

Bubble and Rain 기반 로봇의 벽 추종 경로 생성 방법

조형남, 박진성, 이윤희*
동국대학교 정보통신공학과

aktmdtkd@dongguk.edu, pjs0625@dgu.ac.kr, *yulee@dongguk.edu

A Wall-Following Path Generation Method for Robots Based on Bubble and Rain

Hyeongnam Cho, Jinseong Park, Yu-Cheol Lee*

Department of Information and Communication Engineering, Dongguk University

요 약

본 논문은 로봇의 안전한 벽 추종을 위해, Bubble and Rain 을 활용한 경로 보정 및 생성 방법을 제안한다. 이 방법은 지도 및 위치 정보를 바탕으로 생성된 기준 경로점에 'Bubble(벽에서 멀어지는 과정)'과 'Rain(벽에 가까워지는 과정)'을 수행한다. 이 과정에서 보정 벡터를 이용해 수정함으로써 벽과의 일정한 거리를 유지하게 한다. 또한, Savitzky-Golay 필터를 적용하여 경로의 평탄도를 향상시키고 로봇의 주행 안정성을 높였다. 실험 결과, 제안된 방법은 직관적이고 간단한 방법으로 빠르고 안정적인 경로 생성이 가능하고 이를 통해 로봇이 벽을 안전하게 추종할 수 있음을 입증하였다.

I. 서 론

로봇의 자율 이동을 위한 경로계획 알고리즘은 미지의 환경에서 안전하고 효율적인 내비게이션을 가능하게 하는 기술이다. 그중 벽 추종은 로봇이 벽이나 장애물을 따라 이동하며 충돌을 회피하는 직관적이고 효과적인 방법이다[1]. 이 기법은 복잡한 환경에서도 안정적으로 동작하며, 좁은 통로나 구조 현장과 같이 충돌 위험을 줄여야 하는 환경에서 필수적이다.

그러나 기존의 벽 추종 방법들은 로봇과 장애물 간의 거리 유지 문제에서 한계를 가진다. RANSAC(Random Sample Consensus)과 2 차 곡선을 통해서 벽과 일정 거리를 띄우고 이동하는 방식은 완전한 벽에 대해서만 적용이 가능하다[2]. 그리고 초음파를 사용하는 경우 퍼지 로직으로 인한 반응형 제어로 인해서 센서 노이즈나 동적 변화로 인한 충돌 위험이 증가한다[3]. 따라서 로봇의 안전성과 주행 효율성을 동시에 확보하기 위해서는 장애물과 떨어질 거리를 '일정하게' 유지하는 안정적인 기술이 필요하다. 기존 방법들은 이 문제를 해결하기에 계산 복잡도가 높거나 유연성이 부족한 경우가 많아, 실시간 대응이 중요한 환경에 적용하기 어려운 문제점을 가지고 있다.

본 논문에서는 이러한 문제들을 해결하기 위해, 간단한 방법으로 안정적인 경로 생성이 가능한 새로운 방법론인 Bubble and Rain 을 제안하였다. 제안된 방법은 실험을 통해 효과성과 안정성을 입증하였으며, 이를 통해 자율 로봇이 더 안전하고 효율적으로 임무를 수행할 수 있는 가능성을 제시한다.

II. 본론

본 논문에서 제안하는 Bubble and Rain 알고리즘은 로봇이 장애물과 일정한 거리를 유지하며 안전하고 부드러운 경로를 생성하는 것을 목표로 한다. 벽과의 일정 거리 유지 경로 생성 시스템은 그림 1 과 같이

경로를 보간하고 방향 벡터를 설정하는 단계, 그리고 경로를 구성하는 각 좌표들에 대한 위치 보정 단계, 마지막으로 보정된 경로의 스무딩 과정으로 구성된다.

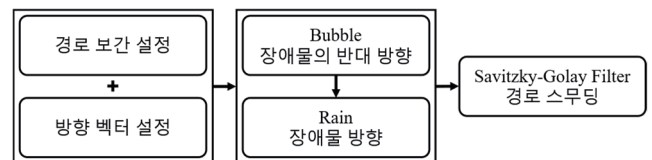


그림 1. 벽과의 일정거리 유지 경로 생성 시스템

1. 경로 보간 및 방향 벡터 설정

벽과의 일정한 거리를 유지하는 경로를 생성하기 위해서는 두 가지 설정이 필요하다. 첫째, 보정을 적용할 경로를 설정한다. 이 경로는 로봇이 이동할 벽 근처의 임의의 경로점들 사이에 보간 경로점들을 채워 생성한다. 예를 들어, 두 점으로 구성된 경로를 100 개 이상의 보간 경로점으로 채워서 사용한다. 이는 경로점의 개수가 많을수록 보정 이후 벽의 윤곽에 더 가깝고 부드러운 경로를 만들 수 있기 때문이다.

둘째, 보정 과정에서 사용할 두 개의 서로 상반된 방향 벡터를 설정한다. 하나는 로봇이 따라가야 할 벽이 존재하는 장애물 방향 벡터 \mathbf{n} 이고, 다른 하나는 그 반대인 장애물 회피 벡터 \mathbf{u} 이다. 서로 $\mathbf{u} = -\mathbf{n}$ 의 관계이며, 주어진 상황에 따라 \mathbf{n} 혹은 \mathbf{u} 를 설정한다.

2. Bubble and Rain 경로 보정

경로 보정 과정은 주어진 경로의 각 지점의 좌표를 미세 조정하여 장애물과 일정한 거리를 유지하도록 만드는 방법이다. 이 과정은 각 경로점을 중심으로 벽과의 안전거리를 반지름으로 하는 가상의 원을 생성한 후, 이 원이 지도상의 벽과 접하는지 확인하는 방식으로 진행된다. 이 방법을 통해 모든 경로가 벽과 일정한 거리를 유지할 수 있다. 가상의 원이 벽과 닿았는지를 알 수 있는 함수는 다음과 같다.

$$\chi(\mathbf{p}, r) = \mathbb{I}(\exists \mathbf{q} \in \mathcal{B}(\mathbf{p}, r) \text{ s.t. } M(\mathbf{q}) > \tau). \quad (1)$$

식(1)은 특정 좌표 \mathbf{p} 를 중심으로 하고 반지름을 r 로 하는 가상의 원 $\mathcal{B}(\mathbf{p}, r)$ 을 구성하는 좌표 \mathbf{q} 가 지도상에서 가지는 $M(\mathbf{q})$ 값이 임계 값 τ 을 넘어서는지를 통해서 원에 닿았는지 판단하는 함수 $\chi(\mathbf{p}, r)$ 를 설명한다. 이는 보정 판별 기준으로 사용된다.

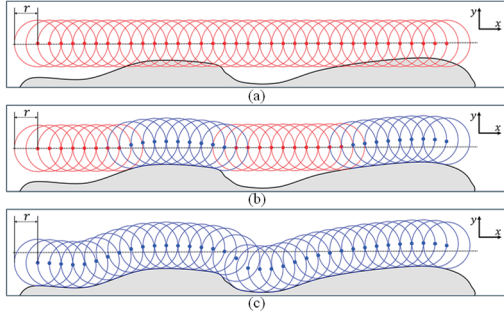


그림 2. 거품과 비 보정 과정의 순서와 적용 구간

\mathbf{n} 과 \mathbf{u} 두 벡터를 이용한 Bubble and Rain 의 적용 대상은 그림 2(a)와 같이 보간 된 경로이다. 'Bubble'단계는 그림 2(b)의 파란색 원이 있던 구간과 같이 가상의 원이 벽과 겹쳐 있을 경우, 벽으로부터 안전하게 떨어질 때까지 장애물 회피 방향으로 이동시키는 단계이다. 이때 조건을 만족하면서 이동 거리를 최소화하는 계수 α^* 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\alpha^*(\mathbf{p}) = \min \{ \alpha \geq 0 | \chi(\mathbf{p} + \alpha \mathbf{u}) = 0 \} \quad (2)$$

'Bubble'단계를 통해 안전거리를 확보한 경로 점은 그림(c)에서 파란색 구간이 된 원과 같이 'Rain'단계에서 벽 방향으로 이동하여 벽 표면에 한 점에서 접하게 된다. 이때 조건을 만족하면서 이동거리를 최소화하는 이동 계수 β^* 는 다음과 같다.

$$\beta^*(\mathbf{p}) = \min \{ \beta \geq 0 | \chi(\mathbf{p} + \alpha^* \mathbf{u} + \beta \mathbf{n}) = 1 \} \quad (3)$$

이 두 과정을 통해 초기 경로 점 \mathbf{p} 는 두 벡터 방향으로의 이동량을 모두 반영한 최종 보정 위치 \mathbf{p}^* 로 업데이트된다. 보간 된 경로의 모든 경로 점에 대하여 두 보정 과정을 적용하면 벽과 일정한 거리를 유지하는 경로가 완성되며, 보정된 개별 경로 점은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\mathbf{p}^* = \mathbf{p} + \alpha^*(\mathbf{p})\mathbf{u} + \beta^*(\mathbf{p})\mathbf{n} \quad (4)$$

3. Savitzky-Golay 필터 경로 스무딩

앞서 구한 경로는 벡터의 이산적인 보정 과정으로 인해 부드럽지 않으므로, 로봇의 부드러운 주행을 위해 경로를 연속적인 형태로 다듬는 스무딩 과정이 필요하다. 본 연구는 Savitzky-Golay 필터를 사용하여 스무딩을 수행하며, 스무딩 된 경로 점 \mathbf{p}_k^{sg} 은 다음과 같다.

$$\mathbf{p}_k^{sg} = \sum_{j=-h}^h c_j \mathbf{p}_{k+j,0,N-1}^* \quad (5)$$

데이터의 작은 구간($-h$ 부터 h)마다 저 차원 다항식을 근사하여, 원본 경로의 주요 특징을 최대한 보존하면서 노이즈를 제거한다. 필터 계수 c_j 를 커널로 사용하여 보정된 경로의 각 점에 컨볼루션 연산을 수행하면, 이산성이 제거된 최종 연속 경로를 생성할 수 있다.

III. 실험 평가

제안된 방법은 Clearpath Robotics 사의 Jackal 과 Hesai 사의 Pandar40P LiDAR 를 이용한 실험을 통해 검증하였다. 실험은 Ubuntu 22.04 LTS 와 ROS2 Humble

환경에서 수행되었으며, 벽과 가장 가까운 point 들과 로봇 사이 거리의 평균값과 벽과 떨어져야 하는 거리 설정 값에 대한 절대 편차와 분산, 그리고 RMSE(Root Mean Square)로 평가되었다. 벽과 떨어져야 하는 거리는 0.9m 로, 로봇의 이동 속도는 0.1m/s 로 설정하였다.

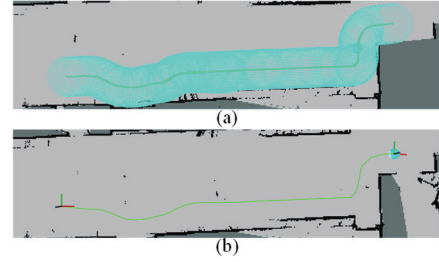


그림 3. (a) 실험 중 Bubble and Rain 에서 생성된 가상의 원, (b) Bubble and Rain 의 경로를 따라 로봇이 주행한 궤적

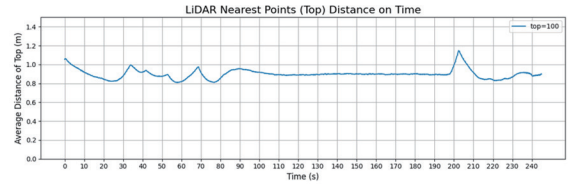


그림 4. 실험 중 로봇에 가장 가까운 point 100 개의 거리 평균

그림 3(a)의 경로와 그림 3(b)의 궤적을 통해서 로봇이 경로를 따라 추종하였음을 알 수 있으며, 그림 4 는 이 과정에서 로봇이 벽과 유지한 거리를 확인할 수 있다. 실험 결과 벽과의 거리는 평균 0.89927m 를 유지하였다. 기준 값 0.9m 에 대한 절대 편차는 0.03163m 이고, 편차 분산은 0.00242m²이며 RMSE는 0.04923m 이었다. 실험 결과 Bubble and Rain 이 벽과 일정한 거리를 안정성 있게 유지하도록 하는 경로를 생성하였음을 알 수 있다.

IV. 결론 및 차후 계획

본 연구는 제안한 Bubble and Rain 이 로봇이 벽 추종을 함에 있어서 적은 간단한 연산을 통해서 안정적인 주행을 할 수 있음을 Jackal 과 Pandar40P 를 사용한 실험을 통해 입증하였다.

향후에는 Bubble and Rain 을 통한 벽 추종으로 미지의 공간에서 탐사를 하는 방법을 제안하고, 어느 로봇 플랫폼이든 범용적으로 사용 가능한 적용 능력을 향상시키는 것을 목표로 한다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 산업통상자원부 재원으로 한국산업기술기획평가원 (KEIT)의 지원을 받아 수행한 연구 과제임 (No. 20024008, AI 및 로봇을 활용한 조선/항공/건설 도장 공정 자동화 플랫폼 기술 개발)

참 고 문 헌

- [1] V. J. Lumelsky and A. A. Stepanov, "Path-planning strategies for a point mobile automaton moving amidst unknown obstacles of arbitrary shape," *Algorithmica*, vol. 2, no. 1, pp. 403-430, 1987.
- [2] X. Che, et al., "A wall-following navigation method for autonomous driving based on lidar in tunnel scenes," in *2022 IEEE 25th International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design (CSCWD)*. IEEE, 2022.
- [3] A. W. Y. Sang, et al., "Design of a reconfigurable wall disinfection robot," *Sensors*, vol. 21, no. 18, p. 6096, 2021.