외란으로 인한 도달영역을 고려한 안전한 자율주행차 경로계획법

이 윤 우•, 김 현 진°

Safe Trajectory Generation for Autonomous Vehicle Based on Reachability Analysis

Yun-woo Lee•, Hyoun-jin Kim°

요 약

본 논문은 모델예측제어 (model predictive control)에 도달성 분석을 추가시킨, 외란이 존재하는 비정형 환경에서의 안전한 자율주행법을 제안한다. 외란이 존재하는 환경에서의 장애물 회피는 제한 미분 동적 프로그래밍 (differential dynamic programming) 기법을 통하여 유한한 계획 시간 (planning time horizon) 동안의 레퍼런스 제어 정책으로부터 제어 입력을 변경하여 차를 장애물로부터 안전한 영역에서 주행하게끔 한다. 존재 가능한 외란 모두를 고려하여 차의 도달영역을 선형시스템 도달성 분석을 통하여 계산하며, 이를 여러 단계의 밀접 근사방법을 이용하여 타원으로 표현한다. 장애물 환경 및 차의 상태오차 도달영역을 타원으로 근사하여, 다시 민코우스키 (Minkowski-Sum)의 근사법을 활용하여 장애물 회피기동을 가능하게 한다.

키워드 : 자율주행, 경로계획, 도달성 분석
Key Words : Autonomous driving, Path planning, Reachability Analysis

ABSTRACT

This paper proposes safe trajectory generation for autonomous driving car in cluttered atypical environments. Obstacle avoidance in an environment where disturbance exists, is executed through trajectory correction, which modifies control input over a finite time horizon, in order for car to be located within a safe area. We calculate the reachable set of autonomous vehicle by taking into account all disturbances, which we represents as ellipses via multiple step tight approximation methods. By approximating the reach-state of the car and obstacles to the ellipse, we deal with obstacle avoidance using the approximation method of Minkowski-Sum.

Ⅰ. 서 론

불규칙적으로 장애물이 산재한 비정형 환경에서의 자율주행 시스템의 기동 계획은 여전히 완벽하게 해결되지 못한 문제이다. 자율주행 시스템은 항상 노면, 바람등의 외란에 노출되어 있기 때문에, 경로계획 단계에서 안전을 보장하는 것이 필수적이다. 또한, 센서 노이즈 등의 불확실성으로 인하여, 생성된 주행경로 역시 충돌등의 위험 상황에 놓일 수 있어 전체 시스템의 임무 실패로 이어질 수 있다. 하지만, 잠정적 위험

※ 이 논문은 2021년도 정부 (과학기술정보통신) 재원으로 정보통신기술진흥센터의 지원을 받아 수행된 연구임. (No.2019-0-00399, 비정형 주행환경 대응이 가능한 자율차 탑재용 AI기반 인지, 판단 및 제어 솔루션 개발)
◆ First Author : Seoul National University, Department of Mechanical and Aerospace Engineering, snunoo12@snu.ac.kr, 정회원
° Corresponding Author : Seoul National University, Department of Aerospace Engineering, hjinkim@snu.ac.kr, 정회원
논문번호 : 202012-330-C-RE, Received December 28, 2020; Revised February 18, 2021; Accepted February 18, 2021

경로 역시 배제하고 변경하여 차가 지형물과의 충돌 없이 주행할 수 있게끔 해야 한다.

외란을 고려한 제어로써, 강건제어[1]가 자율주행 시스템에 포함될 수 있지만, 장애물이 밀집되어 있는 환경에서는 큰 입력 게인을 이용하여 충돌을 피하는 주행을 만들어 내기 때문에 급작스러울 움직임이 불가피하게 일어난다. 이 때문에, 경로계획 단계에서의 외란을 사전에 고려하는 것은 장애물 밀집지역에서의 안정된 움직임을 만들어내는 등의 많은 이점을 갖고 있다.

이러한 전략은 도달성 분석을 기반으로 하며 대표적으로는 해밀턴 자코비 도달성 분석[2] (Hamilton Jacobi reachability analysis)의 접근이 있었다. 동역학을 갖는 시스템의 진화를 게임이론 중 two-player game으로 해석하며 최소극대화 (min-max) 문제 형태를 갖추고 있다. Hamilton-Jacobi-Isaacs Equation을 풀어 도달영역을 계산할 수 있지만, 이는 편미분 방정식을 풀어야 하기 때문에, 시스템의 차원이 증가함에 따라 계산시간이 기하급수적으로 증가한다. 많은 계산시간을 요구하는 분석법의 사용은 자율주행과 같이 실시간성이 요구되는 시스템에 적합하지 못하다. 이에 따라, 도달영역을 빠르게 계산할 수 있는 방법을 고안하는 것이 필수적이다.

본 논문에서는 구간적 선형시스템 (piecewise linear system)의 도달성 분석과 함께 모델예측제어를 적용하여 자율주행 시스템에서의 경로계획을 다룬다. 유계의 외란을 고려한 차량의 실시간성이 보장되는 상태오차 전파 (state-error propagation) 분석법을 제안하며, 이를 타원으로 근사한 제약조건과 함께 최적제어 문제를 해결하여 자율주행 경로계획을 완성한다.

Ⅱ. 시스템 개요

그림 1은 본 논문에서 사용하는 자율주행 시스템의 구조이다. LiDAR 및 카메라 센서를 이용하여 차량의 자기측위 및 환경에 대한 정보 (e.g. pointcloud)를 얻는다. 환경정보를 바탕으로 상위제어기에서 레퍼런스 경로를 생성하고, 모델예측기법을 이용하여 충돌회피 경로를 만든다. 만들어낸 최적 제어입력은 PID제어를 통하여 실제 구동 시스템에 적용된다. 본 논문에서는 만들어진 레퍼런스 경로를 바탕으로 차의 도달 가능 영역을 계산하여, 장애물과 추돌하지 않게 회피하는 경로계획법을 제안한다.

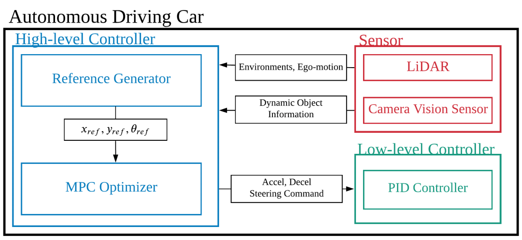

그림 1. 자율주행 시스템
Fig. 1. Autonomous Driving System

Ⅲ. 모델 예측 제어 기법

본 논문에서는 차량 동역학 모델로 자전거 기구학 모델을 사용하여 모델예측제어를 구성한다. 제어 입력으로 뒷바퀴의 선가속력과 앞바퀴의 각도를 사용한다. 상태변수 $\xi = [x, y, v, \theta]^T$는 global 좌표계에서의 x,y 좌표 및 선속력과 차의 방향각 (heading angle)이며, 제어 입력 $u = [a, \delta]^T$는 선가속력과 앞바퀴의 각도를 나타낸다. 다음과 같은 구간 이동 전략 (receding horizon manner) 형태의 최적제어 문제를 구성하여 외란이 존재하는 환경에서의 안전한 경로추종 움직임을 만들어낸다.

$$
\begin{aligned}
\min\ & \frac{1}{2}\|\xi - \xi_f\|^2_{Q_f} + \frac{1}{2}\int_{T_0}^{T_f} \|\xi - \xi_r\|^2_Q + \|u\|^2_R \, dt \\
s.t.\ & \dot{\xi} = f(\xi,\ u,\ w) \\
& c(X(t)) > 0 \\
& X(t) = E(t) + \xi(t) \\
& E(0) = E_0 \\
& \|u\| \le u_{\max}
\end{aligned}
\tag{1}
$$

이 때 시스템의 동역학은 외란이 개입하지 않은 pure dynamics $(w = 0)$을 사용한다. 두 번째 조건은 장애물과 충돌하지 않는 조건으로 비볼록 (non-convex)하다. $X(t)$는 상태오차 도달영역으로, 기존 제어정책으로부터 유계의 외란에 의해 생길 수 있는 차의 도달영역을 나타낸다. 나머지 조건은 초기 존재 가능 영역 및 제어 입력의 한계를 나타낸다. 위 과정의 최적화를 통하여 제한된 제어입력을 사용하여 외란에 노출된 차량의 안전을 보장한다.

Ⅳ. 선형 시스템 도달성 분석에 의한 도달영역 계산법

해밀턴-자코비 도달성 분석은 시스템의 안전성을

평가하기 위해 control input가 disturbance 사이의 게임이론을 기반으로한 분석이다. 최적의 player input으로 만들어진 시스템이기 때문에 최악의 경우를 고려한 문제를 다룰 수 있다. 하지만 시스템의 차수가 증가할수록 도달영역 (reachable set)을 계산하기 위해 소요되는 시간이 기하급수적으로 증가하는 특징을 갖고 있다. 본 논문에서는 경로추종에 쓰이는 input policy를 고정시키고 외란이 최악의 상태를 만드는 one-player game으로 문제를 변화시킨다. 구간적으로 선형화된 시스템에 대해서는 도달영역을 해석적으로 구할 수 있다. 외란에 의해 누적된 상태오차 영역을 민코우스키 합을 통하여 구한다. 외란 w로 인한 선형 시스템의 상태 도달영역은 아래와 같이 표현할 수 있다.[3]

$$E(t)=\Phi(t)x_0+\int_0^t \Phi(t,\tau)D(\tau)w(\tau)d\tau \qquad (2)$$

$\frac{\partial \Phi}{\partial \tau}(t,\tau):=A(t)\Phi(t,\tau)$이며, $A(t),D(t)$는 선형화된 시스템에서의 closed-loop 시스템 행렬 및 외란 게인 행렬이다. i번째 외란에 의한 도달영역은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$D_i(t)=\left\{\int_0^t \overline{D}_i(\tau)sgn\left(v^T Q_0^{-\frac{1}{2}}\overline{D}_i(\tau)\right)d\tau \middle| v^T v \le 1\right\} \qquad (3)$$

$\overline{D}_i(t)=\exp(-\Phi t)D_i(t)\overline{w}_i$ 이며, $D_i(t)$는 $D(t)$의 i번째 열, $\overline{w}_i$는 i번째 외란의 최대값을 나타낸다. (3)에 의해 구하는 영역은 수치적분 과정이 필수적이다. 따라서, 우리는 위의 집합을 가능한 덜 보수적이면서 계산시간이 빠른 타원 근사과정을 택하여 구한다. 다음의 리아푸노프 방정식의 해가 되는 Q_i를 구하여 보수적인 도달영역으로 사용한다.[4,5]

$$\begin{aligned}&\Phi(t)\left(Q_i(t)-\epsilon t^2 I\right)-\left(Q_i(t)-\epsilon t^2 I\right)^T\Phi(t)\\&=N_i(t)-\exp(-\Phi(t))N_i(t)\exp(-\Phi(t))\end{aligned} \qquad (4)$$

여기에서 $N_i(t)=tw_i^2 D_i(t)D_i^T(t)$이며, $Q_i\in S_{++}^{n_\xi}$는 타원체의 모양을 결정짓는 행렬이다. 이렇게 계산된 외란에 의해 생성된 최대 도달영역은 민코우스키 합에 의해 합쳐지며, 이는 최소부피 외접 타원근사법에 의해 결정된다.

V. 타원 장애물 회피 검사

도달영역들의 합을 근사하기 위하여 외접하는 최소부피의 타원을 생각하여 다음의 최적화 문제를 푼다.

$$\min\log(\det(Q(\beta))) \qquad (5)$$

여기서 β는 두 타원 Q_1, Q_2의 합을 조절하는 가중치이며, 외접하는 타원은 다음과 같이 표현이 된다.

$$Q(\beta)=\left(1+\frac{1}{\beta}\right)Q_1+(1+\beta)Q_2 \qquad (6)$$

1차 최적 조건은 closed form의 해를 제공하지 않는다. 따라서 반복법 (iteration method)을 통하여 최소부피를 만드는 β를 구한다.

k번째 iteration에서 $k+1$번째의 β는 아래의 식을 통하여 구하며[6], 최적의 initial guess는 minimum trace 근사방법의 결과를 사용한다.

$$\beta_{k+1}=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{1+\beta_k\lambda_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i}{1+\beta_k\lambda_i}}} \qquad (7)$$

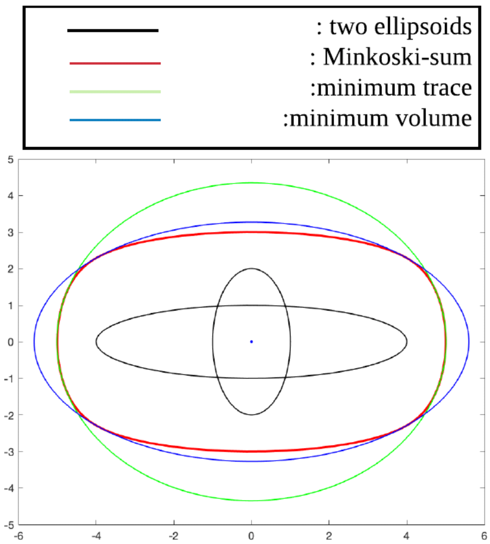

그림 2. 두 타원의 합에 외접한 타원 근사
Fig. 2. External Ellipsoidal Approximation for Sum of Two Ellipsoids

두 타원의 민코우스키 합에 대한 결과는 그림 2에서 확인할 수 있다.

위의 방법을 통하여 n_w개의 상태오차 도달영역의 합을 타원으로 근사하며, 이는 아래와 같이 표현된다.

$$E(q(t),Q(t)) = \left\{ q(t) + Q^{\frac{1}{2}}(t)p \mid p^T p \le 1 \right\} \quad (8)$$

$q(t)$는 타원의 중심이며, $Q(t) := (\oplus^{n_w} Q_i(t)) \oplus Q_0$는 위 과정을 통하여 계산된 초기 영역 및 모든 외란에 의한 도달영역의 합을 타원으로 근사하여 모양을 표현하는 행렬이다. 우리는 모델예측제어기법에서, 매 time step에서 해당되는 상태오차 도달영역을 최적화 문제에서의 제약조건으로 사용한다.

$$c(X(t)) = (x(t) - x_{obs})^T \hat{Q}^{-1}(t)(x(t) - x_{obs}) - 1 \quad (9)$$

여기에서 $\hat{Q}(t)$는 도달영역 $Q(t)$와 장애물 Q_{obs}의 민코우스키 합의 근사된 외접 타원이다.

Ⅵ. 주행 시뮬레이션 및 결과

본 논문이 제시한 경로계획은 Microsoft 사의 AirSim 시뮬레이터 환경에서 검증된다. 전체 time horizon은 5초로 설정하였으며, 샘플링 간격 dt=100ms로 이산화된 시스템을 모델예측제어로 구성하였고, Constrained Unscented Dynamic Programming을 이용하여 비볼록 최적화 문제를 풀었다. 다양한 형태의 정적 장애물을 배치시켜 비정형 환경을 구성하여 본 논문의 경로계획법을 평가하였다. 사각형 모양의 차도에서 global 목표점까지 충돌 없이 주행하는 임무를 주었고 이를 전역 경로계획 (global planning)에서 A* 알고리즘을 사용한 후, 5차 다항곡선으로 가공하여 레퍼런스 경로를 만들고 이를 추종

그림 3. 무질서하게 정차되어 있는 비정형 환경에서의 자율주행
Fig. 3. Autonomous Driving in Atypical Environments

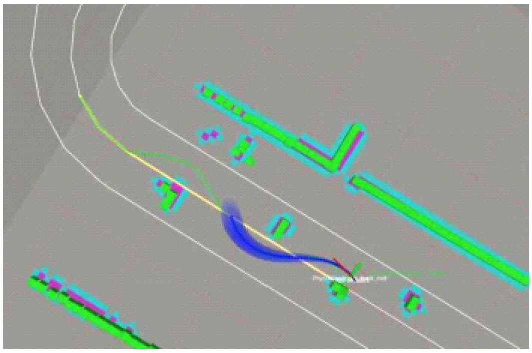

그림 4. 상태오차 전파를 고려한 장애물 회피 기동
Fig. 4 Collision Avoidance Considering State Error Propagation

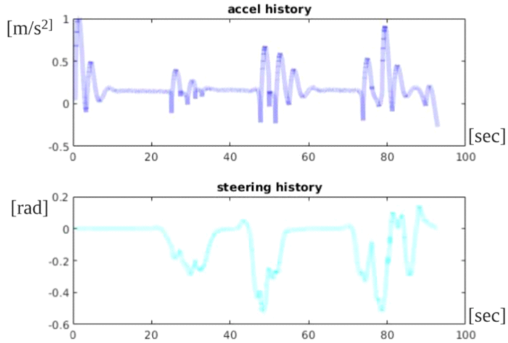

그림 5. 가속도 및 바퀴 각도 profile
Fig. 5. Acceleration and Steering Angle

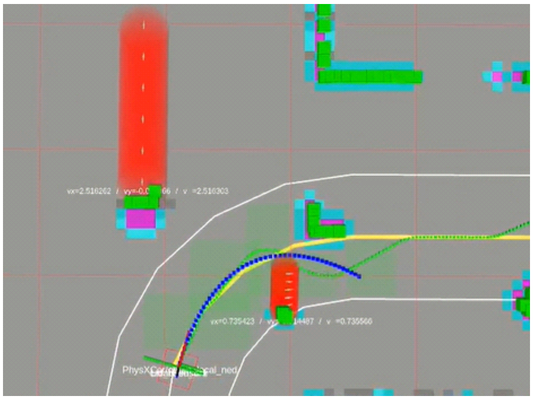

그림 6. 동적 물체 회피 경로계획
Fig. 6. Collision Avoidance considering Dynamic Obstacles

하게끔하였다.

$w_\delta \in [-0.02,\ 0.02]$ $[rad]$, $w_a \in [-0.05,\ 0.05]$ $[m/s^2]$로 설정하여 시뮬레이션 시행을 하였고, 이러한 설정은 하위 제어기의 성능 및 제어 신호 latency

때문에 생기는 전체 시스템의 제어 성능 저하로 만들어지는 상태오차 도달영역을 고려할 수 있다.

시뮬레이션은 Intel i7-8700 CPU, 16GB RAM 데스크탑에서 C++ 코드에 의해 실행되었으며, 전체 horizon에 대한 도달영역 전파 계산에는 평균 0.8ms가 소요되었으며, dynamic programming을 푸는 데에는 평균 3ms의 시간이 소요되었다. 재경로계획은 1초 간격으로 시행하였으며, 새로운 장애물이 발견될 때마다 즉시 재경로계획을 시행할 수 있게 하였다.

이는 이전 연구들에서 도달영역을 계산하는 데에만 수백 초 이상 소모하는 것에 비해 효과적으로 적은 시간의 계산만으로 안전성을 보장할 수 있다.

Ⅶ. 결 론

본 논문에서는 실시간이 보장되는 상태오차 도달성 분석을 고려한 외란에도 강건한 자율주행 경로계획법을 제시하였다. 첫 번째로, 후륜구동 차량의 기구학 모델로부터 최적제어기법을 구성하였으며, 두 번째로, 도달영역을 가능한 덜 보수적이며 효율적으로 계산하여 재경로계획이 적은 시간 내에 이루어질 수 있는 방법을 제시하였다. 위의 방법을 통하여 복잡한 비정형 환경에서 외란에 강건한 제어정책을 완성하였다. 추후 시스템의 외란 및 센서 노이즈를 함께 고려하여 더욱 강건한 자율주행 경로계획법을 연구할 예정이다.

References

[1] M. Rozewicsz and A. Pilat, “Robust control of bicycle model with CMG,” *2016 21st Int. Conf. MMAR*, pp. 369-374, Miedzyzdroie, 2016.

[2] S. Bansal, M. Chen, S. Herbert, and C. J. Tomlin, “Hamilton-Jacobi reachability: A brief overview and recent advances,” *2017 IEEE 56th Annu. CDC*, pp. 2242-2253, Melbourne, VIC, 2017.

[3] B. Houska, F. Logist, J. Van Impe, and M. Diehl, “Robust optimization of nonlinear dynamic system with application to a jacketed tubular reactor,” *J. Process Control*, vol. 22, pp. 1152-1160, 2012.

[4] H. Seo, D. Lee, Clark Y. Son, C. J. Tomlin, and H. J. Kim, “Robust trajectory planning for a multirotor against disturbance based on hamilton-jacobi reachability analysis,” *Int. Conf. IROS*, Macau, China, Nov. 2019.

[5] Y. Lee and H. J. Kim “Trajectory generation for autonomous vehicle based on reachability analysis,” in *Proc. KICS Summer Conf.*, pp. 351-352, Aug. 2020.

[6] A. Halder “Smallest ellipsoid containing *p*-sum of ellipsoids with application to reachability analysis,” *IEEE Trans. Automatic Control*, vol. 66, no. 6, pp. 2512-2525, Jun. 2021.

이 윤 우 (Yun-woo Lee)

2019년 2월 : 서울대학교 전기정보공학부 졸업

2019년 9월~현재 : 서울대학교 기계항공공학부 석박통합과정

<관심분야> 경로계획, 자율로봇

[ORCID:0000-0001-8761-4344]

김 현 진 (Hyoun-jin Kim)

1995년 : 한국과학기술원 기계공학과 학사

1999년 : UC Berkeley 기계공학과 석사

2001년 : UC Berkeley 기계공학과 박사

2004년~현재 : 서울대학교 기계항공공학부 교수.

<관심분야> 로보틱스, 제어 및 인공지능 응용

[ORCID:0000-0002-6819-1136]