

Limit-cycle과 벡터장법을 이용한 이동로봇의 실시간 장애물 회피

A Real-time Obstacle Avoidance of Mobile Robots using Limit-cycle and Vector Field Method

윤재호, 지민석, 이강웅
(Jae Ho Yun, Min Seok Jie and Kang Woong Lee)

한국항공대학교 항공전자공학과(전화:(02)3158-0166, 팩스:(02)3159-9257, E-mail : jaehomanse@hangkong.ac.kr)

Abstract : In this paper, we propose a novel navigation method combined limit-cycle method and the vector field method for avoidance of unexpected obstacles in the dynamic environment. The limit-cycle method is used to obstacle avoidance in front of the robot and the vector field method is used to obstacle avoidance in the side of robot. The proposed method is tested on Pioneer 2-DX mobile robot. The simulations and experiments demonstrate in the effectiveness of the proposed method for navigation of a mobile robot in the complicated and dynamic environments.

Keywords : mobile robot, navigation, reactive, limit-cycle, vector field, occupancy box

1. 서론

이동로봇의 행동기반 경로 계획은 크게 deliberative 와 reactive 기법으로 나눌 수 있다. 전자는 로봇이 센서를 이용해 주위 환경에 대한 모델을 만들거나 외부에 의해 주어진 모델을 이용해서 경로를 설계하는 것이다[1]. 후자는 deliberative 기법이 가지는 환경 변화에 대한 강인성 부족이라는 단점을 극복하기 위해 설계된 방법이다[2][3][4]. 최근 들어 위 두 가지 경로 계획의 장점을 결합한 기법들 중 2차비선형 함수 limit-cycle 기법을 이용하여 로봇추구에 적합한 항법이 제안되었다[5]. 이 항법에서는 위쪽에 카메라가 장착되어 장애물의 전체 크기를 알 수 있기 때문에 단 한번의 limit-cycle 적용으로 순간 장애물을 회피할 수 있는 경로계획이 가능 하다. 그러나 초음파 센서를 이용한 이동로봇에서는 전체 장애물의 크기를 알 수 없기 때문에 주기적인 매 샘플 타임 동안 감지되는 장애물의 단면 길이만을 고려하여 limit-cycle 기법을 적용한 경로계획이 이루어져야 한다.

본 논문에서는 전방에 8조의 초음파 센서를 사용하는 이동로봇이 환경지도 상에 존재하지 않는 돌발 장애물을 효과적으로 회피하기 위한 reactive 경로계획 기법을 limit-cycle과 벡터장 기법을 혼합한 항법을 제안하고자 한다. 로봇이 경로계획에 의해 취득된 최초의 정보만을 가지고 주행을 시작한 후 예상치 못한 미지의 장애물을 만나게 되면, 현재 로봇의 전방과 측면 장애물에 대하여 서로 다른 경로계획 기법으로 장애물

을 회피할 수 있도록 한다. 전방 장애물에 대하여 2차 비선형 함수 limit-cycle 기법을 적용하여 경로를 생성시킨 후 경로를 추종하게 하고, 측면 장애물에 대하여 로봇에 부착된 초음파 센서의 번호 및 배치각도에 의해 장애물과 로봇과의 상대위치를 파악하고, 결과적으로 얻어지는 두 물체간의 최단거리 및 로봇의 현재 자세를 미리 정의하여 장애물을 회피하기 위한 최적의 벡터를 결정한 후 안전한 주행을 하도록 한다.

따라서 제안된 기법의 장애물 회피 성능을 모의실험과 이동로봇에 적용한 실험을 통하여 입증하고자 한다.

II. Limit-cycle 경로계획

2.1 Limit-cycle

다음은 2차 비선형 함수이다[5].

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

안정성 검증을 위해 Lyapunov 후보함수를 다음과 같이 정한다.

$$V(x) = x_1^2 + x_2^2.$$

위의 함수 $V(x)$ 을 미분하면,

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

여기서 $V(x) > r^2$ 이면, $\dot{V} < 0$ 되고 $V(x) < r^2$ 이면,

$\dot{V} > 0$ 이 된다.

따라서 $0 < c_1 < r^2$ 이면, $V(x) = c_1$ 에 있는 모든 점들은 바깥쪽으로 향하고, $c_2 > r^2$ 이면, $V(x) = c_2$ 에 있는 모든 점들은 안쪽으로 향하게 된다.

2.2 점유박스(occupancy box) 설정

로봇의 전방 장애물에 대한 단면의 길이와 중점을 검출하기 위하여 로봇을 중심으로 하는 좌표에 그림 1과 같이 가로 500(mm), 세로 1500(mm)의 크기를 가지는 점유박스들을 왼쪽과 오른쪽 평면 각각에 대하여 설정한다. 각각의 점유박스에 점유된 초음파의 값들 중 로봇의 Y축과 가장 가까운 초음파 값을 로봇과 전방 장애물까지의 거리로 취한다. 설정된 점유박스들 안에 장애물이 감지되면 세 가지 경우로 나누어 장애물에 대한 단면의 길이와 중점을 결정하고, 이 정보를 이용하여 limit-cycle 경로를 생성한다.

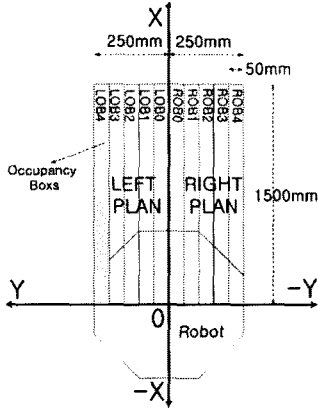


그림 1. 로봇의 좌표에 점유박스 설정.

Fig. 1. Occupancy box setting on the coordination of robot.

그림 1에서 왼쪽 평면의 점유박스들에만 장애물이 점유될 경우, X축과 가장 가까이 있는 점유박스와 가장 멀리 있는 점유박스 안의 초음파 좌표 값을 각각 얻고, 이들을 연결하는 직선의 중심좌표를 식 (3)과 같이 구한다. 여기서 직선의 길이는 장애물의 단면 길이가 된다.

$$C_{x,y} = \frac{LOB_{\min}(x,y) + LOB_{\max}(x,y)}{2} \quad (3)$$

그림 1에서 오른쪽 평면의 점유 박스들에만 장애물이 점유될 경우, X축과 가장 가까이 있는 점유박스와 가장 멀리 있는 점유박스 안의 초음파 좌표 값을 각각 얻고, 이들을 연결하는 직선의 중심좌표를 식 (4)와 같이 구한다. 여기서 직선의 길이는 장애물의 단면 길이로 설정 한다.

$$C_{x,y} = \frac{ROB_{\min}(x,y) + ROB_{\max}(x,y)}{2} \quad (4)$$

그림 1에서 왼쪽과 오른쪽 평면의 점유 박스들에 장애물이 점유될 경우, X축과 가장 멀리 있는 점유박스 안의 초음파 좌표 값을 각각 얻고, 이들을 연결하는 직선의 중심좌표를 식 (5)와 같이 구한다. 여기서 직선의 길이는 장애물의 단면 길이로 설정 한다.

$$C_x = \frac{LOB_{\max}(x) + ROB_{\max}(x)}{2}$$

$$C_y = LOB_{\max}(y) - \frac{|LOB_{\max}(y)| + |ROB_{\max}(y)|}{2} \quad (5)$$

그림 1에서 LOB0 ~ LOB4와 ROB0 ~ ROB4는 왼쪽과 오른쪽 각 평면상의 점유박스 번호들 이다.

2.3 점유박스를 이용한 limit-cycle 경로계획

그림 2와 같이 설정된 점유박스를 이용하여 점유박스 범위(500mm)안에서 장애물의 가장자리를 검출한 후 단면 길이를 계산한다. 그림 3에서는 식 (3),(4),(5)를 이용하여 장애물 단면의 중점(C_x, C_y)좌표를 구한다. 여기서 중점은 식 (1)의 limit-cycle에 대한 원점으로 사용하고, 반지름 r 은 장애물 단면 길이의 1/2와 실제 로봇 크기의 1/2를 더한 값으로 사용한다. 따라서 그림 2와 그림 3의 과정을 통하여 로봇의 전방에 있는 장애물을 회피하기 위한 limit-cycle 경로를 생성한다.

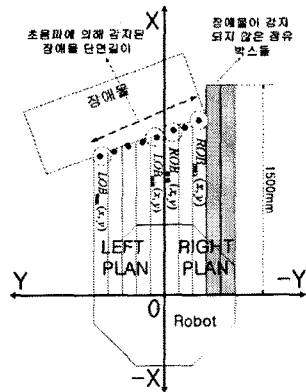


그림 2. 로봇의 전방 장애물에 대한 단면 길이 검출.

Fig. 2. A section length detection of obstacle in front of robot.

로봇이 limit-cycle 경로를 따라 회전해야할 방향은 $\sum_{i=0}^3 S_i > \sum_{i=3}^7 S_i$ 이면 시계방향(CW), $\sum_{i=0}^3 S_i < \sum_{i=3}^7 S_i$ 이면 반시계방향(CCW)으로 회전하도록 설정한다. 여기서 S_i 는 그림 4에서 각 초음파센서(0, 1, ..., 7)들의 거리 값이며, 여기서 최대 감지거리는 3m이다. 또한 공간상 아무런 장애물이 감지되지 않으면, 각 초음파 거리 값

들은 0이 아닌 3m값을 얻도록 설정한다.

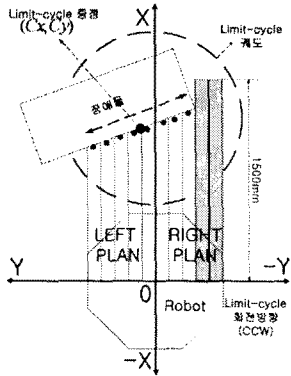


그림 3. 장애물에 대한 limit-cycle 경로생성.
Fig. 3. Limit-cycle path planning for obstacle

III. 벡터장(Vector field) 경로계획

3.1 벡터장을 이용한 측면 장애물 회피

로봇의 측면에 대한 장애물은 초음파 배열 구조상 limit-cycle 경로를 생성하기 어렵고, 안정성을 보장할 수 없으므로 이를 보완할 수 있는 방법으로 벡터장 법을 이용하여 장애물을 회피 하도록 한다. 8조의 초음파센서에서 추출한 거리정보 중 최소값 만을 취득하여 로봇이 취해야 할 회피 각을 표 1과 같이 미리 설정 한다. 로봇의 회피벡터 좌표 값은 그림 4에서 $\text{Min}\{S_i\} \leq l_1$ 인 경우 식 (6)을 이용하고, 그림 5에서 $l_1 < \text{Min}\{S_i\} \leq l_2$ 인 경우 식 (7)을 이용하여 얻는다. 여기서 $\text{Min}\{S_i\}$, $i = 0, 1, \dots, 6, 7$ 은 각 초음파에서 추출한 거리 값 중 최소값이며, l_1 과 l_2 는 로봇이 장애물에 의하여 영향을 받는 로봇과 장애물 간의 절대 거리로써 실험을 통하여 설정한다.

그림 4에서 $\text{Min}\{S_i\} \leq l_1$ 이면, 로봇이 장애물을 회피할 벡터좌표(T_x, T_y)는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} T_x &= K \cos(S_{deg} \pm \alpha) \\ T_y &= K \sin(S_{deg} \pm \alpha) \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 K 는 회피 벡터의 크기를 결정하는 상수이며, S_{deg} 는 표 1에서 $\text{Min}\{S_i\}$ 에 대한 회피각도이다. 또한 α 는 $((l_2 - S_i)(90^\circ/l_1))$ 로, l_1 의 거리에 반비례하는 값으로 설정하고, $\text{Min}\{S_i\}$ 의 값이 왼쪽평면상의 초음파들에 의해 감지된 거리 값이면 음(-)의 부호를 취하고, 오른쪽 평면상의 초음파들에 의해 감지된 거리 값이면 양(+)의 부호를 취한다.

그림 5에서 $l_1 < \text{Min}\{S_i\} \leq l_2$ 이면, 로봇이 장애물을 회피할 벡터좌표(T_x, T_y)는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} T_x &= K \cos(S_{deg}) + K \cos(\phi) \\ T_y &= K \sin(S_{deg}) + K \sin(\phi) \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 ϕ 는 로봇의 X축과 로봇의 중점으로부터 목표점으로 향하는 벡터와의 각도 차이이고, X축을 중심으로 반시계(CCW)방향이면 양(+)의 값, 시계방향(CW)이면 음(-)의 값을 가진다.

표 1. 회피 각 결정 테이블

초음파 번호	0	1	2	3	4	5	6	7
$S_{deg}(\text{deg})$	0	-30	-50	-80	80	50	30	0

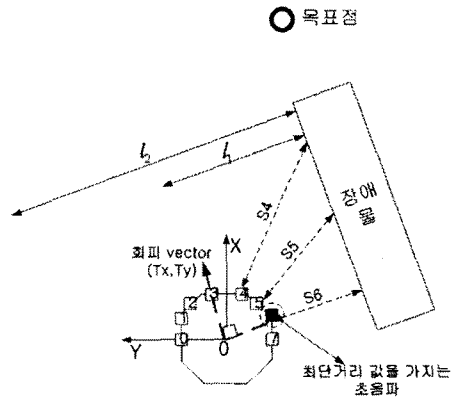


그림 4. $\text{Min}\{S_i\} \leq l_1$ 인 경우.
Fig. 4. Case for $\text{Min}\{S_i\} \leq l_1$.

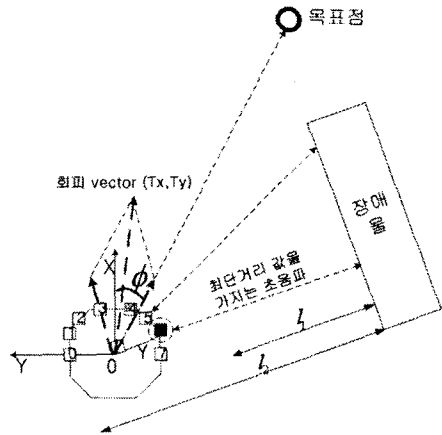


그림 5. $l_1 < \text{Min}\{S_i\} \leq l_2$ 인 경우.
Fig. 5. Case for $l_1 < \text{Min}\{S_i\} \leq l_2$.

IV. 모의실험 및 실험결과

4.1 모의실험

제안한 방법을 적용하여 로봇이 안전하게 목적지까지 수행하는 도중 미지의 불규칙한 크기의 장애물을 잘 회피할 수 있는지를 모의실험을 통하여 확인 하였

다. 각 매개변수 값들은 $K=500$, $l_1=60\text{cm}$, $l_2=100\text{cm}$ 로 설정하였고, 로봇의 평균속도는 $0.5(\text{m}/\text{sec})$ 이다. 그림 6은 크기가 다양한 미지의 장애물을 설정하여 모의실험한 것이다. 그림 7은 그림 6에 설정된 장애물들을 회피하여 목적지까지 주행한 경로이다.

4.2 실험 결과

이동 로봇은 Active Media사의 Pioneer2-DX를 사용하였으며, 전방에 설치된 초음파 센서 8조를 사용하였다. Algorithm의 구현은 VisualC++를 사용하였고, 로봇은 650MHz PentiumIII 노트북과 RS-232 직렬통신으로 정보를 주고받는다. 각 매개변수 값들은 $K=500$, $l_1=50\text{cm}$, $l_2=100\text{cm}$ 로 설정하였고, 로봇의 평균속도는 $0.45(\text{m}/\text{sec})$ 이다. 그림 8은 크기가 다양한 미지의 장애물을 이동로봇이 지나가야할 곳에 배치하고, 초기 로봇의 위치에서 전방10m 떨어진 목표점까지 주행 도중 미지의 장애물이 감지되어 이를 잘 회피하고 있는 것을 순간 포착한 것이다. 그림 9는 그림 8에 대한 실제 환경에서 로봇의 주행 경로이다.

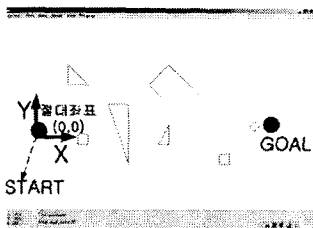


그림 6. 미지의 장애물 회피 모의실험.

Fig. 6. Unexpected obstacle avoidance simulation.

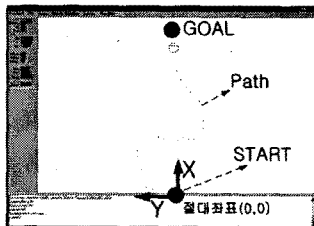


그림 7. 그림 6에 대한 이동로봇 주행경로.

Fig. 7. Mobile robot moving path for figure 6.

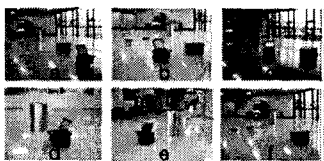


그림 8. 미지의 장애물 회피 실험.

Fig. 8. Unexpected obstacle avoidance experiment.

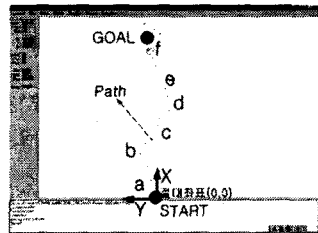


그림 9. 그림 8에 대한 이동로봇 주행경로.

Fig. 9. Mobile robot moving path for fig 8.

V. 결 론

본 논문에서는 이동로봇이 미지의 장애물을 신속, 정확, 안정하게 회피하도록 limit-cycle과 벡터장 기법을 혼합한 방법을 제안하였다. 전방 장애물에 대하여 경로계획 정보가 벡터장법보다 효율적인 limit-cycle 기법으로 경로계획을 세우 회피를 하였으며, 측면 장애물에 대하여서는 로봇에 부착된 초음파 센서의 배열 구조상 limit-cycle 기법 적용이 접합치 않으므로 벡터장법을 이용한 경로계획으로 회피하도록 하였다. 로봇의 특성에 맞게 이들 각각의 장점들을 혼합하여 이동로봇이 원하는 목적지 까지 신속, 정확, 안정하게 도달함을 모의실험과 실험을 통하여 확인을 하였다. 하지만 이 방법은 최적화된 경로를 생성하지 못하므로 이를 보완할 수 있는 방법에 대한 연구가 추후 과제로 남아 있다.

참 고 문 헌

- [1] Lefebvre D. and Saridis G, "A Computer Architecture for Intelligent Machines", Proceedings of the IEEE international Conference on Robotics and Automation, pp. 2245-2250, France, May 1992.
- [2] Brook R, "A Robust Layered Control System for a Mobile Robot," IEEE Journal of Robotics and Automation, vol. RA-2, no. 1, pp. 14-23, 1986.
- [3] Arkin R. C, Behavior Based Robotics, The MIT Press, 1998.
- [4] J. Borenstein and Y. Koren, "Real-time Obstacle Avoidance for Fast Mobile Robots," IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 19, No. 5, Sept. 1989, pp. 1179-1187.
- [5] Dong-Han Kim and Jong-Hwan Kim, "A real-time limit-cycle navigation method for fast mobile robots and its application to robot soccer," in the Robotics and Autonomous Systems, 1. 2003.