

# 안전한 선형 입력 제한 조건을 이용한 다수의 자율 차량 경로 생성 알고리즘

박정원, 김현진

서울대학교

qwerty35@snu.ac.kr, hjinkim@snu.ac.kr

## Trajectory Generation Algorithm for Multiple Autonomous Vehicles Using Safe Linear Input Constraints

Park Jungwon, Kim H. Jin

Seoul National Univ.

### 요약

본 논문은 완충된 보로노이 구역 (Buffered Voronoi Cell)을 바탕으로 선형 입력 제한 조건을 생성하여 다수의 자율 차량에 대해 충돌 없는 안전한 경로를 계획하는 기법을 다룬다. 제안하는 방법은 차량의 동역학을 선형화한 뒤 위치 제한 조건인 보로노이 구역을 선형 입력 제한 조건으로 변환하였으며 이를 기반으로 목표 경로를 추종할 수 있도록 제어입력을 최적화하였다.

### I. 서론

여러 대의 자율 차량을 운용하기 위해서는 차량 간의 충돌을 방지하는 안전한 경로 계획 기법이 필수적이다. 하지만 지금까지 연구된 많은 자율 차량 경로 계획 기법은 한 대의 차량만을 고려하거나 차선 변경과 같이 한정된 시나리오만을 고려하고 있어 다수의 차량이 운행되고 있는 비정형 환경에서는 적용하기 어렵다는 단점이 있다.[1]

본 논문에서는 완충된 보로노이 구역 (Buffered Voronoi Cell)을 기반으로 안전한 선형 입력 제한 조건을 생성하여 최적의 제어입력을 구하는 기법을 제안한다. 기존의 확장된 보로노이 구역을 사용하는 경로 계획 기법 [2]은 위치에 대한 제한 조건만을 주기 때문에 1차 적분 모델 (single integrator model)와 같이 단순한 동역학을 가진 로봇에서만 사용할 수 있지만, 본 논문에서는 이를 자전거 기구학 모델에 대해서도 적용할 수 있도록 확장할 수 있는 기법을 소개한다. 논문 [3]의 경우 본 논문에서 제안하는 방법과 유사하게 완충된 입력 구역(Buffered Input Cell)을 사용하여 충돌을 방지하는 기법을 제안하였지만 차선 변경 시나리오에서만 사용할 수 있다는 한계가 있다. 반면 제안하는 방법은 목표 경로를 계획하는 알고리즘을 개선하여 교차로와 같이 다양한 시나리오에서도 대응이 가능하도록 구성하였다.

### II. 안전한 선형 입력 제한 조건

본 논문에서 다루는 자율 차량 모델은 자전거 기구학 모델을 사용한다.  $k$ 번째 시점에서  $i$ 번째 차량의 상태변수는 위치, 방향각, 선속력으로 구성되어 있으며  $(x_k^i = (x_k^i, y_k^i, \theta_k^i, v_k^i))$ , 제어입력은 선속도와 바퀴의 방향으로 구성되어 있다  $(u_k^i = (a_k^i, \phi_k^i))$ . 자전거 기구학 모델의 경우 비선형 시스템이기 때문에  $i$ 번째 차량마다  $k$ 번째 시점에서  $x_k^i = 0$ ,  $y_k^i = 0$ ,  $\theta_k^i = 0$ 이 되도록 좌표변환을 한 뒤  $\theta_k^i = 0$ ,  $\phi_k^i = 0$ 을 기준으로 선형화를 한다. 따라서 선형화된 시스템 방정식은 아래와 같다.

$$x_{k+1}^i = F_k x_k^i + G_k u_k^i$$

$$p_k^i = C x_k^i$$

$$F_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \Delta t \\ 0 & 1 & \Delta t v_k & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, G_k = \begin{bmatrix} \Delta t^2 & 0 \\ 0 & \frac{(\Delta t v_k)^2}{2L} \\ 0 & \frac{\Delta t v_k}{L} \\ \Delta t & 0 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

여기서  $p_k^i$ 는  $k$ 시점에서  $i$ 번째 차량의 위치,  $\Delta t$ 는 시점간의 시간간격이며  $L$ 은 차량 앞/뒤 바퀴 사이의 거리이다. 이때  $k+1$  시점의 위치는 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$p_{k+1}^i = C x_{k+1}^i = C F_k x_k^i + C G_k u_k^i$$

본 논문에서는 충돌 회피를 위해서 완충된 보로노이 구역을 사용한다. 완충된 보로노이 구역은 아래와 같은 성질을 가지고 있다 [2].

$$(V_k^i \oplus C_{i,j}) \cap V_k^j = \emptyset, \forall i, j \neq i$$

여기서  $\oplus$ 는 민코프스키 덧셈,  $V_k^i, V_k^j$ 는 완충된 보로노이 구역이며  $C_{i,j}$ 는  $i$ 번째 차량과  $j$ 번째 차량 간의 충돌 영역이다. 만약  $k+1$ 번째 시점에서 모든 차량에 대해  $p_{k+1}^{i+1} \in V_k^i$ 를 만족한다면 위의 식에 의해  $k+1$ 번째 시점에서도 충돌 회피가 보장된다. 따라서  $i$ 번째 차량에 대한  $k$ 번째 시점에서 안전한 선형 입력제한 조건은 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$u_k^i \in U_k^i = (C G_k)^{-1} (V_k^i \oplus (-C F_k x_k^i))$$

여기서  $C G_k$ 는  $v_k > 0$ 인 경우 항상 역행렬이 존재한다는 것을 증명할 수 있다.

### III. 목표 경로 계획 및 경로 최적화

충돌 없는 경로를 생성하기 위해 우선 장애물 고려 없이 목표 경로를 생

성한 뒤 안전한 선형 입력 제한 조건을 사용하여 충돌이 발생하지 않으면서 목표 경로에서 요구되는 제어입력과 가장 가까운 제어입력을 찾는다. 목표 경로를 생성할 때는 자전거 기구학 모델의 미분 평탄성 (differential flatness)를 활용하여 3차 다항식 형태의 경로를 사용한다.

$$p_{ref}^i(t) = \sum_{n=0}^3 \alpha_n^i t^n$$

목표 경로는 초기 위치 속도, time horizon에서의 위치 속도를 통해 구한다. 목표 경로를 바탕으로 목표 제어입력은 아래와 같이 구할 수 있다.

$$u_{ref} = [a_{ref}, \phi_{ref}]^T$$

$$a_{ref} = \frac{\ddot{x}\ddot{x} + \ddot{y}\ddot{y}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}}, \phi_{ref} = \arctan\left(\frac{\dot{x}\ddot{y} - \dot{y}\ddot{x}}{(\dot{x}^2 + \dot{y}^2)^{1.5}}L\right)$$

위의 목표 제어입력은 요구되는  $\phi_{ref}$ 가 적은 경우에는 잘 작동하지만 급격한 바퀴 회전이 필요한 경우에는 발산하는 경향이 있다. 따라서 이를 방지하기 위해  $\phi_{ref}$ 의 한계를 지정하여 ( $\phi_{ref} \in [-\phi_{max}, \phi_{max}]$ ) 일정 이상 방향각을 가지지 못하도록 설정하였다. 결론적으로 k시점에서 i번째 차량을 위한 최적 제어입력은 아래의 최적화 문제를 통해 구할 수 있다.

$$J_k^i = (u_k^i - u_{ref})^T R(u_k^i - u_{ref})$$

$$u_k^i \in U_k^i = (CG_k)^{-1}(V_k^i \oplus (-CF_k x_k^i))$$

$$a_k^i \in [-a_{max}, a_{max}], \phi_k^i \in [-\phi_{max}, \phi_{max}]$$

여기서  $J_k^i$ 는 비용함수이며  $R$ 은 제어입력 별 가중 행렬이다.

#### IV. 시뮬레이션 결과

시뮬레이션에서 사용된 차량은  $L=1$  m이고 차량과 차량 사이의 거리가 2 m 보다 적을 때 충돌이 발생한다고 설정하였다. 경로를 계획할 때 시점 간의 시간간격은 0.1초로 설정하였으며 최적 제어입력을 구할 때는 Matlab의 quadprog 함수를 사용하였다. 비용 함수에서 가중행렬은  $R = \text{diag}([1, 100])$ 으로 설정하였으며 제어입력 한계는  $a_{max}=20$   $\text{m/s}^2$ ,  $\phi_{max}=\pi/3$  rad으로 설정하였다. 연산시간은 Intel Core i7-7700, 16G RAM 랩탑에서 측정되었다.

본 논문에서는 두 가지 시나리오에 대해서 시뮬레이션을 진행했다. 첫 번째 시나리오에서는 두 대의 차가 차선을 변경하는 시나리오로 초기 위치를 각각 (-31, 4), (-30, 0)로 목표 위치를 (30, 0), (30, 4)로 설정하였다. 두 번째 시나리오에서는 두 대의 차가 교차로를 지나가는 시나리오로 초기 위치를 (-15.5, 0), (0, -15)로 목표 위치를 (15, 0), (0, 15)로 설정하였다. 그림 1과 그림 2에서 볼 수 있듯이 제안하는 알고리즘은 두 가지 시나리오에 대해 충돌이 발생하지 않는 경로를 생성하는 것을 확인할 수 있었다. 최적 제어 입력을 구하는 데는 평균 1.5 ms가 소요되었다. 하지만 그림 3에서 볼 수 있듯이 차들이 근접해있고 차량 간의 각도가 클 때는 제어 입력이 급격히 변한다는 한계점이 있었다.

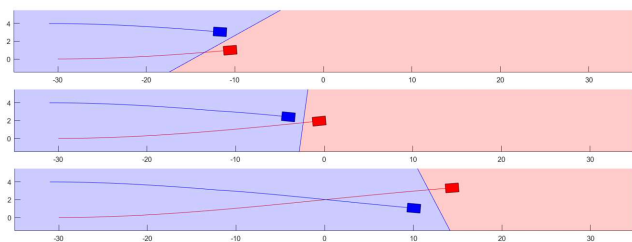


그림 1 시나리오 1에서 경로 생성 결과

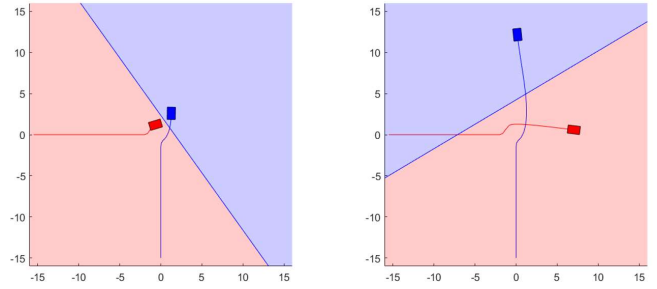


그림 2 시나리오 2에서 경로 생성 결과

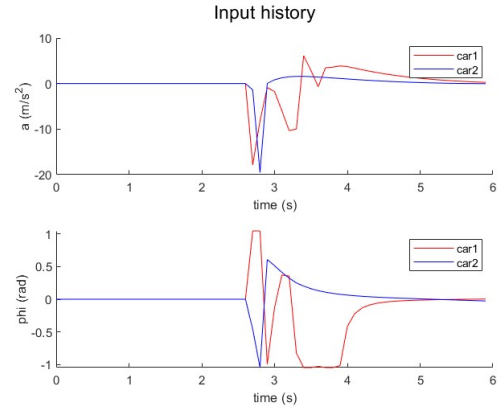


그림 3 시나리오2에서 차량 별 제어 입력

이는 제어입력을 계산할 때 직후의 충돌만을 고려하기 때문에 발생하는 것으로 이를 완화하기 위해서는 모델 예측 제어 기법과 같이 미래의 충돌을 고려하여 경로를 계획할 필요가 있다.

#### V. 결론

본 논문에서는 완충된 보로노이 구역을 기반으로 하여 안전한 선형 제한 조건을 생성한 뒤 이를 바탕으로 여러 대의 차량에 대해 충돌 없는 경로를 생성할 수 있는 경로 계획 기법을 제안하였다. 그리고 제안하는 방법이 차선 변경, 교차로 등 다양한 시나리오에서 충돌 없이 경로를 생성할 수 있음을 시뮬레이션으로 확인하였다.

#### ACKNOWLEDGMENT

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)

#### 참고 문헌

- [1] González, David, et al. "A review of motion planning techniques for automated vehicles." IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems 17.4 (2015): 1135-1145.
- [2] Zhou, Dingjiang, et al. "Fast, on-line collision avoidance for dynamic vehicles using buffered voronoi cells." IEEE Robotics and Automation Letters 2.2 (2017): 1047-1054.
- [3] Wang, Mingyu, et al. "Safe distributed lane change maneuvers for multiple autonomous vehicles using buffered input cells." 2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2018.