

論文 96-33B-9-2

전위장을 이용한 로봇 경로계획의 구조적 Local Minimum을 극복하는 경로계획 방법

(A Trajectory Plannings Avoiding Structural Local Minimum Problem in Robot Path Planning Using Potential Field)

南 憲 星 *, 李 志 弘 **, 柳 鎔 *

(Heon Seong Nam, Ji Hong Lee, and Joon Lyou)

요 약

장애물 회피 경로계획중 인위적 전위장 개념을 사용하는 방법은 매니퓰레이터가 움직이는 경로상에 장애물이 존재할 경우 매니퓰레이터는 장애물에 부딪쳐서 더 이상 움직일 수 없으므로 목표지점에 도달할 수 없다. 이러한 문제는 구조적 local minimum의 한 경우이다. 본 논문에서는 장애물이 매니퓰레이터의 진행경로상에 위치해 있을 경우 발생하는 구조적 local minimum 문제를 해결하는 방법을 제안한다. 매니퓰레이터가 임의의 경유지점을 통과하여 목표지점에 도달하도록 하는 방법으로서 임의의 경유지점을 선정하기 위해 visual region 개념을 제안한다. 제시된 개념의 타당성을 확인하기 위하여 두가지 시뮬레이션 예제에 대해서 2 자유도 매니퓰레이터와 3자유도 매니퓰레이터를 사용하여 시뮬레이션을 수행한다.

Abstract

When artificial potential field approach is used to avoid obstacle, the problem can be occurred in case that manipulator selects the path which across over an obstacle among paths. In this case manipulator can't reach the desired goal from obstacle. This problem is a case of structural local minimum. So this paper proposes the method to solve structural local minimum in this case. The method is that the manipulator goes via temporary goal. This paper proposes that visual region concept to select the temporary goal. The temporary goal is selected on the border of the visual region. To prove its effectiveness, two simulation examples are done by two link manipulator in two dimension and by three link manipulator in three dimension.

I. 서 론

장애물 회피 경로계획에는 광역적인(global) 방법과

지역적인(local) 방법이 있다. 광역적인 경로계획법은 매니퓰레이터를 구동시킬 작업공간상의 환경을 미리 알고 매니퓰레이터의 경로를 계획하는 방법으로서 작업공간상에 장애물이 존재할 경우 이를 회피할 수 있는 경로를 계획할 수 있다. 현재 산업공정에 쓰이는 매니퓰레이터들은 대부분 광역적인 경로계획법에 의해서 경로를 계획한다. 광역적인 경로계획법은 미리 환경을 알고서 경로를 계획했으므로 가장 안전한 경로계획법이다. 그러나 광역적인 경로계획법은 매니퓰레이터의 자유도가 적은 것에는 유용하지만, 자유도가 증가하면 그에 지수적으로 비례하여 계산시간이 증가한다^[1]. 또한, 우주, 해저등과 같은 극한 상황에서 매니퓰레이터

* 正會員, 忠南大學校 電子工學科

(Dept. of Electronics, Chungnam National Univ.)

** 正會員, 忠南大學校 메카트로닉스工學科

(Dept. of Mecatronics, Chungnam National Univ.)

※ 본 연구는 한국과학재단의 특정연구지원으로 이루어졌음(과제 번호: 94-0100-15-01-3)

接受日: 1995년 3월 28일, 수정완료일: 1996년 9월 9일

를 구동시킬 경우 미리 작업공간상의 환경을 알 수 없기 때문에 광역적인 경로계획은 할 수 없다.

지역적인 경로계획법은 말 그대로 매니플레이터가 목표위치에 도달하기 위하여 움직일 다음 위치를 목표 위치와 감지된 장애물에 대한 정보를 이용하여 구하는 경로 계획법으로서 근본적으로 인위적 전위장(artificial potential field) 개념에 근거를 두고 있다. 인위적 전위장 개념은 1980년대 초에 제시된 개념으로서 주로 미지의 환경하에서 구동하는 이동로봇의 경로계획에 사용되었고, 매니플레이터의 경로계획에 대해서도 연구되어 오고 있다. 인위적 전위장 개념은 장애물에서는 미는 힘을 목표위치에서는 끄는 힘을 생성하여 매니플레이터가 장애물을 회피하면서 목표위치에 도달하도록 하는 개념이다^[1-4]. 이 방법은 미지의 환경하에서 작업을 수행할 수 있고, 매니플레이터의 자유도가 증가하더라도 계산시간의 증가는 광역적인 경로 계획법보다 훨씬 작다. 그러나, 전위장이 평형상태에 있을 경우(끄는 힘과 미는 힘이 같은 상태를 계속 유지하는 경우)와 목표위치에 도달하기 위한 여러 경로중 장애물을 통과해서 도달하는 경로를 선택할 경우 구조적(structural) local minimum에 빠진다. 이러한 구조적 local minimum 문제를 해결하기 위한 연구들이 현재 진행되고 있는데^[11, 21], 단편적인 해결 방법으로 [8]에서는 구조적인 local minimum 위치에 가상의 장애물을 두어 그 장소로 로봇이 이동하는 것을 막고 있는 등의 연구가 알려져 있고 대부분의 경우에는 주어진 과제에 따라 직관적인 방법이 이용되고 있으며 로봇의 기구학적인 특성이 상당히 비선형적이며 고려되는 장애물의 모양도 로봇의 각 링크에 비선형적인 영향을 미치기 때문에 이러한 구조적인 local minimum에 빠지지 않는 해석적인 방법은 아직 제안되어 있지 않다.

본 논문에서는 이러한 local minimum 문제를 근본적으로 해결한다기 보다는 지금까지의 직관적인 방법에 비해 조직적이고 순차적인 과정을 통해 여러 실제적인 상황에서 이용될 수 있는 방법을 제안하고자 한다. 핵심 착안점은 매니플레이터가 초기위치에서 목표 위치에 도달하기 위한 여러 경로중 장애물을 통과하는 경로를 선택함으로써 발생하는 구조적 local minimum에 빠지지 않도록 하기 위하여 목표 자세의 각 링크에서 보이는 지역에 링크의 가상 목표지점을 정하고 매니플레이터가 이 지점을 경유하여 목표 자세에 도달하도록 하는 visual region 개념을 제시한다. 이러한 개

념은 local minimum을 항상 피할 수 있다고 증명하지는 못하였지만 현실적인 여러 경우에 원활하게 운동이 이루어짐을 알 수 있다. 이를 검증하기 위하여 여유 자유도를 배제한 상황을 가정하여 먼저 2차원 공간상에서 2 자유도를 가지는 매니플레이터를 대상으로 두 가지 형태의 구조적 local minimum에 대한 시뮬레이션을 수행하고 그 다음에 3차원 공간상에서 3 자유도를 가지는 매니플레이터를 대상으로 두 가지 형태의 구조적 local minimum에 대한 시뮬레이션을 수행한다.

본 논문의 구성은 2장에서는 전위장 생성에 대해서 간략히 다루었고, 3장에서는 제시된 visual region에 대해서 소개하고, 4장에서는 3장에서의 visual region의 유용성을 검토하기 위하여 2차원과 3차원상에서 각각 두 가지 형태의 장애물에 대해서 시뮬레이션을 수행한다.

II. 전위장 생성

장애물을 회피하면서 이동 로봇 및 매니플레이터의 지역적인 경로계획을 실시간으로 수행하는데 전위장을 이용한 방법이 많이 연구되어 왔다^[1-4]. 전위장 개념의 정의는 목표 위치(goal position)에서 인력(attractive force)을 작용하고 장애물에서는 척력(repulsive force)을 작용하는 개념으로 작업공간상에서 주로 생성된다. 본 논문에서는 전위장의 힘을 위치의 변위로 바꾸어 생각한다. 즉, 끌어당기는 힘은 끌어당기는 힘의 발생으로 인한 위치 변위, 미는 힘은 장애물이 밀음으로써 발생하는 위치 변위로서 생각한다.

매니플레이터의 기구학 방정식은 다음과 같다.

$$\mathbf{x} = \mathbf{f}(\theta) \quad (1)$$

여기서 \mathbf{x} 는 종단의 위치벡터이고 θ 는 관절각 벡터로서 일반적으로 정의되는 방법에 의하여 결정된다^[7]. 식(1)을 시간에 대해 미분하면 다음과 같다.

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{J}(\theta) \dot{\theta} \quad (2)$$

여기서 $\dot{\mathbf{x}}$ 는 종단의 속도 벡터이고 $\dot{\theta}$ 는 관절각 속도 벡터이고, $\mathbf{J}(\theta)$ 는 자코비안으로서 작업공간상의 종단의 속도와 조인트 공간상의 관절각 속도의 관계를 나타낸다. 식(2)를 변위개념으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\Delta x &= J(\theta) \Delta \theta \\ \Delta \theta &= J^{-1} \Delta x\end{aligned}\quad (3)$$

여기서 $\Delta \theta$ 는 관절각 변위벡터이고 Δx 는 종단의 위치 변위벡터로서 목표위치에서 끄는 변위와 장애물에서 미는 변위로 표현할 수 있다. 이를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\Delta x = \Delta x_{attr} + \Delta x_{repul} \quad (4)$$

여기서 Δx_{attr} 는 장애물이 끌어당기는 힘에 의하여 나타나는 위치변위벡터이고, Δx_{repul} 는 장애물이 미는 힘에 의하여 나타나는 위치 변위벡터이다.

Δx_{attr} 는 다음과 같이 구한다.

$$\Delta x_{attr} = k_{attr}(x_d - x) \quad (5)$$

여기서 x_d 는 목표 위치벡터, x 는 매니퓰레이터의 현재 위치벡터, k_{attr} 는 이득행렬이다. Δx_{attr} 는 거리오차에 이득을 곱하는 형태로 주어져서 오차를 줄이는 방향으로 작용한다. 작업공간에서 생성된 변위를 조인트 공간으로 다음과 같이 대응시킨다.

$$\Delta \theta_{attr} = J^{-1} \Delta x_{attr} \quad (6)$$

위와 같은 끌어당기는 힘에 의한 변위 생성방법은 매니퓰레이터의 종단을 작업공간상의 원하는 위치로 옮기는 경우에 사용되고, 매니퓰레이터를 원하는 자세로 유지시키려면 조인트 공간상에서 끌어당기는 힘에 의한 변위를 생성해야 한다. 이를 식으로 나타내면 (7)과 같다.

$$\Delta \theta_{attr} = k_{attr}(\theta_d - \theta) \quad (7)$$

여기서 θ_d 는 원하는 관절각 벡터이고, θ 는 현재의 관절각 벡터이고, k_{attr} 는 이득행렬이다. $\Delta \theta_{attr}$ 는 위치변위에 의한 관절각 변위벡터이다.

장애물의 미는 힘에 의한 변위는 장애물과 매니퓰레이터와의 거리함수와 관계된다. 거리가 가까우면 큰 미는 변위를 거리가 멀면 작은 미는 변위를 일으킨다. 즉 미는 힘에 의한 변위는 거리함수의 역수를 취해서 이의 gradient를 취하여 구한다.

$$\Delta x_{repul} = -\eta \begin{bmatrix} \frac{\partial \rho}{\partial x} \\ \frac{\partial \rho}{\partial y} \\ \frac{\partial \rho}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (8)$$

여기서 $\rho(x, y, z)$ 는 거리함수의 역이고, η 는 이득이고, Δx_{repul} 은 미는 위치변위벡터이다. 작업공간상의 미는 변위를 조인트 공간상으로 대응시킬 경우 장애물과 매니퓰레이터의 가장 가까운 곳까지 자코비안을 구하여 대응시킨다.

$$\Delta \theta_{repul} = k_{repul} J_0^{-1} \Delta x_{repul} \quad (9)$$

여기서 $\Delta \theta_{repul}$ 는 미는 위치변위에 의한 관절각 변위벡터이고, J_0 는 장애물과 매니퓰레이터의 가장 가까운 곳까지 구한 자코비안행렬이고, k_{repul} 은 이득행렬이다. 자코비안이 정방행렬이 아닐 경우 의사역행렬을 이용한다.

전위장을 이용하여 장애물 회피 경로를 계획할 때 목표자세에 도달하기 위한 여러 경로중 장애물을 통과하는 경로를 선택할 수 있다. 이를 그림으로 표현하면 그림 1과 같다.

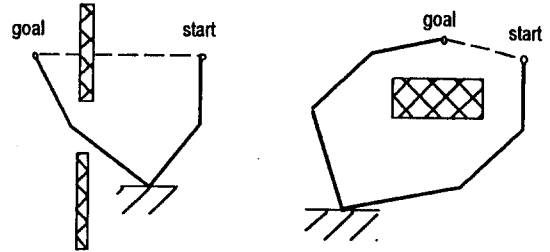


그림 1. 구조적 local minimum
Fig. 1. Structural local minimum.

그림 1에서 점선은 전위장에 의하여 선택된 경로를 나타낸다. 이러한 경로가 선택되면 매니퓰레이터는 장애물 때문에 목표위치에 도달할 수 없다. 매니퓰레이터가 목표위치에 도달하기 위한 여러 경로중 장애물을 통과하는 경로를 선택하여 목표위치에 도달할 수 없을 때 매니퓰레이터가 구조적 local minimum에 빠졌다고 한다^[1].

III. visual region을 이용한 가상 목표 설정

전위장 개념을 이용한 다관절 로봇의 장애물 회피 경로 계획시 장애물로 인해서 생기는 구조적 local minimum 문제를 해결하기 위하여 본 논문에서는 visual region 개념을 제시한다. 이 방법의 착안은 해석적이라기 보다는 직관적인 방법이라고 볼 수 있으나

두 가지 형태의 장애물 형태(등가적인 크기가 유한한 경우와 무한한 경우에) 적용되어 원하는 결과를 제공할 수 있다.

visual region은 매니퓰레이터의 목표 자세의 각 링크에서 장애물을 포함하여 관측할 수 있는 모든 지역을 말한다. visual region 개념은 이러한 지역에 가상 목표지점을 설정하고 매니퓰레이터가 이 지점을 경유하여 최종목표지점에 도달하도록 하는 개념으로서, 이렇게 할 경우 장애물로 인한 구조적 local minimum 문제를 해결할 수 있다. 예로서, 사각형의 장애물과 2 자유도의 매니퓰레이터에 대해서 visual region 개념을 알아본다. visual region은 그림 2와 같다.

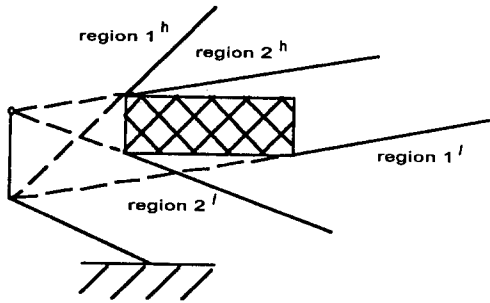


그림 2. visual region
Fig. 2. Visual region.

여기서 region 1은 링크 1의 visual region이고, region 2는 링크 2의 visual region이다. 위의 그림의 경우 각 링크에 대한 visual region이 위, 아래 두 지역으로 나타난다. 매니퓰레이터가 각 링크의 visual region중 위의 지역에 각각의 가상 목표지점을 설정한다면 구조적 local minimum에 빠진다. 그러나 밑의 지역에 가상 목표지점을 설정한다면 장애물을 회피하면서 목표지점에 도달할 수 있다.

한 링크에 대해서 visual region이 여러 개 존재할 경우, visual region의 선택에 관한 규칙이 필요하다. 규칙은 다음과 같다.

- i) 매니퓰레이터의 링크가 도달할 수 있는(reachable) visual region을 선택한다.
- ii) visual region이 베이스를 포함할 경우에는 이 visual region을 선택한다.
- iii) 베이스를 포함하지 않는 경우에는 링크에 가까운 visual region을 선택한다.

각 링크의 visual region이 선택되면 선택된 visual region의 경계에 가상 목표지점을 설정하고 이 지점에서 ρ 는 변위는 가중치를 둔다. 가중치의 크기 순은 다음과 같다.

- i) 베이스에 가까우면서 visual region이 베이스를 포함한 경우
- ii) 베이스에서 떨어졌지만 visual region이 베이스를 포함한 경우
- iii) 베이스에 가깝지만 visual region이 베이스를 포함하지 않는 경우
- iv) 베이스에서 떨어졌고 visual region이 베이스를 포함하지 않는 경우

가상의 목표지점에서 ρ 는 변위는 다음과 같다.

$$\Delta x_{temp_i} = \omega_i \text{sgn}(x_{temp_i} - x_i), i = 1, 2, \dots, n. \quad (10)$$

여기서 x_{temp_i} 는 i 번째 링크의 임의의 목표 위치벡터이고 x_i 는 i 번째 링크의 현재의 위치벡터이고 ω_i 는 가중치행렬이다. Δx_{temp_i} 는 i 번째 링크의 가상 목표지점에서 ρ 는 위치변위벡터이다. 매니퓰레이터의 링크가 자신의 visual region에 들어오면 가상 목표지점에서 ρ 는 변위는 0으로 한다.

작업공간상의 변위를 조인트 공간으로 대응시키기 위하여 자코비안을 이용한다. 자코비안은 베이스부터 각 링크에 대한 자코비안을 사용한다.

$$\Delta \theta_{temp_i} = J_i^{-1} \Delta x_{temp_i} \quad (11)$$

여기서 J_i 는 i 번째 링크까지의 자코비안 행렬이고, 정방행렬이 아닐 때에는 의사 역행렬을 이용한다. $\Delta \theta_{temp_i}$ 는 가상 목표지점에서 ρ 는 위치변위벡터에 대한 관절 각 변위벡터로서 각 링크에 대해서 구해진다. 매니퓰레이터에 대한 가상 목표지점에서 ρ 는 관절각 변위벡터는 각 링크에 대한 관절각 변위벡터를 모두 더함으로써 구해진다.

$$\Delta \theta_{temp} = k_{temp} (\Delta \theta_{temp_1} + \Delta \theta_{temp_2} + \dots + \Delta \theta_{temp_n}) \quad (12)$$

여기서 k_{temp} 는 이득행렬이고 $\Delta \theta_{temp}$ 는 가상 목표지점에서 ρ 는 관절각 변위벡터이다.

총 변위는 식(13)과 같다.

$$\Delta \theta = \Delta \theta_{attr} + \Delta \theta_{repul} + \Delta \theta_{temp} \quad (13)$$

여기서 $\Delta\theta$ 는 전체적인 관절각 변위벡터이다.

IV. 시뮬레이션 결과

시뮬레이션 1

시뮬레이션 대상은 수직 평면상을 움직이는 2 자유도 매니퓰레이터를 대상으로 삼았다. 대상매니퓰레이터의 각 링크의 위치는 다음과 같다.

$$p_{x1} = l_1 \cos(\theta_1)$$

$$p_{y1} = l_1 \sin(\theta_1)$$

$$p_{x2} = l_1 \cos(\theta_1) + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2)$$

$$p_{y2} = l_1 \sin(\theta_1) + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2)$$

여기서 l_1 은 링크 1의 길이로서 0.3m이고, l_2 는 링크 2의 길이로서 0.4m이다. 각 링크의 자코비안은 다음과 같다.

$$J_1 = \begin{bmatrix} -l_1 \sin(\theta_1) \\ l_1 \cos(\theta_1) \end{bmatrix}$$

$$J_2 = \begin{bmatrix} -l_1 \sin(\theta_1) - l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) & -l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ l_1 \cos(\theta_1) + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) & l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix}$$

시뮬레이션은 매니퓰레이터가 구조적 local minimum에 빠지도록 선정하였다. 여기서 다루어지는 예제는 서로 다른 상황을 설정하였는데 첫 번째 상황은 장애물이 유한한 공간을 차지하는 경우(그림 7)이고 두 번째 상황은 로봇에게 등가적으로 무한한 크기를 갖는 상황(그림 9)을 설정하였다. 장애물이 무한한 첫 번째 시뮬레이션은 초기 자세 $\theta_1=40^\circ$, $\theta_2=50^\circ$ 에서 최종 자세 $\theta_1=130^\circ$, $\theta_2=-40^\circ$ 까지 장애물을 회피하는 경로를 계획하도록 하였다. 이는 그림 3과 같다.

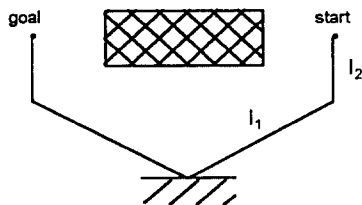


그림 3. 작업 1
Fig. 3. Case 1.

목표지점에서 θ 는 변위는 매니퓰레이터를 원하는 자세로 유지시키기 위하여 식(7)을 이용한다. 여기서

θ_d 는 $(130^\circ, -40^\circ)$ 이고, $k_{attr} = \text{diag}(0.01, 0.003)$ 이다.

장애물에서 미는 변위는 먼저 장애물과 매니퓰레이터와의 최단지점을 구하여야 한다. 최단거리는 직선과 점과의 최단거리를 구하는 식을 이용하여 장애물의 각 모서리와 매니퓰레이터의 링크들, 장애물의 각 선들과 매니퓰레이터의 선단과의 거리 중 가장 작은 거리를 나타내는 점과 선분을 구하고, 선분 위의 최단거리를 나타내는 지점을 선정한다^[5]. 예로서 모서리 (x_2, y_2) 와 링크 2의 한 지점 (px_2', py_2') 사이가 가장 가깝다면 링크 2 위의 한 지점을 구한다. 두 점이 구해졌으므로 두 점 사이의 거리의 역은 다음과 같다.

$$\rho = \frac{1}{\sqrt{(px_2' - x_2)^2 + (py_2' - y_2)^2}}$$

이때 미는 위치변위벡터는 식(8)에 의해서 다음과 같이 구해진다.

$$\Delta x_{\text{repl}} = \begin{bmatrix} (px_2' - x_2)\rho^{\frac{3}{2}} \\ (py_2' - y_2)\rho^{\frac{3}{2}} \end{bmatrix}$$

식(9)를 이용하여 위치변위벡터를 관절각 변위벡터로 변환한다. 이때 자코비안은 다음과 같다.

$$J_{oi} = \begin{bmatrix} -L_1 \sin(\theta_1) \\ L_1 \cos(\theta_1) \end{bmatrix}$$

$$J_{o2} = \begin{bmatrix} -l_1 \sin(\theta_1) - L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) & -L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ l_1 \cos(\theta_1) + L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) & L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix}$$

여기서 L_1 은 링크 1위의 임의의 지점까지의 링크 길이이고, L_2 는 링크 2위의 임의의 지점까지의 링크 길이이다. $\eta=10^{-7}$, $k_{\text{repl}} = \text{diag}(0.001, 0.001)$ 이다.

구조적 local minimum을 피하기 위한 visual region은 그림 4와 같다. 그림 4에서 보는 바와 같이 링크 1은 visual region에 들어와 있고, 링크 2의 visual region은 두 부분으로 나타나지만 베이스를 포함한 지역으로 움직여야 하므로 베이스를 포함한 visual region에 가상 목표지점을 설정한다. 가상 목표지점은 visual region의 경계부분에 선정한다. 링크 2의 가상 목표지점은 그림 5와 같이 구해진다.

그림 5의 가상 목표지점을 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 y_1 &= m(x - x_{2d}) + y_{2d} \\
 y_2 &= -\frac{1}{m}(x - px_2) + py_2 \\
 m &= \frac{y_o - y_{2d}}{x_o - x_{2d}} \\
 x_{temp} &= \frac{(mx_1 + \frac{1}{m}px_2 - y_{2d} + py_2)}{m + \frac{1}{m}} \\
 y_{temp} &= m(x_{temp} - x_{2d}) + y_{2d}
 \end{aligned}$$

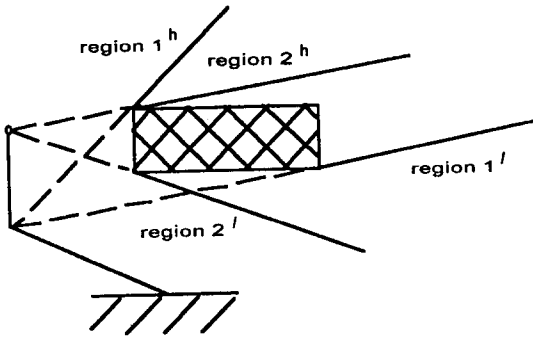


그림 4. 작업 1의 visual region
Fig. 4. Visual region of case 1.

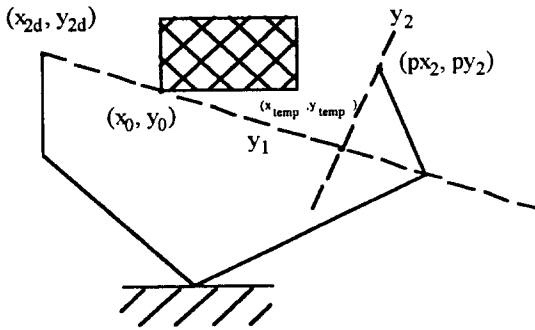


그림 5. 링크 2의 임시 목표지점
Fig. 5. Temporary goal of link 2.

위와 같이 구해진 지점으로 끌어당기는 위치변위벡터는 식(10)에 의해 구해진다. $\omega = \text{diag}(0.1, 0.05)$ 이다. 이 지점으로 끌어당기는 위치변위벡터에 의한 관절각 변위벡터는 식(12)에 의해 구해진다. 여기서 $k_{temp} = \text{diag}(0.25, 0.25)$ 이다.

각각의 관절각 변위를 더하여 시뮬레이션을 수행한 결과 각 관절의 궤적은 그림 6과 같다. 그림 6에서 보는 바와 같이 목표위치에 정확히 일치하지는 않지만 거의 도달함을 확인할 수 있다. 매니플레이터의 형상은 그림 7과 같다.

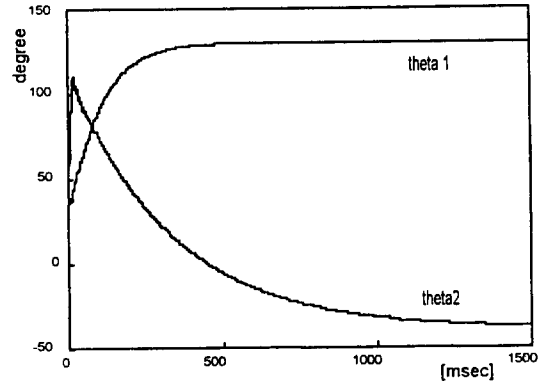


그림 6. 작업 1의 관절의 궤적
Fig. 6. Trajectory of joint angles in case 1.

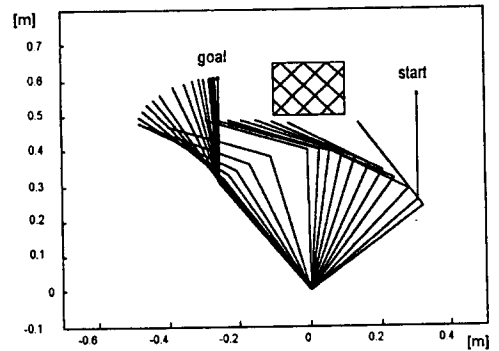


그림 7. 작업 1의 매니플레이터의 형상
Fig. 7. Manipulator Configuration of case 1.

그림 7을 보면 매니플레이터가 장애물을 회피하면서 목표위치에 거의 다다름을 알 수 있다.

두 번째 작업은 초기 자세 $\theta_1=30^\circ$, $\theta_2=60^\circ$ 에서 최종 자세 $\theta_1=150^\circ$, $\theta_2=-20^\circ$ 까지 장애물을 회피하는 경로를 계획하도록 하였다. 이는 그림 8과 같다.

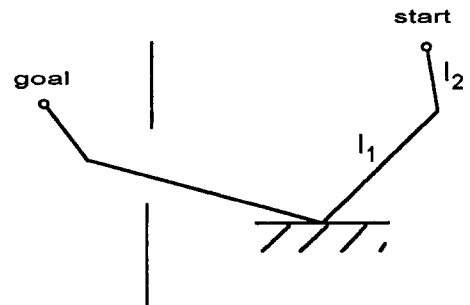


그림 8. 작업 2
Fig. 8. Case 2.

두 번째 작업의 θ 는 변위는 식(7)을 이용한다. 여기서 θ_d 는 $(150^\circ, -20^\circ)$ 이고 $k_{attr} = \text{diag}(0.007, 0.007)$ 이다.

미는 변위는 선분의 끝점과 각 관절사이의 거리, 각 관절과 선분사이의 거리 중 최단거리를 선택하여 첫 번째 경우와 같이 구한다. $\eta = 1.1 \times 10^{-6}$, $k_{repl} = \text{diag}(0.007, 0.007)$ 이다.

두 번째 시뮬레이션의 visual region은 그림 9와 같다.

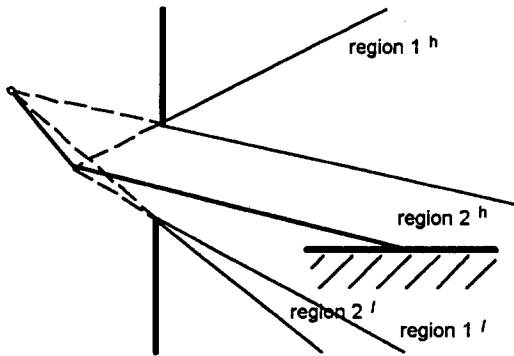


그림 9. 작업 2의 visual region
Fig. 9. Visual region of case 2.

두 번째 시뮬레이션의 경우 visual region이 하나씩 나타나므로 region을 선택할 필요 없이 첫 번째 작업과 같이 가상 목표지점을 설정한다. 가상 목표지점으로 끌어당기는 위치변위벡터는 식(10)에 의해 구해진다. $\omega = \text{diag}(0.1, 0.05)$ 이다. 이 지점으로 끌어당기는 위치변위벡터에 의한 관절각 변위벡터는 식(12)에 의해 구해진다. 여기서 $k_{temp} = \text{diag}(0.2, 0.2)$ 이다.

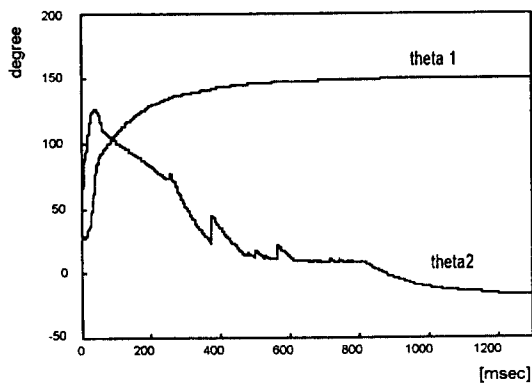


그림 10. 작업 2의 관절의 궤적
Fig. 10. Trajectory of joint angles in case 2.

관절각 변위를 더하여 시뮬레이션을 수행한 결과 각 관절의 궤적은 그림 10과 같다. 그림 10에서 보는 바와 같이 목표위치에 정확히 일치하지는 않지만 거의 다다름을 확인할 수 있다. 매니퓰레이터의 형상은 그림 11과 같다.

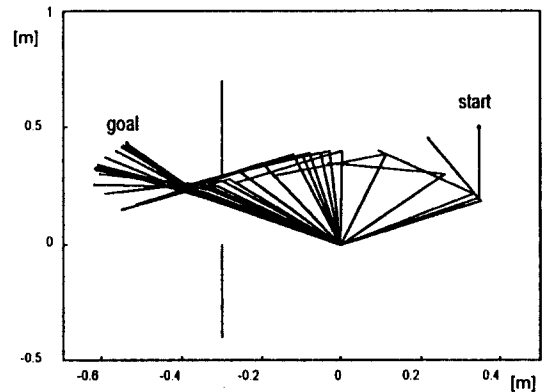


그림 11. 작업 2의 매니퓰레이터의 형상
Fig. 11. Manipulator configuration of case 2.

그림 11을 보면 매니퓰레이터가 장애물을 회피하면서 목표위치에 거의 다다름을 알 수 있다.

여기서 주목할 것은 본 모의 실험에서 사용된 여러 이득들의 값이다. 이들은 최종 정지상태에서의 정상상태 위치 값 자체와 목표 지점과의 오차 등(Steady state response)을 결정하며 또한 움직이는 과도 상태에서 동작의 부드러움이나 진동 등(Transient response)를 결정하게 되는데 일반 PID 제어기의 경우처럼 일정한 결정 규칙을 확립하기는 어렵다. 여기서는 직관을 바탕으로 시행 착오적 방법으로 설정되었으나 기본적인 설정 기준은 다음과 같다. 먼저 정상 상태에서의 필요 조건을 고려하여 각 계수의 크기 비를 결정한다. 이는 인력과 척력일 균형을 이루는 상태가 정상 상태임을 감안하면 장애물에 대한 최대 허용 접근 범위를 미리 설정하면 이로부터 인력과 척력에 관계하는 계수들의 비를 결정할 수 있다. 그리고 다음으로 과도 상태, 즉, 동작 중의 상황을 고려해야 하는데 본 연구에서는 로봇의 기구학적인 요소만을 고려하고 있으나 동력학적인 요소를 포함하는 경우 등에서는 작업이 이루어지는 속도 등을 고려하여 각 계수들의 값을 설정하고 모의 실험을 통하여 약간의 재차 수정이 이루어 지도록 하였다.

시뮬레이션 2

시뮬레이션 대상은 3차원 상을 움직이는 3 자유도 매니퓰레이터를 대상으로 삼았다. 대상매니퓰레이터의 각 링크의 위치는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} p_{x1} &= -l_1 \sin(\theta_1) \\ p_{y1} &= l_1 \cos(\theta_1) \\ p_{z1} &= 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} p_{x2} &= -l_1 \sin(\theta_1) - l_2 \sin(\theta_1) \cos(\theta_2) \\ p_{y2} &= l_1 \cos(\theta_1) + l_2 \cos(\theta_1) \cos(\theta_2) \\ p_{z2} &= l_2 \sin(\theta_2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} p_{x3} &= -l_1 \sin(\theta_1) - l_2 \sin(\theta_1) \cos(\theta_2) \\ &\quad - l_3 \sin(\theta_1) \cos(\theta_2 + \theta_3) \\ p_{y3} &= l_1 \cos(\theta_1) + l_2 \cos(\theta_1) \cos(\theta_2) \\ &\quad + l_3 \cos(\theta_1) \cos(\theta_2 + \theta_3) \\ p_{z3} &= l_2 \sin(\theta_2) + l_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) \end{aligned}$$

여기서 l_1 은 링크 1의 길이로서 0.2m이고, l_2 는 링크 2의 길이로서 0.4m이고, l_3 은 링크 3의 길이로서 0.3m이다. 각 링크의 자코비안은 다음과 같다. 편의상 $\sin(\theta_1) = s_1$ 로 $\cos(\theta_1) = c_1$ 으로 정의한다.

$$J_1 = \begin{bmatrix} -l_1 c_1 \\ -l_1 s_1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$J_2 = \begin{bmatrix} -l_1 c_1 - l_2 c_1 c_2 & -l_2 s_1 s_2 \\ -l_1 s_1 - l_2 s_1 c_2 & -l_2 c_1 s_2 \\ 0 & l_2 c_2 \end{bmatrix}$$

$$J_3 = \begin{bmatrix} -l_1 c_1 - l_2 c_1 c_2 - l_3 c_1 c_{23} & -l_2 s_1 s_2 + l_3 s_1 s_{23} & l_3 s_1 s_{23} \\ -l_1 s_1 - l_2 s_1 c_2 - l_3 s_1 c_{23} & -l_2 c_1 s_2 - l_3 c_1 s_{23} & -l_3 c_1 s_{23} \\ 0 & l_2 c_2 + l_3 c_{23} & l_3 c_{23} \end{bmatrix}$$

시뮬레이션은 매니퓰레이터가 구조적 local minimum에 빠지도록 선정하였다. 첫 번째 작업은 초기 자세 $\theta_1=0^\circ$, $\theta_2=30^\circ$, $\theta_3=40^\circ$ 에서 최종 자세 $\theta_1=180^\circ$, $\theta_2=30^\circ$, $\theta_3=40^\circ$ 까지 z축으로 0.45에서 0.55, x축으로 -1에서 1, y축으로 -0.1에서 0.1까지 차지하고 있는 직육면체 장애물을 회피하는 경로를 계획하도록 하였다. 이는 그림 12와 같다.

목표지점에서 κ 는 변위는 매니퓰레이터를 원하는 자세로 유지시키기 위하여 식(2)을 이용한다. 여기서 θ_d 는 $(180^\circ, 30^\circ, 40^\circ)$ 이고, $k_{attr} = \text{diag}(0.001, 0.001, 0.001)$ 이다.

장애물에서 미는 변위는 먼저 장애물과 매니퓰레이터와의 최단지점을 구하여야 한다. 최단거리는 평면과 점과의 최단거리를 구하는 식을 이용하여 장애물의 각 모서리, 선분, 면들과 매니퓰레이터의 링크, 선단과의 거리 중 가장 작은 거리를 나타내는 부분을 선정한다. 두 점을 구하면 두 점 사이의 거리의 역을 이용한다.

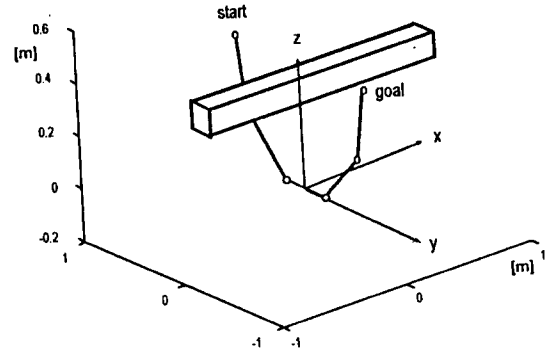


그림 12. 작업 3

Fig. 12. Case 3.

이때 미는 위치변위벡터는 식(8)에 의해서 구해진다. 식(9)를 이용하여 위치변위벡터를 관절각 변위벡터로 변환한다. 이때 자코비안은 다음과 같다.

$$J_{01} = \begin{bmatrix} -l_1 c_1 \\ -l_1 s_1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$J_{02} = \begin{bmatrix} -l_1 c_1 - L_2 c_1 c_2 & -L_2 s_1 s_2 \\ -l_1 s_1 - L_2 s_1 c_2 & -L_2 c_1 s_2 \\ 0 & L_2 c_2 \end{bmatrix}$$

$$J_{03} = \begin{bmatrix} -l_1 c_1 - l_2 c_1 c_2 - L_3 c_1 c_{23} & -l_2 s_1 s_2 + L_3 s_1 s_{23} & L_3 s_1 s_{23} \\ -l_1 s_1 - l_2 s_1 c_2 - L_3 s_1 c_{23} & -l_2 c_1 s_2 - L_3 c_1 s_{23} & -L_3 c_1 s_{23} \\ 0 & l_2 c_2 + L_3 c_{23} & L_3 c_{23} \end{bmatrix}$$

여기서 L_2 는 링크 2위의 임의의 지점까지의 링크 길이이고, L_3 는 링크 3위의 임의의 지점까지의 링크 길이이다. $\eta = 10^{-5}$, $k_{repul} = \text{diag}(0.005, 0.005, 0.005)$ 이다.

구조적 local minimum을 피하기 위한 visual region은 그림 13과 같다.

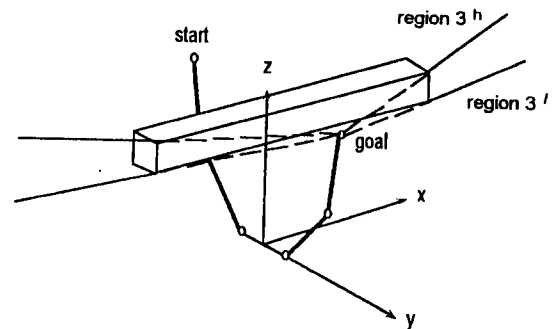


그림 13. 작업 3의 visual region

Fig. 13. Visual region of case 3.

visual region위의 가상 목표지점은 각 관절에서

visual region의 경계 평면에 내린 수직선과의 교차점을 선정한다. 가상 목표지점에서 끌어당기는 위치변위 벡터는 식(10)에 의해 구해진다. $\omega = \text{diag}(0.1, 0.1, 0.1)$ 이다. 이 지점으로 끌어당기는 위치변위벡터에 의한 관절각 변위벡터는 식(12)에 의해 구해진다. 여기서 $k_{\text{temp}} = \text{diag}(0.1, 0.1, 0.1)$ 이다.

각각의 관절각 변위를 더하여 시뮬레이션을 수행한 결과 각 관절의 궤적은 그림 14와 같다. 매니퓰레이터의 형상은 그림 15와 같다. 각 관절의 궤적을 보면 관절 1은 장애물 회피에 영향을 주지 않으므로 부드럽게 증가한다. 그러나 관절 2는 장애물을 회피하기 위하여 밑으로 숙여짐을 궤적을 통해 알 수 있다. 관절 3은 가상 목표지점을 visual region의 경계 평면에 잡았으므로 이를 추종하기 위해 약간 증가하는 형태로 나타났다.

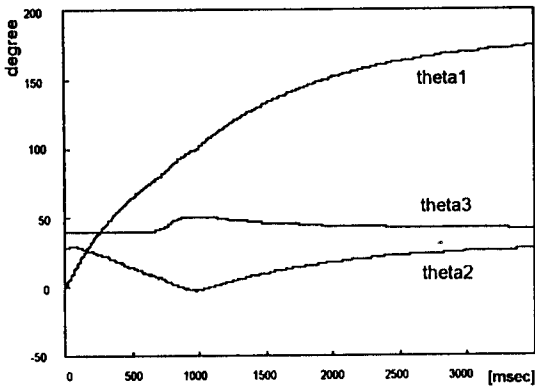


그림 14. 작업 3의 관절의 궤적
Fig. 14. Trajectory of joint angles is case 3.

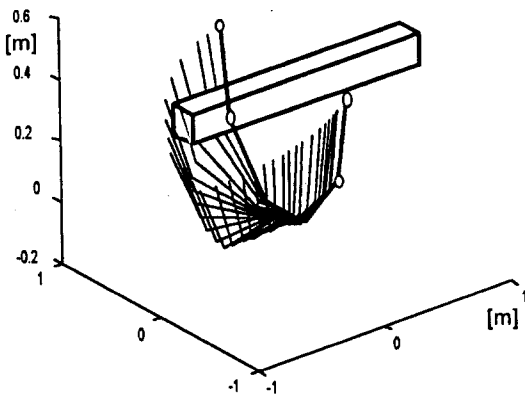


그림 15. 작업 3의 매니퓰레이터의 형상
Fig. 15. Manipulator configuration of case 3.

두 번째 작업은 초기 자세 $\theta_1=0^\circ$, $\theta_2=80^\circ$, $\theta_3=10^\circ$ 에서 최종 자세 $\theta_1=180^\circ$, $\theta_2=80^\circ$, $\theta_3=10^\circ$ 까지 y는 -0.1에 반지름 0.6인 원 이외에는 전부 막혀 있을 경우 이를 통과하는 경로를 계획하도록 하였다. 이는 그림 16과 같다.

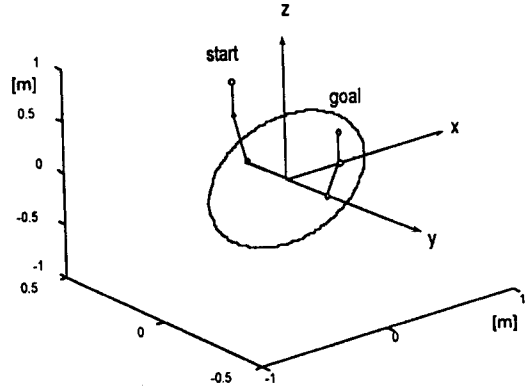


그림 16. 작업 4
Fig. 16. Case 4.

두 번째 작업의 끄는 변위는 식(7)을 이용한다. 여기서 θ_a 는 $(180^\circ, 80^\circ, 10^\circ)$ 이고, $k_{\text{attr}} = \text{diag}(0.001, 0.001, 0.001)$ 이다.

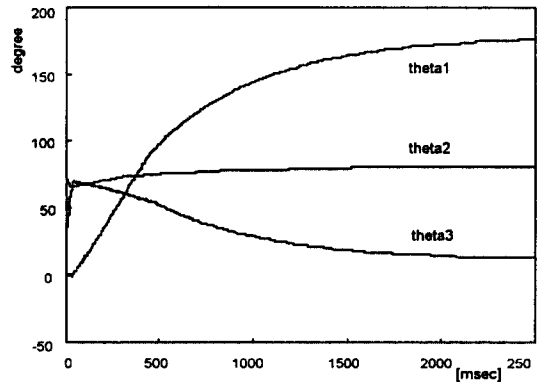


그림 17. 작업 4의 관절의 궤적
Fig. 17. Trajectory of joint angles in case 4.

미는 변위는 평면, 원호와 매니퓰레이터의 링크, 선단과의 거리함수의 구하여 첫 번째 경우와 같이 구한다. 이때 $\eta = 10^{-7}$, $k_{\text{repl}} = \text{diag}(0.01, 0.01, 0.01)$ 이다.

가상 목표지점은 선단에서 본 visual region의 경계 면상의 $x=0$ 인 직선 위의 점들로 선정했다. visual region위의 가상 목표지점으로 끌어당기는 위치변위 벡터는 식(10)에 의해 구해진다. $\omega = \text{diag}(0.1, 0.1, 0.1)$

이다. 이 지점으로 끌어당기는 위치변위벡터에 의한 관절 각 변위벡터는 식(12)에 의해 구해진다. 여기서 $k_{temp} = \text{diag}(0.1, 0.1, 0.1)$ 이다.

관절 각 변위를 더하여 시뮬레이션을 수행한 결과 각 관절의 궤적은 그림 17과 같고, 매니플레이터의 형상은 그림 18과 같다. 각 관절의 궤적을 보면 관절 1은 부드럽게 증가하는 형태이고, 관절 2는 원을 통과하기 전에는 구부러졌다가 원을 통과한 뒤 다시 증가하는 형태이고, 관절 3은 원을 통과하기 위하여 숙여졌다가 다시 증가하는 형태이다.

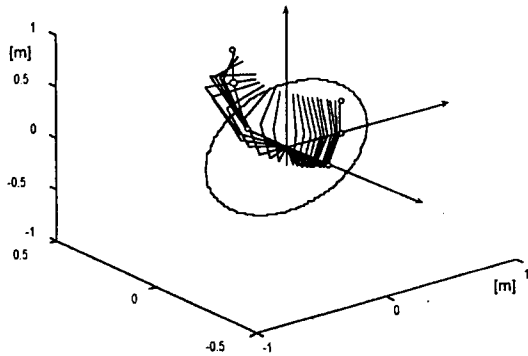


그림 18. 작업 4의 매니플레이터의 형상

Fig. 18. Manipulator configuration of case 4.

V. 결 론

지엽적인 경로계획시 주로 전위장개념을 이용하여 장애물을 회피하는 경로를 계획한다. 전위장 개념은 전위계가 평형상태에 도달하여 매니플레이터를 구동시키지 못하는 경우와 장애물로 인한 구조적 local minimum에 빠져서 매니플레이터를 구동시킬 수 없는 경우가 있다. 이러한 경우에 대부분의 일관성 없는 직관적인 방법 대신 최종 목표를 순차적인 부 목표로 나누는 방법을 도입하여 visual region상에 가상 목표지점을 설정하고 매니플레이터가 이 지점을 경유하여 최종 목표지점에 도달하도록 하는 visual region 개념을 도입하여 이 문제를 해결했다. visual region 개념은 visual region을 선정하고 선정된 visual region에 가상 목표지점을 설정하고 매니플레이터가 이 지점을 경유하여 최종 목표지점에 도달하게 하는 방법이다. 한 링크에 대한 visual region이 여러 개 존재할 경우 가상 목표지점을 포함할 visual region은 본 논문에서 정한 규칙에 따라서 선정한다. 또한 가상 목표지점은

선정된 visual region의 경계에 정한다.

본 논문에서는 제시된 visual region 개념의 타당성을 검증하기 위하여 먼저 2차원공간상에서 2자유도 매니플레이터를 이용하여 두 가지 형태의 구조적 local minimum 문제에 대한 시뮬레이션을 수행하였고, 그 다음에 3차원공간상에서 3자유도의 매니플레이터를 대상으로 매니플레이터가 구조적 local minimum에 빠지지 않고 장애물을 회피하는 경로를 계획했다.

참 고 문 헌

- [1] J. O. Kim and P. K. Khosla, "Real-Time Obstacle Avoidance Using Harmonic Potential Function," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 8, no. 3, pp. 338-349, 1992.
- [2] O. Khatib, "Real-Time Obstacle Avoidance for Manipulator and Mobile Robots," *Int. J. Robotics Res.*, vol. 5, no. 1, pp. 90-98, 1986.
- [3] Y. K. Hwang and N. Ahuja, "A Potential Field Approach to Path Planning," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 8, no. 1, pp. 23-32, 1992.
- [4] R. B. Tilove, "Local Obstacle Avoidance for Mobile Robots Based on the Method of Artificial Potentials," in *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, vol. 1, pp. 566-571, 1990.
- [5] 장철, "두대의 일반적인 로봇 매니플레이터를 위한 거리함수를 이용한 충돌 회피 방법," 박사 학위 논문, 한국과학기술원, 1990.
- [6] 남현성, 이지홍, 유 준, "전위장을 이용한 로봇 경로계획의 구조적 Local Minimum에 대한 연구," 한국자동제어학술회의 논문집, pp. 58-63, 1994.
- [7] K.S. Fu, R.C. Gonzalez, and C.S.G. Lee, *Robotics Control, Sensing, Vision, and Intelligence*, McGRAW-HILL, Chap. 2, 1987.
- [8] J. Lee and Z. bien, "Collision-Free Trajectory Control for Multiple Robots based on Neural Optimizaion Network," *Robotica*, vol. 8, pp. 185-194, 1990.

— 저 자 소 개 —



南 憲 星(正會員)

1991年 2月 충남대학교 공과대학
전자공학과 졸업(공학사). 1993
年 2月 충남대학교 전자공학과
석사학위 취득. 충남대학교 전자
공학과 박사과정 재학중. 주관심
분야는 경로 계획, 원격 조작 로

봇 제어, 공정제어 등임



李 志 弘(正會員)

1983年 2月 서울대학교 전자공학과
졸업(공학사). 1985年 2月 한국과학
기술원 전기 및 전자공학과 석사학
위 취득. 1991年 2月 한국과학기술
원 전기 및 전자공학과 박사학위 취
득. 1983年 1月 ~ 1988年 2月 현대

중공업 로봇사업부 근무. 1991年 3月 ~ 1991年 6月 한국
과학기술원 전기 및 전자공학과 연수연구원. 1991年 6月
~ 1993年 12月 금오공과대학교 전자제어공학과 조교수.
1994年 3月 ~ 충남대학교 메카트로닉스공학과 부교수.
주관심 분야는 지능제어, 신경회로망제어, 퍼지제어, 다중
로봇트 경로계획 등임

柳 鐸(正會員) 第 33卷 B編 第 4號 參照

현재 충남대학교 메카트로닉스공
학과 교수