

## 안전한 주행을 위한 정보 격자지도 기반의 경로계획<sup>§</sup>

정민국\* · 박중태\* · 송재복\*\*†

\* 고려대학교 메카트로닉스학과, \*\* 고려대학교 기계공학부

### Path Planning Using an Information Grid Map for Safe Navigation

Min-Kuk Jung\*, Joong-Tae Park\* and Jae-Bok Song\*\*†

\* Dept. of Mechatronics, Korea Univ.,

\*\* School of Mechanical Engineering, Korea Univ.

(Received December 28, 2011; Revised March 20, 2012; Accepted March 20, 2012)

**Key Words:** Path Planning(경로 계획), Information Grid Map(정보 격자지도), Mobile Robot(이동로봇)

**초록:** 기존의 경로계획 방법은 최단거리의 경로를 생성하는 것에 목적을 둔다. 그러나 이렇게 선택된 최적의 경로가 안전한 주행을 보장해주지는 못하는데, 이는 종종 좁은 통로나 이동 장애물이 많은 영역으로 경로를 생성하기 때문이다. 그러므로 로봇은 정보 격자지도를 이용하여 안전하게 이동할 수 있는 경로를 생성하는 것이 필요하다. 이 정보 격자지도는 기존의 지도가 가지고 있는 영역의 정보 외에 유도지역과 위험지역을 포함한다. 안전한 경로는 인력과 척력을 이용하여 위험지역을 우회하고 유도지역으로 접근되어 생성된다. 실험 및 시뮬레이션은 제안된 방법이 안전한 영역으로 경로를 생성시켜, 안전하게 주행하는 데 유용하다는 것을 보여준다.

**Abstract:** Conventional path planning methods have focused on the generation of an optimal shortest path to the goal. However, this optimal path cannot guarantee safe navigation, because it can often lead to a narrow area. Therefore, we propose a Coulomb's law-based safe path planning method that uses an information grid map. The information grid map includes four types of information: occupied, empty, guide, and dangerous areas. A safe path can be generated away from the dangerous area and close to the guide area by repulsive and attractive forces, respectively. Experiments and simulations show that the proposed method can generate paths inside the safe region and is useful for safe navigation.

### 1. 서론

이동로봇이 인간처럼 원하는 목적지까지 안전하게 이동하기 위해서는 위치추정, 운동제어, 경로계획 등 다양한 기술을 필요로 한다. 그 중에서도 경로계획법은 로봇을 원하는 목적지까지 효율적으로 보내기 위한 핵심기술 중의 하나이다. 이러한 이유로 이동로봇의 경로계획에 대한 많은 연구가 진행되어 왔다.

장애물과의 충돌을 회피하며 목적지까지의 안전

한 경로를 생성할 수 있는 Potential Field Method (PFM)가 제안되었다. 제안된 방법은 장애물 회피에 유용하게 적용될 수 있으나, 다수의 장애물이 존재하는 공간이나 좁은 통로에서 로봇의 경로가 진동하는 현상 유발시키며, 또한 국부최소(local minimum)에 빠지는 단점을 가진다.<sup>(1,2)</sup> 앞선 PFM의 문제점을 해결하기 위하여 Vector Field Histogram, Laplace equation, 유전자 알고리즘 등의 다양한 연구 방법들이 제시되었으나, 효율적인 경로를 생성하지 못하는 단점을 가지고 있다.<sup>(3-6)</sup> 이와 유사한 방법으로 충돌회피 경로만으로 구성하여 지도를 작성하고, 이를 추종함으로써 로봇이 장애물과의 충돌을 방지하는 방법으로 보로노이 그래프가 제안되었다.<sup>(6)</sup> 그러나 이 방법은 충돌 회피경로를 우선적으로 통과하므로 목적지까지의 최

§ 이 논문은 대한기계학회 2011년도 추계학술대회(2011.

11. 2.-4., EXCO) 발표논문임

† Corresponding Author, [jbsong@korea.ac.kr](mailto:jbsong@korea.ac.kr)

© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

적경로를 생성하지 못한다. 또한, 로봇의 기구학적인 특징을 고려하지 못하기 때문에 로봇이 실제로 지나갈 수 없는 경로를 생성하게 되는 문제점을 가지고 있다. 최근에는 이전 방법들의 문제를 해결하기 위해서, 지도 기반의 A\*, 구배법(gradient method) 등과 같이 국부최소에 빠지지 않으며 최단거리의 경로를 생성할 수 있는 방법 등이 제시되어 많은 주행 시스템에 사용되고 있다.<sup>(7-9)</sup> 그러나 이러한 방법들은 모두 로봇의 최단거리 이동에만 초점이 맞춰져 있어, 인간과 공존하는 실생활에 적용할 경우에는 여러 문제점이 발생할 수 있다. 실제 환경에는 인간들의 왕래가 잦은 공간이나, 돌발 장애물들이 존재할 수 있는 문이나 코너 같은 지역들이 무수히 많이 존재한다. 만약, 로봇이 앞서 설명한 환경적 특성을 무시하고 단순히 목적지까지의 최단경로로만 이동하게 된다면, 인간이나 이동장애물과 충돌할 확률이 높아진다. 또한, 인간을 고려하지 않는 로봇의 주행으로 인해 인간의 보행 불편을 야기할 수 있다.

본 논문에서는 실제 환경에서 발생할 수 있는 돌발 장애물과의 충돌을 방지하며, 인간의 보행에 불편함을 주지 않는 이동로봇의 지능적 경로계획법을 제시한다. 이를 위해 환경적 특성에 대한 정보를 저장하고 있는 정보 격자지도를 이용하여 경로를 생성하였다. 이를 통해 생성된 경로는 장애물의 출현이 빈번한 곳 또는 돌발장애물이 발생할 수 있는 사각지대를 우회하여 로봇을 목적지까지 안전하게 유도할 수 있다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 정보 격자지도에 대해 설명하고, 3장에서는 정보격자지도를 기반한 비용함수 및 이를 이용한 경로계획법에 대해 설명한다. 4장에서는 실험결과를 설명하고, 5장에서는 결론을 도출한다.

## 2. 정보 격자지도

격자지도는 환경을 일정한 크기의 격자로 나누고, 정지 장애물의 유무에 따라 점유 영역(occupied area) 또는 비점유 영역(empty area)으로 나타내는 지도이다. 이와 같이 격자지도는 장애물의 유무만을 나타내므로, 그 이외의 실제환경에 대한 정보를 반영하지 못한다. 따라서 격자지도만을 이용하여 목적지까지 안전한 경로를 생성하는 것은 매우 어려운 일이다. 이를 해결하기 위해 본 논문에서는 기존 격자지도에 유도 및 위험지역 정보를 포함시킨 정보 격자지도를 작성하였다. 정보 격자지도는 인간의 사고방식과 유사한 경로계획을

하기 위해 제안되었다. 예를 들어, 인간은 자동차로 원하는 목적지까지 가기 위한 다양한 방식의 경로를 계획하게 된다. 그리고 단순히 거리가 가까운 경로가 아니라, 다양한 매체를 통해 얻은 여러 사전 정보를 바탕으로 교통량이 가장 적은 경로를 선택한다. 이 경우, 이동거리는 늘어나도 원하는 목적지까지 보다 빠르게 도착할 수 있다.

Figure 1(a)에는 본 논문에서 제안한 정보 격자지도의 예가 나타나 있다. 로봇으로부터 목적지까지의 최단경로는 광장을 가로 질러 가는 것이지만, 이 경우 무수히 많은 이동 장애물들을 회피하며 이동해야 하므로 로봇 주행의 안전성이 저하된다. 이를 해결하기 위해서 로봇의 주행 안정성을 보장할 수 있는 영역을 선정하여, 이를 유도지역이라고 정의하였다. 이 영역으로 이동할 경우 이동 장애물과의 만남을 최소화할 수 있다. 또한, 로봇의 경로를 원하는 영역으로 생성할 수 있어, 로봇의 좌측 또는 우측 통행이 가능해진다. Figure 1(b)는 정보 격자지도에 유도지역이 표시된 예를 나타낸다.

Figure 2(a)의 위험지역은 예상치 못한 돌발 장애물들이 발생할 수 있는 장소로서 로봇의 주행이 원활하게 이루어지기 위해서 이와 같은 장소를 우회하는 경로를 생성해야 한다. 실외 환경에서는 산사태나 낙석같이 예상치 못한 사고가 발생할 수 있는 장소를 위험지역으로 등록할 수 있으며, 실내에서는 문과 코너 등 갑작스러운 돌발 장애물들과 충돌이 발생할 수 있는 영역을 위험지역으로 등록할 수 있다. 이와 같이 영역을 최대한 우회하는 경로를 생성함으로써 로봇의 주행 위험성을 최소화 시킬 수 있다. Figure 2(b)는 정보 격자지도에 위험지역이 표시된 예를 나타낸다.

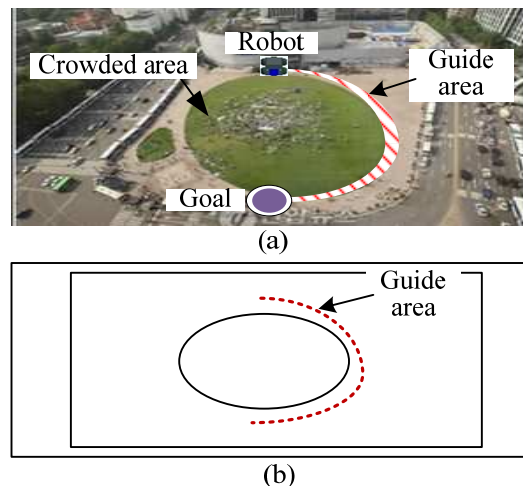


Fig. 1 Example of guide area: (a) on real environment, and (b) on information grid map

Table 1 Information map data

Information data	Empty area	Occupied area	Dangerous area	Guide area
Characteristic number	0	1	2	3

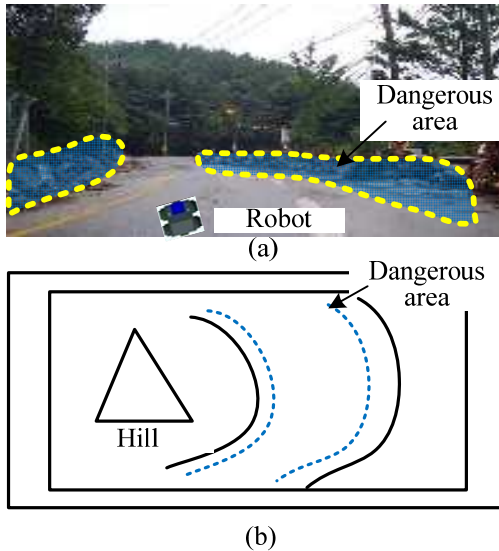


Fig. 2 Example of dangerous area: (a) on real environment, and (b) on information grid map

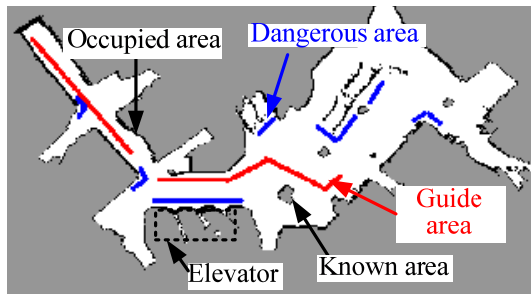


Fig. 3 Example of information map

정보 격자지도에는 위험지역과 유도지역, 장애물(점유영역), 이동 가능한 공간(비점유영역) 등 환경에 대한 정보가 숫자 정보로 표시된다. 로봇의 주행에 이용되는 정보 격자지도는 Fig. 3과 같이 표시되어 있다. 그리고 각 영역들은 특성에 따른 Table 1과 같이 고유한 값이 부여된다.

### 3. 비용함수를 이용한 경로 생성

본 논문에서는 구배법에서 사용되는 비용함수에 유도 및 위험 지역에 대한 비용을 포함하여 경로계획을 수행하였다. 제안한 경로계획 기법은 유도 및 위험지역을 설정한 구간에서는 안전에 비중

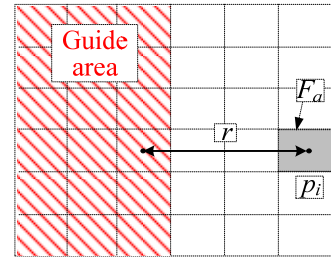


Fig. 4 Cost function for guide area

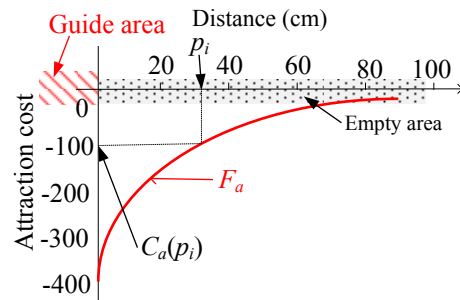


Fig. 5 Attraction cost around guide area

을 둔 경로를 생성하며, 이외의 구간에서는 구배법을 기반으로 최적의 경로를 생성한다. 비용함수는 인력비용, 척력비용, 고유비용, 인접비용, 주행비용으로 구성되어 있다. 여기서, 인력비용과 척력비용은 유도 및 위험지역에 대한 비용함수이며, 인력과 척력은 정보 격자지도의 영역과 로봇의 경로 사이에서 발생하는 가상의 힘으로 정의한다. 즉, 정보 격자지도의 영역과 로봇의 경로 사이의 거리가 가까워질수록 힘의 크기를 크게 증가시키기 위하여 거리의 제곱에 반비례하는 값을 갖도록 하였다. 우선, 유도지역의 경우, 유도지역과 인접한 격자 사이에 인력  $F_a$ 가 발생하며, 다음과 같이 정의된다.

$$F_a = \begin{cases} -\frac{M_a}{(r-1)^2}, & r \geq 1 \\ -M_a, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

여기서  $r$ 은 Fig. 4에서와 같이 격자  $p_i$ 에서 유도지역까지의 최단거리를 의미하고, 인력상수( $M_a$ )는 로봇과의 인력을 발생시키는 상수로서, 최대 인력을 나타낸다. 본 연구에서는 임의의 값으로 400을 설정하였다. 격자  $p_i$ 에 작용하는 인력  $F_a$ 는 비용함수에서는 인력비용(attraction cost)  $C_a(p_i)$ 로 표현되며, 이를 그래프로 나타내면 Fig. 5와 같다. 이와 같이 발생된 인력비용  $C_a(p_i)$ 는 유도지역에서 생성되는 비용으로서, 로봇과의 인력을 발생시켜 유도지역

에 인접하게 경로를 생성하도록 유도하는 역할을 한다.

위험지역의 경우, 위험지역과 인접한 격자 간의 척력  $F_r$ 가 발생하며,  $F_r$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$F_r = \begin{cases} \frac{M_r}{(r-1)^2}, & r \geq 1 \\ M_r, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

여기서 척력상수( $M_r$ )는 로봇과의 척력을 발생시키는 상수로서, 최대 척력을 나타낸다. 본 연구에서는 임의의 값으로 400을 설정하였다. 격자  $p_i$ 에 작용하는 척력  $F_r$ 는 비용함수에서 척력비용(repulsion cost)  $C_r(p_i)$ 로 표현되며, 이를 그래프로 나타내면 Fig. 6과 같다. 결과적으로, 척력비용  $C_r(p_i)$ 는 위험지역에서 생성되는 비용으로서, 로봇과의 척력을 발생시켜 위험지역을 우회하는 경로를 생성하도록 돕는 역할을 한다.

고유비용(intrinsic cost)은 환경과 관련되어 지도의 특성을 나타내는 비용이다. 대표적인 요소로 장애물, 정보가 불확실한 미지의 영역 등이 존재한다. 즉, 로봇이 주행 중에 회피하기를 원하는 영역에 속하는 격자에 높은 고유비용을 부여함으로써, 실제 경로계획에서 이들 영역을 회피할 수 있다. 근접비용(adjacency cost)은 두 점 간의 이동에 관련된 비용으로, 대부분의 경우 이동거리에 비례하여 경로비용을 부여한다. 즉, 각 격자에 목표점으로부터 거리가 멀수록 더 큰 비용을 부여한다.

목표점까지의 경로는  $P$ 로 나타내며, 지도상의 주행 가능한 경로점들의 집합이다.

$$P = \{p_1, p_2, p_3, \dots, p_N\} \quad (5)$$

여기서  $p_i$ 는 경로상의 경로점을 의미하며,  $N$ 은 시작점과 목표점을 포함한 경로상의 모든 경로점의 개수를 나타낸다. 따라서 마지막 점인  $p_N$ 은 목표점에 해당한다.

현재 위치에서 목표점으로 가는 경로를 결정하는 방법으로 주행비용(navigation cost)의 개념을 사용한다. 주행비용은 시작점으로부터 목표점까지 존재하는 다수의 경로 중 최소의 비용을 가진 경로를 선택하기 위해 사용된다. 경로  $P$ 의 주행비용  $C(P)$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$C(P) = \sum_{i=1}^N [I(p_i) + A(p_i, p_{i+1}) + C_a(p_i) + C_r(p_i)] \quad (3)$$

여기서  $I(p_i)$ 는 점  $p_i$ 에서의 고유비용,  $A(p_i, p_{i+1})$ 는

점  $p_i$ 에서 점  $p_{i+1}$ 까지의 이동에 대한 근접비용,  $C_a(p_i)$ 는  $p_i$ 에서의 로봇의 접근을 유도하는 인력비용, 그리고  $C_r(p_i)$ 는  $p_i$ 에서의 로봇의 접근을 막는 척력비용을 각각 나타낸다. 시작점에서 목표점까지 주행하는 경로는 다수 개가 존재할 수 있으므로 이들 경로 중에서 최소의 비용을 갖는 경로를 선택하는 것이 필요하다. 따라서 최적의 경로를 고려한 주행 비용은 다음과 같다.

$$N_k = \min_{P_k} C(P_k) \quad (4)$$

여기서  $P_k$ 는 점  $k$ 에서 시작하는 경로를 나타낸다. 따라서  $N_k$ 는 다수의 경로  $P_k$  중에서 최소비용을 갖는 경로의 비용을 의미한다.

## 4. 실험결과

### 4.1 시뮬레이션

본 연구에서는 정보 격자지도 기반의 경로계획법을 시뮬레이션을 통해서 검증하였다. 먼저, Fig. 7은 문 주변을 위험지역으로 설정하여 경로를 생성한 모습을 나타낸 것이다. Figure 7(a)의 기존 구배법을 이용한 경로에서는 최단경로가 선정되어 문 틈에 가깝게 통과하였지만, Fig. 7(b)의 정보격자 기반의 경로에서는 양 문 틈이 위험지역으로

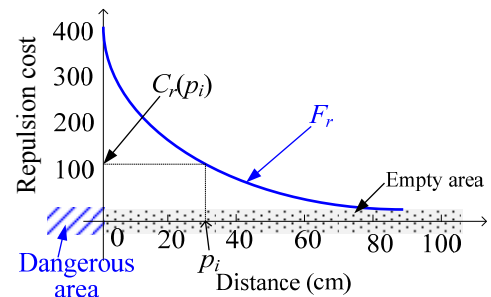


Fig. 6 Repulsion cost around dangerous area

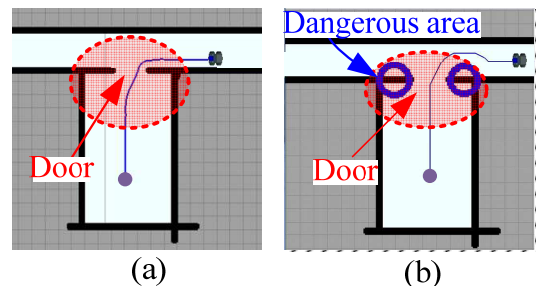


Fig. 7 Path generated by gradient method: (a) conventional, and (b) with repulsion cost



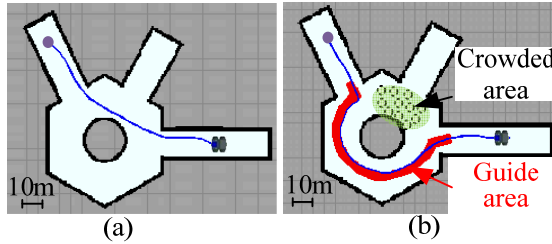


Fig. 8 Path planning by gradient method: (a) conventional, and (b) with attraction cost

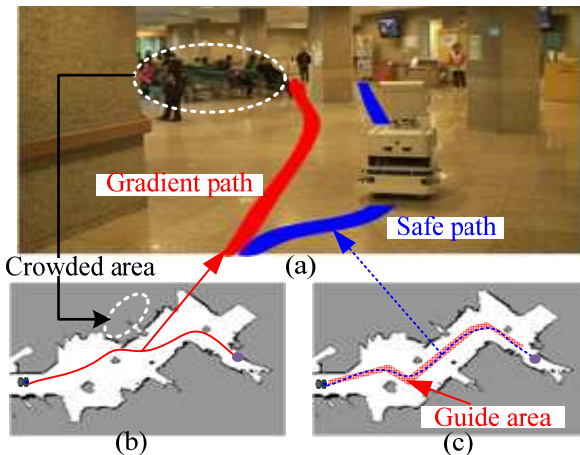


Fig. 9 Path planning results: (a) experimental environment (hospital lobby) and results from (b) conventional gradient method, and (c) proposed method

분류되어 문의 중앙을 통과하는 경로가 생성되어 보다 안전한 경로를 제공해 주었다. 따라서 문에서 갑자기 나타나는 돌발 장애물들과의 충돌을 사전에 어느 정도 방지할 수 있었다.

또 다른 예로, 항상 돌발적인 충돌이 발생할 수 있는 장소가 아니라 인간 활동에 의해서 갑작스럽게 환경이 변화하는 경우를 예로 들 수 있다. Figure 8과 같이 넓은 홀에서 평소에는 로봇의 경로가 Fig. 8(a)와 같이 형성되어 목적지까지 빠르게 주행할 수 있지만, 인간의 활동에 의해서 환경이 변화될 경우, 기존의 지도에 유도지역을 등록하여 Fig. 8(b)와 같은 효율적인 경로로 주행할 수 있다.

#### 4.2 실제 환경에서의 경로계획

정보 격자지도를 기반한 경로계획법은 실제 환경에서 다음과 같이 적용과 활용이 가능하다. Figure 9(a)를 살펴보면, 실제 환경에서는 구매법을 이용한 경로가 다수의 이동장애물이 존재하는 좁은 장소로 경로가 생성되는 것을 볼 수 있다. 하지만, Fig. 9(c)와 같이 유도지역을 지도에 등록하면, Fig. 9(a)의 안전 경로처럼 경로가 생성되어, 사람이 적은 지역을 고속으로 주행할 수 있다. 이

Table 2 Travel time

Generated path	Gradient path	Safe path
	112.91	84.21
Time (s)		

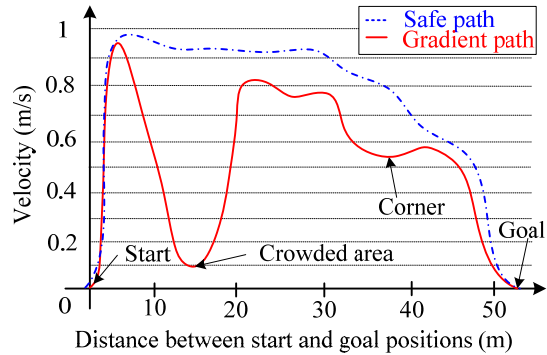


Fig. 10 Robot velocity over distance

와 같이 정보 격자지도를 바탕으로 로봇을 유도지역으로 움직이게 하고, 위험지역으로 로봇의 접근을 막아 로봇이 안전하게 주행할 수 있는 경로를 생성할 수 있다. 실제로 로봇이 Fig. 9(b)의 경로와 Fig. 9(c)의 경로로 각각 움직였을 때, 시작점과 목적지점 사이의 거리에 따른 이동속도의 변화는 다르게 나타난다.

Figure 10의 그래프를 살펴 보면, 구매법을 이용한 경로는 사람들이 밀집해 있는 영역과 코너에서 속도가 줄어 드는 것을 볼 수 있다. 반면에, 안전한 경로는 장애물과 만날 확률이 상대적으로 작고, 만나더라도 대응할 수 있는 공간이 있어 빠른 이동속도를 가질 수 있다. 뿐만 아니라, 각각의 경로로 이동하는 시간을 50번 반복 측정된 결과 Table 2 와 같이 안전한 경로가 더 빠른 시간 안에 목적지에 도착하는 것을 볼 수 있다.

#### 4.3 인간의 보행편의를 위한 경로계획

실제 환경에서 인간과 로봇이 모두 안전하게 이동하기 위해서는 로봇과 인간간의 규칙이 필요하다. 사용자는 Fig. 11(a)와 같은 구름 다리에서 “인간은 좌측 또는 우측통행을 하고, 로봇은 중앙통행”과 같은 규칙을 준수하는 로봇이 필요하다. 단순히 구매법을 이용하게 되면 Fig. 11(b)와 같이 벽에 상당히 인접한 경로를 생성하기 때문에, 사용자가 지정한 규칙에 위배되어 인간의 이동을 방해하게 된다. 반면에, Fig. 11(c)와 같이 정보격자지도를 기반으로 경로를 생성하게 되면, 로봇의 경로는 중앙으로 생성되며, 이를 추종하여 주행할 수

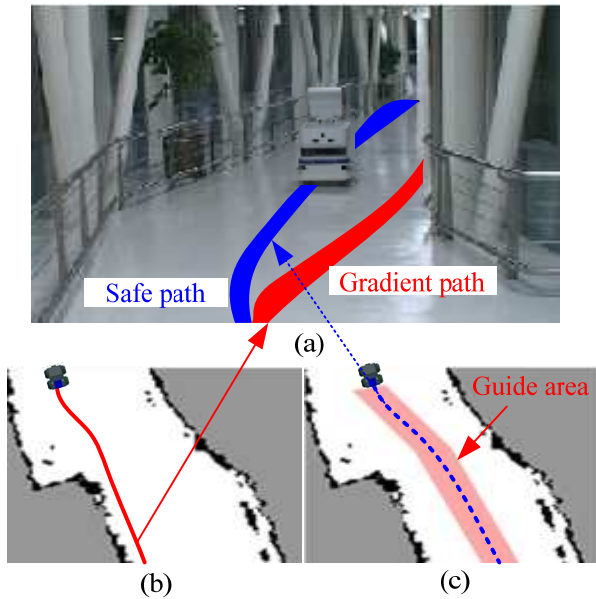


Fig. 11 Path planning result: (a) on corridor, (b) gradient method, and (c) information map

있다. 이렇게 함으로써 로봇은 규칙을 준수하는 안전한 주행을 할 수 있게 된다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 정보 격자지도와 비용함수를 이용한 안전한 경로의 계획법을 제안하였다. 제안된 경로계획 방법의 효용성은 실험 및 시뮬레이션을 통하여 입증하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 장애물이 빈번히 나타나지 않는 지역을 유도지역으로 정보지도에 등록하여, 장애물과 만날 확률을 감소시킬 수 있다. 이는 보다 효율적이고 안전한 주행을 가능하게 한다.

(2) 문이나 코너와 같은 사각지대에 대한 정보를 정보 지도에 등록하고 우회경로를 생성하여, 돌발장애물과의 충돌 가능성을 줄이고 안정적인 주행을 수행할 수 있다.

(3) 제안된 방법은 사용자와 로봇간의 규칙을 정하여 로봇의 주행을 경로를 결정지을 수 있으므로 실제 환경에서 유용하게 사용할 수 있다.

본 연구에서는 사용자의 개입을 통한 정보 격자지도의 제작에 의해서 경로를 생성하였다. 그러나 사용자가 변화하는 환경에 대해서 매번 새로운 지도를 작성할 수 없다. 따라서 추후 연구에서는 주행 중에 자동으로 정보격자 지도를 작성하고, 이

를 통해 로봇이 상황에 맞는 지능적 경로계획을 수행할 수 있는 방법에 대한 연구할 예정이다.

## 후 기

본 연구는 지식경제부 지원으로 수행하는 21C 프론티어 연구개발사업 및 지식경제부 융복합형 로봇인력 양성사업인 “자율지능형 머니플레이션 연구센터”를 통하여 수행되었음. (NIPA-2011-C7000-1001-0003).

## 참고문헌

- (1) Krogh, B. H., 1984, “A Generalized Potential Field Approach to Obstacle Avoidance,” *International Robotics Research Conference*, pp. 1~15.
- (2) Borenstein, J. and Koren, Y., 1991, “Potential Field Methods and Their Inherent Limitations for Mobile Robot Navigation,” *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, California, Vol. 2, pp. 1398~1404.
- (3) Hwang, Y. K. and Ahuja, N., 1992, “A Potential Field Approach to Path Planning,” *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 8, No. 1, pp. 23~32.
- (4) Ren, J., McIsaac, K. A. and Patel, R. V., 2006, “Modified Newton’s Method Applied to Potential Field-Based Navigation for Mobile Robots,” *IEEE Robotics and Automation Society*, Vol. 22, No. 2, pp. 384~391.
- (5) Gerke, M., 1999, “Genetic Path Planning for Mobile Robots,” *American Control Conference*, Vol. 4, pp. 2424~2429.
- (6) Choi, C.-H., Song, J.-B., Chung, W. and Kim, M., 2003, “Thinning Based Global Topological Map Building with Application to Localization,” *Trans. of the KSME*, pp. 822~827.
- (7) Hart, P. E., Nilsson, N. J. and Raphael, B., 1968, “A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths,” *IEEE Trans. on Systems Science and Cybernetics*, Vol. 4, No. 2, pp. 100~107.
- (8) Stentz, A., 1994, “Optimal and Efficient Path Planning for Partially-known Environments,” *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3310~3317.
- (9) Kim, J.-W. and Song, J.-B., 2010, “Local Path-based Obstacle Avoidance in Outdoor Environments,” *Proc. of Int. Conf. on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence*, pp. 538~541.