

이 논문은 1996년도 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었음

포텐셜함수(Potential Function)를 이용한 자율주행로 봇들간의 충돌예방을 위한 주행제어 알고리즘의 개발

이 병 룡*

Development of Potential-Function Based Motion Control Algorithm for Collision Avoidance Between Multiple Mobile Robots

Byung-Ryong Lee*

ABSTRACT

A path planning using potential field method is very useful for the real-time navigation of mobile robots. However, the method needs high modeling cost to calculate the potential field because of complex preprocessing, and mobile robots may get stuck into local minima. In this paper, An efficient path planning algorithm for multiple mobile robots, based on the potential field method, was proposed. In the algorithm, the concepts of subgoals and obstacle priority were introduced. The subgoals can be used to escape local minima, or to design and change the paths of mobile robots in the work space. In obstacle priority, all the objects (obstacles and mobile robots) in the work space have their own priorities, and the object having lower priority should avoid the objects having higher priority than it has. In this paper, first, potential based path planning method was introduced, next an efficient collision-avoidance algorithm for multiple mobile robots, moving in the obstacle environment, was proposed by using subgoals and obstacle priority. Finally, the developed algorithm was demonstrated graphically to show the usefulness of the algorithm.

Key Words : Path Planning(경로계획), Potential Field Method(전위장법), Multiple Mobile Robot(복수 이동로봇), Collision Avoidance(충돌방지), Obstacle Priority(장애물 우선순위), Subgoal Concept(중간목표)

1. 서 론

자율주행 로봇에 있어서 경로제어의 주된 목적은 그 로봇을 출발지로부터 목적지까지 주위의 장애물에 충돌하지 않고 안전하게 이동하는 것이다. 지금까지 경로제어의 연구의 주류를 이루고 있는 방법들은 크게 격자분할법

(cell decomposition method), 인공전위장법(artificial potential field method) 및 퍼지.신경회로망등이다. 격자분할법⁽¹⁾은 장애물의 유무에 따라 작업장을 크고 작은 격자로 분할하여 충돌로부터 안전한 격자간의 연결로서 경로를 찾는 방법이고, 인공전위장법^(2,3,4)은 장애물 근처에서 높은 전위값을 부여하고 장애물로부터 멀리 떨

* 울산대학교 기계공학부

어진 곳일수록 낮은 전위값을 갖게 하여 목적지까지의 경로를 찾는 방법이다. 그리고, 퍼지.신경회로망법⁽⁶⁾은 전문가적인 지식을 이용하여 장애물을 지능적으로 우회하거나 이동할 경로를 미리 학습하여 로봇을 목적지까지 이동하게 해준다. 그러나, 격자분할법은 격자간의 연결선(connectivity graph)을 구하는데 많은 시간을 요구하게 되며, 인공지능위장법 역시 전위장을 형성하는데 많은 시간이 걸리는 단점이 있다. 그리고, 퍼지.신경회로망법의 경우는 로봇의 이동환경이 복잡할수록 전문가적인 판단이 어려워지며 이동정보의 학습을 위한 시간이 많이 드는 단점이 있다. 연구의 방향 면에서 볼 때 지금까지의 연구의 대부분은 한 개의 이동로봇이 정적인 장애물 혹은 일정한 방향으로 움직이는 상황하에서 이동로봇을 목표점까지 이동시키는 것에 치중을 하였으며, 이동로봇의 시작점과 목표점은 고정되어 있으며 시작점이나 목표점이 바뀌면 모델링전체를 변경해야 했으므로 유연성에 문제가 있었다.

최근에는 여러 대의 이동로봇이 각각의 출발점에서 각각의 목표점까지 정적 및 동적인 장애물들과의 충돌 없이 이동시키는 방향으로 연구가 활발히 진행되고 있는데, Tsubouchi⁽⁷⁾등은 직선과 곡선을 이용한 유용경로(feasible path)를 이용하여 로봇이 이동중인 장애물을 우회하여 목표점에 도달하게 하는 알고리즘을 이용하였다. 그러나, 이 경우 알고리즘이 너무 해석적이며 로봇의 경로가 직선구간과 곡선구간으로 연결되어 있으므로 경로거리의 효율성측면에서 문제가 발생된다. Ferrari⁽⁸⁾등은 경로-시간영역을 이용하였으며 로봇이 장애물과 충돌이 예상된다면 로봇은 정지한 상태로 대기하도록 하였다. 따라서, 이동로봇은 목표점을 향해서 진행 및 정지를 반복하게되는 단점이 있다. Ro⁽⁵⁾등은 로봇이 작업하는 작업영역에서 안전영역(collision-free band)을 설정하고 로봇이 가능한 안전영역을 따라 이동하도록 신경회로망을 이용하여 주행정보를 학습시키고 이동중의 돌발장애물은 퍼지제어를 이용하여 장애물을 우회하도록 하였다. 이 방식은 안전영역을 설정하고 주행정보를 신경회로망으로 학습하는데 많은 시간이 소요되는 단점이 발생하였다. Aoki⁽⁹⁾등은 계층적퍼지규칙(hierarchical fuzzy rule)을 이용하여 움직이는 장애물을 우회하여 목표점에 도달하도록 하였다. 이 경우 역시 환경이 복잡할수록 퍼지규칙의 작성 및 튜닝(tuning)이 쉽지 않다.

본 연구에서는 포텐셜함수(potential function)를 이용하여 이동로봇들을 출발점에서 목표점까지 장애물을

우회하여 도달할 수 있도록 하는 알고리즘을 개발하였다. 포텐셜함수는 흡인포텐셜함수(attractive potential function) 과 반발포텐셜함수(repulsive potential field)로 구성되어 있다. 흡인포텐셜함수는 이동로봇이 목표점으로 가까이 갈수록 적은 값을 가지며, 반발포텐셜함수는 로봇이 장애물에 가까이 갈수록 큰 값을 갖도록 구성되어 있다. 따라서, 각 로봇의 목표점에서 전체 포텐셜함수의 값은 최소값을 가지게 된다. 그리고, 여러 대의 이동로봇이 작업장을 이동중일 때 각 로봇은 다른 로봇에 대하여 이동장애물로 작용하므로 각 로봇들에 우선순위(priority)를 부여하여 우선순위가 낮은 로봇은 자기보다 우선순위가 높은 로봇들만 장애물로 간주하게 하여 복잡한 이동환경에서도 충돌 없이 각각의 목표점에 도달하도록 하였다. 또한 로봇이 지역최소점(local minimum)에 빠지더라도 중간목표위치(subgoal) 와 가상장애물(virtual obstacle)의 개념을 이용하여 지역최소점을 효율적으로 이탈할 수 있도록 하였다.

2. 포텐셜함수를 이용한 경로제어

2.1 포텐셜함수

자율주행로봇의 경로계획에 있어서 포텐셜함수는 로봇의 작업영역에서 이동중인 로봇이 로봇의 목표위치(goal position)로 흡인되는 힘(attractive force)을 주도록 하며, 장애물 근처에서는 로봇이 장애물과 충돌하지 않도록 반발력(repulsive force)을 주어서 로봇이 장애물들을 우회하며 결국에는 목표위치에 도달하게 하는 개념이다. 따라서, 포텐셜함수는 아래와 같이 두 개의 부분 포텐셜함수로 구성될 수 있다.

$$U(q) = U_{an}(q) + U_{rep}(q) \quad (1)$$

여기서, U_{an} 는 흡인포텐셜(attractive potential)이고 U_{rep} 는 반발포텐셜(repulsive potential)이다. 일반적으로 목표위치에서 U_{an} 의 값은 0이고 각각의 장애물에서의 U_{rep} 의 값은 매우 큰 값이 되도록 포텐셜함수 $U(q)$ 가 정의된다.

흡인포텐셜함수 U_{an} 는 다음과 같은 2차함수로 간단히 구성할 수 있다.

$$U_{an}(q) = \frac{1}{2} \xi \rho^2_{goal}(q) \quad (2)$$

여기서, ξ 는 임의의 양수 값이며 $\rho_{goal}(q)$ 는 로봇의 현재위치 q 에서 로봇의 목표위치까지의 거리를 나타낸다. 따라서, U_{at} 는 0보다 큰 값을 가지며 로봇의 목표위치에서 최소값 0을 갖는다. 반발포텐셜함수 U_{rep} 는 로봇이 장애물을 통과할 수 없도록 해주는 장벽의 역할을 수행한다. 그래서, 로봇이 장애물 근처로 접근할수록 U_{rep} 의 값은 기하급수적으로 증가하게되며 로봇이 장애물로부터 어느 정도의 거리로 떨어져 있는 경우에 U_{rep} 의 값은 0의 값에 접근하게 된다. 일반적인 반발포텐셜함수는 다음과 같이 정의된다.

$$U_{rep}(q) = \frac{1}{2} \eta \left(\frac{1}{\rho(q) - \rho_0} \right)^2 \quad \text{if } \rho(q) \leq \rho_0 \quad (3)$$

$$U_{rep}(q) = 0 \quad \text{if } \rho(q) > \rho_0$$

위 식에서 η 는 임의의 양의 값이며 $\rho(q)$ 는 로봇의 현재위치 q 에서 장애물까지의 거리를 나타내며 ρ_0 는 로봇과 장애물의 크기에 의해 결정되는 양의 상수 값이다.

2.2 정지장애물 및 운동장애물에서의 경로계획

이동로봇의 작업영역내에 고정된 장애물이 존재하며 그 장애물들을 우회하여 여러 대의 이동로봇이 각각의 출발위치에서 목표위치까지 이동하는 경우를 고려하면, 각 로봇 자체는 다른 로봇에 대하여 움직이는 장애물로 간주할 수 있다. 그러므로, 많은 로봇이 동시에 움직이는 경우에 각각의 로봇이 다른 로봇 혹은 정지장애물들과 충돌하지 않고 각각의 목표위치에 도달하는 것은 결코 쉽지 않은 문제이다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 효과적으로 해결하기 위하여 작업영역에서 움직이는 물체에 대하여 우선순위(priority) 개념을 도입하고자 한다.

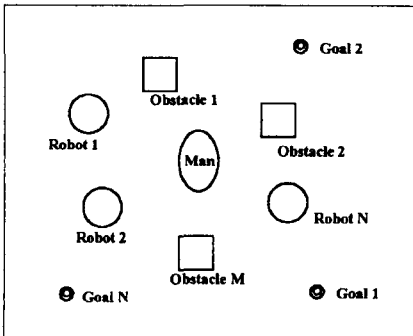


Fig. 1 Configuration of mobile robots and obstacles in the working space

예를 들어, Fig.1과 같은 작업영역을 고려할 때 운동장애물의 우선순위는 아래와 같이 표현될 수 있다.

Priority: Man > Robot 1 > Robot 2 > ... > Robot N

위의 조건과 같은 우선순위가 정해졌을 경우 Robot 1은 자기보다 우선순위가 낮은 로봇들의 움직임은 무시하고 자기보다 우선순위가 높은 Man과 정지장애물들과의 충돌이 일어나지 않도록 움직이는 경로를 변경하면 된다. 따라서, 각 로봇에 대한 장애물은 다음과 같이 분류될 수 있다.

Robot 1의 장애물: Man, Obstacle 1, Obstacle 2, ... , Obstacle M

Robot 2의 장애물: Man, Robot 1, Obstacle 1, Obstacle 2, ... , Obstacle M

Robot N의 장애물: Man, Robot 1, Robot 2, ... , Robot N-1, Obstacle 1, Obstacle 2, ... , Obstacle M

3. 경로제어 알고리즘

포텐셜함수를 이용한 일반적인 경로제어 방법은 작업영역을 C-공간(configuration space)⁽¹⁰⁾으로 변환하며 이동로봇은 하나의 점 입자로 간주된다. 점 입자 로봇은 흡인력(attractive force) 혹은 반발력(repulsive force)의 영향을 받으면서 목표점으로 이동하게 된다. 이러한 방식은 실시간적으로 경로를 탐색할 수 있는 장점이 있고, 또 장애물의 위치가 알려져 있지 않은 경우에도 비교적 적용이 용이하지만 C-공간을 계산하는데 많은 시간이 소요되며 로봇이 이동 중에 목표위치가 아닌 지역최소점(local minimum)에서 머무르는 경우도 발생한다. 본 연구에서는 C-공간을 이용하지 않고 국소최소점에 머무르는 문제를 효과적으로 해결할 수 있으며 형태적으로도 간단한 경로탐색 알고리즘을 적용하였다.

3.1 경로탐색 알고리즘

로봇은 출발위치에서 목표위치까지 전위함수의 값이 적은 쪽으로 이동하게되며 목표위치에서 전위함수의 값이

최소로 된다. 이러한 탐색과정은 Fig.2 에서 보는 바와 같이 탐색반경(search radius)을 이용하여 전위함수의 값이 낮은 곳을 찾기 위하여 반복과정(iteration)을 하게 된다.

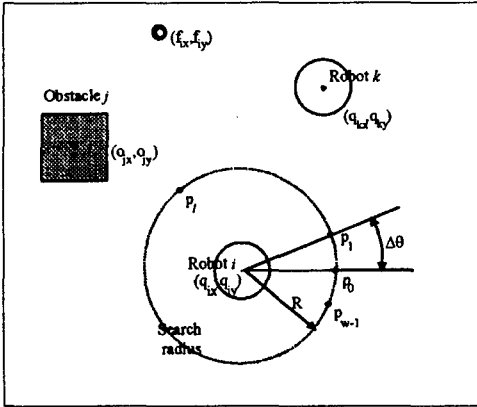


Fig. 2 Optimal direction search procedure for the new position

탐색반경은 로봇의 중심과 동심을 이루며 반경이 R 인 동심원으로서, 동심원의 원주상에 같은 간격을 유지하고 있는 W 개의 점의 좌표는 다음과 같이 표시된다.

$$p_{lx} = q_{ix} + R \cos(l \Delta\theta) \quad (4)$$

$$p_{ly} = q_{iy} + R \sin(l \Delta\theta)$$

위 식에서 q_{ix} , q_{iy} 는 i 번째 로봇의 현재위치를 말하며, $l=0, \dots, W-1$, 그리고 $\Delta\theta = 2\pi/W$ 의 값이다. 그리고, 상수 R 의 값은 로봇 및 장애물을 크기를 고려해서 정해지는 값이다. 동심원 위의 임의의 점에 대한 포텐셜 값을 구하기 위한 포텐셜함수는 다음과 같은 식으로 정의된다.

$$U_{ii}(p_l) = C_{an}(f_{ix} - p_{lx})^2 + (f_{iy} - p_{ly})^2 \quad (5)$$

$$+ \sum_{j=1}^M C_{repo} / [(o_{jx} - p_{lx})^2 + (o_{jy} - p_{ly})^2]$$

$$+ [\sum_{k=1}^N C_{repr} / [(q_{kx} - p_{lx})^2 + (q_{ky} - p_{ly})^2]]$$

위 식에서 사용된 변수들은 다음과 같은 의미를 나타낸다.

$U_{ii}(p_l)$: i 번째 로봇의 탐색반경위의 l 번째 점에서 의 포텐셜 값

- f_{ix}, f_{iy} : i 번째 로봇의 목표위치의 x 및 y 좌표
- o_{jx}, o_{jy} : j 번째 정지장애물의 x 및 y 좌표
- q_{kx}, q_{ky} : k 번째 로봇의 x 및 y 좌표
- $C_{an}, C_{repo}, C_{repr}$: 흡인포텐셜 및 반발포텐셜함수의 상수값

우변의 첫 번째 항은 i 번째 로봇의 탐색반경위의 점 p_l 과 i 번째 로봇의 목표위치사이의 흡인포텐셜을 나타내며 두 번째 항은 점 p_l 과 j 번째 장애물사이의 반발포텐셜을 나타내고, 마지막 세 번째 항은 점 p_l 과 k 번째 로봇사이의 반발포텐셜을 나타낸다. 그리고, 세 번째 항에서 k 번째 로봇의 위치 (q_{kx}, q_{ky})에서의 아래첨자 k 는 다음과 같은 조건을 만족하는 값이다.

$$\{k\} = \{k \mid priority(robot\ k) > priority(robot\ i)\} \quad (6)$$

다시 말하면, 경로탐색을 진행하고 있는 i 번째 로봇보다 우선순위가 높은 로봇들만 장애물로 간주하게 된다. 경로 탐색과정을 통해서 포텐셜값을 최소화시키는 l 번째 위치 p_l 의 위치가 구해지면, 로봇의 현재위치와 p_l 위치를 연결하는 방향이 곧 로봇이 움직여야 할 방향이 된다. 그러므로, i 번째 로봇의 새로운 위치는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$q_{ix} = q_{ix_{old}} + \cos(l_{min} \Delta\theta) d \quad (7)$$

$$q_{iy} = q_{iy_{old}} + \sin(l_{min} \Delta\theta) d$$

위 식에서 $l_{min} = \{l \mid \min(U_{ii})\}$, 그리고 d 는 단위스텝길이를 나타낸다. 로봇은 이와 같은 과정을 반복함으로써 포텐셜값이 낮은 지역을 찾아감으로서 로봇의 목표위치에 도달할 수 있게 된다. 전체적인 탐색과정 알고리즘은 Fig.3 에 나타나 있다.

3.2 지역최소점 이탈 알고리즘

정적장애물의 형상이 복잡하거나 장애물이 로봇과 로봇의 목표위치 사이에서 로봇의 진행방향에 대하여 대칭적인 구조를 이루고 있는 경우 종종 흡인전위장 및 반발전위장에 의하여 지역최소점이 존재하게 된다. 로봇은 이 지역 부근을 지날 때 지역최소점에 빠지게 되며 그 곳에서 정체하게 되므로 로봇의 주행중에 현 위치가 지역최소점인가를 판별하기 위한 판별식은 다음과 같이 정의할 수 있다.

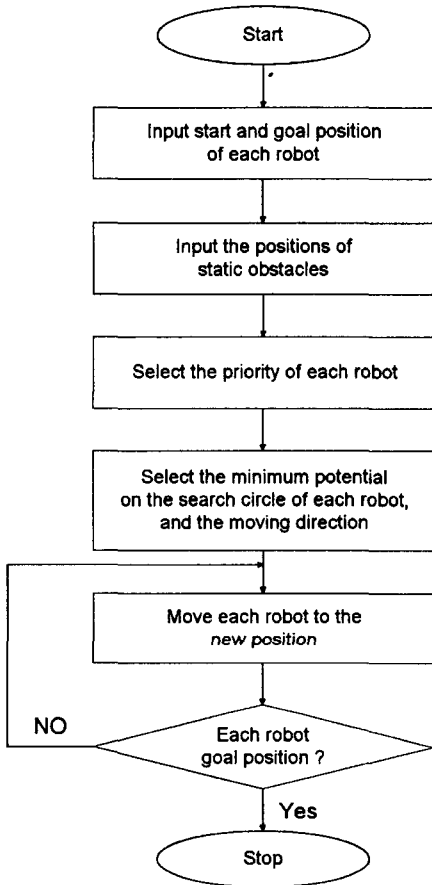


Fig. 3 Flowchart of the collision-free path search procedure

$$\sum_{i=1}^N \sqrt{(q_{ix}(k) - q_{ix}(k-i))^2 + (q_{iy}(k) - q_{iy}(k-i))^2} / N < \epsilon \quad (8)$$

식(8)에서 k 는 현재의 시간을 의미하며 $k-i$ 는 현재시간으로부터 i 번째 샘플링 이전의 시간을 의미한다. 로봇이 지역최소점에 빠지게 되면 자력으로 이 지역을 벗어날 수 없으므로 Fig.4와 같이 중간목표위치(subgoal)와 가상장애물(virtual obstacle)의 개념을 도입한다.

중간목표위치는 지역최소점과 목표위치를 연결하는 선과 법선방향으로 이루는 선상에 설정되며 다음과 같은 식으로 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} Sgoal_x &= q_{ix}(k) + R \cdot \cos(\theta - \pi/2) \\ Sgoal_y &= q_{iy}(k) + R \cdot \sin(\theta - \pi/2) \end{aligned} \quad (9)$$

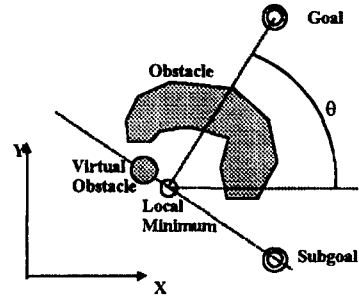


Fig.4 Configuration of subgoal and virtual obstacle

식(9)에서 R 은 장애물의 크기와 관계되는 임의의 상수이다. 한편, 가상장애물은 로봇을 지역최소점에서 중간목표위치까지 밀어주는 역할을 담당하게 되며, 일단 로봇이 중간목표점에 도달하게 되면 가상장애물은 소멸하게 된다. 따라서, 가상장애물의 위치는 다음과 같은 식으로 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} Vobs_x &= q_{ix}(k) + r \cdot \cos(\theta + \pi/2) \\ Vobs_y &= q_{iy}(k) + r \cdot \sin(\theta + \pi/2) \end{aligned} \quad (10)$$

식(10)에서 r 은 임의의 상수이며, 가상장애물은 로봇이 중간목표위치에 도달할 때까지 로봇과 일정한 거리를 유지하며 따라다니게 된다.

4. 전산모의실험

전산모의실험에서 사용된 로봇의 반경이 $0.1m$, 정적장애물은 단위크기가 $0.2m \times 0.2m$ 인 정사각형의 집합하여 다양한 형태와 다양한 크기로 선정할 수 있도록 하였다. 이동로봇의 작업영역은 $10.0m \times 10.0m$ 공간으로 설정하였다. 로봇의 현재위치에서 전위함수가 최소인 방향을 찾기 위한 탐색반경의 크기는 로봇의 반경과 단위정적장애물의 반경의 합으로 선정하였으며 탐색반경에서 탐색방향은 32개로 선정하였다. 따라서, 식(7)에서 $\Delta\theta = \pi/16$ 이고 한 번 탐색한 후의 단위이동거리는 $d=0.02m$ 으로 선정하였다. 그러나, 동적장애물의 실험에서 이동로봇들이 정해진 반경내로 서로 접근하면 우선순위가 낮은 로봇의 단위이동거리를 $d = 0.025m$ 하여 신속하게 충돌지역을 벗어나게 하였다. 식(5)에서 흡인전위함수의 상수 $C_{in} = 1.0$, 로봇과 장애물과의 반발전위함수의 상수 $C_{rep} = 1.0$, 그리고 로봇과 로봇사이의 반발함

수의 상수 $C_{rep} = 1.0$ 으로 선정하였다. 여기서, C_m 의 값이 크면 클수록 로봇은 장애물에 매우 접근하면서 장애물을 우회하게 되며 C_m 의 값이 적을수록 로봇은 장애물과 큰 거리를 유지하면서 우회하게 된다.

4.1 정적장애물에서의 경로실험

정적장애물은 이동로봇이 움직이는 작업영역내에서 크기 및 위치가 시간의 경과에 따라 변하지 않는 경우의 장애물로 정의 되었다. 경로실험에서는 주어진 정적장애물의 위치정보하에서 한 개의 로봇이 출발위치(S1)로부터 목표위치(G1)까지 탐색과정을 거쳐 찾아가는 예를 들어 보았다.

i) 지역최소점이 존재하지 않는 경우:

Fig.5 와 같이 7개의 단위 장애물들이 그림과 같은 형태로 놓여 있는 경우에는 로봇의 작업영역내에서 지역최소점은 존재하지 않는다. 따라서, 로봇은 지역최소점에 빠지지 않고 장애물을 우회하여 목표위치에도달하게 된다.

ii) 지역최소점이 존재하는 경우:

Fig.6 와 같이 9개의 단위장애물이 로봇의 출발위치와 목표위치의 연결선상에 대칭적인 구조로 놓여 있는 경우 통상적으로 로봇의 출발위치와 장애물사이에 지역최소점이 존재하게 되며 실제로 이동중인 로봇은(5.0,3.6) 위치에서 지역최소점에 빠지게되지만 실시간적으로 중간목표위치(subgoal)와 가상장애물을 설정하여 작업영역 내에서의 전위함수의 값을 변경하게된다. 즉, 중간목표위치에서 전위함수의 값이 최소로 되게 하여 로봇이 중간목표

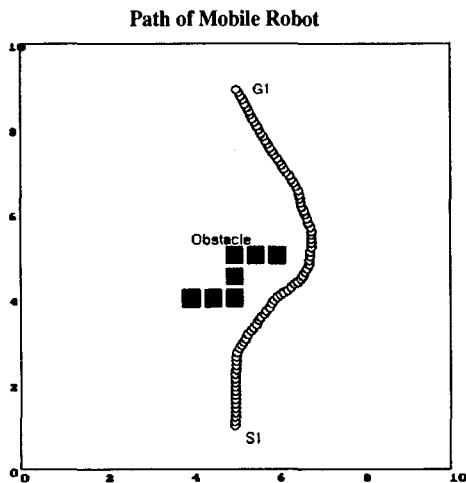


Fig. 5 Successful goal access without local minima

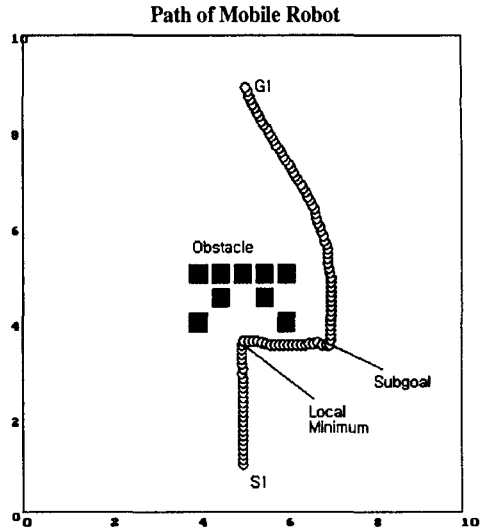


Fig. 6 Successful goal access using subgoal with local minimum

위치에 도달하게 한다. 그 후에 중간목표위치는 소멸되고 원래의 목표위치가 전위함수가 최소 값으로 설정이 된다. 이와 같이 하여 로봇은 지역최소점에 빠지더라도 성공적으로 이탈하여 목표위치에 도달할 수 있게 된다.

4.2 동적 장애물(이동로봇간)에서의 경로실험

동적 장애물은 장애물의 위치가 작업영역내에서 고정되어 있는 것이 아니고 시간에 따라서 변하는 장애물로 간주될 수 있다. 예를 들면 이동로봇이 움직이는 작업장 내부를 지나가는 작업자, 또는 여러 대의 이동로봇이 움직이는 경우 한 로봇에 대한 다른 로봇들의 움직임 등은 모두 동적 장애물로 고려될 수 있다. 본 경로 실험에서는 작업영역을 공유하는 3대의 이동 로봇이 각각의 출발위치를 출발하여 목표위치에 도달하게 된다. 3대의 이동로봇 중에서 우선순위가 높은 순서로 로봇1, 로봇2, 그리고 로봇3 으로 나타내었다. 각 로봇의 출발위치는 S1, S2, 및 S3로 표시하였고 목표위치는 G1, G2, 및 G3로 표시하였다. 본 실험은 3가지로 구성되었다.

i) 정적장애물이 없는 경우:

Fig.7 은 첫 번째 전산모의실험의 예이다. Fig.7 에서 로봇1은 로봇들 중에서 우선순위가 가장 높으므로 로봇2나 로봇3이 로봇1에 근접하는 것이 거리센서 혹은 시각센서 등을 통하여 감지된다 하더라도 로봇2나 로봇3을

장애물로 간주하지 않고 자신의 목표위치(G1)로 움직이게 된다. 따라서, 이동궤적은 거의 직선적으로 나타남을 알 수 있다. 반면에 로봇2는 로봇1을 자신의 동적 장애물로 간주하고 로봇1과 충돌하지 않고 우회하여 자신의 목표위치(G2)에 도달하게 된다. Fig.7 에 보는 바와 같이 로봇2는 일정한 반경 내에 로봇1이 감지되었을 때 로봇1을 우회한 다음 거의 직선적인 궤적을 유지하면서 목표위치(G2)에 도달함을 볼 수 있다. 로봇3은 로봇1 과 로봇2를 자신의 동적장애물로 간주하며 이동하게된다.

ii) 정적장애물이 존재하는 경우:

Fig.8 는 5개의 정적 단위장애물이 작업영역의 중간부분에 설치되어 있는 경우이다. 로봇1은 자신보다 우선순위가 높은 정적장애물들을 우회하여 자신의 목표위치에 도달하게 된다. 그리고, 로봇2와 로봇3은 자신보다 우선순위가 높은 로봇뿐만 아니라 정적장애물들도 우회해야 하는 대상이다. Fig.8 에서 로봇1과 로봇2의 궤적들은 작업영역의 중심부근의 수직선을 따라 움직이게되므로 이 지역의 공간이용이 집중되고 있는 것을 볼 수 있다.

iii) 중간목표위치를 설정한 경우:

Fig.9 에서는 작업영역의 이용공간을 분산하기 위하여 로봇1이 목표위치에 도달하기 전에 도달해야하는 중간목표위치를 (7.0,3.0)의 위치에 설정하였다. 그림에서 보는 바와 같이 로봇1과 로봇2의 이동궤적은 분산되는 것을 알 수 있다.

Paths of Mobile Robots

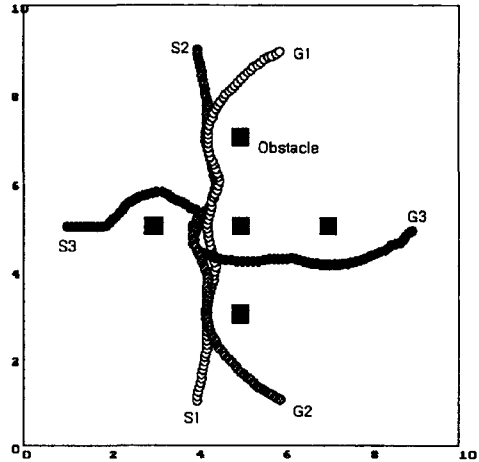


Fig. 8 Collision-free paths of 3 mobile robots with static obstacles

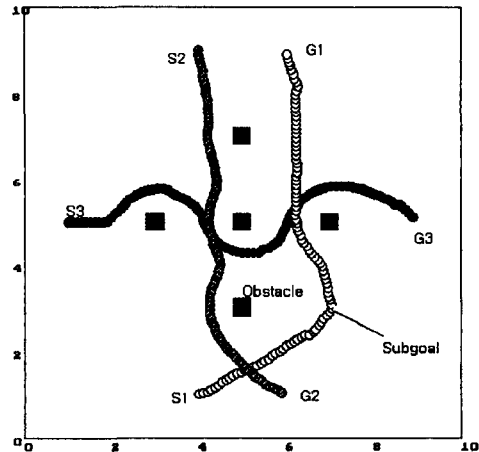


Fig. 9 Collision-free paths of 3 mobile robots using subgoals with static obstacles

Paths of Mobile Robots

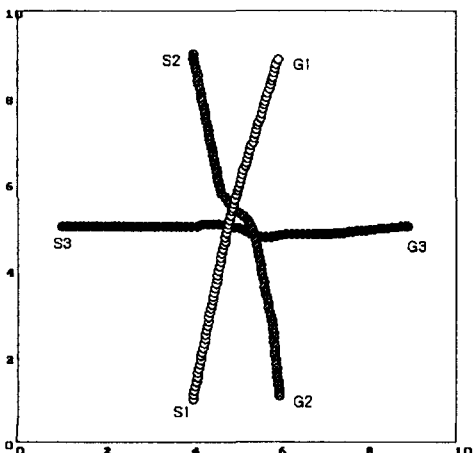


Fig. 7 Collision-free paths of 3 mobile robots without static obstacles

따라서, 본 연구에서 개발된 경로제어 알고리즘은 이동 로봇들의 충돌예방, 장애물우회의 기능뿐만 아니라 중간 목표위치 개념을 이용하여 로봇의 이동궤적을 작업장내에서 효율적으로 배치 혹은 분산할 수 있음을 보여준다. Fig.10의 a), b) 및 c)는 Fig.7, Fig.8 및 Fig.9에서의 이동로봇간의 상대거리를 나타낸 것이다. Fig.10 a)에서 로봇2와 로봇3의 상대거리는 0.25m 정도까지 접근하였다. 본 실험에서는 로봇의 반경을 0.1m 로 설정하였으므로 두 로봇의 상대거리가 0.2m 이상이면 충돌하지 않음을 알 수 있다.

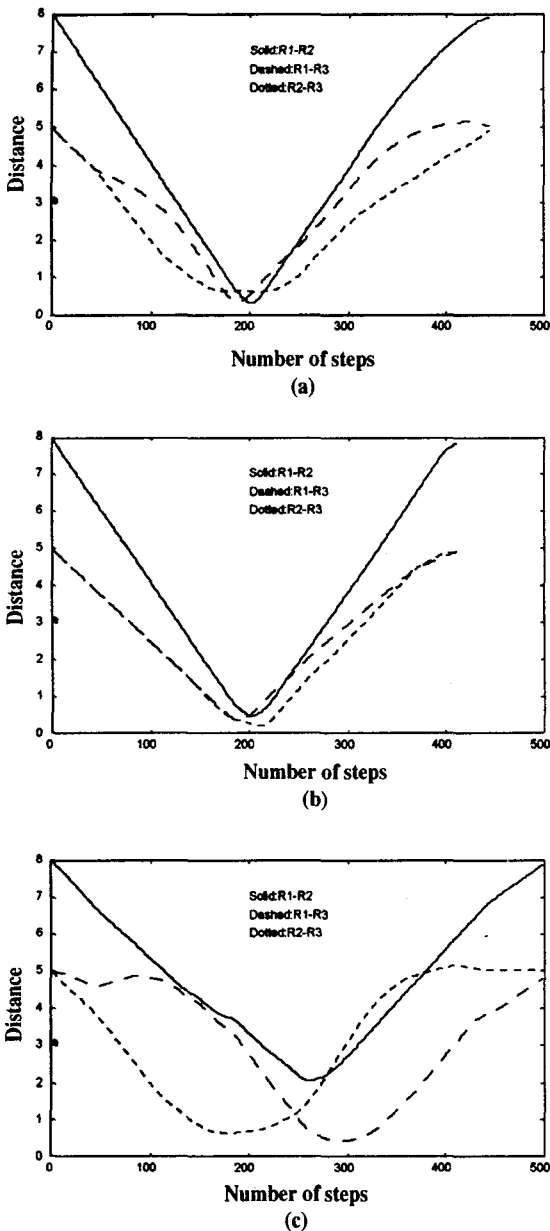


Fig. 10 Distance Between Two Robots (R1-R2, R1-R3, R2-R3)
 a) Fig.7 case b) Fig.8 case c) Fig.9 case

5. 결론

일반적으로 전위함수를 이용하는 경로계획(path planning)에 있어서의 단점은 전위장(potential field)을 계산하기 위한 전처리과정-예를 들면 작업영역을 C-

공간(configuration space)으로 모델링하거나, 모델링한 C-공간에서의 전위장을 계산하기 위하여 C-공간을 일정한 격자로 이산화 하는 과정-이 복잡하며, 또한 이동로봇이 주행중에 지역최소점(local minimum)에 빠져 로봇이 목표위치에 도달하지 못하는 경우라고 할 수 있다.

본 연구에서는 C-공간을 이용하지 않고 탐색반경(search radius)을 이용하여 장애물들이 일정한 반경 내에서 감지되면 장애물들에 의한 반발전위함수값을 계산하도록 하여, 전위함수값이 최소인 방향으로 이동하도록 하였다. 이 방법은 전처리과정을 생략할 수 있고, 탐색을 위한 계산과정도 간단해 지며 돌발적으로 발생하는 미지의 장애물들도 쉽게 우회할 수 있다. 이동로봇들간에 우선순위 개념과 중간목표위치(subgoal)개념을 도입하여 각 로봇들이 동시에 이동하는 작업공간에서 로봇상호간 및 로봇과 정적장애물과의 충돌위험성을 효과적으로 줄일 수 있고 각 로봇이 지역최소점에 빠지더라도 실시간적으로 중간목표위치(subgoal)와 가상장애물을 설정하여 지역최소점을 이탈하도록 하였다. 또한, 중간목표위치를 off-line적으로 설정하여 작업공간 내부에서 로봇들의 이동경로를 효과적으로 설계 및 변경이 가능하다.

참고 문헌

1. Faverjon, J. and Tournassoud, P., "A Practical Approach to Motion Planning for Manipulators with Many Degree of Freedom," 5th International Symposium of Robotics Research, pp. 65-73, 1989.
2. Khatib, O., "Real-Time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots," Int. Journal of Robotics Research, Vol. 5, No. 1, pp. 90-98, 1986.
3. Warren, C. W., "Multiple Robot Path Coordination Using Artificial Potential Fields," IEEE Int. Conf. of Robotics and Automation, Vol. 1, pp. 500-505, 1990.
4. Barraquand, J. and Latombe, J. C., "Robot Motion Planning: A Distributed Representation Approach," Vol. 10, No. 6, pp. 628-649, 1991.
5. Ro, P. I. and Lee, B. R., "Neural-Fuzzy

- Hybrid System for Mobile Robot Path Planning in a Partially Known Environment," American Control Conference, Vol. 1, pp. 673-677, 1995.
6. Biewald, R., "A Neural Network Controller for the Navigation and Obstacle Avoidance of a Mobile Robot," In Neural Networks for Robotic Control-Edited by A. M. S. Zalzalá and A. S. Morris, Ellis Horwood, pp. 162-191, 1996.
 7. Tsubouchi, T., Kuramochi, S., and Arimoto, S., "Iterated Forecast and Planning Algorithm to Steer and Drive a Mobile Robot in the Presence of Multiple Moving Objects," IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, Vol. 2, pp. 33-38, 1995.
 8. Ferrari, C., Pagello, E., Ota, J. and Arai, T., "Planning Multiple Autonomous Robots Motion in Space and Time," IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, Vol. 2, pp. 253-259, 1995.
 9. Aoki, T., Oka, T., Suzuki, T., and Okuma, S., "Acquisition of Optimal Action Selection to Avoid Moving Obstacles in Autonomous Mobile Robot," Int. Conf. on Robotics and Automation, Vol. 3, pp. 2055-2060, 1996.
 10. Lozano-Perez, T., "Spatial Planning: A Configuration Space Approach," IEEE Trans. Comput. C-32, No. 2, pp. 108-120, 1983.