Limit-cycle 항법과 모서리 검출을 기반으로 하는 UGV를 위한 계획 경로 알고리즘

Path Planning Algorithm for UGVs Based on the Edge Detecting and Limit-cycle Navigation Method

임 윤 원, 정 진 수, 안 진 웅, 김 동 한*

(Yun-Won Lim¹, Jin-Su Jeong², Jin-Ung An³, and Dong-Han Kim⁴)

¹LIGNex1

²TITENG

³Daegu Gyeongbuk Institute of Science & Technology

⁴Kyunghee University

Abstract: This UGV (Unmanned Ground Vehicle) is not only widely used in various practical applications but is also currently being researched in many disciplines. In particular, obstacle avoidance is considered one of the most important technologies in the navigation of an unmanned vehicle. In this paper, we introduce a simple algorithm for path planning in order to reach a destination while avoiding a polygonal-shaped static obstacle. To effectively avoid such an obstacle, a path planned near the obstacle is much shorter than a path planned far from the obstacle, on the condition that both paths guarantee that the robot will not collide with the obstacle. So, to generate a path near the obstacle, we have developed an algorithm that combines an edge detection method and a limit-cycle navigation method. The edge detection method, based on Hough Transform and IR sensors, finds an obstacle's edge, and the limit-cycle navigation method generates a path that is smooth enough to reach a detected obstacle's edge. And we proposed novel algorithm to solve local minima using the virtual wall in the local vision. Finally, we verify performances of the proposed algorithm through simulations and experiments.

Keywords: UGV, path planning, limit-cycle, edge detection, local vision

I. 서론

UGV (Unmanned Ground Vehicle)는 로봇이 사람의 명령 없이 주어진 임무를 수행하는 UV (Unmanned Vehicle)의 한 부류이다. UGV는 현재 산업현장에서는 화물 운반용과 같은 용도로 사용되고 있으며 군사적으로는 정찰 및 감시와 같은 임무를 수행하는 역할로 사용될 뿐만 아니라 일상 생활에서는 청소 로봇과 같은 가전 제품으로 사용되고 있다[1]. 그리고 더 많은 분야로의 활용을 위해 다양하고 깊은 연구가 이루어지고 있다. 초기의 UGV 연구가 하드웨어의 성능을 높이는 연구가 주를 이루었다면 이제는 하드웨어의 효율성을 높이기 위한 연구가 주를 이루고 있으며 그 하나의 방법으로 항법에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. UGV를 위한 항법은 로봇이 출발점에서 목적지까지 사람의 명령 없이 스스로 판단하여 이동할 수 있도록 하는 알고리즘을 의미한다. 특히, 항법 중에서 장애물 회피는 가장 중요한 연구 분야를 차지하고 있기 때문에 장애물을 회피하는 항법에 대한 연구가 가장

활발하게 진행되고 있다. 대표적인 장애물 회피 방법으로는 포텐셜 필드(potential field), 셀 분할(cell decomposition), 벡터 필드(vector field), 그리드 알고리즘(grid algorithm)과 같은 방법이 있다[2-6]. 각각의 항법은 한계점을 극복하고 효율성 향상을 위해 지속적으로 연구되고 있다[7,8]. 항법의 효율성을 판단할 수 있는 기준은 여러 가지가 있지만 본 논문에서는 가장 효율적인 계획 경로를 가장 짧은 경로를 생성하는 것으로 가정한다. 그리고 가장 짧은 경로를 생성할 수 있다고 알려진 원과 직선의 조합으로 표현하기에 가장 적합한 리미트 사이클 항법을 이용하여 글로벌 비전에서만 사용되었던 한계를 극복하고 항법의 효율성을 향상시킬 수 있는 새로운 계획 경로 알고리즘을 제안하고자 한다.

본 논문은 다음과 같은 구성을 가지고 있다. 우선, 문제 제기장에서 리미트 사이클 항법에 대한 소개와 그 항법이 가지는 한계점에 대하여 알아 볼 것이다. 다음으로, 경로 계획장에서는 문제 제기에서 살펴본 리미트 사이클 항법의 한계점을 극복할 수 있는 방법에 대하여 제안을 할 것이다. 그리고 네 번째 장에서는 로컬 비전에서 모서리 검출을 위하여 모노 카메라로 장애물의 형태와 모서리를 검출하는 방법과 IR 센서들로 장애물과의 거리를 측정하는 방법에 대하여 알아 볼 것이다. 마지막으로, 시뮬레이션 툴인 MATLAB을 가지고 시뮬레이션을 통하여 제안한 항법 알고리즘의 효과적임을 입증할 것이고 로봇축구 시스템을 가지고 축구로봇에 제안한 항법 알고리즘을 적용하는 실험을 통하여 검증할 것이다.

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2011. 2. 20., 수정: 2011. 3. 10., 채택확정: 2011. 3. 29.

임윤원: LIGNex1 Maritime 연구소(yunwon.lim@lignex1.com)

정진수: TITENG 기술연구소(jinsu0199@khu.ac.kr)

안진웅: 대구 경북 과학 기술원 실용로봇연구소(robot@dgist.ac.kr)

김동한: 경희대학교 전자공학과(donghani@khu.ac.kr)

※ 본 연구는 교육과학기술부의 대구경북과학기술원 일반사업 연구비 지원에 의해 수행되었음.

※ 본 논문은 지식경제부 산업원천기술개발 사업(No. 10035544-2010-01)으로 지원된 연구임.

II. 문제제기

1. limit-cycle 항법 소개

리미트 사이클 항법은 경로 생성을 2차 선형/비선형 시스템의 안정도를 판별하기 위하여 phase portrait를 통해 표현하였을 때 나타나는 원 형태의 특성과 원에 수렴하는 궤적으로 항법에 적용한 방법이다. 기존에 소개된 초기의 리미트 사이클 항법은 모바일 로봇에서 효과적인 항법으로 검증된 항법이다[9,10].

2차 비선형 시스템이 다음과 같이 주어졌다고 할 때[11],

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= x_2 + x_1(r^2 - x_1^2 - x_2^2) \\ \dot{x}_2 &= -x_1 + x_2(r^2 - x_1^2 - x_2^2)\end{aligned}\quad (1)$$

안전성 검증을 위해 Lyapunov 함수를 다음과 같다고 하자.

$$V(x) = x_1^2 + x_2^2 \quad (2)$$

식 (2)의 $V(x)$ 에 대하여 미분을 구하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}\dot{V}(x) &= 2x_1\dot{x}_1 + 2x_2\dot{x}_2 \\ &= 2x_1x_2 + 2x_1^2(r^2 - x_1^2 - x_2^2) - 2x_1x_2(r^2 - x_1^2 - x_2^2) \\ &= 2V(x)(r^2 - V(x))\end{aligned}\quad (3)$$

식 (3)을 가지고 MATLAB을 이용하여 그림 1의 리미트 사이클을 나타낼 수 있다.

리미트 사이클 항법의 가장 큰 장점은 계산량이 많지 않아 계산 처리 속도에 크게 영향을 받지 않기 때문에 실시간 환경에서 모바일 로봇에 항법을 적용할 수 있다는 점이다. 또한, 리미트 사이클 항법에 의하여 생성되는 경로가 다른 방법이나 알고리즘의 추가 없이 직선과 원으로 자연스럽게 이루어지도록 만들 수 있는 장점을 가진다. 그림 1은 MATLAB을 통하여 리미트 사이클 함수를 나타내는 것으로 실선으로 그려진 원은 리미트 사이클로 항법으로 적용 시 로봇이 수렴하려는 원을 나타내고 화살표는 리미트 사이클에 수렴하는 방향으로 항법 적용 시 로봇의 이동할 방향을 나타낸다. 또한, 점선은 리미트 사이클로 수렴하는 궤적으로 항법으로 적용 시 로봇의 이동할 경로를 나타낸다. 그림 1(a)는 시계 방향으로 수렴하는 리미트 사이클의 궤적이고, 그림 1(b)는 반

그림 1. (a) 시계방향의 리미트 사이클 궤적, (b) 반 시계방향의 리미트 사이클 궤적.

Fig. 1. (a) Clockwise (CW) limit-cycle, (b) Counter-clockwise (CCW) limit-cycle.

시계 방향으로 수렴하는 리미트 사이클의 궤적으로 항법으로 적용 시 로봇이 이동할 수 있는 경로를 나타낸다. 시계방향 또는 반 시계방향의 선택은 효율적인 경로를 생성하는데 반드시 필요한 부분이다.

초기의 리미트 사이클 항법은 장애물의 모양과 크기에 관계없이 로봇과 같은 크기의 장애물에서만 적합하였다. 그리고 로봇의 이동 경로 상에 여러 개의 장애물이 있는 상황에서는 장애물들의 무게 중심에서 가장 멀리 떨어진 장애물까지의 거리를 반지름으로 갖는 원을 리미트 사이클로 인식하는 무게중심법을 이용하기 때문에 장애물의 크기나 위치와 같은 환경에 의한 영향을 크게 받는다. 또한, UGV의 항법에서 발생하는 가장 큰 문제점 중의 하나인 국부적 최소치가 역시 초기의 리미트 사이클 항법에서도 발생하였다. 임 등이 제안한 향상된 리미트 사이클 항법은 장애물의 무게 중심에 리미트 사이클의 중심을 두지 않고 장애물의 모서리에 리미트 사이클의 중심을 두고 로봇이 회피할 수 있는 최소한의 거리를 반지름으로 하여 초기의 리미트 사이클 항법이 가지고 있는 몇 가지 한계점을 극복하였다[12]. 하지만 리미트 사이클이 가지는 한계점인 경로의 최적화 부분이나 글로벌 비전의 한계, 국부적 최소치 발생이라는 부분까지는 해결하지 못하고 여전히 큰 문제로 남아있다.

2. 기존의 리미트 사이클(limit-cycle) 항법의 한계

2.1 글로벌 비전(global vision)의 한계

기존의 리미트 사이클 항법들은 그림 2(a)에서 보여주는 로봇 축구 시스템과 같이 시스템의 상부에 카메라를 설치하여 장애물과 로봇의 위치를 파악 할 수 있는 글로벌 비전을 사용하는 환경에서 연구되었다. 따라서 UGV 임무에 따른 경로가 미리 정해져 있거나 사용 장소의 환경을 이미 알고 있는 실내 환경에서 사용 될 때는 글로벌 비전을 사용하는 것이 효율적인 경로를 생성할 수 있다. 하지만 그림 2(b)의 화성 탐사로봇인 Rover와 같이 주변환경에 대한 정보가 알려져 있지 않거나 실외에서 사용되는 경우에는 많은 제한 사항과 한계점이 발생하기 때문에 로봇에 카메라를 설치하여 로봇의 입장에서 환경을 탐색하고 경로를 설정하는 로컬 비전에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 실외 환경은 시스템 전체를 볼 수 있도록 카메라를 설치할 수 없기 때문에 실외에서 글로벌 비전 시스템을 사용하기 힘들다. 게다가, 실내 환경에서 사용하기 적합하기는 하지만 실내 환경 전체를 카메라로 시야를 확보가 힘들기 때문에 실내 환경에서도 카메라를 설치되어 있는 제한적인 공간에서만 사용이 가능하다. 그

그림 2. 글로벌 비전을 사용하는 대표적인 예[13]와 로컬 비전을 사용하는 대표적인 예.

Fig. 2. Typical examples of UGVs using a global vision system [13] and a local vision system, respectively.

그림 3. 직사각형 장애물에서의 비효율성.

Fig. 3. Inefficiency in a rectangular obstacle.

러므로, UGV를 실외 환경뿐만 아니라 실내의 좁은 공간에서 사용하기 위해서는 글로벌 비전보다는 로봇의 입장에서 환경을 인식하는 로컬 비전의 사용이 절실히 필요하다. 초기의 리미트 사이클 항법뿐만 아니라 향상된 리미트 사이클 항법도 장애물의 위치 및 크기, 로봇의 초기위치 및 목적지를 정확하게 알고 있어야 하기 때문에 글로벌 비전에서만 사용 가능하다는 한계점을 가지고 있다.

2.2 Wall 모형 장애물 회피

초기의 리미트 사이클 항법은 벽(wall)을 인식하는 것이 불가능하였고 벽 모형의 장애물을 인식한다고 할지라도 비효율적인 경로를 생성하였다. 그림 3(a)는 초기의 리미트 사이클 항법을 이용하여 벽 모형의 장애물을 회피하는 시뮬레이션 결과이다. 그림 3(b)는 향상된 리미트 사이클 항법을 이용하여 벽 모형의 장애물을 회피하는 시뮬레이션 결과이다. 시뮬레이션을 통하여 향상된 리미트 사이클 항법이 초기의 리미트 사이클 항법보다 효율적인 경로를 생성함을 알 수 있다. 하지만 향상된 리미트 사이클 항법도 리미트 사이클의 특성상 그림 3(b)에서 장애물의 옆면을 통과할 때 리미트 사이클 항법의 특성 때문에 발생하는 비효율적인 경로를 생성하고 있음을 알 수 있다. 본 논문에서는 향상된 리미트 사이클 항법이 갖는 비효율성을 극복하고자 한다.

2.3 국부적 최소치(local minima)

국부적 최소치란 로봇이 자신이 이동하려는 경로상에는 아무런 문제가 없다고 인식하여 계획 경로를 생성하지만 장애물의 위치나 크기와 같은 환경적인 문제로 인하여 계획한 경로로 이동하지 못하고 딜레마에 빠지는 상황을 말한다. 이동로봇에서 대표적인 항법으로 알려진 벡터 필드와 포텐셜 필드를 이용하는 항법에서 주로 발생하는 문제지만 비슷한 상황에서 기존의 리미트 사이클 항법을 사용할 때도 발생한다.

그림 4는 국부적 최소치가 발생할 수 있는 대표적인 환경을 나타낸다. 그림 4(a), (b)는 두 개의 장애물이 로봇이 통과할 수 없는 간격을 두고 떨어져 있는 상황으로 로봇이 리미트 사이클 항법을 사용하여 장애물을 회피하려고 하지만 장애물 사이의 공간이 로봇이 지나 갈수 없을 정도로 작기 때문에 장애물을 회피할 수 없다. 하지만 로봇은 회피가 가능하다고 인식하고 다른 경로의 탐색 없이 생성된 계획 경로를 쫓아 이동하려 하기 때문에 장애물들 사이에서 움직이지 못하는 국부적 최소치에 빠지게 된다. 그림 4(c), (d)는 벽과 장애물이 로봇이 통과할 수 없는 간격을 두고 떨어져 있는 상

그림 4. 국부적 최소치가 발생하는 상황.

Fig. 4. The Situations which generated local minima.

황이다. 로봇은 벽(wall)을 인식하지 못하고 앞에서 설명한 그림 4(a)와 같은 이유로 로봇은 장애물을 회피하지 못하고 국부적 최소치에 빠지게 된다. 그림 4(a), (c)는 초기의 리미트 사이클 항법을 사용하였을 때 국부적 최소치에 빠지는 경우이고 그림 4(b), (d)는 향상된 리미트 사이클 항법을 사용하였을 때 국부적 최소치에 빠지는 경우를 나타낸다.

초기의 리미트 사이클 항법과 향상된 리미트 사이클 항법들은 모두 국부적 최소치가 발생할 수 있는 대표적인 상황에서 여지없이 국부적 최소치에 빠지게 되는 것을 볼 수 있다. 계산량이 적기 때문에 실시간 환경에서 UGV에 항법을 적용하기 쉽다는 큰 장점을 가지고 있는 리미트 사이클 항법일지라도 국부적 최소치의 해결 없이는 적합한 계획 경로 생성 알고리즘이라고 볼 수 없다. 따라서 본 논문에서 국부적 최소치를 해결할 수 있는 새로운 알고리즘을 제안하여 리미트 사이클 항법의 한계점을 극복하고자 한다.

III. 경로 계획

경로 계획이란 로봇이 목적지까지 이동하기 전에 이동할 최적의 경로를 미리 생성하는 것이다. 사람이 목적지까지 이동할 때, 우선 목적지의 방향을 인식하고 어떻게 이동하는 것이 효율적인지 판단하는 과정을 경로 계획이라 할 수 있다. 사람은 목적지까지 이동하는 중에 장애물이 발생하면 장애물의 모양과 위치를 정확하게 파악하고 경로를 계획하여 이동하지 않는다. 장애물의 모양과 위치에 관계없이 이동 경로 상에 가깝게 위치한 장애물의 모서리로 이동하여 충돌하지 않을 정도의 공간을 두고 회피한다. 또한, 목적지를 향해 이

동하다가 장애물들 사이를 통과할 수 없는 경로라고 판단이 되면 다른 경로를 탐색하고 탐색된 새로운 경로로 이동하게 된다. 본 논문에서 제안하는 UGV 항법의 기본 개념은 사람이 장애물을 회피하여 이동하는 방법과 같은 즉, 생체 모방 개념을 적용하였다. 로봇이 목적지까지 도달하는 과정을 살펴보면, 로봇은 목적지의 방향을 알고 있다고 가정하고 목적지 방향에 목적지가 보이면 직진으로 이동한다. 만약 목적지까지 이동하는 도중에 장애물이 있으면 장애물의 모서리를 탐색하고 탐색된 모서리 중에서 가깝게 위치한 모서리를 선택하여 모서리에 리미트 사이클 항법을 적용한다. 모서리를 찾지 못하면 로봇의 방향을 회전시켜 모서리를 탐색한다. 로봇은 위의 과정을 반복하여 목적지에 도달할 수 있다.

기존의 리미트 사이클 항법은 글로벌 환경에서 효율적으로 사용되었지만 제안하는 항법은 로컬 비전에서 사용할 때 더욱 많은 장점을 가지고 있다. 로봇의 입장에서 보면 장애물이 어떤 모양을 가지고 있던 간에 장애물의 양쪽 끝인 모서리 부분이 있기 때문에 글로벌 비전에서 사용할 때와는 다르게 장애물의 모양과 크기에 영향을 받지 않는다. 제안하는 리미트 사이클 항법을 로컬 비전에서 사용하기 위해서는 크게 두 가지 요소가 필요하다. 첫째는 장애물의 모서리의 방향을 결정하기 위하여 모노 카메라를 가지고 모서리를 찾는 방법이고 둘째는 IR 센서를 가지고 로봇으로부터 장애물 및 장애물의 모서리까지의 거리를 측정하는 방법이다. 두 가지 요소는 다음 장인 IV에서 알아 보도록 할 것이고 이번 장에서는 기존의 리미트 사이클 항법들에 존재하는 한계점을 해결하기 위한 방법을 소개하도록 하겠다.

1. 벽(wall) 모형의 장애물 회피

기존의 리미트 사이클 항법들은 글로벌 비전 시스템 환경에서 사용하였기 때문에 로봇 주위의 환경 전체를 알고 장애물 또는 장애물의 모서리에 리미트 사이클 항법을 적용하였다. 따라서 카메라의 시야를 벗어나는 벽과 같이 매우 크게 인식되는 장애물은 회피하지 못한다. 초기의 리미트 사이클 항법은 벽을 인식하지 못하여 벽에 부딪혔으며 장애물로 인식하여 회피한다고 해도 비효율적인 부분이 발생하였다. 즉, 장애물의 크기와 모양에 크게 의존적인 항법이었다. 이렇게 발생하는 비효율적인 부분에 대해서는 임 등이 제안한 논문에서 그림 3(a)와 비교해 볼 때 그림 3(b)에서 보여지듯이 향상된 결과를 보여주었지만 그림 5에서 보여지듯이 효율적이지 못하고 여전히 개선될 부분이 있음을 알 수 있다. 따라서 본 논문에서는 모노 카메라와 IR센서를 가지고 로봇이 장애물을 탐색할 수 있고 카메라와 센서를 활용하여 향상된 리미트 사이클 항법에서 발생하는 비효율적인 부분을 개선시킬 수 있는 방법에 대해 알아보자. 기본적으로 모노 카메라를 이용하여 장애물 모서리가 존재하는 방향을 알 수 있고 IR 센서들을 이용하여 로봇으로부터 장애물까지의 거리를 알 수 있다. 또한 다섯 개의 IR센서 중에서 측면에 있는 두 센서가 장애물로부터의 거리값이 일정하면 벽으로 인식하고 직진하도록 한다. 위에서 제안한 방법을 리미트 사이클 항법에 적용하면 기존의 리미트 사이클 항법들의 한계점인 벽이나 장애물을 인지하여 효율적으로 장애물들을 회피하는 경로를 생성할 수 있다.

그림 5. IR 센서를 이용한 계획 경로.

Fig. 5. The Path planning using IR sensors.

2. 가상의 벽(virtual wall)을 이용하여 local minima 해결

기존의 리미트 사이클 항법들의 경우에는 환경에 따라 국부적 최소치가 발생할 수 있다. 본 논문에서는 국부적 최소치를 해결하기 위하여 가상의 벽 사용을 제안한다. 가상의 벽을 사용하기 위해 그림 6과 같이 로봇이 통과할 수 없는 간격을 가진 장애물들이 로봇의 계획 경로 위에 놓여 있다고 가정하자. 로봇의 전반부에 부착된 IR 센서에 의한 값이 왼쪽부터 오른쪽 방향으로 I1, I2, I3, I4, I5라고 하고 로봇이 장애물을 회피할 수 있는 최소한의 리미트 사이클의 반경을 r , 두 장애물 사이의 거리를 d 라고 하자. I3은 로봇에서 왼쪽 장애물의 오른쪽 모서리까지의 거리를 나타내고 I4는 오른쪽 장애물의 왼쪽 모서리까지의 거리를 나타낸다. 로봇에서부터 두 장애물의 모서리까지의 거리를 알 수 있고 부착된 센서들 사이의 각을 알 수 있기 때문에 삼각함수기법을 이용하여 장애물 사이의 거리인 d 를 구할 수 있다. d 와 r 사이에는 두 가지의 경우가 존재한다.

$d \geq 2r$; 로봇이 장애물들 사이를 통과 가능

$d < 2r$; 로봇이 장애물들 사이를 통과 불가능

두 번째 경우에는 로봇이 장애물들 사이를 통과 할 수 없는 것으로 판단하여 장애물의 두 모서리를 잇는 가상의 벽을 설치하고 장애물의 다른 모서리를 탐색한다. 그림 7(a)는 로봇이 국부적 최소치가 발생할 수 있는 장애물의 모서리를 탐

그림 6. 국부적 최소치가 발생하는 상황.

Fig. 6. The Situations which generated local minima.

그림 7. 국부적 최소치가 탐색과 탈출.
Fig. 7. Detecting and escaping local minima.

색하는 과정을 보여주고 그림 7(b)는 두 개의 장애물이 로봇이 통과 할 수 없는 공간을 생성하여 국부적 최소치가 발생하였을 때 가상의 벽을 사용하여 장애물을 회피하면서 새로운 계획 경로를 탐색하여 국부적 최소치를 탈출하는 과정을 보여준다. 그림 7(c)는 로봇이 국부적 최소치가 발생할 수 있는 벽과 장애물의 모서리를 탐색하는 과정을 보여주고 (d)는 벽과 장애물이 로봇이 통과 할 수 없는 공간을 갖는 국부적 최소치가 발생한 상황에서 가상의 벽을 이용하여 장애물을 회피하면서 새로운 계획 경로를 탐색하여 목적지까지 도달하는 과정을 보여준다.

로봇은 ①에서 출발하여 모서리 탐색 후에 선택한 모서리로 이동한다. ②에서는 선택한 모서리에 국부적 최소치가 발생하는지 검사한다. 국부적 최소치가 발생하지 않으면 통과하고 발생하면 ③에서 다른 경로를 계획하기 위해 다른 모서리를 탐색하고 선택된 모서리에 리미트 사이클 항법을 적용하여 장애물을 회피한다.

IV. 모서리 검출

1. 모노 카메라 이용한 모서리 찾기와 방향 결정

로봇의 전방에 설치된 모노 카메라를 이용하여 장애물을 촬영하고 촬영된 영상을 Hough Transform을 사용하여 장애물의 형상과 모서리를 검출하였다. 그림 8(a), (b)는 계획 경로상에 벽 모형 장애물이 있는 경우, 로봇 전방의 모노 카메라에

그림 8. 모노 카메라에 찍힌 영상과 휴그 트랜스폼을 거친 영상.

Fig. 8. Pictures taken by mono camera and Picture used hough transform.

찍힌 영상과 찍힌 영상을 MATLAB에서 Hough Transform을 사용하여 처리한 결과를 보여준다. 그림 8(c), (d)는 계획 경로상에 두 개의 장애물이 있는 경우, 로봇 전방의 모노 카메라에 찍힌 영상과 찍힌 영상을 MATLAB에서 Hough Transform을 사용하여 영상을 처리한 결과를 보여준다. 그림 8(e), (f)는 계획 경로상에 벽과 일반 장애물이 있는 경우 로봇 전방의 모노 카메라에 찍힌 영상과 찍힌 영상을 MATLAB에서 Hough Transform을 사용하여 영상을 처리한 결과를 보여준다. 따라서 모노 카메라에 찍힌 영상을 Hough Transform을 사용하였을 때 장애물의 형태와 모서리를 찾을 수 있기 때문에 로봇이 장애물의 모서리 방향으로 이동하는데 유용하다.

2. IR 센서를 이용하여 장애물까지의 거리

모노 카메라를 이용하여 장애물의 형상과 모서리를 찾았

그림 9. IR 센서를 사용하여 거리 측정.

Fig. 9. Distance measurement using IR sensors.

으면 그 다음으로 IR 센서를 이용하여 로봇으로부터 장애물과 장애물의 모서리까지의 거리를 측정한다. 그림 9의 화살표는 IR 센서들의 방향으로 로봇에 IR 센서들끼리 간섭이 발생하지 않도록 정면과 15° 간격으로 오른쪽에 두 개, 왼쪽에 두 개의 센서를 장착하여 총 다섯 개의 센서를 통하여 로봇으로부터 장애물까지의 거리를 측정한다. 측정값을 삼각함수 방법을 이용하여 장애물의 모서리까지의 거리를 계산할 수 있다. 5개의 IR 센서를 이용하여 그림 9(a)에서 보여지듯이 장애물까지의 거리뿐만 아니라 그림 9(b)에서 보여지듯이 벽을 인지하고 로봇으로부터 벽까지의 거리를 계산할 수 있다. 따라서 로봇이 장애물과 충돌 없이 회피할 수 있는 경로를 생성하는데 유용하다.

V. 시뮬레이션

초기 리미트 사이클 항법과 향상된 리미트 사이클 항법은 문제 제기 부분에서 제시하였듯이 글로벌 비전의 한계점이 존재하고 본 논문에서는 이러한 한계점을 극복하기 위하여 로컬 비전에서 모노 카메라와 IR 센서를 이용하여 벽 모형 장애물 인식 방법과 국부적 최소치를 극복하기 위해 가상의 벽을 이용하는 방법을 제안하였다. 그림 10은 제안한 항법을 시뮬레이션 툴인 MATLAB을 활용하여 확인하였다. 그림 10(a)는 벽 모형의 장애물을 회피할 경우 향상된 리미트 사이클 항법이 가지고 있는 비효율적인 경로를 IR 센서를 이용하여 극복하는 방법을 시뮬레이션을 통하여 효율적인 경로가 생성되었음을 알 수 있다. 그림 10(b), (c)는 기존의 리미트 사이클 항법을 사용할 때 발생하는 국부적 최소치를 가상의 벽을 사용하여 해결하고 도착지점까지 도달하는 것을 시뮬레이션을 통해 보여주고 있다.

결과적으로, 제안한 항법을 통하여 기존의 리미트 사이클 항법보다 효율적인 계획 경로를 생성하고 기존의 항법들이 가지고 있던 국부적 최소치를 해결할 수 있음을 시뮬레이션을 통하여 검증하였다. 그림 10(b), (c)에서 로봇이 이동하기 힘든 90°에 가깝게 방향전환이 이루어진 부분은 시뮬레이션 조건에 실제 로봇과 같은 사항을 조건으로 정해주지 않아 발생한 부분으로 추후에 제어가 설계 시 보완을 할 예정이다.

(a) Obstacle like a wall

(b) Wall and an obstacle

(c) Obstacles

그림 10. 제안한 항법의 시뮬레이션 결과.

Fig. 10. Simulation results of the proposed navigation method.

(a) Avoiding a big obstacle like wall

(b) Solving the local minima

그림 11. 로컬 비전에서 제안한 계획 경로 알고리즘을 축구 로봇에 적용.

Fig. 11. The proposed path planning algorithm applied to soccer robot in the local vision.

VI. 실험

이번 장에서는 본 논문에서 제안한 계획 경로 알고리즘을 축구 로봇을 가지고 실제 실험을 통하여 검증하였다. 계획 경로 알고리즘을 검증하기 위하여 로봇의 미끌어짐이나 휠 크기 및 속도의 오차 등은 반영하지 않았다. 또한, 기존의 로봇 축구 시스템은 글로벌 비전을 사용하였으나 본 논문을 위하여 축구 로봇의 전방에 모노 카메라와 IR 센서를 부착하여 로컬 비전 환경 아래서 실험을 하였다. 그림 11(a)는 벽 모형의 큰 장애물이 있는 환경에서 축구 로봇에 제안한 방법을 적용하여 시뮬레이션 결과와 일치하는지 확인하기 위한 실험을 수행하였다. 시뮬레이션 결과와 동일하게 장애물 옆으로 회피할 때 기존의 리미트 사이클 항법에서 나타나는 비효율적인 경로 대신에 직진하는 경로를 선택하여 이동하는 것을 볼 수 있다. 그림 11(b)는 국부적 최소치를 해결하기 위하여 두 개의 장애물이 로봇이 통과할 수 없는 간격을 갖도록 환경을 설정하였다. 그리고 제안한 가상의 벽을 사용하는 방법을 적용하여 축구 로봇을 가지고 실험을 수행하였다. 시뮬레이션 결과와 동일하게 장애물 사이에 공간이 있음에도 국부적 최소치에 빠지지 않고 로봇 사이의 공간을 가상의 벽으로 인식하여 다른 경로를 탐색한 후에 이동하는 것을 볼 수 있다. 두 가지 환경에서의 실험을 통하여 제안한 항법 알고리즘이 시뮬레이션을 통하여 예상했던 계획 경로 생성 결과와 일치함을 확인 할 수 있었다.

VII. 결론 및 토의

본 논문에서는 모서리 검출 방법을 기반으로 리미트 사이클 항법을 이용하여 글로벌 비전 환경에서만 사용될 수 있었던 기존의 리미트 항법들을 로컬 비전 환경에서 사용할 수 있도록 간단한 계획 경로 알고리즘을 제안하였다. 로봇이 이동경로 상에서 장애물이 존재할 때 장애물 회피를 위한 모서리 방향을 결정하기 위하여 모노 카메라를 사용하였고 로봇으로부터 장애물까지의 거리를 결정하기 위하여 IR 센서를 사용하였다. 모노 카메라를 사용하여 적은 계산량으로 쉽게 장애물을 찾을 수 있었고 hough transform을 이용하여 모서리

를 검출할 수 있었지만 장애물까지의 거리를 IR 센서 값에만 의존하였다. 하지만 스테레오 카메라를 사용하면 결과값으로 방향과 거리를 동시에 측정할 수 있기 때문에 본 논문에서 제안한 항법의 효율성을 높일 수 있는 결과를 얻을 수 있을 것이라고 생각된다. 또한, IR 센서가 아니라 고가의 레이저 거리 감지 센서를 사용하면 로컬 비전 환경에서 더욱 정확한 값을 얻을 수 있을 것으로 예상되기 때문에 더욱 정밀한 계획 경로를 생성할 수 있을 것이다. 다음 연구는 스테레오 비전과 레이저 거리 감지 센서를 활용하여 본 논문에서 방향과 거리를 측정하기 위하여 제안한 방법보다 더욱 정확하고 정밀한 결과값을 얻을 것이다.

참고문헌

- [1] S. H. Nam and S. B. Moon, "Minimal turning path planning for clean robots employing flow networks," *Journal of Control, Automation, and Systems Engineering(in Korean)*, vol. 11, no. 9, pp. 789-794, Sep. 2005.
- [2] K. H. Rew and D. H. Kim, "Enhancement of complex potential navigation method for obstacle avoidance of mobile robot," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems(in Korean)*, vol. 15, no. 4, pp. 385-389, Apr. 2009.
- [3] S. S. Ge and Y. J. Cui, "Dynamic motion planning for mobile robots using potential field method," *Autonomous Robots*, vol. 13, no. 3, pp. 207-222, Nov. 2002.
- [4] J. Rossell and P. Iniguez, "Path planning using Harmonic functions and probabilistic cell decomposition," *Proc. of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Barcelona, Spain*, pp. 1803-1808, Apr. 2005.
- [5] H. Xiaoxi and C. Leiting, "Path planning based on grid-potential fields," *International Conference on Computer Science and Software Engineering*, vol. 2, pp. 1114-1116, Dec. 2008.
- [6] B. You, J. Qiu, and D. Li, "A novel obstacle avoidance method for low-cost household mobile robot," *Proc. of the IEEE International Conference on Automation and Logistics, Qingdao, China*, pp. 111-116, Sep. 2008.
- [7] S. M. Chen, S. Nie, and C. F. Sun, "Motion planning of mobile robot based on artificial potential field in fuzzy space," *Journal*

- of Nanchang University-Engineering and Technology Edition, vol. 32, no. 2, pp. 192-195, Jun. 2010.
- [8] X. J. Zhao, J. Bi, and L. Chen, "The study of soccer robot path planning based on grid-based potential field method improvements," *Journal of Advanced Materials Research*, vol. 139-141, pp. 1798-1802, Oct. 2010.
- [9] D. H. Kim and J. H. Kim, "A real-time limit-cycle navigation method for fast mobile robots and its application to robot soccer," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 42, pp. 17-30, Jan. 2003.
- [10] D. H. Kim and K. H. Rew, "Limit-cycle navigation method for fast mobile robots," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems(in Korean)*, vol. 14, no. 11, pp. 1130-1138, Nov. 2008.
- [11] Hassan K. Khalil, *Nonlinear System*, 2nd Ed., Prentice Hall, 1996.
- [12] Y. W. Lim and D. H. Kim, "Path planning algorithm based on the limit-cycle navigation method applied to the edge of obstacles," *Proc. of Trends in Intelligent Robotics 13th FIRA Robot World Congress*, Bangalore, India, vol. 103, no. 4, pp. 226-233, Sep. 2010.
- [13] N. Agrawal and T. Jain, "Real time vision guided reactive strategies for micro robot soccer," *B.S. thesis, Dept. Electrical Eng., Indian Institute of Technology*, Kanpur, India, 2000.

임 윤 원

2009년 경희대학교 전자정보학부 전자공학과(공학사). 2011년 동 대학원(공학석사). 2011년~현재 LIGNex1 Maritime연구소 연구원. 관심분야는 UGV, AUV 항법 및 제어, 다개체 로봇 제어.

정 진 수

2009년 경희대학교 전자공학과(공학사). 2010년 동 대학원(공학석사). 2011년~현재 TITENG 기술연구소 전문연구요원 복무. 관심분야는 모바일 로봇의 항법, 다개체 지능제어, UAV.

안 진 웅

1997년 한국과학기술원 기계공학과(공학석사). 2005년 동 대학원(공학박사). 2005년~2008년 광운대학교 정보제어공학과 교수. 2008년~현재 대구경북과학기술원 실용로봇연구소장. 관심분야는 군집지능, HRI, 진화컴퓨팅, 뇌기계인터페이스.

김 동 한

1995년 KAIST 전기 및 전자공학과(공학사). 1998년 동 대학원(공학석사). 2003년 동 대학원(공학박사). 2003년~2004년 일리노이 주립대학 Post Doc. 2004년~2007년 삼성전자 무선사업부 책임 연구원. 2007년~현재 경희대학교 전자정보대학 교수. 관심분야는 로봇 제어, 다개체.