

# TTC 기반 제동 메커니즘을 이용한 DRL 내비게이션의 충돌 방지 성능 향상 연구

남지원, 남해운  
한양대학교

namjw@hanyang.ac.kr, hnam@hanyang.ac.kr

## Improving Collision Avoidance of DRL Navigation via a TTC-based Braking Mechanism

Zhiyuan Nan, Haewoon Nam  
Hanyang University

### 요약

본 논문은 심층 강화학습(DRL) 기반 이동 로봇 내비게이션에서 발생하는 근접 장애물 충돌 문제를 해결하기 위해 TTC 기반 제동 메커니즘(TTC-BM)을 제안한다. DRL 정책은 복잡한 환경에서 우수한 주행 성능을 보이나, 장애물과 매우 인접한 상황에서 제동 지연으로 인한 충돌 위험이 존재한다. 제안된 메커니즘은 3D LiDAR 데이터를 활용해 충돌 시간(TTC)을 실시간으로 추정하며, 기존 DRL 모델의 재학습 없이 즉각 적용 가능한 Plug-and-play 방식을 채택한다. 특히 TTC가 임계값 미만일 때 선속도를 제어하는 긴급 제동을 실시하되, 정책의 각속도 출력은 유지하여 즉각적인 조향 회피를 보장한다. 또한, 제어 모드 전환 시의 진동을 방지하기 위해 히스테리시스 기법을 적용하였으며, 점진적 최소 조향 주입을 통해 교착 상태(Deadlock)를 방지하였다. Gazebo[1] 환경에서의 실험을 통해, 제안 알고리즘이 기존 DRL 모델의 충돌률을 유의미하게 낮추고 주행 성공률을 향상시키는 것을 입증하였다.

### I. 서론

심층 강화학습(Deep Reinforcement Learning, DRL)은 이동 로봇 내비게이션 분야에서 복잡한 환경 내 장애물 회피 및 목표 지점 도달을 위한 효과적인 엔드투엔드(End-to-End) 제어 전략으로 자리 잡았다. 그러나 실제 환경에 적용할 경우, 이산적인 제어 주기, 하드웨어의 실행 지연 및 환경의 불확실성 등으로 인해 장애물 근접 상황에서 조향은 시작되었으나 진진 관성이 유지되어 충돌이 발생하는 문제가 빈번히 발생한다. 이를 해결하기 위해 제어 출력값에 대해 전역적인 평활화(Smoothing)나 리미팅(Limiting)을 적용하기도 하지만, 이는 유효 제어 지연(Effective delay)을 발생시켜 긴급 상황에서의 즉각적인 반응성을 저해하고 결과적으로 내비게이션 성능을 하락시키는 부작용을 초래한다. 본 논문은 이러한 한계를 극복하기 위해 최소한의 개입으로 높은 안전성을 보장하는 TTC 기반 제동 메커니즘(TTC-BM)을 제안한다. 제안된 안전층은 전역적인 동작 최적화 대신, 충돌 임계 시점에서만 개입하여 위험한 전진 동작을 차단하는 동시에 로봇의 조향 능력은 보존한다. 구체적으로, 3D LiDAR의 전방 ROI(Narrow front-cone) 내 최소 거리와 충돌 시간(Time-to-Collision, TTC)을 기반으로 긴급 모드를 활성화한다. 이때 선속도는 제동(Zero velocity)하되, DRL 정책이 산출한 각속도는 그대로 유지하여 로봇이 즉각적으로 장애물을 회피할 수 있도록 설계하였다. 또한, 임계값 부근에서의 빈번한 모드 전환에 따른 제어

진동을 억제하기 위해 TTC 히스테리시스(Hysteresis) 및 최소 유지 스텝(Shortest hold steps) 기법을 도입하였다. 아울러 제동 상태에서 낮은 각속도로 인해 발생하는 로봇의 고착 현상을 방지하고자, 목표 방향을 고려한 점진적 교착 방지 조향 주입(Progressive Anti-freeze Steering Injection) 알고리즘을 제안한다. 본 방법론은 별도의 재학습 없이 기존 DRL 기반 내비게이션 시스템에 즉각 적용(Plug-and-play) 가능하며, 논리적으로 명확한 안전 메커니즘을 제공한다. 본 논문의 주요 기여도는 다음과 같다: 1. 기존 DRL 내비게이션 정책의 수정이나 재학습 없이 즉각 중첩 적용 가능한 TTC-BM 알고리즘을 제안한다. 2. 전방 특정 영역(ROI) 내 최소 거리 및 TTC 히스테리시스 기술을 통해, 측면 벽면 등에 의한 오작동을 방지하고 신뢰도 높은 임계 위험 감지를 구현한다. 3. 점진적 교착 방지(Anti-freeze) 조향 주입 메커니즘을 설계하여, 긴급 제동 상황에서도 정지 상태에 빠지지 않고 안정적으로 주행을 재개할 수 있도록 한다.

### II. 본론

본 연구에서 제안하는 TTC-BM은 DRL 정책과 로봇 환경 사이에서 동작하는 독립적인 모듈로 설계되었다. 시점  $t$ 에서 DRL 정책이 출력하는 연속적인 제어 명령을  $a_t = [v_t, \omega_t]$ 라고 할 때( $v_t$ : 선속도,  $\omega_t$ : 각속도), TTC-BM은 실시간 LiDAR 데이터를 기반으로 충돌 위험을

평가하고 이를 안전(Safe) 또는 긴급(Emergency) 모드로 구분하여 최종 제어 명령  $a'_t = [v'_t, \omega'_t]$ 을 산출한다.

전방 ROI 기반의 충돌 시간(TTC) 추정: 측면 벽면과의 인접 상황에서 발생할 수 있는 과도하게 보수적인 판단을 방지하기 위해, 본 연구에서는 전방 180 도 LiDAR 점군 데이터를 20 개의 섹터로 이산화한 후, 전방의 좁은 원추형 영역(Narrow-cone ROI)만을 고려한다. 거리 벡터를  $\mathbf{d} \in \mathbb{R}^{20}$  이라 할 때, 전방 최소 거리는 다음과 같이 정의된다[3]:

$$d_{min}^{front} = \min(d_8, d_9, d_{10}, d_{11}, d_{12}) \quad (1)$$

충돌 임계 거리  $d_{coll}$  을 반영한 충돌 시간(Time-to-Collision, TTC)은 선속도  $v_t$  를 이용하여 아래와 같이 추정한다:

$$TTC = \frac{d_{min}^{front} - d_{coll}}{\max(v_t, v_{floor}) + \epsilon} \quad (2)$$

여기서  $v_{floor}$  는  $v_t \approx 0$  인 정지 상태에서 TTC 수치가 불안정해지는 것을 방지하기 위한 하한값이다.

히스테리시스 기반 모드 전환 (Hysteresis-based Switching): 제어 모드의 빈번한 전환으로 인한 채터링(Chattering) 현상과 동작 성능 저하를 방지하기 위해, 본 연구에서는 TTC 히스테리시스와 최소 유지 스텝(H) 기법을 도입한다. 긴급 모드 진입:  $TTC < \tau_{on}$  일 때 활성화한다. 긴급 모드 해제:  $TTC > \tau_{off}$  조건을 만족하고, 동시에 긴급 모드가 최소 H 스텝 동안 유지되었을 때 해제한다.

동작 수정 규칙 및 교착 상태 방지 (Anti-freeze Mechanism): 각 모드에 따른 동작 수정 규칙은 다음과 같다: 1. 안전 모드 (Safe Mode): 정책의 출력을 변형 없이 수행한다. 2. 긴급 모드 (Unsafe Mode): 선속도를 즉시 제동하되, 각속도는 유지하여 회피 능력을 보존한다.

긴급 제동 상태에서 각속도가 매우 작아 로봇이 고착되는 현상을 방지하기 위해, 목표 방향  $\theta_t$  를 참조하여 최소 조향을 주입한다.  $|\omega'_t| < \omega_{min}$  인 경우, 목표 각속도를  $\omega_{target} = \text{sign}(\theta_t) \cdot \omega_{min}$  으로 설정하고, 다음과 같이 변화율 제한(Rate limiting)을 적용하여 갱신한다:

$$\tilde{\omega}_t \leftarrow \text{clip}(\tilde{\omega}_{t-1} \pm \Delta\omega_{shield}) \quad (3)$$

이러한 점진적 조향 주입은 각속도의 급격한 변화를 억제하면서 로봇이 안전하게 탈출할 수 있도록 돕는다.

본 연구는 제안된 TTC-BM의 성능을 검증하기 위해 Gazebo 시뮬레이션 환경에서 모바일 로봇 내비게이션 실험을 수행하였다. DRL 정책의 입력으로는 3D LiDAR 점군 데이터와 목표 지점까지의 거리 및 상대 방위각을 포함한 상태 정보를 사용하였다. 제안된 알고리즘은 DRL 정책의 출력과 환경 입력 사이의 중첩 레이어로 동작한다. 성능 평가를 위해 학습된 DRL 모델 단독(Baseline[2])과 제안된 알고리즘을 적용한 모델(TTC-BM+ Baseline[2])을 비교 분석하였다. 평가는 20 회 및 50 회 에피소드 단위로 수행되었으며, 주요 지표로는 평균 보상, 성공률, 충돌률, 그리고 동작의 평활도가 있다. 실험 결과, 50 회 평가 기준 TTC-BM 적용 시 충돌률은 0.16 에서 0.06 으로 대폭 감소하였으며, 성공률은 0.82 에서 0.94 로 향상되었다. 특히 평균 보상은 68.5 에서 91.1 로 크게 증가하여 전체적인 주행 효율성이 개선됨을 확인하였다. 주목할 점은 동작의 평활도 수치가 Baseline[2]과 큰 차이를

보이지 않는다는 것이다. 이는 성능 향상이 단순히 동작의 전역적 평활화에 의한 것이 아니라, 충돌 위험이 감지된 임계 상황에서만 선별적으로 개입하는 '최소 간섭 메커니즘'의 효과임을 입증한다.

표 1. 제안된 알고리즘과 Baseline 모델의 성능 비교

	평균보상	성공률	충돌률	평활도
Baseline (20)	59.5	0.8	0.2	0.284
TTC-BM (20)	109.4	1	0	0.281
Baseline (50)	68.5	0.82	0.16	0.314
TTC-BM (50)	91.1	0.94	0.06	0.319

### III. 결론

본 논문은 심층 강화학습 기반 이동 로봇의 주행 안정성 및 임무 성공률 제고를 위한 TTC-BM 알고리즘을 제안하였다. 본 방법론은 기존에 학습된 DRL 모델을 수정하거나 재학습할 필요 없이 즉각적인 적용이 가능하다는 강점을 가진다. 전방 좁은 원추형 영역(Narrow front-cone) 기반의 TTC 추정과 히스테리시스 및 최단 유지 스텝 기법을 통해 안정적인 긴급 모드 트리거를 구현하였다. 긴급 모드에서는 선속도 제동과 각속도 보존 전략을 취하며, 점진적 교착 방지(Anti-freeze) 조향 주입을 통해 로봇의 고착 현상을 방지하였다. Gazebo[1] 시뮬레이션 결과, 제안된 방법은 충돌률을 유의미하게 낮추는 동시에 주행 성공률과 보상을 탁월하게 향상시켰다. 향후 연구로는 LiDAR 대신 비전(Vision) 기반의 깊이 정보나 충돌 위험 예측 모델을 적용하는 방안을 모색할 예정이며, 실제 로봇 플랫폼에서의 검증을 통해 일반화 성능과 강인성을 확보하고자 한다.

### ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (No. 2022R1A2C1011862).

### 참 고 문 헌

- [1] Koenig, Nathan, and Andrew Howard. "Design and use paradigms for gazebo, an open-source multi-robot simulator." 2004 IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems (IROS)(IEEE Cat. No. 04CH37566). Vol. 3. Ieee, 2004.
- [2] Nan, Zhiyuan, and Haewoon Nam. "Multimodal Feature Fusion for Deep Reinforcement Learning-Based Mobile

Robot Navigation." 2025 International Conference on Artificial Intelligence in Information and Communication (ICAIIIC). IEEE, 2025.

- [3] Cimurs, Reinis, Il Hong Suh, and Jin Han Lee. "Goal-driven autonomous exploration through deep reinforcement learning." IEEE Robotics and Automation Letters 7.2 (2021): 730–737.