

논문 2010-47IE-2-11

퍼지시스템과 포텐셜 필드를 이용한 다중 이동로봇의 충돌회피 최적경로 연구

(Study on the Collision Free Optimal Path for Multi Mobile Robots
Using Fuzzy system and Potential Field)

이종호*, 김동원*

(Chong-Ho Yi and Dong W. Kim)

요약

자율적인 다중이동 로봇환경에서는 현시점에서 목표점까지 장애물과 충돌없이 연결하는 최적 경로를 설정하는 것은 필수불가결하며 매우 중요하다. 실제 많은 이동로봇은 주위 장애물에 대하여 주어진 정보 없이 미지의 환경에서 자율적 이동이 가능해야 한다. 따라서 본 논문에서는 다중이동 로봇환경에 적합한 새로운 형태의 충돌회피 최적경로에 대한 방법을 연구한다. 잘 알려진 포텐셜 필드 방법을 이용하여 다중이동 로봇의 전역경로를 계획하고, 퍼지로지 시스템을 이용하여 각 로봇에 근접하는 혹은 경로를 가로막는 장애물과의 충돌을 피하기 위한 지역경로를 계획한다. 제안된 방법의 성능 및 정확성을 검증하기 위해 다양한 모의실험을 진행하여 결과를 검증하고 이의 결과를 토의한다.

Abstract

In an autonomous multi-mobile robot environment, optimal path planning without collision which connects the beginning and ending point is essential and primary important. Many mobile robots should move autonomously without prior or given information about obstacles which are stationary or dynamic. Collision free optimal path planning for multi mobile robots is proposed in this paper. The proposed approach is based on a potential field method and fuzzy logic system. First, a global path planner using potential field method selects the shortest path from each robot to its own target. Then, a local path planner modifies the path and orientation from the global planner to avoid collisions with static and dynamic obstacles using a fuzzy logic system. To verify performance of this method, several simulation-based experimental are done and their results are discussed. These results show that the path planning and collision avoidance strategies are effective and useful for multi-mobile robot systems.

Keywords : Multi-mobile robot systems, collision avoidance, potential fields, fuzzy logic.

I. 서론

이동로봇과 관련된 연구주제 중에서 돌출하는 다수의 장애물이 있는 환경에서 초기 위치에서 목적지까지 이동하는 로봇의 경로를 결정하는 일은 매우 어렵다.

또한 로봇의 지능을 통하여 다양한 환경에서 자율적으로 활동 할 수 있기를 기대하기 때문에 자율적인 주행 능력에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다. 즉 로봇이 주행 중 원하는 목표점까지 최적의 경로를 찾고 주위 환경이 변화여도 지능적으로 최적의 경로를 만들어 장애물과의 충돌 없이 빠르게 이동하는 것이 주목적이 된다^[1]. 이를 위해 목적지까지 안전하게 도착할 수 있는 경로를 찾는 경로 계획이 이루어 져야 하며, 장애물의 형태에 따라 전역경로 계획(global path planning) 과 지역경로 계획(local path planning) 으로 나뉠 수 있다.

* 정희원, 인하공업전문대학 디지털 전자과
(Dept. of Digital Electronics, Inha Technical College)

※ 이 논문은 2009학년도 인하공업전문대학 교내연구비 지원에 의하여 연구되었음.

접수일자: 2010년4월26일, 수정완료일: 2010년6월7일

전역적인 방식은 로봇과 경로 상의 환경이 알려져 있기 때문에 목적지까지의 완전한 경로를 계산할 수 있다. 하지만 지역적인 방식은 로봇이 움직일 때 경로상의 장애물에 대한 정보가 주어지지 않기 때문에 이를 해결하기 것으로 주위 환경에 따라 다양한 방법이 이용되고 있다^[1~3]. 일반적으로 이동로봇은 현재의 위치로부터 목적지까지 이동하기 위해 이동공간상에 있는 장애물을 회피하여 최소의 에너지가 소비되는 경로를 찾기 위한 방법을 사용하고 있다. 이를 위해 이동로봇이 장애물에 접근하는 경우, 에너지 필드간의 반발력이 증가하는 특성을 이용하여 충돌회피 계획을 구성하였다. 하지만 작업형태의 다양성과 복잡성으로 인해 상황에 따른 판단과 동적인 대응능력을 가진 로봇이 필요하게 되었다. 또한 기존의 방법은 돌발적이고 움직이는 장애물과 충돌하거나 목표점에 이르지 못하는 단점이 있다. 따라서 장애물 회피에 대한 효과적인 알고리즘이 없는 최적 경로 계획은 이루어지기 어려운 실정이다^[1, 4]. 장애물들은 정적이거나, 혹은 동적으로 움직이거나 혹은 동시에 두 가지 경우 모두를 고려해야 한다. 궁극적으로 이동로봇과 장애물 사이에 충돌이 없이 진행할 수 있는 경로가 최적의 경로가 된다. 최근에는 많은 연구자들이 이동 로봇의 미지환경 탐색과 관련된 경로계획 방법과 알고리즘에 대한 연구를 진행하고 있다. [2]에서는 경로 계획과 관련된 포괄적인 주제로 다양한 기술에 대한 개론을 제공하였으며, [5]에서는 장애물과 가중치가 주어진 지역에 대하여 이동하는 로봇의 탐색방법과 관련된 최적의 경로 계획알고리즘이 제안되었다. 가장 적은 비용을 지닌 경로를 찾는 것으로 일반적인 환경에서 단일 이동 로봇의 강인한 경로 계획법에 대한 알고리즘이 [6]에서 제안되었다. 장애물에 대한 포텐셜 필드를 이용하여 3차원 환경 속에서 일반적인 움직임 문제에 대한 경로 계획 알고리즘은 [7]에서 제안되었다. 미지의 환경에서 단일 로봇의 주행 중 동적인 장애물과의 회피를 연구한 내용은 [8]에서 제안되었으며, 벡터와 거리에 대한 함수를 이용하여 충돌은 피하고 장애물은 감지할 수 있는 연구가 [9]에서 제안되었으며, 정전기적인 포텐셜 필드와 퍼지로직을 이용하여 단일 로봇의 경로계획 문제에 대한 연구가 [10]에서 진행되었다. 따라서 기존의 단일로봇에 대하여 장애물 회피에 대한 연구는 꾸준히 이루어지고 있다. 그러므로 로봇이 단일 개체이고 정적인 장애물로만 이루어진 환경에서 이동이 이루어진다면 최적의 충돌회피 경로를 찾는 모션 계획과 관련된 어려

움은 줄어들 수 있다. 하지만 주어진 환경이 복잡하고 다수의 로봇끼리 복잡적이며 상호협력을 통하여 주어진 일을 처리해야 한다면 많은 경로계획과 관련하여 많은 어려움에 처하게 된다. 우리는 다중이동 로봇 (멀티 모바일 로봇)에 대하여 초점을 맞춘다. 다중이동 로봇에 대한 경로계획과 관련하여 유사한 연구주제가^[11~12] 진행되고 있으나 여전히 더욱 복잡한 환경에서 다양한 형태로 실험이 진행되어 결과를 분석하고 성능을 평가 받고 이의 결과를 토의할 필요가 있다. 또한 다중로봇과 관련하여 장애물과 충돌하지 않는 경로를 계획하는 것은 이동 로봇과 관련된 연구주제 중에서 여전히 해결되지 않은 복잡한 내용이며, 높은 신뢰도를 요하는 중요한 이슈이기도 하다. 상호 협동을 통하여 주어진 일을 수행하는 것은 복잡하고 동적인 특성으로 인하여 각각의 이동로봇의 경로를 설정하는 것은 쉬운 일이 아니다. 각각의 로봇 모션은 다른 로봇의 이동과 움직이는 장애물의 형태 및 이동성과 관련된 복잡한 환경으로 인하여 많이 제약 받기 때문이다. 본 논문에서는 장애물과 충돌없이 자율적으로 움직이는 멀티 모바일 로봇을 위해 포텐셜 필드 방법과 퍼지 규칙을 이용한 경로계획 알고리즘을 개발하는 것이 목적이다. 최소한의 비용으로 목적지까지 가기 위한 전역 경로를 위해 포텐셜 필드 방법이 이용되었으며, 충돌상황을 피하기 위해 퍼지 규칙기반 시스템이 지역 경로 계획을 위해 사용되었다. 또한 동일하거나 반복된 상황에서의 경로 계획을 위해 분산된 다층 행동 코디네이터를 소개한다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 자율적인 다중 이동로봇의 장애물 회피 및 경로 계획과 관련된 내용이 기술되며, III장에서는 시뮬레이션을 통한 결과확인과의 검토가 이루어진다. 또한 추후 보완되어야 할 앞으로의 과제에 대하여 살펴본다. 마지막으로 IV장에서 결론을 맺는다.

II. 자율적인 멀티 모바일 로봇 시스템

II장에서는 멀티 모바일 로봇이 충돌 없이 어떻게 목표로 하는 목적지까지 움직일 수 있는 가를 묘사한다. 전역경로 탐색을 위해 사용된 잘 알려진 포텐셜 필드 방법과 지역경로 탐색을 위한 퍼지로직 시스템이 기술된다. 특정한 환경에서 우선순위가 높은 동작을 선택하기 위해 효율적인 동작조정기 (코디네이터) 또한 기술된다. 위에서 기술된 내용은 시뮬레이션을 통하여 자율

적인 멀티 모바일 로봇에 응용되어 효율적인 탐색과 충돌을 피할 수 있다는 것을 보여준다.

가. 멀티 모바일 로봇 시스템의 환경

멀티 모바일 로봇 시스템은 다양한 환경 하에서 다른 로봇과의 유연한 협동을 통하여 주어진 일을 잘 수행할 수 있도록 설계되었다. 센서를 이용하여 주위 환경에 대하여 정보를 얻을 수 있어야 하므로 센서를 통한 데이터 취득 시스템이 모바일 로봇에 장착되어 있어야 한다. [11]에서 구체적인 멀티모바일 로봇시스템의 환경설정 내용을 확인할 수 있다. 그림 1은 제안된 멀티 모바일 로봇 시스템의 효율적인 임무수행과정을 위한 코디네이션 작업을 나타내고 있다. 각각의 로봇에게는 초기 시작점과 목표점이 주어지며, 각 로봇은 목표물에 달성하기 위해 각자의 고유한 궤적을 생성할 수 있다. 만약 로봇이 예상치 못한 장애물을 만난다면 충돌 가능한 이벤트에 대하여 정보를 제공하는 퍼지 함수에 기반하여 지역 경로를 갱신할 수 있다. 복잡한 환경에서는 각각의 로봇은 다중작업 사이에서 우선순위가 높은 동작을 고려해야 한다. 이때 그림 1에서 보인 동작조정기(코디네이터)의 기능을 이용하여 최우선순위의 동작을 선택하게 되고 주위 환경 조건에 따라 각각의 로봇이 행동하게 된다. 벽 따라 이동하기, 충돌회피, 경로 계획 등과 같은 다양한 미션이 어떤 특정한 로봇과 이와 관련된 다른 로봇에서 나온 센서 데이터를 기반으로 동작조정기에 의해 수행된다.

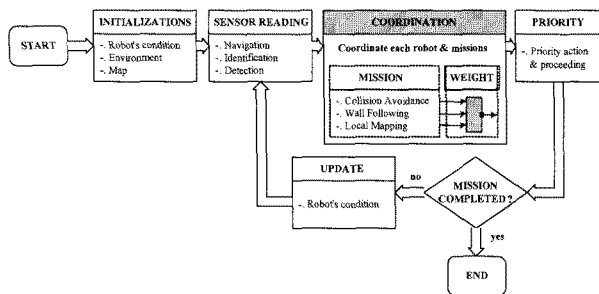


그림 1. 동작조정기의 구조
Fig. 1. Architecture of action coordinator.

나. 포텐셜 필드와 퍼지 로직 시스템

포텐셜 필드 방법에서 로봇은 힘이 미치는 공간에서 힘의 반대방향으로 움직이는 미립자로 간주되며, 장애물과 로봇 사이의 인위적인 반발력을 만들어 서로간의 충돌을 피할 수 있도록 한다. 즉 포텐셜 필드 방법은 인

위적인 힘이 미치는 영역에서 로봇을 한 점으로 고려한다. 여기서, 한 점에 힘을 가하고 있는 유도된 인위적인 힘은 장애물과 앞쪽에 위치한 목표물로부터 로봇을 멀리 이동시킨다. 목표로 하는 위치는 끌어들이는 힘 인력 F_{att} 을 만들어 내는 반면, 장애물은 척력 F_{rep} 을 생성한다. 매시간 t_i 에서, 로봇의 움직임은 두 가지 힘, $F_{tot}(q_t) = F_{att}(q_t) + F_{rep}(q_t)$ 의 합에 의하여 유기된 힘의 방향으로 진행되게 계산된다^[13]. 본 논문에서는 로봇은 오직 한 점이며 포텐셜 필드는 2차원 (x, y) 이라고 가정하며, 식 (2)와 같이 표현된다.

$$F_{att}(q_t) = k_{att}\eta_q$$

$$F_{rep}(q_t) = \begin{cases} k_{rep} \sum_j (\frac{1}{d(q_t, p_j)} - \frac{1}{d_0}) \eta_p, & \text{if } d(q_t, p_j) < d_0 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

(1)

여기서, K_{att} 와 K_{rep} 는 각 힘에 대한 상수들이며 장애물 p_j 에 대하여 영향이 미치는 거리는 d_0 , 현재 로봇의 위치는 q_t , $\eta_{q_{target}}$ 와 η_{p_j} 는 현재 로봇의 위치로부터 목적지까지의 위치와 장애물에 대한 위치를 각각 나타내는 유니터리 벡터이다. 그림 2에서 포텐셜 필드 방법에 의한 움직임 방향에 대한 연산과 이에 따른 경로를 묘사하였다. 목표물은 힘 F_{att} 을 가진 미립자를 끌어당기는 반면 장애물은 반발력 F_{rep} 을 만들어 낸다.

최종적인 힘 F_{tot} 은 움직임에 대한 가장 우선시 되는 방향이다. 포텐셜 필드 방법에 대한 구체적인 내용은 참고문헌^[13-14]에서 자세히 확인할 수 있다.

퍼지 로직 시스템과 같은 규칙기반 알고리즘은 실제 환경에서의 제어방법과 멀티로봇 도메인에서 로봇을 제어하는 형태로 일반적이다. 본 논문에서는 알려지지 않

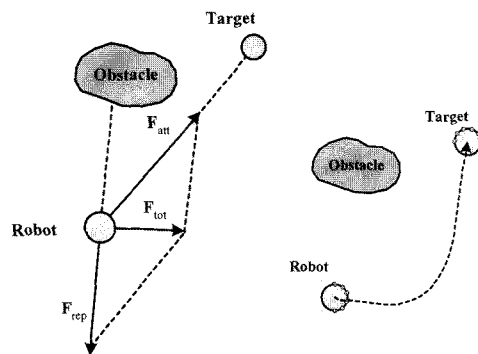


그림 2. 포텐셜 필드에 의한 움직임 방향과 최종경로
Fig. 2. Direction by potential field and final trajectory.

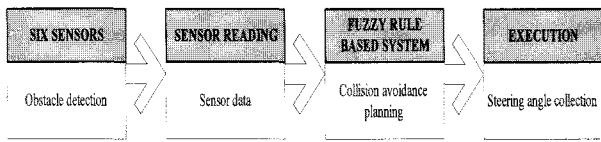


그림 3. 퍼지규칙기반 시스템을 이용하여 지역적으로 충돌을 회피할 수 있는 알고리즘의 개념
Fig. 3. Collision avoidance algorithm using fuzzy rules.

은 장애물을 가진 충돌회피 환경을 위해 퍼지 규칙기반 알고리즘이 응용되었다. 장애물에 대한 지역회피에 대한 전체적인 개념은 그림 3에서 나타내었다.

센서를 통한 데이터 정보는 로봇과 장애물 사이의 거리와 각도이며, 이는 서로 다른 두 개의 퍼지 변수로 표현 가능하다. 거리와 관련된 퍼지변수는 퍼지 규칙기반 시스템의 입력값으로 사용되며 3개의 서로 다른 값: "far", "near", "very near" 을 가진다. 다른 퍼지변수인 각도는 5개의 서로 다른 값: "left big", "left small", "zero", "right big", "right small", 을 가지며 퍼지 시스템의 또 다른 입력값으로 사용된다. 퍼지 시스템의 입력값인 각도와 거리 정보를 이용하여 로봇의 조향각도는 결정될 수 있다. 퍼지 시스템의 출력값인 조향각은 5개의 퍼지 멤버쉽 함수: "left big", "left small", "zero", "right big", "right small", 을 가진다. 이에 대한 퍼지규칙과 멤버쉽 함수의 형태는 [11]에서 살펴볼 수 있다.

III. 시뮬레이션 기반 실험결과

충돌회피 움직임 프래너를 가진 자율 주행 멀티 모바일 로봇 네비게이션의 효율성과 유용성을 평가하기 위해 시뮬레이션 환경을 개발하였으며 멀티 모바일 로봇의 네비게이션에 대한 다양한 실험을 수행하였다. 여기서, 모든 로봇은 동일한 로봇 시스템과 자율주행 능력을 가졌으며 로봇 주위의 환경을 인식하기 위해 소너 센서가 장착되었다고 가정한다. 개발된 시뮬레이션 환경은 비주얼 C++ 프로그래밍 언어를 사용하였으며, 로봇의 개체수, 정적인 장애물의 위치, 각 로봇의 출발점과 목표점 등을 임의로 특정하게 지정할 수 있다.

그림 4와 5에서 목적지로 향하는 다수의 로봇을 묘사하였다. 전역경로 가운데서 정적인 장애물을 피하는 동시에 같은 환경 내에서 로봇 3대 또는 4대가 서로를 움직이는 동적 장애물로 고려하면서 주어진 목적지까지 충돌 없이 주행하는 시나리오이다. 겹쳐진 전역경로로 인하여 3대의 로봇은 반듯이 만나게 되며, 길의 한 가

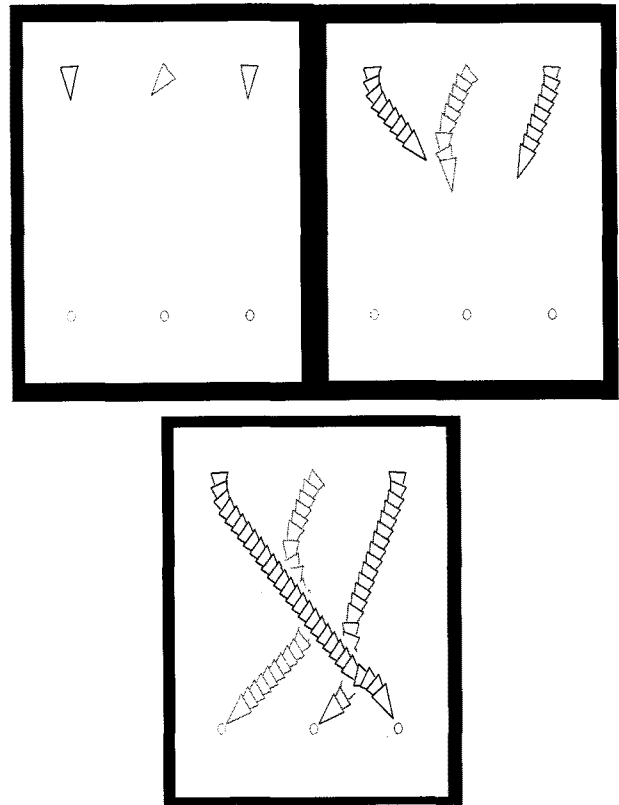


그림 4. 경로의 가운데에서 충돌에 노출된 세 대의 로봇 궤적
Fig. 4. Trajectory of three robots exposed to collision in the middle of path.

운데에 자리잡고 있는 동적인 장애물로 인하여 각자 충돌에 노출되어 있다. 그러나 충돌회피와 함께 마지막 목적지까지 성공적으로 잘 도착하였다. 각 로봇의 초기 위치, 출발점, 목표점, 그리고 출발방향은 그림 4(좌)에서 보여진다. #1 로봇은 목표점에 쉽게 도착하였다. 그러나 #2 와 #3 로봇은 경로의 가운데서 #1 로봇과 마주칠 가능성을 가지고 있다 (그림 4(우)).

#2 로봇은 #1 로봇이 다가오는 것을 감지한 후 왼쪽으로 회전하여 목적지를 향해 계속 움직인 반면, #3 로봇은 목표점까지 거의 다다른 상태에서 #1 로봇을 감지했으므로 #1과 #3 로봇의 사이의 상호영향은 그리 크지 않았다. 따라서 안전하게 경로에 접근하기 위해 왼쪽으로 약간의 회전만 진행된 후 목적지에 안전하게 도달하였다 (그림 4(하단)). 최종적으로 3대의 로봇은 아무런 충돌 없이 목표점에 도달할 수 있었다.

그림 5에서 보인 것처럼 로봇 3대의 전역경로를 정적인 장애물이 가로막고 있는 또 다른 경우를 고려하였다. 로봇의 초기 위치와 장애물이 그림 5(좌)와 같이 구성되어 있으며, 모든 로봇, #1, #2, #3는 각자의 전역경

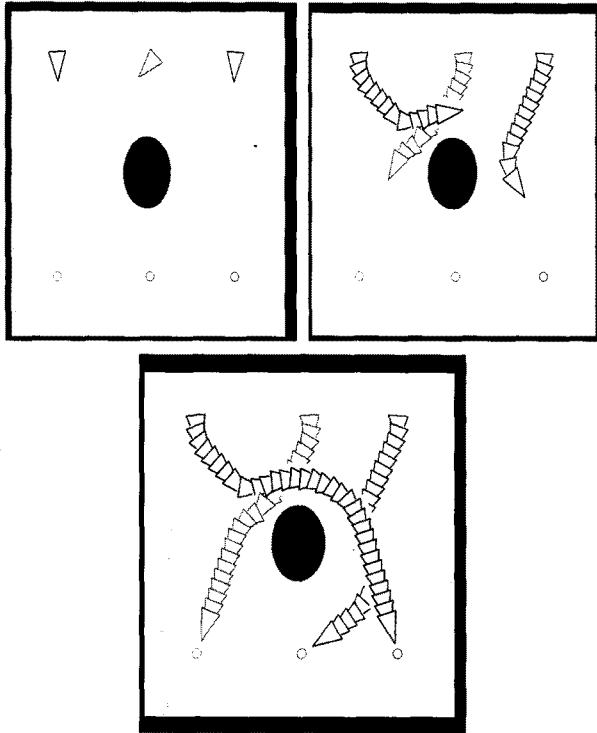


그림 5. 경로의 가운데서 장애물과의 충돌에 노출된 세 대의 움직이는 로봇의 궤적
 Fig. 5. Trajectory of three robots exposed to collision obstacle in the middle of the path.

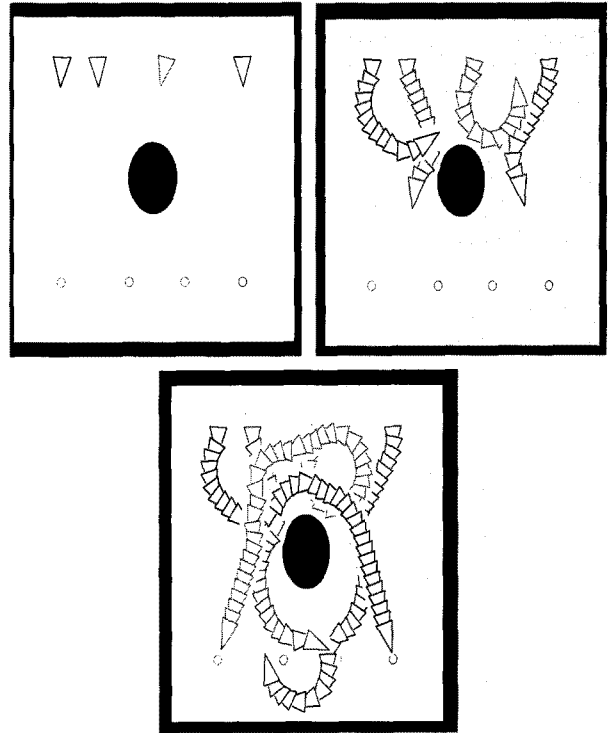


그림 7. 경로의 가운데서 장애물과의 충돌에 노출된 네 대의 움직이는 로봇의 궤적
 Fig. 7. Trajectory of four robots exposed to collision obstacle in the middle of the path.

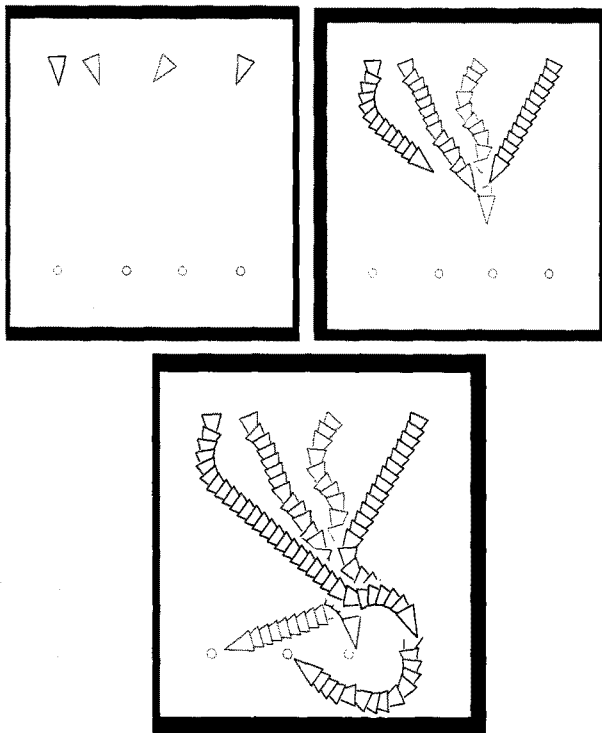


그림 6. 경로의 가운데서 충돌에 노출된 네 대의 움직이는 로봇의 궤적
 Fig. 6. Trajectory of four robots exposed to collision in the middle of the path.

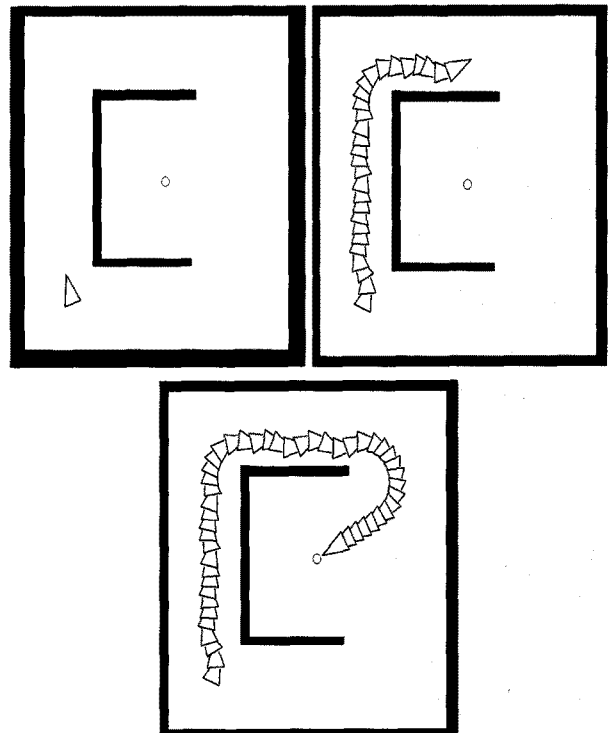


그림 8. 정적인 장애물을 따라 주행하는 로봇의 궤적
 Fig. 8. Trajectory of wall following robot (along the static obstacle).

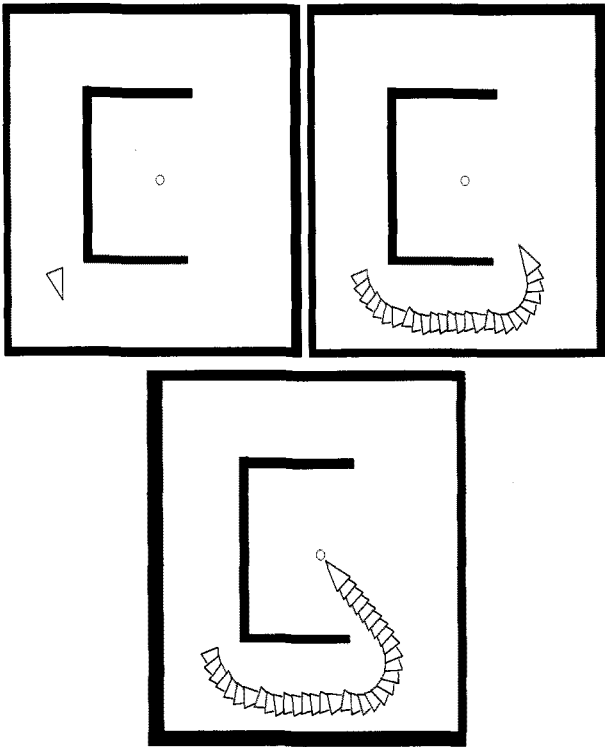


그림 9. 그림 8에서 보인 로봇의 다른 형태의 주행궤적
 Fig. 9. Different trajectory of wall following robot shown in Fig. 8 (along static obstacle).

로를 가로막고 있는 장애물을 인식하였다. 그러므로 각자의 전역경로는 수정되었다. #1, #2, #3 로봇은 장애물과의 충돌에서 벗어나고자 왼쪽, 오른쪽, 왼쪽으로 각자 회전하였다 (그림 5(우)). 마지막으로 #2 로봇과 #3 로봇이 우선 목적지에 도달했으며, #1 로봇은 이들과의 충돌 회피경로를 탐색한 후 목표점에 도착하였다(그림 5(하단)). 그림 6과 7에서는 4대의 로봇을 보여주고 있다. 그림 6(좌)에서 보인 것처럼, 각 로봇의 초기 위치가 설정되었고 #2 로봇이 #3 로봇으로 다가가고 있으므로 #3 로봇은 궤적을 다소 변경하여 최종 목적지로 다가가고 있으며 먼저 도착하였다. #3 로봇 뒤로 #2 로봇이 목표점으로 안정적이며 다소 수월하게 도착하였다. #1 로봇과 #4 로봇은 목표지점까지 도착했으나 #2 로봇이 이미 목표점에 도달해 있는 것을 인식하고 이와 충돌을 피하고자 왼쪽으로 방향을 바꾸어 #2 로봇과의 안전거리를 확보하였으며, 회전으로 인하여 목표점에 다소 늦게 도착했음을 알 수 있다 (그림 6(우-하단)). 그림 7(좌)처럼, 4대의 로봇도 앞의 경우와 마찬가지로 경로의 중앙에서 장애물과의 충돌에 노출되었다. #2 로봇이 경로의 중앙에 위치한 장애물을 인식하고 오른쪽으로 회전하여 충돌을 벗어난 후 가야 할 길을 따라 계

속해서 진행하였다. 마지막으로 #1 로봇보다 앞서 안전하게 목적지에 도착했다. #1 로봇은 장애물과의 충돌을 고려하여 왼쪽으로 방향을 바꾸어 목표지점으로 계속해서 주행하였다. #4 로봇은 왼쪽으로 약간 회전하여 목표지점으로 계속 진행했으며 #2 로봇이 가까워지고 있다는 것을 알고 다시 왼쪽으로 회전하여 최종 목적지에 도착하였다. 그 후 #3 로봇은 앞에 장애물이 있는 것을 인식한 후 회전하여 충돌에서 벗어나고 계속해서 경로를 따라 목적지에 도달하였다 (그림 7(우-하단)). 이러한 결과로 모든 로봇은 각각의 목적지에 정적 혹은 동적인 장애물과의 충돌 없이 잘 도착했음을 알 수 있다.

벽 따라 움직이는 동작은 이동 로봇에 있어 또 다른 중요한 기능이다. 따라서 이 기능도 본 논문에서 평가된다. 벽 따라 움직이는 것은 장애물을 회피하는 것뿐만 아니라 맵을 생성하는 자율이동 로봇의 네비게이션 방법으로 간주할 수 있다. 따라서 벽 따라 움직이는 실험을 통해 본 논문에서 제안된 이론의 성능을 검증하고 유용성을 확인할 수 있다.

이들 경우에 그림 1에서 보여진 코디네이션 절차에 의해 특정한 환경에 처한 로봇의 행동이 결정될 수 있다. 그림 8과 9에서 정적인 장애물인 벽을 따라 주행하는 로봇의 궤적을 볼 수 있다. 초기 로봇의 위치에 따라 결과가 전혀 다른 것을 알 수 있다. 그러나 어떠한 경우라도 벽을 따라 잘 주행하여 목표지점까지 안전하게 도착함을 알 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 멀티 모바일 로봇 시스템을 위한 효율적인 충돌회피 알고리즘이 제안되었으며 이에 대한 결과를 도출하였다. 제안된 방법은 주로 포텐셜 필드 방법과 퍼지 규칙기반 시스템에 근간을 두고 있다. 제안된 방법의 효용성과 유용성을 확인하기 위해 다수의 로봇을 이용하는 다양한 실험이 이루어지고 그 결과를 분석하였다. 알려지지 않은 환경 속에서 다중이동 로봇의 장애물 회피에 대한 연구는 매우 긍정적인 결과를 나타냈으며 장애물에 대한 움직임 예측에 대한 비싼 노력이 필요 없게 되었다. 또한 경제적인 이득과 컴퓨터 연산상의 부담을 덜고자 6개의 소나 센서와 15개의 퍼지 규칙만을 이용하였다. 서로 다른 환경에서 다양한 실험을 수행했으며, 각각의 경우에서 모든 로봇은 정적인 장애물과 동적인 장애물과의 충돌 없이 목표지점에 안정하

고 성공적으로 도착했다. 앞으로의 과제는 물리적인 멀티 모바일 로봇 시스템으로 본 연구를 확장하고 이를 평가하는 작업이 필요하다.

참고 문헌

- [1] S. S. Ge, and Y. J. Cui, "New potential functions for mobile robot path planning," *IEEE Trans. Robotics and Automation*, vol. 16, no. 5, pp. 615-620, 2000.
- [2] R. C. Arkin, *Behavior Based Robotics*, MIT press, 1998.
- [3] 정경권, 강성호, 정성부, 엄기환, "퍼펜셜 필드를 이용한 이동 로봇의 경로 계획," *한국해양정보통신학회 2006 춘계종합학술대회*, pp. 701-705, 2006
- [4] 박종훈, 이재광, 허욱열, "퍼지로직과 포텐셜 필드를 이용한 자율이동로봇의 최적경로계획법," *2003 정보 및 제어 학술회의*, pp. 11-14, 2003.
- [5] G. E. Jan, K. Y. Chang, and I Parberry, "Optimal Path Planning for Mobile Robot navigation," *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 13, no. 4, pp. 451-460, 2008.
- [6] T. C. Hu, A. B. Hahng, and G. Robins, "Optimal Robust Path Planning in General environments," *IEEE Trans. Robotics and Automation*, vol. 9, no. 6, pp. 775-784, 1993.
- [7] Y. K. Hwang, and N. Ahuja, "A Potential Field Approach to Path Planning," *IEEE Trans. Robotics and Automation*, vol. 8, no. 1, pp. 23-32, 1992.
- [8] C. P. Wu, T.T. Lee, and C.R. Tsai, "Obstacle avoidance motion planning for mobile robots in a dynamic environments with moving obstacles," *Robotica*, vol. 15, pp. 493-510, 1997.
- [9] K. P. Valavanis, T. Hebert, R. Kolluru, and N. Tsourveloudis, "Mobile Robot Navigation in 2-D Dynamic Environments Using an Electrostatic Potential Field," *IEEE Trans. Syst. Man and Cybern.-part A*, vol. 30, no. 2, 2000
- [10] N. C. Tsourveloudis, K. P. Valavanis, and T. Hebert, "Autonomous Vehicle Navigation Utilizing Electrostatic Potential Fields and Fuzzy Logic," *IEEE Trans. Robotics and Automation*, vol. 17, no. 4, pp. 490-497, 2001.
- [11] 김동원, 이종호, "충돌회피환경에서의 퍼지 규칙 기반 멀티 모바일 로봇 시스템," *제어, 로봇, 시스템학회 논문지*, 제 16권, 3호, pp. 233-238, 2010
- [12] 안창환, 김동원, "멀티 모바일 로봇 시스템의 충돌회피 경로 계획," *조명, 전기설비학회 논문지 (심사중)*
- [13] B. Siciliano, O. Khatib, *Springer Handbook of Robotics*, Springer, 2008.
- [14] R.B. Tilove, "Local obstacle avoidance for mobile robots based on the method of artificial potentials," *IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, pp. 566-571, 1990.

저자 소개



이종호(정회원)
1995년 경희대학교 전자공학과 공학박사
1990년~1991년 한국전자통신 연구소 연구원
2005년~현재 대한전자공학회 이사

1994년~현재 인하공업전문대학 디지털 전자과 교수

<주관심분야 : 신호처리>



김동원(정회원)-교신저자
2007년 고려대학교 전기공학과 공학박사.
2007년 7월~12월 고려대학교 공학기술 연구소 선임연구원 및 연구교수
2007년 12월~2008년 12월 University of California Berkeley, 박사후 연구원 - Prof. Zadeh의 BISC Group

2009년 1월~2009년 8월 University of California Davis, Research Fellow

2009년 9월~현재 인하공업전문대학 디지털 전자과 교수

<주관심분야 : 로봇틱스 및 고급제어시스템, 지능 로봇 및 로봇지능, 소프트 컴퓨팅 알고리즘>