

가려진 동적 장애물을 고려한 이동로봇의 안전한 주행기술개발

Safe Navigation of a Mobile Robot Considering the Occluded Obstacles

김 석 규, 정 우 진*
(Seokgyu Kim and Woojin Chung)

Abstract : In this paper, we present one approach to achieve safe navigation in indoor dynamic environment. So far, there have been various useful collision avoidance algorithms and path planning schemes. However, those algorithms have a fundamental limitation that the robot can avoid only "visible" obstacles. In real environment, it is not possible to detect all the dynamic obstacles around the robot. There exist a lot of "occluded" regions due to the limitation of field of view. In order to avoid possible collisions, it is desirable to consider visibility information. Then, a robot can reduce the speed or modify a path. This paper proposes a safe navigation scheme to reduce the risk of collision due to unexpected dynamic obstacles. The robot's motion is controlled according to a hybrid control scheme. The possibility of collision is dually reflected to a path planning and a speed control. The proposed scheme clearly indicates the structural procedure on how to model and to exploit the risk of navigation. The proposed scheme is experimentally tested in a real office building. The presented result shows that the robot moves along the safe path to obtain sufficient field of view, while appropriate speed control is carried out.

Keywords : obstacle avoidance, autonomous navigation, mobile robot, speed control, occluded dynamic obstacle

I. 서론

사람과 공존하는 이동로봇의 자율주행에서 충돌에 대한 안전은 반드시 해결해야 하는 문제이다. 또한 안전성이 확보 되는 한도 내에서 가능한 한 고속으로 주행하는 것은 이동서비스의 효율성 향상을 위해 바람직하다. 하지만 안전한 고속 주행에는 여러 가지 어려움들이 존재한다. 이러한 문제는 다음의 세 가지로 분류될 수 있다.

- 1) 기계적, 동역학적 문제
 - 2) 장애물감지 및 충돌회피 운동제어 성능의 문제
 - 3) 돌발 장애물의 출현 등 예측하기 어려운 주행환경의 변화
- 첫 번째 문제는 고속으로 선회 또는 급정지 시 발생할 수 있는 바퀴의 미끄러짐이나 로봇 본체의 진폭 등과 같은 기계적 문제이다. 문헌 [8]에서는 로봇의 속도가 증가함에 따라 동역학적인 요소가 반드시 고려되어야 한다고 지적하고 있다. 하지만 이런 문제는 적절한 속도 및 가속도 제한으로 많은 경우에 해결 가능하며, 다른 두 가지 요인에 비해 상대적으로 심각성이 낮다고 볼 수 있다.

두 번째 문제는 실시간 충돌회피 운동제어의 성능이다. 로봇의 최고 주행 속도는 센서 주기와 감지 범위, 계산시간, 구동기의 응답속도 등 다양한 요인의 영향을 받는다. 이러한 실시간 충돌 회피문제는 전 세계적으로 많은 연구가 진행되고 있으며 문헌 [2]에서 제시한 DWA(Dynamic Window Approach) 등 유용한 제어기법이 다양하게 제안되어 있다.

본 논문에서 주목하는 문제는 세 번째 문제이다. 특히, 시야의 가려짐에 의해 거리 센서로 감지할 수 없는 영역으로부터 갑자기 출현하는 장애물과의 충돌위험에 주목한다. 운전자는 신호등이 없는 교차로에 진입하는 순간 속도를 감속하

면서 잠재적인 돌발 장애물에 대비하며, 가능한 한 시야를 충분히 확보할 수 있는 경로로 주행한다. 위와 같은 행동패턴은 실내 환경의 문 앞이나 모서리, 기둥 근처를 지나가는 사람에서도 관찰된다. 이것은 안전한 고속 주행을 위해서는 센서로 감지할 수 있는 장애물뿐만 아니라 잠재적인 위험요인을 고려해야 함을 의미한다. 시야를 제한하는 위치정보가 이동로봇의 주행에 반영되면 보다 안전한 주행을 도모할 수 있음이 본 연구의 핵심 아이디어라 할 수 있다.

시야의 제한에 관한 문제와 돌발 장애물 출현으로 인한 충돌 문제에 관해 최근 몇몇 연구가 진행되고 있다. Sadou 등 [4]은 로봇의 주행 예정 경로상에 놓여있는 가려진 장애물에 주목하였다. 이 연구는 감지가 불가능한 장애물의 잠재적인 위험성을 다루었다는 측면에서 중요한 의미를 가진다. 하지만 경로상에 위치한 정적 장애물만을 대상으로 하였고 경로 수정 전략이 고려되지 않았기 때문에 그 효과는 제한적이다. 문헌 [7]에서는 주행과 관련된 과거의 축적된 경험을 활용하는 기법이 제시되었다. 실내에서 이동하는 사람들의 동선과 이동패턴을 관측하고 그 결과를 바탕으로 효과적인 로봇의 움직임을 도출하였다. 이 연구는 환경의 변화와 불확실성에 대처하기 위해 과거의 경험을 활용할 수 있음을 보였다는 의미를 가진다. 하지만, 경험은 통계적이고 확실적인 정보를 제공하는 것으로서, 본 논문의 주안점인 안전성의 문제를 해결하는 데에는 한계가 있다. 충돌 문제는 그 가능성이 낮다고 해서 성공적인 것이 아니며, 기본적으로 언제나 보장되어야 하는 성능이기 때문이다. Krishna 등[6,11]은 주행경로상에서 속도제어와 시야의 제한을 고려한 경로의 부분적인 수정기법을 제안하였다. 이 연구는 안전확보를 위한 경로생성과 속도제어의 조합방안에 대한 한가지 예를 보였으나 실시간 동적 장애물을 고려하지 않고 있어, 주행의 위험 요인을 반영하는 일반적이고 체계적인 해법으로 보기는 어렵다. 문헌 [9]에서는 충돌 위험을 고려한 속도제어 기법이 제시되었다. 이 동체의 특성과 운전 조건을 고려한 속도조건들이 체계적으로 제시되어있다. 하지만 경로생성과의 관련성이 제시되지

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2006. 12. 14., 채택확정 : 2007. 11. 30.

김석규 : 현대기아 연구개발총괄본부(seokgyu.kim@hyundai-motor.com)

정우진 : 고려대학교(smarterobot@korea.ac.kr)

※ 이 논문은 2005년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2005-003-D00017).

않은 점이 한계이다.

본 논문에서는 안전한 자율주행을 위해 갑자기 나타나는 동적 장애물과의 충돌위험을 줄일 수 있는 기술을 개발하였다. 본 연구의 성과는 주행의 위험도를 체계적이며 정량적으로 반영할 수 있는 경로계획과 운동제어기법이라 할 수 있다. 본 논문에서는 충돌에 대한 위험요인을 도출하고, 그 결과가 경로계획에 반영되어 시야를 확보하는 경로를 생성하고, 시야가 제한된 지역에서 안전을 보장하기 위한 속도제어에 활용된다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 환경지도를 바탕으로 시야가 제한되는 위험지역에 대한 위치 정보와 안전 최대 속도의 계산 방법에 대해 설명하고, 3장에서는 안전하고 빠른 주행을 위해 주행위험도를 반영할 수 있는 주행제어 기술에 대해 설명한다. 4장에서는 실제 환경에서의 실험을 통해 제안된 주행기법의 타당성을 검증하고 마지막으로 5장에서 본 연구의 결론을 제시한다.

II. 시야정보를 활용한 위험도 모델링

1. 시야제한 영역

기지의 환경지도를 바탕으로 특정 위치에서 시야가 제한되는 영역을 계산할 수 있다. 로봇의 동적 특성과 장애물의 이동속도를 고려하여 로봇과 충돌을 야기 할 수 있는 거리범위 내의 보이지 않는 영역만을 고려한다. 충돌가능 거리범위는 다음의 식과 같이 쉽게 계산 할 수 있다.

$$d_{collision} = d_{delay} + d_{break} + d_{obs} \quad (1)$$

$$d_{delay} = t_{delay} \times (v_r + v_{obs}) \quad (2)$$

$$d_{break} = v_r^2 / (2 \times a_{robot}) \quad (3)$$

$$d_{obs} = v_{obs} \times \frac{v_r}{a_{robot}} \quad (4)$$

$d_{collision}$, d_{delay} , d_{break} , d_{obs} 는 각각 충돌 위험거리, 지연 시간 동안 로봇과 장애물의 이동거리, 정지를 위한 감속과정의 거리, 정지하는 동안 장애물의 이동거리를 말하고, v_r 과 v_{obs} 는 각각 로봇과 장애물의 초기속도를, a_{robot} 는 로봇의 가속도를 나타낸다. t_{delay} 는 센서의 특징으로 나타나는 탐지 지연시간, 즉 탐지주기를 말한다. 실제 주행에 사용된 로봇의 최대 속도는 0.5m/s, 최대가속도는 0.8m/s², 센서 샘플링 주기는 0.2초이다. 동적 장애물의 최대 속도는 2m/s로 가정하였다. 이를 바탕으로 계산하면 (1)로부터 로봇이 최대 속도일 때 충돌위험거리는 약 2m 이다. 즉 로봇주위 2m 이내의 동적 장애물은 로봇이 최고속도로 주행하고 있을 때 충돌가능성이 존재한다.

로봇주위의 가려짐 영역은 다음의 식으로 구할 수 있다.

$$Occlusion(s_r) = search(s_r) - scan(s_r) \quad (5)$$

서비스 로봇은 정해진 공간을 반복적으로 이동하므로 비교적 정확한 환경지도를 가지고 있다고 가정할 수 있다. 따라서 환경내의 일정위치 s_r 를 기준으로 충분히 가까운 주위 영역 $search(s_r)$ 을 계산할 수 있다. 엄밀하게는 로봇의 감속과 그에 따른 도달가능 영역(reachable region)을 계산하여야 하지만 모든 지점에서 도달가능영역을 계산하는 것은 계산 부담

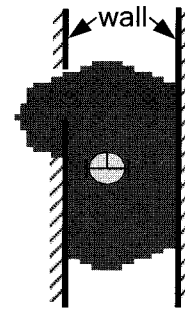


그림 1. Wave-front propagation으로 구한 로봇주위 영역.

Fig. 1. Computing the reachable region by the wave-front propagation.

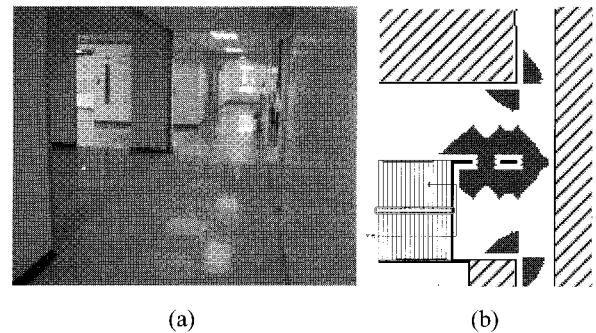


그림 2. 실험환경(a)와 가려짐이 있는 위험 영역(b).

Fig. 2. Experimental environment (a) and occluded region (b).

이 지나치게 크다. 따라서 문헌[1]에서 제시된 wavefront propagation 기법을 이용하여 로봇 중심으로 대략 2m근방에 대한 계산을 수행하였다. 로봇의 좌측전방에 문이 열려있는 복도 주행상황에 대하여 계산된 결과를 그림 1에 보였다.

이렇게 정의된 로봇 주위 영역으로부터 센서가 직접 감지할 수 있는 영역 $scan(s_r)$ 을 제외하면 가려진 영역 $occlusion(s_r)$ 을 계산할 수 있다. 직접 감지할 수 있는 영역은 ray-casting 기법을 이용하여 계산한다. 이러한 계산을 환경내의 모든 위치에 대해 반복적으로 수행하면, 가려짐이 있는 위험 지역을 도출해 낼 수 있다. 이러한 과정은 주행의 위험도 도출을 위한 전 처리 과정이라고 볼 수 있다.

그림 2(a)는 실제 환경을 보여주고 있다. 그림 2(b)는 시야가 제한되는 모든 영역을 계산한 결과이다. 로봇이 점유된 위치에 있는 경우 로봇주위의 일정거리 내에 시야가 제한되는 비어있는 공간이 존재함을 의미한다. 시야가 제한되는 영역은 주로 코너나 기동 근처에 있음을 쉽게 알 수 있고, 사람이 일상생활에서 경험적으로 알고 있는 돌발장애물과의 충돌위험지역과 일치함을 알 수 있다.

2. 최대 안전 속도

로봇이 시야가 제한되는 영역을 빠른 속도로 주행하게 되는 경우 갑자기 나타나는 동적 장애물과 충돌할 위험이 높다. 그러므로 이러한 구간에서는 충돌 위험을 줄이기 위해 속도를 줄이는 것이 바람직하다.

시야가 제한되는 영역에서는 시야를 제한하게 하는 특정한 지점이 존재한다. 이러한 지점은 대부분 돌출된 모서리부분으로, 환경을 정확하게 반영하는 격자지도에서 주위의 좌

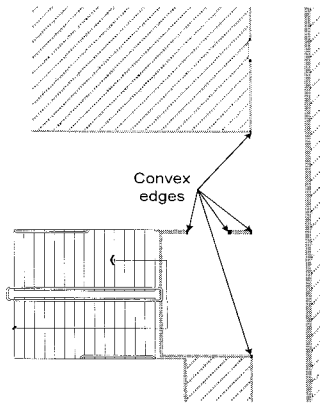


그림 3. 특이점.
Fig. 3. Convex edges.

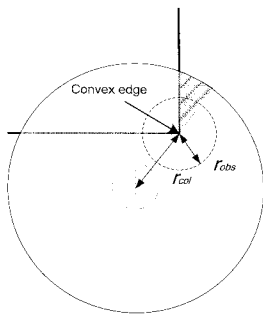


그림 4. 충돌 회피를 위한 최소 여유거리 모델.
Fig. 4. Minimum clearance model to prevent collision.

우, 상하, 대각선영역의 점유정보를 비교함으로써 시야를 제한하게 하는 특정한 지점(convex edge)을 찾을 수 있다.

그림 3은 그림 2에 나타난 환경에서 격자지도를 바탕으로 찾아낸 특이점(convex edge)들을 보여주고 있다. 이러한 특이점은 시야가 제한되는 영역으로부터 갑자기 나타나는 장애물과의 충돌회피를 위한 안전한 최대 속도를 계산하는데 활용된다.

동적 장애물은 안 보이는 영역내의 임의의 위치에서 임의의 방향으로 이동한다고 생각할 수 있다. 이때, 충돌 위험성이 가장 높은 경우는 모서리 바로 부근에 있던 장애물이 로봇이 있는 방향을 향해 최대 속도로 이동하는 경우에 해당한다. 이럴 경우 충돌이 일어나기까지의 속도와 거리를 계산하기 위해서 그림 4와 같이 모서리 지점을 중심으로 한 반경 r_{obs} 의 원을 가정한다. 이때에 충돌이 일어나지 않기 위해서는 (1)의 $d_{collision}$ 이 r_{obs} 보다 작아야 한다. $d_{collision}$ 은 로봇과 장애물의 주행 속도에 의존하므로 동적 장애물의 최대 속도를 가정하면, 로봇과 모서리 간의 거리인 r_{col} 에 따른 안전 주행 속도를 계산 할 수 있다.

그림 5는 로봇주행 속도에 따른 충돌여유거리의 계산 결과를 보여준다. 실험용 로봇의 거리센서 값 갱신 주기는 0.2 초, 동적 장애물의 최대속도는 2m/s이다. 그림 5로부터 로봇이 속도가 아무리 느리더라도 모서리로부터 최소 약 0.4m 이상 떨어져야 함을 알 수 있다. 이것은 2m/s로 움직이는 동적 장애물이 한번의 센서주기 0.2초 동안 약 0.4m 이동할 수 있기 때문에 로봇이 정지해 있더라도 0.4m의 거리여유가 필요

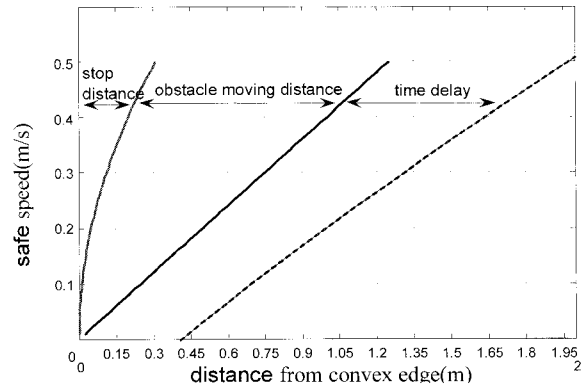


그림 5. 최대안전속도에 따른 충돌 여유거리.
Fig. 5. r_{col} versus maximum safe speed of a robot.

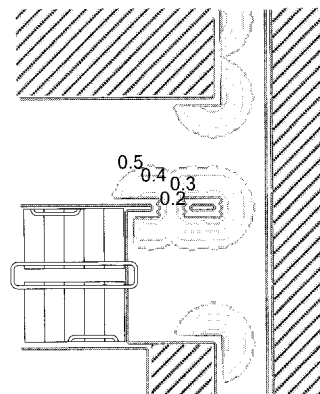


그림 6. 최대 안전속도 계산 결과.
Fig. 6. Computed maximum speed for safety speed(m/s).

함을 의미한다. 만약 로봇이 0.3m/s로 움직인다면 로봇에게는 최소 1.35m 가량의 거리 여유가 필요하다. 역으로, 현재의 거리여유가 1.8m가량이라면 로봇의 최대 속도는 약 0.4m/s 이하가 되어야 안전하다. 불록한 모서리 지점을 동적 장애물의 출발가능지점으로 가정한 안전 속도제어기법은 문헌 [6]에서도 제시되어있다. 하지만 문헌 [6]에서는 예정경로가 위험지역에 포함되는지에 따른 부분적인 수정에 대한 기법만 제시되었고, 본 연구에서는 일반성을 갖는 최대 속도조건을 도출하였다는 것이 차별성이다.

그림 6은 실제 환경에서 모서리와의 거리에 따른 안전한 속도를 구한 결과를 보여준다. 모서리로부터 멀어질수록 최대 안전속도가 빠른 것을 알 수 있다. 즉 로봇이 모서리에 근접할수록 저속으로 주행해야 돌발 장애물의 출현에도 안전할 수 있음을 보여준다.

3. 속도 정보와 시야정보

특이점까지의 거리를 바탕으로 구한 안전한 속도정보영역 분포는 앞서 구한 시야가 제한되는 위험영역과 일견 비슷하게 보인다. 하지만 두 정보를 자세히 살펴보면 조금 차이가 있음을 알 수 있다. 즉 안전한 속도 정보는 시야의 제한에 대한 정보를 포함하지 않고 있다. 그러므로 앞서 구한 시야가 제한 되는 위치정보와 모서리와의 거리로부터 구한 안전한 속도를 조합하여 시야가 제한되는 구간에서의 안전한 최대 속도정보만을 추출할 필요가 있다.

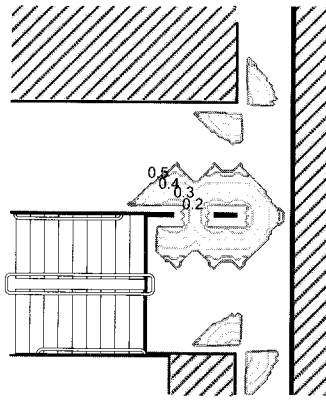


그림 7. 시야제한 영역에서 안전속도.
Fig. 7. Safe speed at occluded region.

그림 7은 시야정보와 최대 안전속도정보를 조합한 결과를 보여주고 있다. 특이점 근처에서 시야가 제한되지 않는 영역이 제외되었음을 알 수 있다. 결국, 시야가 제한되는 영역에서의 돌발 장애물과의 충돌위험도는 그림 7과 같이 정량적으로 표현된다고 할 수 있다.

III 경로계획과 운동제어

주행 위험도의 모델링과 활용에는 여러 가지 방법이 있을 수 있다. 실내환경에서 동작하는 자율주행 이동로봇의 주행 기술 통합연구[5]를 바탕으로 앞서 구한 환경의 정보를 두 가지 방법으로 반영하였다. 먼저 시야가 제한되는 위치정보는 위험지역을 우회하는 경로계획에 반영하고, 또한 추가적으로 로봇의 위치에 따른 최대 속도를 제한하여 안전하고 효율적인 주행을 할 수 있도록 하였다.

본 연구에 사용된 이동로봇의 제어구조는 문헌 [3]과 같이 운동제어와 경로계획이 상호 유기적으로 동작하는 하이브리드 접근방식으로 되어있다. 경로계획은 그래디언트[1]기법에 기초하였고 실시간 충돌회피 운동제어는 Global Dynamic Window Approach[3]을 바탕으로 하였다. 또한 로봇의 위치는 Monte Carlo 방식의 위치추정기법[10]을 사용하여 추출하였다.

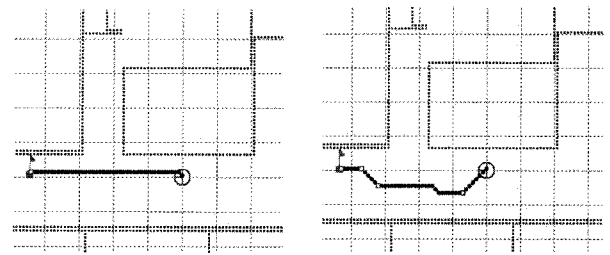
1. 경로계획

그래디언트 경로계획법[1]은 국부최소를 피하면서 목표지점까지의 최적 경로를 계산한다. 최적화는 목표지점까지의 거리에 대한 비용, 장애물에서 떨어진 정도에 대한 비용 등을 고려해서 이루어진다.

$$F(P) = \sum I(p) + \sum A(p_i, p_{i+1}) \tag{6}$$

P_i 는 환경에서 로봇이 있을 수 있는 위치를 나타낸다. $I(p)$ 는 P_i 에서의 고유비용(intrinsic cost), $A(P_i, P_{i+1})$ 는 P_i 에서의 인접한 위치(P_{i+1})까지의 이동비용(adjacency cost)를 나타낸다. 그래디언트 경로 계획방법에서는 경로에 대한 비용은 고유비용과 인접이동비용으로 나누어진다. 인접이동 비용은 한 격자에서 다음 격자로 움직일 때의 비용으로 일반적으로 거리에 비례한 값을 가진다. 고유비용은 장애물에 대한 비용으로 장애물에 가까울수록 높은 값을 가진다. 또 미지의 영역이나, 주행의 위험도가 큰 지역에 높은 값을 부여할 수 있다.

본 연구에서는 인접이동비용을 최대안전속도 조건하에서



(a) Conventional path (b) Proposed path

그림 8. 교차로를 지나는 경로.
Fig. 8. Path passing through the junction.

의 이동시간으로 정의하였다. 시야가 제한되는 영역이 없는 환경이라면 기존의 방법과 동일한 경로를 생성한다. 하지만 시야가 제한되는 영역의 경우에는 위험지역을 우회하면서도 빠르게 주행할 수 있는 경로를 생성해준다.

그림 8(a)은 최단거리 이동에 해당하는 일반적인 경로계획법의 결과를 보여주고 우측 그림은 최대 안전 속도를 바탕으로 최소이동 시간의 경로계획 결과를 보여준다. 교차로 부근을 우회하는 경로가 돌발 장애물과의 충돌에 대비하여 시야를 확보하는 위치에 형성되어 있음을 직관적으로 알 수 있다. 시야가 확보되는 위치에서는 상대적으로 이동속도를 높일 수 있으므로 (b)의 경우에 이동거리는 다소 늘어나지만 결과적인 이동시간은 단축된다.

2. 속도구속조건

본 연구에서는 Global Dynamic Window Approach [3]충돌회피 주행기술을 활용하였다. 미리 전역적으로 경로를 계산한 후에 DWA 충돌회피 기술을 바탕으로 동적 장애물을 피하면서 중간 목표지점까지 주행한다. DWA의 주행 성능지수는 목표지향성, 충돌에 대한 안전성, 이동의 고속화라는 3가지 계산을 수행하는 것으로 구성된다. 본 연구에서 도출한 지역에 따른 최대 이동속도를 반영하기 위해서는 DWA에서 이동의 고속화 성능지수 부분에 최대 속도 조건을 추가적으로 부여하면 된다. 따라서 도출한 최대속도조건의 체계적인 활용이 가능하다.

IV 실험결과

복도, 방, 교차로, 홀 등이 있는 20m x 80m 크기의 대형건물에서 실제 이동로봇을 사용하여 주행실험을 수행하였다. 환경에 대한 정확한 격자지도를 기초로 시야가 제한되는 위치정보와 안전한 최대 주행속도 정보를 계산하였다. 환경에 대한 정보를 활용한 경우와 그렇지 않은 경우에 대해서 주행 성능을 비교하기 위해 동일한 조건의 주행 실험을 수행하였다.

1. 위험지수

위험지수는 주행하는 동안 충돌위험성을 정량화하기 위한 지수로 샘플링 주기 동안 제어 가능한 속도영역(dynamic window [2])에서 충돌에 안전한 속도 범위의 면적과 충돌이 일어나는 면적의 비로써 (7)과 같이 충돌여유합수를 정의하였다. 제어 가능한 속도영역은 최대 속도, 가속도, 제어주기에 의해 정해지며 그 속도 영역내의 모든 속도는 센서정보를 바탕으로 충돌시간을 계산함으로써 충돌여부를 계산하게 된다.

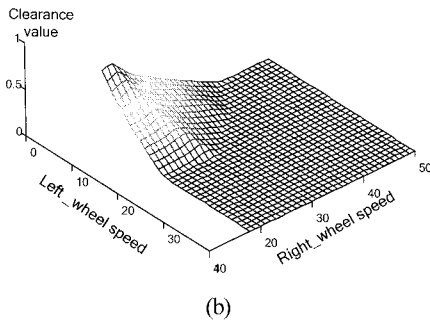
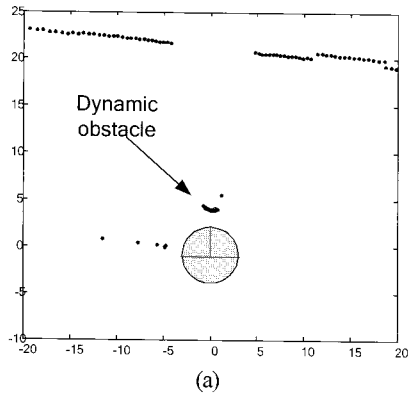


그림 9. 장애물 출현 시 센서정보(a), 충돌여유함수 값(b).

Fig. 9. A sensor data when a dynamic obstacle appears (a), Clearance object value (b) (left wheel velocity: 0.24m/s, right wheel velocity 0.34m/s).

$$I_{danger} = \frac{A_{collision}}{A_{collision} + A_{safe}} \quad (7)$$

(7)에서 $A_{collision}$ 는 속도영역 내의 충돌을 야기하는 속도영역의 면적, A_{safe} 는 충돌에 안전한 속도영역의 면적을 말한다. Dynamic window 속도영역 내에서 충돌을 야기하는 속도영역이 넓은 경우 위험지수는 1에 가까운 값을 가지게 되고 충돌 위험이 낮은 안전한 주행상황에서는 위험지수는 0의 값을 가지게 된다.

그림 9의 왼쪽 그림은 장애물이 로봇에 근접해 있는 순간의 센서정보를 나타내고, 오른쪽 그림은 그 순간의 DWA의 충돌여유함수의 값을 나타낸다. 충돌여유함수가 0의 값을 가지는 속도는 장애물과 충돌이 일어남을 나타낸다. 따라서 그림 10의 경우는 제어 가능한 속도영역 내에서 충돌이 일어나지 않는 속도영역의 범위가 대단히 좁기 때문에 비교적 위험한 상황으로 간주할 수 있다.

2. 코너진입실험

코너에 진입하는 주행실험을 하면서 위험지수와 주행시간으로 주행의 안전도와 효율을 알아보았다. 여러 번의 실험마다 동적 장애물은 그림 10의 A에서 출발하여 B로 움직이고 로봇은 그림 10의 출발 위치로부터 목표지점으로 이동하였다. 각각의 실험은 서로 다른 주행 기법으로 실행되었으며 주행실험 동안 주행시간과 위험도를 측정하였다.

2.1 가려짐에 의한 위험성을 고려하지 않은 주행실험

경로는 주행 위험성을 반영하지 않은 기존의 경로계획 기

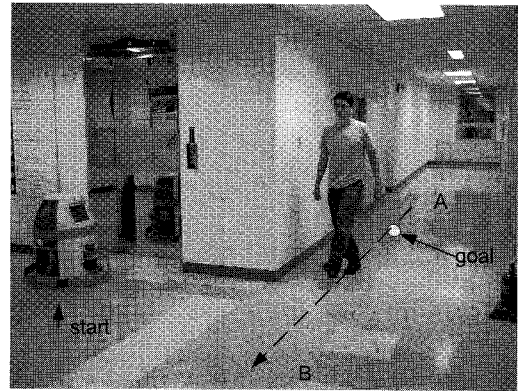


그림 10. 실험 환경.

Fig. 10. Experimental environment.

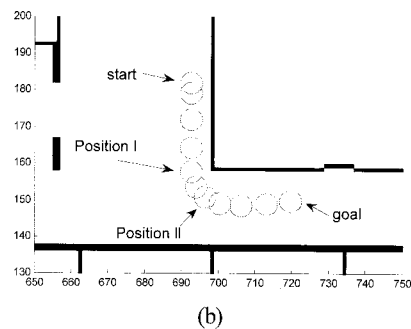
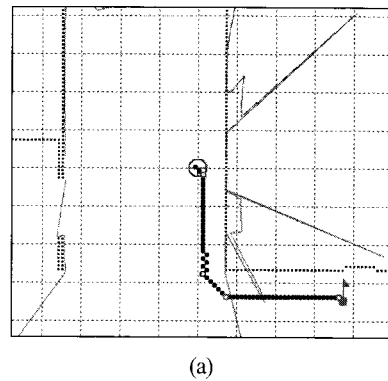


그림 11. 실험 경로(a)와 로봇의 움직임(b) (실험 1 주행시간 10.2초).

Fig. 11. Experimental path and the robot's motion with conventional approach (experiment 1 travel time 10.2s).

법으로 생성하고 운동제어에서도 가려짐을 고려한 최대 안전 속도 조건을 고려하지 않았다.

그림 11(a)은 로봇의 초기 위치에서 목표지점까지의 경로를, (b)는 실제 로봇의 이동경로를 보여주고 있다. 생성된 경로는 최단거리 경로로서 벽에 매우 근접하여 지나간다. 로봇이 모서리 부근에 도달한 순간 갑자기 나타난 동적 장애물에 의해서 순간적으로 속도를 줄인 모습이 그림 11(b)과 같이 위치 I과 II사이 구간과 같이 나타나 있다.

그림 12는 주행하는 동안의 속도와 위험도 변화를 보여주는 그림이다. 로봇은 빠른 속도로 주행하고 있었기 때문에 돌발 장애물 출현 순간 갑자기 속도를 줄이고 위험지수도 순간적으로 증가하였다. 로봇은 장애물이 지나고 난 후 다시

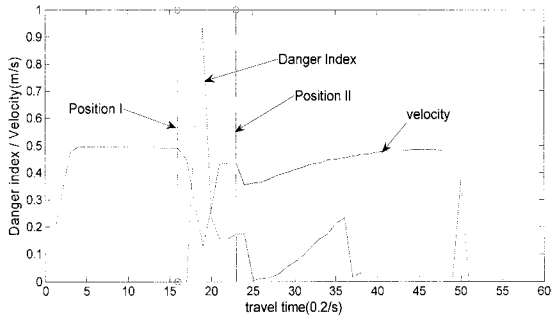


그림 12. 위험지수와 속도변화(실험 1).
Fig. 12. Danger index and speed change (experiment 1).

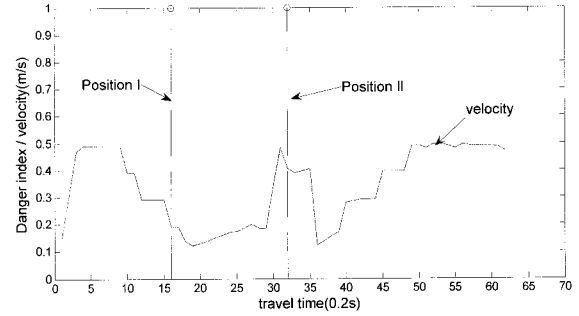
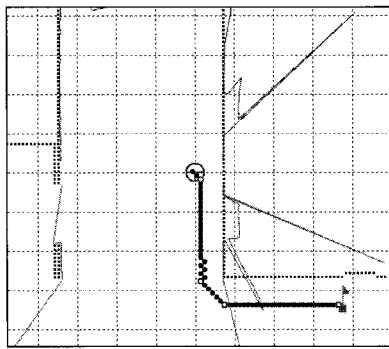
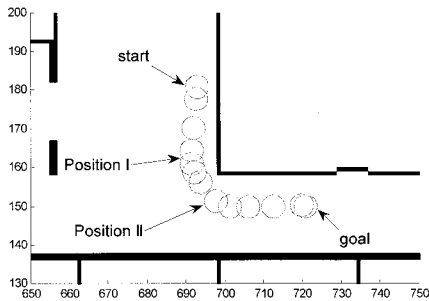


그림 14. 위험지수와 속도변화(실험 2).
Fig. 14. Danger index and speed change (experiment 2).



(a)



(b)

그림 13. 실험 경로(a)와 최대 안전 속도 기법을 적용한 로봇의 움직임(b)(실험 2 주행시간 12.4초).
Fig. 13. Experimental path and the robot's motion with proposed speed control (experiment 2 travel time 12.4s).

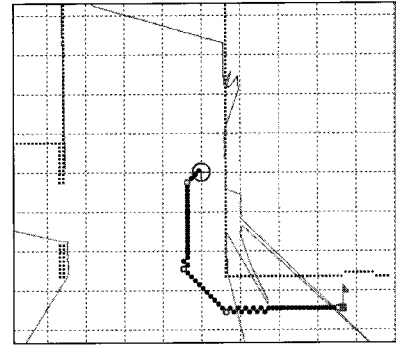
가속해서 목표지점까지 주행하였다. 즉, 모서리 건너편에 가려져 있던 장애물의 갑작스런 출현으로 인하여 순간적으로 위험지수가 1에 가까운 충돌 위험 상황이 발생하였다.

2.2 속도제어 주행

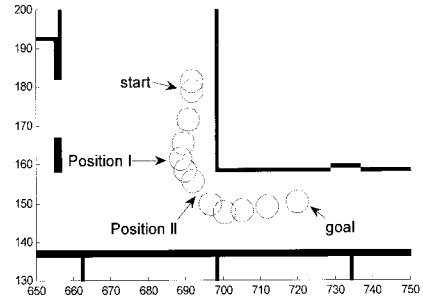
두 번째 실험에서는 경로생성은 기존의 기법을 활용하고 최대 안전 속도 조건만을 반영하여 속도제어를 수행하였다. 따라서 주행경로는 실험1에서의 경로와 동일하다.

그림 13으로부터 경로는 첫 번째 실험과 동일하지만 모서리에 접근함에 따라 동적 장애물과의 충돌위험에 대비하기 위하여 장애물 출현 이전에 미리 속도를 줄였음을 알 수 있다.

그림 14는 실험 2에서의 위험지수와 주행속도를 나타낸다. 그림 14의 위치 1 주위의 속도변화로부터 로봇이 모서리에 근접하면서 미리 속도를 줄였음을 알 수 있다. 위험지수는



(a)



(b)

그림 15. 실험 경로(a)와 로봇의 움직임(b) (실험 3 주행시간 11.8초).
Fig. 15. Experimental path and the robot's motion with the proposed path planning and speed control (experiment 3 travel time 11.8s).

돌발 장애물의 출현에도 불구하고 0을 유지함으로써 주행시 안전성이 확보되었다. 로봇에 근접하게 장애물이 통과하였으나 낮은 주행속도로 인하여 충돌에 안전했음을 알 수 있다. 총 주행 시간은 12.4초가 걸렸다.

2.3 안전한 경로계획과 속도제어의 통합 주행

마지막 실험에서는 가려짐에 의한 위험성을 경로계획과 운동제어에 모두 반영하였다.

그림 15(a)에서 보듯이 생성된 경로는 위험지역을 우회하는 경로가 생성되었다. 모서리에 접근할수록 로봇은 속도를 서서히 줄였고, 시야를 최대한 확보하며 실험 2에 비해서는 상대적으로 고속으로 주행하였다. 따라서 주행거리는 다소 늘었으나 총 주행시간은 11.8초로서 단축되었다.

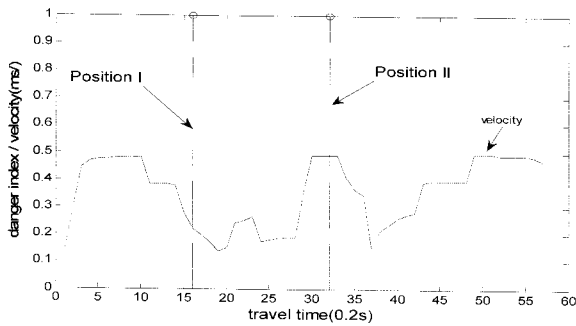


그림 16. 위험지수와 속도변화(실험 3).

Fig. 16. Danger index and speed change (experiment 3).

주행 중 위험지수는 항상 0을 유지하였다.

V 결론

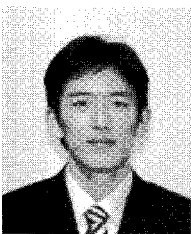
본 논문에서는 시야정보를 바탕으로 가려진 동적 장애물과의 충돌을 고려한 안전한 주행기술을 제안하였다. 돌발 장애물의 출현위험을 정량적으로 도출하여 경로계획과 충돌회피 제어에 활용하였다. 제안한 경로계획법은 시야를 확보하면서 빠르게 움직일 수 있는 경로를 생성하게 해주고, 속도 제어기법은 위험지역에서의 최대 속도를 제한하여 안전한 주행을 가능하게 하였다. 시야의 가려짐에 의한 주행위험도를 활용한 주행기법이 안전하고 효율적임을 주행실험으로 검증하였다.

참고문헌

- [1] Konolige, "A gradient method for realtime robot control," *Proc. of the IEEE/R SJ Conf. on Intelligent Robots and Systems*, Takamatsu, Japan, pp. 639-646, 2000.
- [2] D. Fox, W. Burgard, and S. Thrun, "The dynamic window approach to collision avoidance," *IEEE Robotics and Automa-*

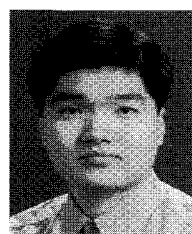
tion Magazine, vol. 4, no. 1, pp. 23-33, 1997.

- [3] O. Brock and O. Khatib, "High speed navigation using the global dynamic window approach," *In Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation*, vol. 1, pp. 341-346, 1999.
- [4] M. Sadou, V. Polotski, and P. Cohen, "Occlusions in obstacle detection for safe navigation," *IEEE Intelligent Vehicle Symposium*, pp. 716-721, 2004.
- [5] W. Chung, G. Kim, and M. Kim "Development of the Multi-Functional Indoor Service Robot PSR Systems," *Autonomous Robots* (To appear. Published online at <http://dx.doi.org/10.1007/s10514-006-9001-z>)
- [6] K. M. Krishna, R. Alami, and T. Simeon, "Safe proactive plans and their execution," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 54, pp. 244-255, 2006.
- [7] M. Bennewitz, W. Burgard, G. Cielniak, and S. Thrun. "Learning motion patterns of people for compliant motion," *International Journal of Robotics Research*, 24(1), 2005.
- [8] W. Burgard, A. B. Cremers, D. Fox, G. Lakemeyer, D. Hähnel, D. Schulz, and S. Thrun. "Real robots for the real world—the RHINO museum tour-guide project," *In Proc. of the AAAI 1998 Spring Symposium on Integrating Robotics Research: Taking the Next Leap*, 1998.
- [9] A. Mandow, V. F. Mufloz, R. Fernandez, and A. G-Cerezo. "Dynamic speed planning for safe navigation," *In Proc. of the int. Conference on Intelligent Robots and Systems(IROS)*, 1997.
- [10] F. Dellaert, D. Fox, W. Burgard, and S. Thrun, "Monte carlo localization for mobile robots," *In Proc. IEEE Int. Conference on Robotics and Automation*, Detroit, MI, 1999, pp. 1322-1328.
- [11] R. Alami, T. simeon, and K. M. Krishna, "On the influence of sensor capacities and environment dynamics onto collision free motion plans," *In Proc. IEEE/R SJ Int. Conference on Intelligent Robots and Systems*, EPFL, Switzerland, 2002.



김 석 규

1980년 1월 8일생. 2005년 고려대학교 기계공학과(공학사). 2007년 동 대학원 기계공학과 석사. 2007년~현재 현대기아 연구개발총괄본부 바디제어설계팀 연구원. 관심분야는 이동로봇, 지능제어, Safety Vehicle.



정 우 진

1970. 11. 20일생. 1993년 서울대 기계설계학과 졸업. 1995년 동경대 기계정보공학과 석사. 1998년 동 대학원 박사. 1998년~2005년 KIST 선임연구원. 2005년~현재 고려대학교 기계공학과 조교수. 관심분야는 이동로봇 위치추정 및 주행제어, 논홀로노믹 시스템 제어, 다지 로봇손.

어, 논홀로노믹 시스템 제어, 다지 로봇손.