

비정형 환경 내 특수목적차량 주행을 위한 동적 및 정적 객체 코스트맵 생성에 관한 연구

이준서*, 서지환*, 조세운*, 김동훈*, 김병준*, 정성환*,
*한국전자기술연구원

e-mail: {dlwnstj6873, seojh410, swcho, clickmiss123, jun0420,
shjeong}@keti.re.kr

A Study on Dynamic and Static Object Costmap Generation for Special Purpose Vehicle Navigation in Unstructured Environments

Jun-Seo Lee*, Ji Hwan Seo*, Sewoon Cho*, Donghoon Kim*,
Byoungjun Kim*, Sunghwan Jeong*
*Korea Electronics Technology Institute

요 약

본 논문에서는 비정형 환경에서 특수목적 차량의 자율주행을 위하여 DWB 경로계획 알고리즘을 수행하였으며 이를 통해 기존 자율주행의 거리 기반 인지 방식의 한계를 분석하였다. 이를 해결하기 위하여, 객체의 동적 및 정적 상태에 따라 위험도를 차등 부여하는 통합 Costmap 생성 시스템을 설계하였다. 제안한 방법은 LiDAR 포인트 클라우드 데이터를 기반으로 PointPillars 모델을 통해 동적 및 정적 객체를 탐지 및 분류하며, 동적 객체에 대해서는 객체 추적을 통해 추정된 속도를 반영한 동적 Costmap을, 정적 객체에 대해서는 거리 기반 감쇠함수를 적용한 정적 Costmap을 각각 생성하여 통합 Costmap을 구성한다. 시뮬레이션을 통해 동적 및 정적 객체에 따라 Costmap이 다르게 생성되는 것을 확인하였으며 객체 인지 기반 Costmap 생성 시스템을 제안한다.

1. 서론

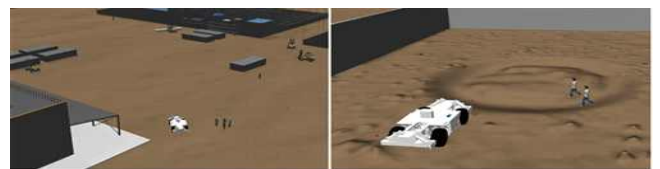
건설·광산·물류 이송 등에서 운용되는 특장차는 정형(도로) 환경과 달리, 차량·보행자 통행 구간과 진행 방향이 엄격히 규정되지 않고 불규칙한 지형·지물이 존재하여 그림 1과 같이 비정형 환경에서 운용되는 경우가 존재한다. 비정형 환경에서의 작업은 지형, 지물 그리고 작업자 위치가 동적으로 변경되어 비규칙적인 시간변화에 따른 공간이 구성이 변경되어 입력에 의존한 특수목적차량의 운용은 작업 피로를 높여 안전사고 발생 위험을 증가시키는 문제가 존재하여, 작업 안전 제고를 위해 특장차 자율주행에 대한 관심이 증대되고 있다[1,2].

최근 비정형 환경 내 안전을 확보하기 위해 다양한 환경적 변화를 반영하여 장애물을 회피하는 방법에 대해 실시간(online)으로 계획하는 능력이 필수적이다. 실시간 계획에 따른 다양한 환경적 변화에 능동적으로 장애물을 회피하는 방법은 대표적인 기술로 내비게이션 분야에서는 Costmap [3,4]과 Dynamic Window Approach(DWA)가 널리 활용된다[5-6]. Costmap은 장애물과의 거리가 가까울수록 높은 비용을 부여하는 방식으로 주행 환경의 위험도를 격자 형태로 수치화하여 장애물 회피 판단에 활용된다. DWA[5]는 주행 가능한 속도 명령으로 다수의 후보 궤적을 생성하고, Costmap 정보를 활용해 각 궤적 별 점수를 계

산해 최적의 속도 명령을 선택한다.

일반적으로 DWA에서 고려하지 못한 코스트맵 정보, 전역 경로 추종, 회전이나 병진 속도의 진동 등의 요소를 고려하도록 개념을 확장한 DWB[7] 방법 또한 활발히 활용되고 있다. 하지만, 플래너에 입력되는 Costmap이 단순한 장애물과의 거리에만 의존하여 생성될 경우, 장애물의 동적 상태에 따른 위험도를 경로 계획에 반영하지 못하는 문제가 존재하여 실제 충돌 위험이 높은 상황에서 장애물에 과도하게 근접하는 경로를 생성하거나, 충돌 위험이 낮은 상황에서 불필요한 우회를 유발하는 비효율적인 경로 생성으로 이어질 수 있다.

본 연구에서는 DWB가 가진 한계를 분석하여 개선 방향을 제시하기 위해 특수목적차량에 설치된 LiDAR 센서를 통해 획득한 포인트 클라우드 데이터를 활용하여 비정형 환경 내 다양한 객체의 동적 및 정적 상태를 판별하고, 위험도를 차등적으로 부여하는 통합 Costmap 생성 시스템에 대해 시뮬레이션 환경하에 연구를 수행하였다.



[그림 1] 비정형환경 기반 건설현장 예시

2. 제안방법

2.1 DWB 로컬 플래너

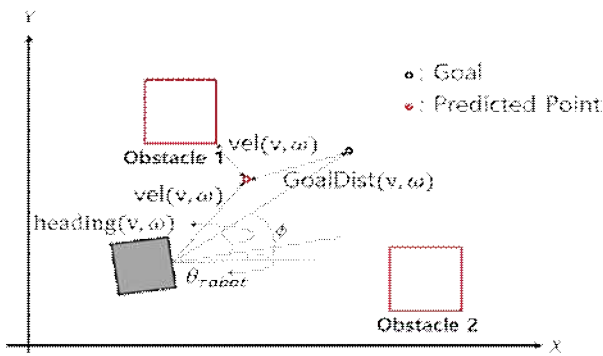
일반적으로 DWB는 DWA의 확장 알고리즘으로 사용자가 목적에 맞게 평가 기준(Critic)을 유연하게 조합하여 평가 함수 $G(v, \omega)$ 를 구성할 수 있다는 점을 가지고 있다. 본 연구에서는 비정형 환경 내 장애물과의 거리 정보를 고려하여 회피하는 방식의 한계를 분석하기 위해, 표 1에 설명된 기본 Critic을 가중합하여 평가 함수를 식 (1)과 같이 구성하였다.

[표 1] DWB 알고리즘 동적창 평가 요소

| 수식 | 설명 |
|------------------------------|--------------------------------|
| $\text{heading}(v, \omega)$ | 목적지로의 방향각과 로봇의 방향각의 차이 |
| $\text{dist}(v, \omega)$ | 예상 지점으로부터 모든 장애물까지의 거리 중 최단 거리 |
| $\text{vel}(v, \omega)$ | 예상 지점의 병진 속도 |
| $\text{GoalDist}(v, \omega)$ | 예상 지점과 목적지까지의 거리 |
| $w_k \ (k \in 1, 2, 3, 4)$ | 각 항의 가중치 |

$$G(v, \omega) = w_1 \cdot \text{heading}(v, \omega) + w_2 \cdot \text{dist}(v, \omega) + w_3 \cdot \text{vel}(v, \omega) + w_4 \cdot \text{GoalDist}(v, \omega) \quad (1)$$

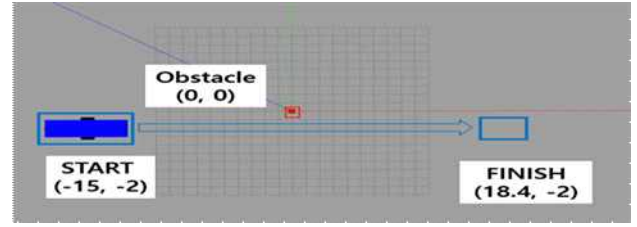
$\text{dist}(v, \omega)$ 는 생성된 후보 궤적이 장애물로부터 얼마나 떨어져 있는지를 평가하는 항목으로, 장애물과의 안전거리 확보에 직접적인 영향을 미친다. 각 critic의 기하학적 의미에 대해서는 아래 그림 2에 제시된다.



[그림 2] The Scheme of DWB

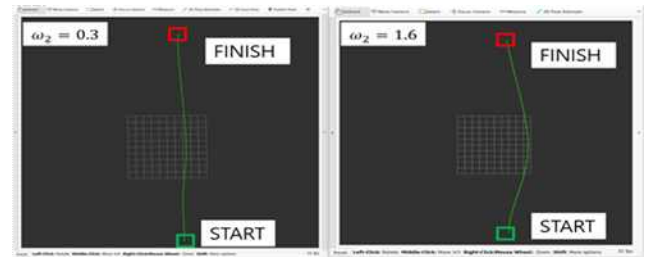
2.2 거리 기반 회피 방식의 한계 분석

본 절에서는 DWB가 사용하는 거리 기반 장애물 회피 방식의 한계를 실험적으로 분석하기 위해 그림 3과 같이 중앙에 배치된 단일 장애물을 회피하는 시나리오를 구성후 장애물 회피 critic인 $\text{dist}(v, \omega)$ 의 가중치 w_2 값의 변화에 따른 주행 궤적을 비교하였다.



[그림 3] 거리 기반 회피 분석 위한 시뮬레이션 주행 환경

그림 3을 통한 거리 기반 회피 방식의 한계에 대한 시뮬레이션 주행 환경을 통해 실험한 결과, 장애물과의 거리에 대한 가중치 w_2 가 높아짐에 따라 장애물로부터 훨씬 더 넓은 안전거리를 확보하며 우회하는 경로를 생성하게 된다. 아래 그림 4는 실험 결과를 나타낸다.

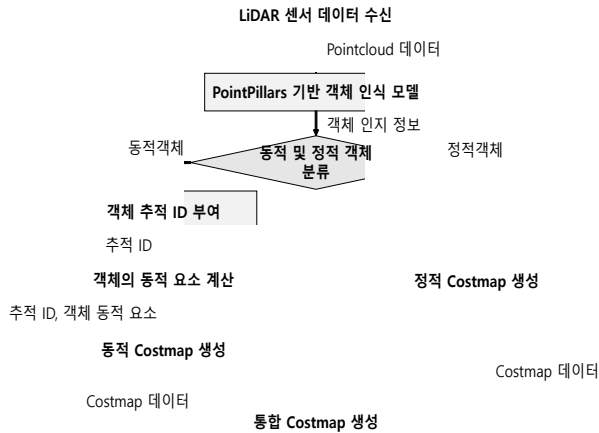


[그림 4] w_2 에 따른 주행 궤적 변화

실험 결과를 통해, 가중치 w_2 의 변화에 따라 주행 궤적이 변화함을 확인하였지만, 고정된 가중치는 속도를 가진 동적 장애물이나 장애물의 종류와 관계없이 장애물 회피를 수행한다. 이러한 점은 시간에 따라 환경이 변하는 비정형 환경에서는 최적 경로를 주행하기 어려운 측면이 존재하는 것으로 판단된다.

2.3. LiDAR 기반 객체 인지 기반 Costmap 생성

본 연구에서 제안한 시스템의 전체 구성도는 아래 그림 5과 같다. 제안한 시스템의 주요 기능은 LiDAR 기반 객체 인식, 객체의 동적 상태 판별 및 추적, 상태에 따른 차등적 Costmap 생성으로 구성된다.



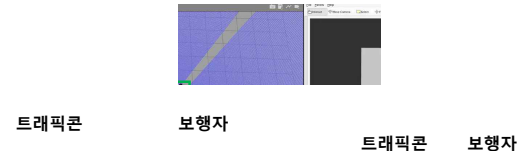
[그림 5] Costmap 생성 시스템 구성도

제시한 그림 5를 통해 비정형 환경에 대하여 LiDAR 센서 데이터를 수집 후 3차원 포인트 클라우드로부터 복셀(Voxel) 형태의 특징 정보를 2D CNN(Convolutional Neural Network)로 특징맵을 구성 후 단일 검출기 (One-stage detector)인 SSD(Single-Shot Detector) Head로 구성된 PointPillars[8] 모델을 통해 트래픽콘, 배럴, 작업자, 작업차량, 그리고 벽돌 등 다양한 객체에 대해 인식 후 동적 및 정적 객체로 분류한다.

동적 및 정적 객체 분류 결과를 기반으로 동적 객체인 경우 시간에 따라 위치 변화로 인해 정적 Costmap 활용의 어려움이 존재하여, 각 동적 객체에 ID를 부여 후 norfair[10] 객체 추적 라이브러리를 통해 개별 객체의 위치 정보 기반 칼만필터로 속도를 추정한 결과를 ADIC(Adaptive Dynamic Influence Costmap)[9]로 전달되어 동적 Costmap을 생성한다. 정적 객체인 경우 시간에 따른 위치 변화가 존재하지 않기 때문에, 객체들 간의 거리에 대해 감쇠함수를 적용하여 정적 Costmap을 생성된다. 생성된 동적 및 정적 Costmap에 대해 Cell 점수를 합산하는 방식을 통해 통합 Costmap을 생성한다.

3. 결과 및 분석

본 연구에서 그림 5를 통해 제안한 방법이 비정형 환경 내 지역 경로 계획 적용 가능성을 검토하기 위해 Ouster OS1-64채널 모델인 LiDAR 센서를 활용하였고, Intel 19-14900K CPU, Nvidia GeForce RTX 4090 GPU, 32GB RAM이 갖춰진 PC에서 ROS2-Foxy Gazebo WSL2 가상 환경과 ROS2-Humble 환경인 Nvidia Jetson Orin보드 환경을 구성하였다. 서로 다른 두 환경의 데이터 송수신을 위해 SSH 통신과 ROS Bridge를 활용하였으며, ROS Gazebo 상 지원하는 libgazebo_ros_ray_sensor을 활용하였다.

[그림 6] 제안한 방법 분석 결과
(좌: 통합 Costmap 생성, 우: 시뮬레이션 수행 결과)

제안한 방법에 대해 구성한 시뮬레이션 환경에서는 정적 및 동적 객체 인식 및 분류하여 통합 Costmap 생성에 대해 트래픽콘과 작업자 객체를 선정 후 Gazebo에 구현된 모델을 활용하였다. 시뮬레이션 환경을 통해 분석한 결과 정적 객체로 인식할 경우 LiDAR 포인트 탐지 지점 근방으로만 Costmap이 생성되어, 객체와 동일한 크기의 Costmap이 생성되며, 동적 객체로 인식하는 경우에는 해당 반경을 포함한 동적 정보를 포함하여 Costmap을 생성하는 모습을 확인하여, 객체 인식 결과 기반으로 Costmap이 다르게 생성됨을 그림 6을 통해 확인하였다.

4. 결론 및 향후 연구

본 연구에서는 DWB가 가진 한계를 분석하여 개선 방향을 제시하기 위해 특수목적차량에 설치된 LiDAR 센서를 통해 획득한 포인트 클라우드 데이터를 활용하여 비정형 환경 내 다양한 객체의 동적 및 정적 상태를 판별하고, 위험도를 차등적으로 부여하는 통합 Costmap 생성 시스템에 대해 시뮬레이션 환경하에 연구를 수행하였다. 제안한 방법은 LiDAR 센서를 통해 획득한 포인트 클라우드 데이터를 기반으로 PointPillars 모델을 통해 동적 및 정적 객체 인식과 분류한 결과를 시간에 따른 위치 변화에 대하여 서로 다른 유형의 Costmap을 생성 후 통합 Costmap을 생성한다. 제안한 방법을 통해 비정형 환경 내 시간에 따른 위치 변화에 대한 동적 및 정적 객체에 대한 통합 Costmap 생성함으로써 다양한 객체 인식 및 분류 수행과 비정형 환경 내 존재하는 정형 및 비정형 객체 인식을 통한 Costmap 생성 및 특수목적차량 주행에 대해 적용 가능하다고 사료된다.

향후 연구에서는 다양한 센서를 융합하여 제안한 Costmap 생성 시스템을 DWB를 포함한 경로계획 알고리즘 적용 및 특수목적차량 주행에 대한 경로 분석 및 정형 및 비정형 객체에 따른 위험도 최소화에 대한 방법에 대해 연구할 예정이다.

ACKNOWLEDGMENT

본 논문은 2025년도 산업통장자원부의 재원으로 한국산업기술기획평가원(KEIT) 자동차산업기술개발사업 “상용 특수 및 작업 보조 차량의 자율 주행 협업 제어 플랫폼 개발 (20018906)” 사

업의 지원을 받아 수행된 연구 결과임.

참고문헌

- [1] Teng, S., Li, X., Li, Y., Li, L., Ai, Y., & Chen, L. Scenarios engineering driven autonomous transportation in open-pit mines. In 2023 IEEE 3rd International Conference on Digital Twins and Parallel Intelligence (DTPI) (pp. 1–6). IEEE, 2023
- [2] Huemer, J., Murschitz, M., Schörghuber, M., Reisinger, L., Radiofsky, T., Weidinger, C., ... & Zips, P. (2025). ADAPT: An Autonomous Forklift for Construction Site Operation. arXiv preprint arXiv:2503.14331, 2025
- [3] Jeong, S., Ga, T., Jeong, I., Oh, J., & Choi, J. Layered-cost-map-based traffic management for multiple autonomous vehicles via a dds. Applied sciences, 12(16), 8084, 2022
- [4] Lu, David V., Dave Hershberger, and William D. Smart. "Layered costmaps for context-sensitive navigation." 2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2014.
- [5] Fox, D., Burgard, W., & Thrun, S. "The dynamic window approach to collision avoidance", IEEE robotics & automation magazine, 4(1), 23–33, 2002
- [6] Wei, Z., Wang, S., Chen, K., & Wang, F. ROS-Based Navigation and Obstacle Avoidance: A Study of Architectures, Methods, and Trends. Sensors, 25(14), 4306, 2025
- [7] Nav2, "DWB Controller Parameters," [Online]. Available: <https://docs.nav2.org/configuration/packages/dwb-params/controller.html> [Accessed: 2025-09-16].
- [8] 김동훈, et al. "3D 객체 인식과 좌표계 변환을 이용한 전역 객체 위치 추정 시스템", 대한전자공학회 학술대회, 157–158, 2025년
- [9] 이준서, et al. "특수목적차량 주행 환경을 위한 동적 장애물 특성 기반 Costmap 모델 개발" 대한전자공학회 학술대회, 155–156, 2025년
- [10] Tryolabs, "Norfair: Real-time 2D Object Tracking Library," GitHub, [Online]. Available: <https://github.com/tryolabs/norfair> [Accessed: 2025-09-16].