

여유 자유도 로봇의 실시간 충돌 회피
Real-Time Obstacle Avoidance for Redundant Manipulator

조웅장*, 권동수**

*한국과학기술원 자동화 및 설계공학과(Tel : 958-3457; Fax:968-1638; E-mail : chowj@robot.kaist.ac.kr)

**한국과학기술원 기계공학과((Tel : 958-3417; Fax:968-1638; E-mail : kwonds@robot.kaist.ac.kr))

Abstract : A new approach based on artificial potential function is proposed for the obstacle avoidance of redundant manipulators. Unlike the so-called "global" path planning method, which requires expensive computation for the path search before the manipulator starts to move, this new approach, "local" path planning, researches the path in real-time using the local distance information. Previous use of artificial potential function has exhibited local minima in some complex environments. This thesis proposes a potential function that has no local minima even for a cluttered environment. This potential function has been implemented for the collision avoidance of a redundant robot in simulation. The simulation also employ an algorithm that eliminates collisions with obstacles by calculating the repulsive potential exerted on links, based on the shortest distance to object

Keyword : Redundant robot, Collision avoidance, Velocity potential, Local minima

1. 서 론

초기 산업용 로봇에서 단순하고 반복적인 작업이 요구되었던 것과는 달리 오늘날에는 보다 환경 변화에 적응적인 지능형 로봇이 요구되고 있다. 그런데 대부분의 산업용 로봇은 주어진 작업을 하는데 필요한 수 만큼의 자유도(Degree Of Freedom: DOF)를 가지고 있기 때문에 이러한 변화에 능동적으로 대처하기 힘들다. 반면, 여유자유도 로봇(Redundant Robot)은 7자유도를 가진 인간의 팔과 같이 그 기구적 여유도로 인해 유연(Flexible)하고, 능숙(Dexterous)하며, 기계적 고장 등에도 견실(Robust)한 특징을 가지고 있어 환경변화에 적응적인 지능화된 로봇에 적합하다. 이러한 지능화 된 로봇의 구현을 위해서는 환경인식, 획득된 정보의 처리, 구조적 한계의 극복등 여러 가지 요소가 고려 되어야겠지만, 미지 환경에서의 작업등에 필수적인 로봇의 충돌 회피 문제가 해결 되어야 한다.

충돌 회피를 위한 경로 계획에는 크게 두가지 접근 방법이 있는데 그 하나는 전역적 접근(Global Approach)이고, 다른 하나는 국소적 접근(Local Approach)이다.[1] 전역적 접근 방법은 작업 환경에 대한 정보를 알고 있을 때 사용하는 방법으로 주로 형상공간(Configuration Space)에서 이루어 진다. 반면에 국소적 접근 방법은 작업환경 내에 있는 물체의 크기, 형태, 모양 등에 대한 정보를 알지 못하거나, 부분적으로 알고 있을 때 센서(Sensor)에 의존한 정보를 이용하여 경로 계획을 하는 방법이다. 전역적 접근 방법은 형상공간방법(Configuration Method), 일반화된 Voronoi 다이어그램(Generalized Voronoi Diagram), 그래프 탐색(Graph Search) 방법 등이 있다. 이 방법은 무충돌 경로가 있다면, 그 경로를 찾을 수 있다는 장점이 있지만, 일반적으로 매니퓰레이터의 자유도가 늘어남에 따라 계산량이 기하급수적으로 증가하여 실시간 처리가 어렵고, 또 미리 계획된 경로 상에 알려져 있지 않은 물체가 놓여 있거나, 가변적인 환경에는 적용하기 힘든 단점이 있다. 그에 반해 지역적 센서 정보를 이용하는 국소적 접근 방법은 주로 인공 포텐셜 함수(Artificial

Potential Function)를 사용하는데, 국소적 포텐셜은 작업공간 상의 물체에 대해서는 리펠시브 포텐셜함수(Repulsive Potential Function)에 의해 표현되고, 종점(Goal)에 대해서는 어트랙티브 포텐셜 함수(Attractive Potential Function)에 의해 나타내어 진다. 국소적 접근 방법은 시점(Start)과 종점을 연결하는 물체에 의해 점유되지 않은 자유공간 경로(Free Space Path)가 존재하더라도 이를 찾지 못하거나, 경우에 따라서는 긴 경로(Long Path)를 따라가는 단점도 있지만, 전역적 접근 방법에 비해 계산량이 상대적으로 적기 때문에 실시간 처리가 용이하다는 장점이 있다. 만약 텔레오퍼레이션(Teleoperation)등에 사용 될 경우에는 경로가 작업자(Operator)에 의해 주어지므로 이러한 문제는 어느 정도 해결될 수 있다. 그러나 국소적 포텐셜 함수를 이용한 접근 방법에는 리펠시브 포텐셜 함수와 어트랙티브 포텐셜 함수에 의해 만들어지는 국소적 최소(Local Minima)가 생겨 로봇이 원하지 않는 곳에서 더 이상 움직이지 못하는 문제가 발생한다. 지금까지 국소적 최소에서 빠져 나오기 위해서는 각각의 상황에 의존하는 전략(Stragegy)을 수립해 왔었다. 이것은 국소적 포텐셜 함수의 사용을 제한하는 주요한 요인이다.

본 논문에서는 유체역학(Hydrodynamics)에서 사용되고 있는 포텐셜 유동 이론(Potential Flow Theory)에 근거하여 국소적 접근 방법에서 문제가 되었던 국소적 최소 문제를 해결 하므로써 여유 자유도 로봇을 이용한 작업시 사전 계획된 경로(Pre-Planned Path)상에 물체가 존재하거나 갑자기 나타 났을 경우등에도 경로를 수정하여 충돌을 회피하게 하므로써 조작자로 하여금 상위 수준의 제어가 용이 하게 하였다.

2. 역기구학(Inverse Kinematics)

로봇을 제어하기 위해서는 로봇 말단장치(End-Effector)의 작업공간이 관절 공간(Joint Space)으로 표시되어야 한다. 비여유 자유도 로봇(Non-Redundant Robot)의 경우에는 작업공간에 대한 관절공간의 해가 로봇의 형상에 따라 유한개로 정해지고

이를 적절히 선택하므로써 단일해를 얻는다. 반면에 여유 자유도 로봇은 하나의 작업공간에 대해 무한개의 역기구학 해가 존재하기 때문에, 이에 적절한 조건을 부여하므로써 충돌회피, 특이점 회피 등의 부가적인 목적을 실현 할 수 있다.[2]

역기구학 해를 작업의 우선 순위(Task Priority)라는 관점에서 전개하면 먼저, 첫번째 부작업을 위한 말단장치의 작업변수(Task Variables)를 $X_1 \in R^{m_1}$ 이라 하고, 두번째 부작업을 위한 작업 변수를 $X_2 \in R^{m_2}$ 라 하면 관절 변수 $\theta_1 \in R^n$ 와 작업 변수와의 기구적인 관계는 식 (1)과 같다. 이때 $n > m$ 인 경우가 여유 자유도가 있는 경우이다. 여기서 m_1, m_2 는 각각의 부작업에 대한 작업 공간의 차원(Dimension)을 나타내고 n 은 관절 공간의 차원을 나타 낸다.

$$X_i = f_i(\theta) \quad i = 1, 2 \quad (1)$$

로봇의 제어를 위해서는 말단장치의 궤적에 대한 관절 궤적이 요구 되므로 위의 관계식을 관절 공간 θ 에 대해 정리 해야 한다. 그러나 관절 변수에서 말단 장치의 작업변수 X 로의 사상(Mapping) $f: R^n \rightarrow R^m$ 은 일반적으로 비선형 관계식을 이루고 있으므로 아래와 같은 미분 기구학을 이용한다.

$$\begin{aligned} \dot{X}_i &= J_i(\theta) \dot{\theta} \quad i = 1, 2 \\ J_i(\theta) &= \frac{\partial f_i}{\partial \theta} \in R^{m_i \times n} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 \dot{X}_i 는 로봇 말단 장치의 속도를 나타내며, θ 는 관절의 속도를 나타낸다. 또 $J_i(\theta) \in R^{m_i \times n}$ 는 i 번째 작업 변수에 대한 자코비안 행렬(Jacobian Matrix)을 나타낸다.

식(2)에 대한 일반해(General Solution)은 Boullion, Odell 등에 의해 Moore-Penrose 의 사 역행렬(Pseudo-Inverse)를 이용하여 표시 되었다. \dot{X}_{1d} 는 원하는 말단 장치의 속도를 나타내며, $i=1$ 인 경우에 일반해는 다음과 같다.

$$\dot{\theta} = J_1^+(\theta) \dot{X}_{1d} + (I - J_1^+(\theta) J_1(\theta)) K \quad (3)$$

$I \in R^{n \times n}$ 는 단위 행렬을 나타내며, $K \in R^n$ 는 임의의 벡터이다. 또 $J_1^+(\theta) \in R^{n \times m_1}$ 는 $J_1(\theta)$ 의 Moore-Penrose 의 사 역행렬을 나타낸다. 만약 엄밀해(Exact Solution)가 존재하지 않는다면 식 (3)은

$\| \dot{X}_{1d} - J_1(\theta) \dot{\theta} \|$ 를 최소화 하는 최소 자승해(Least-Squares Solution)을 나타낸다. 마찬가지로 $i=2$ 에 대해서도 전개한 후 흡수성(Idempotency) 및 대칭성(Symmetry)을 이용하여 정리하면 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$\dot{\theta} = J_1^+ \dot{X}_{1d} + J_2 (I - J_1^+ J_1)^+ (\dot{X}_{2d} - J_2 J_1^+ \dot{X}_{1d}) \quad (4)$$

식 (4)의 각 항들에 대한 의미는 다음과 같다.

- J_1 : 로봇 말단장치(End-Effector)의 자코비안
- J_2 : 충돌 회피 점(Obstacle Avoidance Point)의 자코비안
- \dot{X}_{1d} : 주어진 말단장치의 속도
- \dot{X}_{2d} : 충돌 회피점의 속도

충돌 회피점(Obstacle Avoidance Point)은 매 순간 로봇 매니퓰레이터와 물체와의 거리가 가장 가까운 매니퓰레이터 위의 점을 의미한다. 즉 아래 Fig.1.과 같이 나타 낼 수 있다.

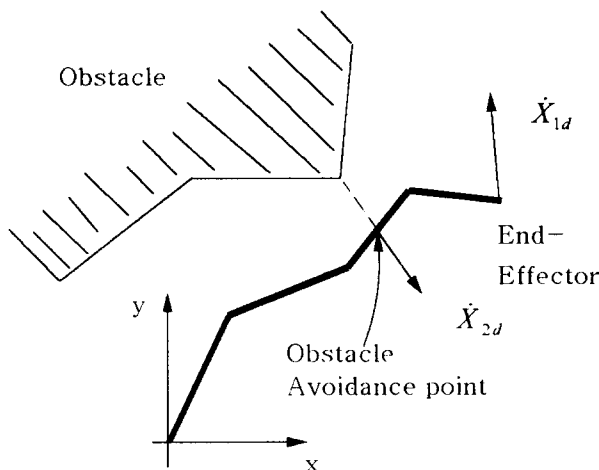


그림 1. 링크의 충돌 회피
Fig.1. Collision avoidance of Links

식 (4)는 특해(Particular Solution)와 제차해(Homogeneous Solution : Null Space Solution)로 구성되어 있다. 우변 첫번째 항은 로봇 말단 장치의 속도에 대응하는 최소 크기의 관절 속도(Minimum Velocity Norm Solution)를 의미하며, 우변 두번째 항의 제차해가 더해짐으로써 충돌회피 등 특수한 목적을 위해 최소 자승해는 희생 된다. 우변 두번째 항의

$J_2 (I - J_1^+ J_1)$ 는 로봇 말단장치의 운동을 유발하지 않으면서 충돌회피점을 움직일수 있는 자유도를 의미하며, 의사 역행렬을 이용하여 직각 좌표계에서의 충돌 회피점의 속도 공간을 관절 좌표계의 속도공간으로 전달하는 역할을 한다.

$(\dot{X}_{2d} - J_2 J_1^+ \dot{X}_{1d})$ 는 충돌 회피점의 운동을 나타내며, 말단장치의 속도 제한 ($J_2 J_1^+ \dot{X}_{1d}$)에 의해 수정된 형태를 취하고 있다.

3. 속도 포텐셜 함수

3.1 국소 최소점(Local Minima)

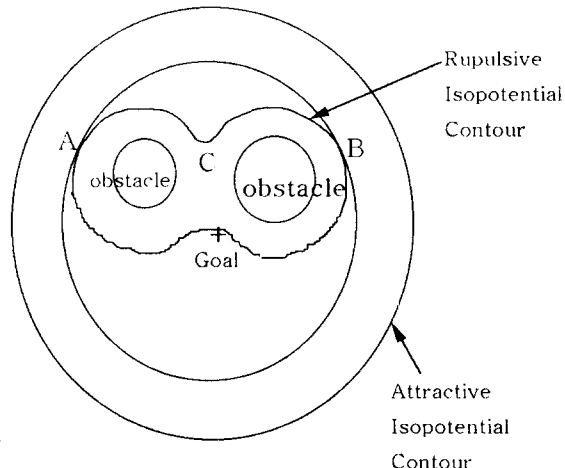


Fig.2. 국소적 최소의 발생
Fig.2. Local Minima

위의 Fig.2에서 보면 A, C점은 등 포텐셜(IsoPotential) 점이다. 그리고 A, C, B 점은 리펠시브 포텐셜이 같은 점이다. 그런데 C 점은 A, B 점에 비해 어트랙티브 포텐셜이 낮기 때문에 로봇은 C 점으로 이동 하게 된다. 그러나 두물체에 의한 강한 척력의 전위로 인해 종점(Global Well)에 이르지 못하고 국소적 최소점(Local Well)에 빠지게 된다. 즉 국소적 최소점이란 입구는 있지만 출구가 없는 것과 같은 점이다.

이러한 국소 최소점이 생기는 원인은 일반적으로 어트랙티브 등 포텐셜의 곡률 보다 리펠시브 등포텐셜의 곡률이 더 크게 될 때 발생한다. 따라서 물체를 중심으로 공간적으로 대칭적(Spherically Symmetry)인 리펠시브 포텐셜 함수의 분포가 이러한 국소 최소점을 제거 할 수 있지만 물체의 상호 위치와 형상에 따라 대칭적인 분포를 만드는 것은 어렵다. 아래 Fig.3는 FIRAS(Force Inducing an Artificial Repulsion form the Surface)라고 알려진 포텐셜 함수에 의한 국소적 최소와 전역적 최소를 나타낸 것이다. 어트랙티브 포텐셜 함수는 로봇을 목적지로 유도하는 작용을 하며 본 논문에서는 아래와 같은 형태를 사용한다. 이 포텐셜 함수는 종점 주변의 일정한 거리 x_0 에서는 Quadratic Well 형태를 취하고 있지만, 먼 거리에서는 선형적으로 증가하는 특성을 가지고 있다.[3]

$$U(x) = \begin{cases} kx \cdot x & |x| \leq x_0 \\ 2kx_0|x| - kx_0^2 & |x| \geq x_0 \end{cases} \quad (5)$$

물체 표면에서는 포텐셜의 값이 무한대로 커지지만, 일정 크기 이하의 값만 표시 하였다.

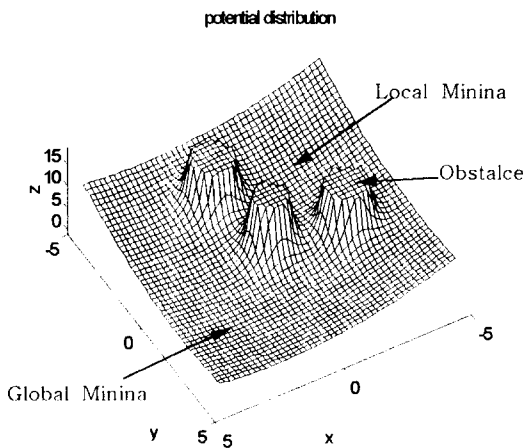


그림 3. 전역적 최소 및 국소적 최소
Fig.3. Global minimum and Local minimum

3.2 속도 포텐셜 함수(Velocity Potential Function)

본 논문에서는 위에서 밝힌 기존 포텐셜 함수들이 가지고 있는 국소 최소점 문제를 해결하기 위해 유체역학의 포텐셜 유동 이론(Potential Flow Theory)에 기반을 둔 새로운 포텐셜 함수를 사용하고자 한다.

비압축성 유체의 유동(Incompressible Fluid Flow)중에서 점성(Viscosity) 및 회전성(Irrotation)이 없는 유체의 흐름을 포텐셜 유동(Potential Flow)이라고 한다. 포텐셜 유동은 점성 및 회전 성분이 없기 때문에 원거리의 유동(Far Upstream)이 포텐셜 유동장(Potential Field)내에 있는 물체의 주위까지 흐름이 그대로 유지되는 특성을 가지고 있다.

V를 포텐셜 유동장 내의 속도장(Velocity Field)라 하면, 비회전성으로 인해 유체의 회전성을 정량적으로 나타내는 회전(Vorticity)이 영(Zero)이 되어야 한다. 그 관계는 다음과 같다.

$$\text{curl}(V) = \nabla \times V = 0 \quad (6)$$

V의 직교 좌표계에서 속도 성분을 $V(u,v,w)$ 라 두면 위의 식(6)이 만족되기 위해서는 속도장 V는 아래와 같은 조건을 만족해야 한다.

$$V = -\nabla \Theta$$

여기서 Θ 는 속도 포텐셜(Velocity Potential or Potential Function)을 나타낸다.

또 비압축성 유체의 조건에 의해 속도장(Velocity Field)은 다음과 같은 연속방정식(Continuity Equation)을 만족해야 한다.

$$\nabla \cdot V = 0 \quad (7)$$

따라서 식 (6)을 식 (8)에 대입하면 다음과 같은 관계식을 얻는다.

$$\nabla^2 \Theta = 0 \quad (8)$$

여기서 $\nabla^2 = \nabla \cdot \nabla$ 을 나타내는 Laplace 연산자 이고 식(8)의 해 Θ 를 조화 함수(Harmonic Function) 또는 속도 포텐셜 함수라 부른다. 속도 포텐셜 함수의 특성에 의해 속도 포텐셜 Θ 은 국부적 최소점이 생기지 않는 특성을 가지고 있다. 2차원 평면에서 위와 같은 조건을 만족하는 속도 포텐셜 함수의 한가지는 소스(Source) 특이점이라 불리며 다음과 같다.

$$\Theta_{\text{source}} = \frac{\lambda}{2\pi} \ln(r) \quad (9)$$

λ 는 소스에서 나오는 유량을 나타내며, r 은 소스로부터의 거리를 나타낸다.[4]

아래 그림 4.는 제안된 속도 포텐셜 함수에 의한 4개의 소스를 가지는 작업 공간에서의 포텐셜 분포를 표시한 것이다. 그림에서 보면 국소적 최소가 생기지 않는 것을 알 수 있다. 좌표의 원점에서는 속도가 0인 점으로 스테그네이션 포인트이다. 이는 불안정점이지만 국소적 최소는 아니다.

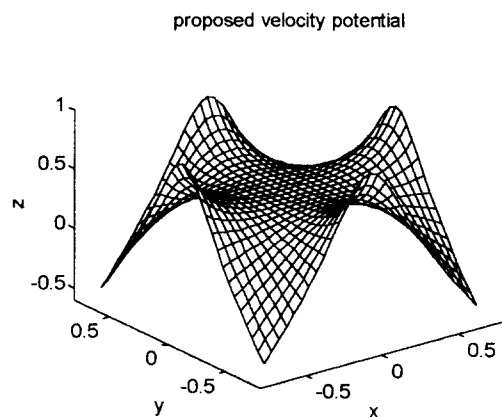


그림 4. 속도 포텐셜 함수의 포텐셜 분포
Fig.4. Potential distribution of velocity potential function

그림 5.는 전역적 최소를 추가 했을 때의 포텐셜 분포를 도시한 것이다.

종점이 스테그네이션 포인트로부터 멀리 떨어져 있을 때에는 외부의 교란에 의해 로봇은 종점으로 유도 되지 않을 수도 있기

때문에 로봇을 보다 효율적으로 종점으로 유도하기 위해서 일정한 유동(Uniform Flow)을 추가한다.

$$\Theta_{uniform} = V_{\infty} x \cos\beta + V_{\infty} y \sin\beta \quad (10)$$

이 속도 포텐셜은 공간적으로 일정한 속도를 발생시킨다. 이때 β 는 아래와 같이 얻어진다.

$$\beta = \text{atan}\left(\frac{y_{goal} - y_{start}}{x_{goal} - x_{start}}\right) \quad (11)$$

proposed velocity potential : No Local Minima

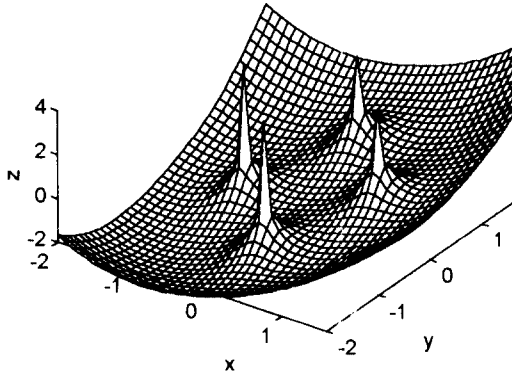


그림 5. 전역적 최소를 가진 속도 포텐셜 함수의 포텐셜 분포
Fig.5. Potential distribution of velocity potential function with a global minimum

식 (9)에서 구한 속도 포텐셜 함수는 각 링크와 물체와의 충돌 회피에 적용되고, 식(9)와 식(10)의 속도 포텐셜을 더하여 로봇 말단장치의 충돌 회피에 사용 된다.

$$\Theta_{rep} = \Theta_{source} + \Theta_{uniform} \quad (12)$$

4. 시뮬레이션

로봇의 말단장치 및 각 링크로부터 물체까지의 최단 거리가 구해지면, 물체는 최단거리 위치에서의 소스포텐셜로 모델링 된다. 아래 Fig.6 은 로봇 말단장치의 경로가 주어졌을 때 각 링크가 물체와의 충돌 회피를 이루면서 작업을 수행 하는 과정을 평면 여유자유도 로봇에 적용한 결과이다.

Avoid Link Collision

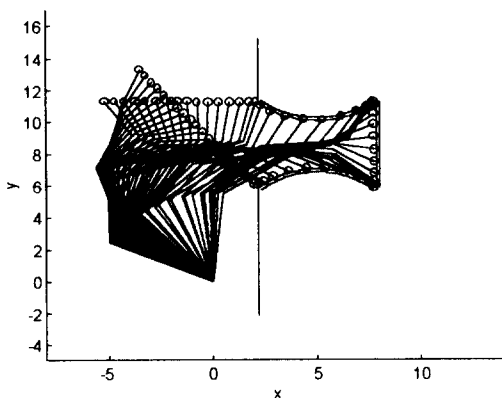


그림 6. 말단장치의 경로가 주어졌을 경우의 링크의 충돌 회피
Fig.6. Collision Avoidance of Links for given path

Fig. 7은 시점과 종점이 주어졌을 때 로봇의 말단장치가 경로를 수정하면서 충돌을 회피하고 동시에 각 링크도 충돌을 회피하는 것을 나타 내었다.

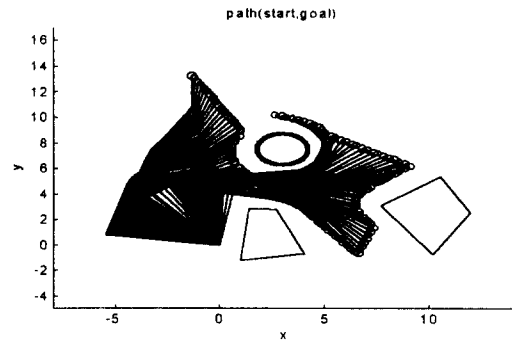


그림 7. 시점과 종점이 주어진 경우의 충돌 회피
Fig.7. Collision Avoidance for given start and goal

5. 결 론

본 연구에서는 기존의 포텐셜 함수와 다른 유체 동역학에 기반을 둔 속도 포텐셜 함수를 제안하여 여유자유도 로봇을 이용한 장애물이 있는 복잡한 환경에서 시뮬레이션을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 제안된 속도 포텐셜 함수를 이용하여 여유자유도 로봇의 충돌 회피를 실현 하였다.

둘째, 제안된 포텐셜 함수의 속도장(Velocity Field)은 보존적이다.

셋째, 포텐셜 함수에 의한 충돌 회피시 문제가 되었던 국소적 최소(Local Minima)를 피할 수 있었다.

넷째, 로봇 말단장치(End-Effector)의 경로가 주어지거나, 또는 시점(Start)과 종점(Goal)이 주어졌을 때 작업공간 내에 있는 장애물과의 충돌 없이 주어진 작업을 수행하였다.

다섯째, 하위수준의 충돌회피를 위한 로봇제어 알고리즘을 통하여 텔리오퍼레이션(Robotic Assisted Teleoperation)등의 상위수준의 제어가 용이하다.

6. 참고문헌

- [1] Y.Koren and J.Borenstein, "Potential field Method antheir inherent limitation for mobile robot navigation," *In Proc. IEEE Robotics Automation* vol.3, pp1398-1404, 1992
- [2] Nakamura,Y.,Hanafusa,H., and Yoshikawa,T., "Task Priority Based Redundancy Control of Robot Manipulator" *Int J. Robotics Research*, Vol.6, No2, pp3-15, 1987
- [3] R.Volpe and P.Khosla, "Manipulator Control With Artificial Sperquadratic Potential Functions:Theory and Experiments", *IEEE Trans. Sys.,Man,Cyber*, Vol.20, No.6, 1990, 1423-1436
- [4] Jin-Oh Kim and P.Khosla, "Real time Obstacle Avoidance using Harmonic potential Functions", *In proc IEEE Int'l Conf. on Robotics and Automation*, pp 790-796, 1991