여 임의 대로 회전량과 회전방향을 바꾸어 줄 수 있도록 다음과 같이 변형 시켜보자.

문제 2.

$$\begin{aligned} & \min \sum_i G_i (U_i - U_i^*)^2 \\ & \text{subject to} \\ & g_n(U) = 0, \quad n = 1, 2, 3, 4, \\ & h_m(U) \leq 0, \quad m = 1, 2, \dots, 2N \end{aligned} \quad (13)$$

이 문제를 Patt과 Rørr[17]이 주장하는 신경망 최적화 회로를 적용하여 풀면 식(14)~식(17)으로 표현 된다.

$$U_i = -2G_i (U_i - U_i^*) - \sum_{k=1}^4 \beta_k \frac{\partial g_k(U)}{\partial U_i} - \sum_{j=1}^{2n} \gamma_j \frac{\partial h_j(U)}{\partial U_i}, \quad (14)$$

$$z_j = -2 \sum_{m=1}^{2n} \gamma_m z_j, \quad (15)$$

$$\beta_k = g_k(U), \quad (16)$$

그리고

$$\gamma_j = h_j(U) + z_j^2, \quad (17)$$

여기서 β_k 와 γ_m 은 등 조건식 에대한 Lagrange Multiplier의 역할을 하는 뉴론이고 z_j 는 부등 조건식을 등 조건식으로 변환하는 데 필요한 Slack variable에 대한 뉴론이다.

여유자유도 로봇트가 주어진 궤적을 추적하는식 $g_n(U) = 0$ 를 만족시킬 수 있는 최소한의 자유도를 제외한 여유자유도 관절에 대하여 만일 그것이 j번째 관절이라 하면, 문제 2에서 $U_j^* = U_{jmax}$, $U_{jmax} > 0$, 로 할경우 U_j 는 U_{jmax} 로 수렴하면서 문제 2.가 해를 찾을 것이다. 수렴속도는 G_i 에 따를 것이므로 G_i 가 작게되면 U_j 가 많이 움직여

U_{jmax} 까지 움직일 것이고 G_i 가 크게되면 U_j 가 작게 움직여 U_{jmax} 로 수렴하는 도중에 문제 2.는 해를 찾을 것이다. 따라서 j 번째 관절을 증가하는 방향으로 움직여 주려면 U_j^* 를 U_{jmax} 로하고 감소하는 방향으로 움직여 주려면 U_{jmin} , $U_{jmin} < 0$, 로 하여 그 움직이는 방향을 결정한다. 또 움직이는 속도는 G_i 를 조종함으로써 제어할 수 있다. 따라서 여유자유도 로봇트가 주어진 작업을 할경우 어떤 링크가 장애물과 충돌 위험이 있을 때 그 링크가 충돌이 일어나지 않도록 해당 관절을 충돌 위험 회피 기여도에 따라 임의로 조종할 수 있게 된다. 여기서 충돌 위험 회피 기여도와 그에따른 관절의 움직임은 퍼지법칙을 적용하여 구해지게 된다.

3. 장애물 회피를 위해 움직여 주어야할 관절 및 가중치의 결정.

기존의 여유자유도 로봇트의 제어방법들은 여유자유도 로봇트의 링크가 장애물과의 충돌을 회피하기위한 방법으로 관절의 여유자유도를 이용하여 장애물과 링크간의 최소 거리에 대한 potential함수를 크게 해주도록 하므로써 모든 링크가 장애물에 멀어지게하면서 주어진 궤적을 추적하도록 하였다[9]. 하지만 이러한 방법들의 문제는 링크의 위치는 조인트 스페이스(joint space)에서 설정되는데 반해 장애물의 위치는 Cartesian Space에서 설정되므로 그 사이의 거리에 대한 Potential함수는 구하기가 매우 어렵고, 최소거리에 대한 함수는 연속적이고 미분가능하다는 보장이 없으므로 [14] 적용하기가 곤란한 점이다.

본 논문에서는 여유자유도 로봇트의 장애물 회피를 위한 관절 및 관절의 가중치의 결정을 위하여 다음과 같이 하고자 한다.

1) 각 링크와 장애물 간의 최소 거리를 구하여, 최소 거리가 주어진 한계값 d 보다 작은 링크들을 충돌 위험이 있는 링크로 한다. 만일 모든 링크가 충돌 위험이 없다면 각 관절의 가중치는 식(8)을 따르고 식(14)의 U_i^* 는 영으로 하여 관절의 움직임이 조작 성능 지수를 따르도록 한다. 2) 각 관절을 미소 회전 시켜 그 링크와 장애물간의 최소 거리의 변화 및 모든 링크와 장애물간의 최소 거리의 변화의 합을 구한다. 여기서 최소 거리의 변화한 관절을 미소 회전시킨 상태에서의 충돌 위험이 있는 링크와 장애물간의 최소 거리에서 관절을 미소 회전 시키지 않은 상태에서의 충돌 위험이 있는 링크와 장애물간의 최소 거리를 뺀것이다. 이때 관절의 미소 회전 방향은 이 최소 거리의 변화가 크게 되도록 하는 방향으로 선택하는 바, 그 이유는 관절의 회전이 충돌 위험이 있는 링크를 장애물로 부터 얼마나 회피시킬 수 있는 가 하는 정도를 알수 있기 때문이다. 한편, 어떤 관절에 대해서는 관절의 미소운동이 장애물과 충돌 위험 있는 링크 사이의 최소 거리 변화에 전혀 영향을 주지 않을 수 있다. 예를 들어 그림 1.에서와 같이 $i+1$ 번째 관절 운동에 의한 링크의 움직임은 $(i+1)$ 번째 이후인데, 충돌 위험링크는 i 번째 이므로 전혀 충돌 위험 최소 거리에 영향을 주지 못한다. 이와 같은 경우에 해당하는 관절은 장애물 회피와는 관련이 없으므로, 관절운동을 결정짓는 가중치 G_i 를 (8)식에서와 같이 조작 성능 지수로써 결정하며, 따라서 (14)식의 U_i^* 는 영으로 한다.

3) 2)에서 구한 최소 거리의 변화와 최소 거리의 변화들의 합을 건전부호한 퍼지법칙을 사용하여 각 관절에 대한 충돌회피 기여도를 구한다. 4) 충돌 회피와 관련된 관절 중에서 충돌회피 기여도가 큰것을 여유자유도 수 만큼 결정하여 그 기여도에 따라 식(14)의 가중치 G_i 를 조정하여 준다. 만약 충돌 회피 기여도가 같은 경우에는 조작 성능 지수가 작은 관절이 장애물 회피에, 큰것이 경로 추적에 사용하도록 한다.

3-1) 퍼지 법칙에 의한 관절 각속도 가중치의 결정.

충돌위험이 있는 링크들에 대하여 각 관절의 충돌 회피 기여도는 각 관절들을 충돌 위험이 있는 링크와 장애물간의 거리가 멀어지는 방향으로 미소 회전 시켜 그 링크와 장애물간의 거리의 변화 및 장애물과 로봇트의 모든 링크와의 거리 변화들의 합을 건전부호한 퍼지 법칙을 사용한다.

우선 건전부의 입력 변수를 정의하기로 한다. 장애물과 링크간의 최소거리, 충돌위험이 있는 링크, 어떤 관절을 미소 회전 했을때 충돌 위험이 있는 링크와 장애물간의 거리의 변화, 그리고 어떤 관절을 미소회전 했을때 장애물과 모든 링크 간의 거리의 변화의 합등을 정의해 보기로 하자.

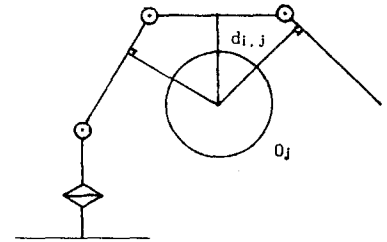


그림1. 각링크와 장애물 간의 최소거리.
Fig. 1 The minimum distance between the link L_i and obstacle O_j

x_i 를 i 번째 링크 L_i 선상의 점들의 집합 SL_i 의 원소라 하고, $x_i \in SL_i$, z_j 를 장애물 O_j 의 경계선을 이루는 점들의 집합 SO_j 의 원소 라하면, $z_j \in SO_j$, i 번째 링크 L_i 와 j 번째 장애물 O_j 사이의 최소거리 $d_{i,j}$ 는 다음과 같이 정의 할 수 있다.

$$d_{i,j} = \{ x : x = \min \|x_i - z_j\|_2 : x_i \in SL_i, z_j \in SO_j \} \quad (18)$$

또, 모든 링크 중에서 충돌 위험이 있을 정도로 $d_{i,j}$ ($i = 1, 2, \dots, N$, $j = 1, 2, \dots, J$, J 는 장애물의 수) 가 작은 링크들의 집합을 A 라 할때, 충돌 위험 회피에 영향을 주는 i 번째 관절의 미소 회전(충돌위험이 있는 링크가 장애물과 멀어지는 방향으로의 미소 회전)에 의한 장애물과 충돌 위험이 있는 p 번째 링크 L_p 사이의 거리의 변화를 $cdp_{p,i}$ (change of distance) 라하고, i 번째 관절의 미소 회전에의해 만들어지는 모든 링크와 장애물사이의 거리의 변화의 합을 scd_i (sum of change of distance)라 하자. 이때 충돌위험이 있는 p 번째 링크 L_p 에 대한 i 번째 관절의 충돌 회피 기여도 $yp_{p,i}$ 를 다음과 같이 구한다.

L_p 에 대한 $cdp_{p,i}$ 가 크면 i 번째 관절은 충돌 위험이 있는 p 번째 링크에 대하여 충돌 회피 기여도 가 큰 것이다. 그리고 만일 scd_i 가 크면 i 번째 관절의 미소회전이 로봇트의 링크 전체를 장애물에서 멀어지게하여 로봇트가 주어진 작업을 수행하는 중에 장애물과의 충돌 위험이 작아질 것이다. 따라서 $yp_{p,i}$ 를 구하는 데 $cdp_{p,i}$ 와 scd_i 를 언어적 변수 PB (Positive Big), PS (Positive Small), Z (zero), NS (Negative Small), NB (Negative Big) 으로 하여 이것을 건전부호한 퍼지법칙 사용한다. 퍼지 규칙은 표 1.과 같이 하였다. 표 1.에서 후건부 $yp_{p,i}$ 의 언어적 변수는 PVL (Positive Very Large), PL, PM, PS, PVS (Positive Very Small), Z, NS, NM, NL으로 하였다. 그림2., 그림3.은 각각 $cdp_{p,i}$ 와 scd_i 그리고 $yp_{p,i}$ 에 대한 언어적 변수의 Membership Function 이다. 퍼지 추론 방법은 Zadeh 의 Max-Min 방법 [15]을 사용하였고 추론 결과에 대한 Defuzzification은 Center Of Gravity 방법[16]을 사용하였다.

충돌 위험이 있는 링크가 여러개이고 한 관절의 움직임이 여러개의

충돌 위험이 있는 링크들에 영향을 줄 경우, 그 관절에 대한 충돌 회피 기여도는 그 관절에 의하여 충돌 위험의 영향을 받는 모든 링크들에 대한 충돌 위험 회피 기여도의 평균 값으로 결정한다.

$$y_i^* = \sum_{j=1}^p \frac{y_{j,i}}{p} \quad (19)$$

이렇게 함으로써 모든 충돌 위험이 있는 링크에 대한 그 관절의 충돌 회피 기여도를 고려 할 수가 있다. 여기서 관절의 회전 방향은 여러 충돌 위험이 있는 링크중 어느 하나가 장애물과 멀어지게 하는 방향으로 선택한다 (그 링크와 장애물간의 거리의 변화율이 Positive로 되는 방향). 만일 i 번째 관절을 p 번째 링크가 장애물을 회피하는 방향으로 회전시킬 때, 또 다른 충돌 위험이 있는 $(p+1)$ 번째 링크는 장애물에 가까이 간다면, $c_{dp,i}$ 는 양수, $c_{dp+1,i}$ 는 음 수가 되는 바 i 번째 관절의 충돌 회피 평균 기여도는 영에 가까게 된다. 따라서 관절은 움직이지 못하여 두 링크에 대한 충돌이 발생하지 않을 것이다.

여유자유도 로봇의 경우 i 번째 관절에 대한 충돌 회피 기여도 y_i^* 가 여유자유도 갯수 보다 많을 경우 충돌 회피 기여도가 큰 것부터 여유자유도 수 만큼 선택 하는 바, 충돌 회피 기여도의 크기가 같아서 선택이 곤란한 경우 관절에 대한 조작 성능 지수가 작은 것을 선택하여 전체적인 조작 성능 지수를 될수있던 크게 해준다.

이제 이렇게 선택된 i 번째 관절에 대한 충돌 회피 기여도 y_i^* 에 따라 관절의 움직임을 결정해보자. y_i^* 가 클수록 i 번째 관절의 설정된 방향으로의 움직임은 장애물을 회피하는데 크게 기여하게 되므로 많이 움직여 주어야 한다. 따라서 로봇의 i 번째 관절의 속도를 조정할 수 있는 식(14)의 G_i 를 작게 해주어야 한다. 또 y_i^* 가 작을 경우 ("0" 보다 작은 경우도 포함한다), 식(14)의 G_i 를 크게 해주어 해당 관절을 거의 움직이지 못하게 해야 한다. 따라서 G_i 는 이러한 관계식을 만족해야 하므로 다음식과 같이 결정 하였다.

$$G_i = \begin{cases} 1, & y_i^* \leq 0, \\ \frac{G_{min} - 1}{Y_{max}} y_i^* + 1, & 0 < y_i^* \leq Y_{max} \end{cases} \quad (20)$$

여기서 G_{min} 은 가중치의 최소값이고, Y_{max} 는 충돌 회피 기여도의 최대값이다.

4. 모의 실험결과

모의실험(simulation)은 그림 4 와 같은 3 링크 planar type 여유자유도 로봇을 대상으로 한다. 로봇의 각 링크의 길이는 암1(Arm1)이 400 mm, 암2(Arm2)가 400mm, 그리고 암3(Arm3)가 250mm이다. 본 실험에서 충돌 회피 기여도 y_i^* 와 가중치 G_i 의 관계를 나타내는 식(20)에서의 G_{min} 과 Y_{max} 은 각각 0.001, 그리고 16 으로 하였다. 제안한 방법의 타당성을 보기위해 로봇과 장애물의 위치에 따라 2 가지 경우로 모의 실험을 하기로 한다.

경 우 1. 장애물이 로봇 원편에 있는 경우.

초기 위치는 $q_1 = 100^\circ$, $q_2 = -600^\circ$, $q_3 = -70^\circ$ 이고, 로봇가 추적할 궤적은 $y = -0.193x + 613.50$, $70. \leq x \leq 453.46$ 이며 로봇의 end-effector의 초기 위치는 A이다. 그림5(b)에서 보면, 충돌 위험이 큰 링크는 링크1이고 충돌 회피기여도가 가장 큰 관절은 관절 1 임을 알 수 있다. 그림 6(a)와 6(b)에서 볼때, 처음 장애물과 링크가 충돌 위험이 없을때는 두 경우의 속도가 같다가 time 이 1 sec 정도때

그림 6(b)의 관절 1의 속도가 갑자기 감소함을 알 수 있다. 즉, 이때 장애물과 링크 1이 충돌위험이 있는 경우인데 이때부터 제안한 제어방법이 충돌회피를 위해 관절 1을 선택하여 장애물과 충돌하지 않는 방법으로 움직여 주고 있다.

경 우 2. 로봇가 장애물을 감싸고 있는 경우

초기 위치는 $q_1 = 110^\circ$, $q_2 = 110^\circ$, 그리고 $q_3 = -100^\circ$ 이며, 추적궤적은 $y = -0.7195x + 287.8$, $219.78 \leq x \leq 400$, 이며, 로봇의 end-effector의 초기 위치는 A이다. 그림 7(b)에서는 링크 1이 장애물과 일정 거리 이내를 침범하지 못하고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 본 논문에서 제안한 제어 방법은 충돌 회피를 위해 관절 1을 선택 하였다. 관절 1은 충돌 위험이 감지 되는 순간 (그림 8(b)에서 속도 곡선이 갑자기 뛰는 순간) 관절 1을 CCW방향으로 ($v_{q1} > 0$)으로 하여 장애물을 회피 하려 하고 있으며 그렇게 하여 충돌 위험거리를 벗어나면 다시 그 순간부터 조작 성능 지수에 의한 가중치를 따라 속도가 결정되어 궤적 추적을 하고 (이 경우 $v_{q1} < 0$) 그렇게 해서 또 충돌 위험거리로 들어 오면 CCW방향으로 가는 동작을 반복함으로써 각 속도 곡선은 잠시 진동하는 양상을 띄고 있다. 이러한 현상의 이유는 본 논문에서 제시한 방법이 충돌 회피에 기여하는 관절의 속도를 결정 할 때 장애물과 충돌위험이 있는 링크와의 거리를 전혀 고려하지 않고 그 관절을 장애물과 멀어지는 방향으로 미소 회전 시켰을 때의 장애물과 충돌 위험이 있는 링크와의 거리의 변화를 고려하기 때문이다. 본 논문의 방법에서 장애물과 링크 사이의 거리는 다만 로봇의 어떤 링크가 장애물과 충돌 위험이 있는가를 결정하는 변수가 될 뿐이다. 따라서 링크가 충돌 위험 거리에 있으면 충돌 회피에 영향을 주는 관절이 충돌을 피하기 위한 방향으로 갑자기 회전하는 현상이 발생한다.

로봇과 장애물의 위치에 따른 경우 1 과 경우 2의 실험에서 알 수 있듯이 본 논문에서 제안한 신경 최적화 회로와 퍼지 이론을 이용한 여유자유도 로봇의 제어방법은 장애물이 있는 환경하에서 주어진 궤적을 잘 추적 할 수 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

장애물이 있는 환경하에서 여유자유도 로봇을 제어하기 위한 방법으로 신경망 최적화 회로와 퍼지 이론을 사용하였다. 여유자유도 로봇의 장애물 회피는 여유자유도관절 각속도를 변경시키는 방법을 사용하였는 바, 관절 각속도는 제안된 충돌 위험 기여도에 따라 결정된다. 충돌 회피 기여도는 각 관절의 장애물과 충돌 위험이 있는 링크와 멀어지는 방향으로의 미소회전에 따른 장애물과 충돌위험이 있는 링크와의 최소 거리의 변화 및 로봇 전체 링크와 장애물간의 거리의 변화의 합에 의해서 결정되며 로봇의 각 링크와 장애물간의 최소 거리는 간단한 기하학적 방법을 사용하였다. 제안된 방법은 로봇과 장애물간의 위치에 따라 3가지 경우를 예로 그 유용성을 입증하였다. 추 후과제로는 장애물 회피시 로봇의 자세로 나타날 수 있는 특이자세의 회피 문제와 모의 실험에서 본 바와 같이 로봇가 장애물과 충돌 위험이 있는 거리에 있을 때 관절의 각 속도가 갑자기 변화 하는 문제 등은 연구 해야할 과제이다.

참고 문헌

- 1] M.S.Braniky and W.S.Newman, "Rapid Computation of configuration Space Obstacle," In. Proc. IEEE, Int. conf. on Robotics and Automation, pp 304 - 310,1990
- 2] Q.Ge and J.M.McCarthy,"Equation for Boundaries of Joint Obstacles for planar Robot," In. Proc. IEEE, Int. Conf. on Robotics and Automation, pp 164 - 169,1989

3] C.A.Klein and C.Huang, "Review of pseudo inverse control for kinematically redundant manipulators, "IEEE Trans. on Syst, Man and Cybernetics, Vol.SMC-13,pp 245 - 250,1983

4] T.Yoshikawa, Manipulability of robotic Machism, "Int.J.of Robotics Research Vol.4, No.2, pp 3 - 9. summer 1985.

5] S.Mitsuji and F.katsubisa, "Robot control in the neighborhood of singular points,"IEEE J. of Robotics and Automation, Vol.4 No.3, pp. 303 - 309, 1988.

6] P.khosla and R.Volpe, "Superquadric Artificial potential for obstacle Avoidance and Approach," In.Proc. of IEEE Robotics and automation, Vol.3 pp 1778 - 1789, Philadelphia, April,1988.

7] R.volpe and R. Volpe, "Artificial with elliptical isopotential contours for obstacle avoiance,"In.Proc. of IEEE Decision and control. pp 180 - 185, Los Angeles, deccember,1987.

8] E.G.Gilbert,D.W.johnson, and S.S.Keerthi, "A Fast procedure for computing the distance between complex objects in Three-Dimensionak Space,"Int.J. of Robotics and automation, Vol.4,No.2,pp 193 - 203,1988

9] Y.Nakamura, H.Hanafusa, and T.Yoshikama,"Task-priority Based Redundancy Control of Robot Manipulators,"Int.J. of Robotics Reserach, Vol.6,No.2,pp 3 - 15,summer,1987.

10] O.Khatib,"Real - Time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots," Int.J.of Robotics Research, Vol.5, No.1,pp 90 - 98, Spring, 1986.

11] M.Kircanski and M.Vukobratovic," Contribution to Control of Redundant Robotics Manipulators in An Environment with Obstacles, "Intl.j.of Robotics Research, Vol.5, No.4, pp 112 - 119, winter, 1986.

12] W.K.Hyun, and I.H.Suh, and J.H.Lim,"Resolved Motion Control of Redundant Robot Manipulators by Neural Optimization Network," In. Proc. of IEEE IROS '90 pp 627 - 634, Japan, July, 1990

13] 현 응근, 서 일홍, "신경망 최적화 회로에 의한 여유자유도를 갖는 로봇트의 제어," 대한 전기공학회, 39권, 6호, pp 638-648, 1990

14] Y.C.Chen and M.Vidyasagar," In.Proc.IEEE Int.Conf.on Robotics and Automation, pp 202 - 207, 1988

15] C.C.Lee, "Fuzzy Logic in Control Systems : Fuzzy Logic Controller, PartII ," IEEE Trans. on Man, And Cybernetics, Vol.20, No.2, pp 419 - 435, 1990

16] L.A.Zadeh, "Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Process," IEEE Trans. on Syst., Man, And Cybernetics, Vol. ,SMC-3, No.1, pp 28 - 44, 1973

17] J.c.Platt and A.H.Ran, "Constraintes differential optimization," Neural Information processing System, American institute of physics, pp612 - 621, New York 1988.

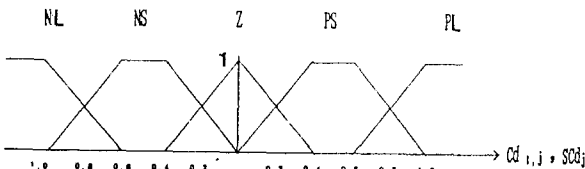


그림 2 $Cd_{i,j}$ 와 S_{Cd_j} 의 퍼지 값에 대한 멤버십 함수
Fig. 2 Membership functions of fuzzy values for $Cd_{i,j}$ and S_{Cd_j} , where $Cd_{i,j}$ and S_{Cd_j} are normalized to unity.

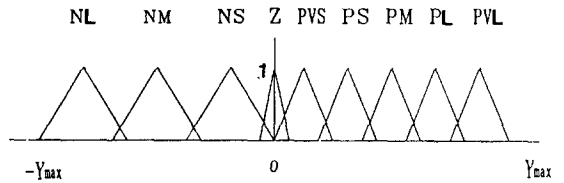


그림 3 $Y_{i,j}$ 의 퍼지 값에 대한 멤버십 함수
Fig. 3 Membership functions of fuzzy values for $Y_{i,j}$

표 I. $Y_{i,j}$ 에 대한 퍼지 룰 테이블.
Table I. Fuzzy Rules to Determine $Y_{i,j}$

S_{Cd_j}	PL	PS	Z	NS	NL
$Cd_{i,j}$	PL	PS	Z	NS	NL
PL	PVL	PL	PM	PM	PM
PS	PM	PS	PS	PS	PVS
Z	Z	Z	Z	Z	Z
NS	NS	NM	NM	NM	NM
NL	NL	NL	NL	NL	NL

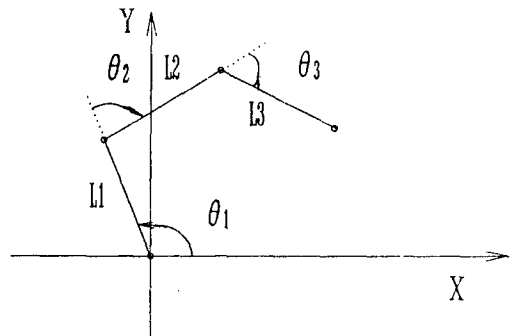


그림 4 3 링크를 갖는 Planar Type의 여유자유도 로봇트.
Fig. 4 Planar Type Redundant Robot Manipulator with 3 DOF's

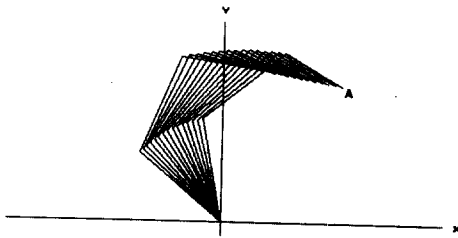


그림 5(a) CASE (i)에 대한 로봇트 추적 궤적
(장애물이 없는 경우)
Fig. 5(a) The Robot Motion for the CASE (i).
(without Obstacle)

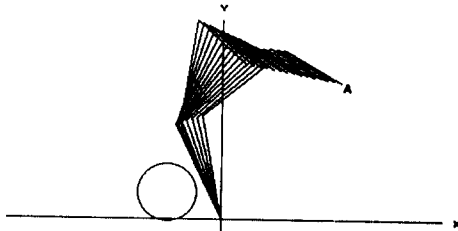


그림 5(b) CASE (i)에 대한 로봇트 추적 궤적
(장애물이 있는 경우)
Fig. 5(b) The Robot Motion for the CASE (i).
(with Obstacle)

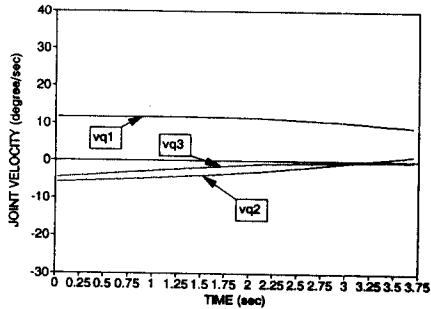


그림 6(a) CASE (i)에 대한 각속도 곡선
(장애물이 없는 경우)
Fig. 6(a) Joint Velocities for the CASE (i)
(without Obstacle)

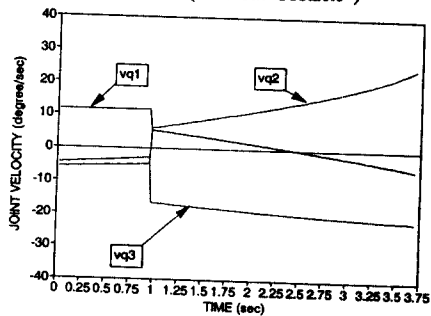


그림 6(b) CASE (i)에 대한 각속도 곡선
(장애물이 있는 경우)
Fig. 6(b) Joint Velocities for the CASE (i)
(with Obstacle)

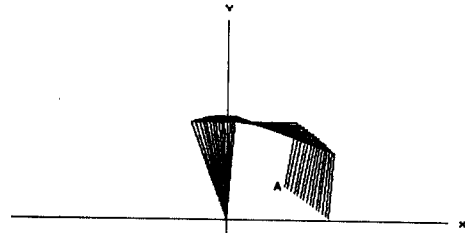


그림 7(a) CASE (ii)에 대한 로봇트 추적 궤적
(장애물이 없는 경우)
Fig. 7(a) The Robot Motion for the CASE (ii).
(without Obstacle)

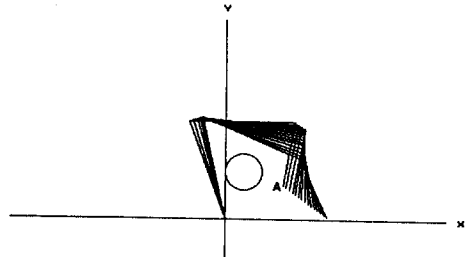


그림 7(b) CASE (ii)에 대한 로봇트 추적 궤적
(장애물이 있는 경우)
Fig. 7(b) The Robot Motion for the CASE (ii).
(with Obstacle)

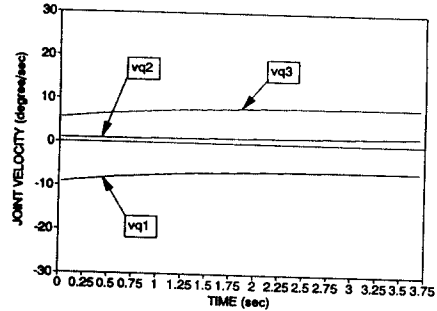


그림 8(a) CASE (ii)에 대한 각속도 곡선
(장애물이 없는 경우)
Fig. 8(a) Joint Velocities for the CASE (ii)
(without Obstacle)

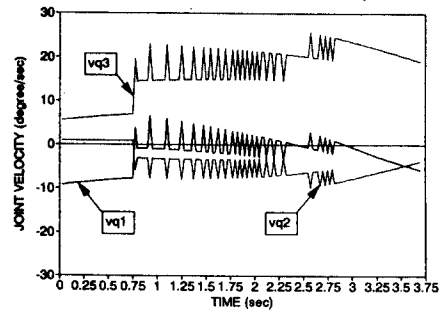


그림 8(b) CASE (ii)에 대한 각속도 곡선
(장애물이 있는 경우)
Fig. 8(b) Joint Velocities for the CASE (ii)
(with Obstacle)