

로봇형 차량의 자율주행을 위한 센서 기반 운동 계획법 개발

Development of Sensor-based Motion Planning Method for an Autonomous Navigation of Robotic Vehicles

김 동 형, 김 창 준, 이 지 영, 한 창 수*
(Dong-Hyung Kim¹, Chang-Jun Kim¹, Ji-Yeong Lee¹, and Chang-Soo Han¹)
¹Hanyang University

Abstract: This paper presents the motion planning of robotic vehicles for the path tracking and the obstacle avoidance. To follow the given path, the vehicle moves through the turning radius obtained through the pure pursuit method, which is a geometric path tracking method. In this paper, we assume that the vehicle is equipped with a 2D laser scanner, allowing it to avoid obstacles within its sensing range. The turning radius for avoiding the obstacle, which is inversely proportional to the virtual force, is then calculated. Therefore, these two kinds of the turning radius are used to generate the steering angle for the front wheel of the vehicle. And the vehicle reduces the velocity when it meets the obstacle or the large steering angle using the potentials of obstacle points and the steering angle. Thus the motion planning of the vehicle is done by planning the steering angle for the front wheels and the velocity. Finally, the performance of the proposed method is tested through simulation.

Keywords: motion planning, robotic vehicle, unmanned ground vehicle, autonomous navigation

I. 서론

미국 DARPA (Defense Advanced Research Project Agency) 주관 2004년, 2005년 Grand Challenge 및 2007년 Urban Challenge 중 세 차례의 무인 자동차 대회에서 알 수 있듯이, 기존 지능형 자동차(intelligent vehicle)의 운전 보조기술은 로봇형 차량(robotic vehicle)의 자율주행 기술로 발전을 도모하고 있다 [1]. 로봇형 차량의 자율주행을 수행하기 위해서는 차량의 위치 및 방향이 정확히 추정되어야 하며, 주어진 경로를 추종할 수 있도록 차량을 제어해야 하고, 주변 환경을 파악함으로써 경로 위 예상치 못한 장애물을 회피해야 한다. 이러한 로봇형 차량의 자율주행을 위한 기술 중, 본 논문은 차량의 운동 계획(motion planning)을 다룬다. 차량의 운동 계획은 차량이 장애물과 충돌하지 않으면서 목적지까지 도달할 수 있는 운동(motion)을 실시간으로 생성하는 것을 의미하며, 차량이 추종할 경로가 대략적인 경유점들로 주어졌다 하더라도 주변 환경이 실시간으로 바뀌므로 많은 어려움을 내포하고 있다.

차량의 경로 추종 방법은 현재 차량에서 기준 경로까지 위치 오차와 방향 오차를 줄이는 기술이다. 이를 위하여 무인 주행 차량 및 이동 로봇의 경로 추종 제어기 설계 시에 복잡한 연산을 피하기 위하여 기하학적 경로 추종 방법이 사용된다[2-7]. 마치 운전자가 일정 거리 앞을 보면서 운전하는 것처럼, 기하학적 경로 추종 방법은 차량에서부터 예견 거리(look-ahead distance)만큼 떨어진 경로상의 예견점(look-ahead point)을 정의하고 이를 추종할 수 있도록 차량의 목표 선회

반경을 알려준다.

기하학적 경로 추종 방법으로써 follow the carot [2], pure pursuit [3-5,7] 그리고 vector pursuit [6]이 제안되었다. 첫 번째로, follow the carot 은 차량의 이동 방향이 예견점을 가리키도록 조향하는 방법이다. 이는 단순한 비례 제어를 통해 수행되며, 경우에 따라 제어기의 안정성을 보장할 수 없다. 두 번째로, pure pursuit은 현재 차량의 위치와 예견점을 지나며 차량의 진행 방향에 접하는 원을 찾는다. 따라서 매 순간 계산되는 원의 반지름을 목표 선회 반경으로 사용하여 경로를 추종한다. 이 pure pursuit 경로 추종 방법의 안정성은 검증되었다[3]. 마지막으로 vector pursuit은 pure pursuit과 유사하지만 나선 이론(screw theory)에 기반하여 목표 선회 반경을 계산한다. 이 세 가지 방법들을 비교하였을 때, vector pursuit이 가장 빠른 경로 오차 수렴 결과를 보인다[6]. 하지만 pure pursuit 과 상대적으로 큰 차이를 보이는 것은 아니며, 복잡한 연산과 정으로 인하여 실제 적용에 있어 어려움이 존재한다.

고전적인 로봇의 경로 계획 방법은 전체 주변 환경이 주어 진 상황에서 장애물과 충돌하지 않는 경로를 찾으므로, 거리 센서 등에 의존하여 실시간 주변 환경 예측을 요하는 차량의 자율 주행에 적용함에 있어서 한계가 있다. 이러한 한계점을 극복하기 위하여 O. Khatib 의 포텐셜 필드(potential field) [8] 방법이 제안된 이후, 다양한 센서 기반 장애물 회피 방법들이 제안되었다. Curvature velocity [12], vector field histogram [10] 및 dynamic window [13] 등이 그 예이다. 또한 이 방법들의 확장된 연구 또한 진행된 바가 있다[11,14]. 하지만 대부분의 연구는 차량이 옆으로 미끄러지지 않는다는 비홀로노믹 구속 조건(nonholonomic constraint)을 무시한 채 이뤄졌다. 따라서 실제 차량이 수행할 수 없는 운동을 생성하는 경우가 발생할 수 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여, 차량의 비홀로노믹 구속조건을 만족시키는 동시에 실시간으로 경로 생성 및

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2011. 2. 20., 수정: 2011. 3. 10., 채택확정: 2011. 3. 29.

김동형, 김창준, 이지영, 한창수: 한양대학교 기계공학과

(fileman@hanyang.ac.kr/aphate@hanyang.ac.kr/jiyeongl@hanyang.ac.kr/cshan@hanyang.ac.kr)

※ 본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 고기능 로봇 메니플리케이션 연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음(NIPA-2010-C7000-1001-0002).

장애물 회피를 수행하는 연구 또한 진행되었다[15,18]. 하지만 초기 목표 지점까지 경로를 생성한 뒤, 장애물로부터 경로를 따라 포텐셜 필드를 계산해야 하므로 상당량의 계산량을 요한다.

본 논문은 전륜 조향이 가능한 일반 차량의 운동 계획을 다룬다. 목표 지점까지 경로는 경유점들로 이루어지며, 이 경로를 추종하기 위해 기하학적 경로 추종 방법인 pure pursuit을 사용한다. 이를 통해 차량이 경로를 추종하기 위한 전륜의 목표 조향각을 결정한다. 또한 차량이 경로를 추종하는 도중 장애물을 만났을 때, 장애물 회피를 수행한다. 본 논문에서는 제한된 거리 내에 장애물의 형상을 장애물 점(obstacle point)들의 집합으로 표현하며, 이로부터 일정 거리 내에 장애물 포텐셜(obstacle potential)을 정의한다. 장애물 포텐셜은 가상의 힘 벡터를 계산하여 장애물 회피를 위한 목표 운동을 결정하는데 사용된다. 그리고 차량의 종 방향 목표 속도는 차량이 목표로 하는 운동 궤적의 곡률이 클수록, 그리고 앞서 언급한 장애물로부터 가상의 힘 벡터의 크기가 클수록 감소하도록 한다. 이러한 경로 추종 및 장애물 회피를 위한 운동 계획 방법은 시뮬레이션을 통해 그 성능이 검증되었다.

본 논문의 내용은 다음과 같이 요약된다. II 장에서는 대상으로 하는 로봇형 차량의 모델을 정의하였고, III 장에서는 경로 추종 방법을 설명하였다. IV 장에서는 장애물 회피 방법을 언급하였고, V 장에서는 차량의 운동 계획법을 제안하였다. VI 장에서는 제안된 운동 계획법의 시뮬레이션 결과를 나타내었고, VII 장에서 결론을 내렸다.

II. 로봇형 차량 모델

본 논문에서 다루는 로봇형 차량은 저속으로 주행한다. 이와 더불어 지면과 휠 간의 미끄러짐을 고려하지 않으며, 차량의 미끄러짐 각(slip angle)은 존재하지 않는다. 이러한 가정하에 그림 1에서 보이는 2차원 평면 상에서 차량의 기구학 모델(kinematic model)을 사용한다.

그림 1은 차량이 O 점을 중심으로 저속 선회하는 모습을 나타낸다. 여기서 ${}^G X, {}^G Y$ 로 표기된 지구 좌표계(global coordinate)는 임의의 위치에 고정된 좌표계이며, ${}^V X, {}^V Y$ 로 표현된 차량 좌표계(vehicle coordinate)는 차량의 무게 중심점에 고정되어 이동하는 좌표계이다. 그리고 그림 1에 나타난 것처럼 차량의 저속 선회시 에커만각(ackerman angle)으로부터 다음 관계가 성립한다.

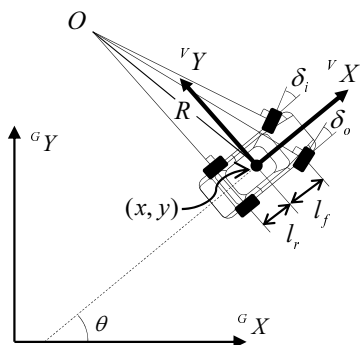


그림 1. 좌표계 및 차량 기구학 모델.
Fig. 1. Coordinate systems and the kinematic model of the vehicle.

$$\delta = \frac{\delta_o + \delta_i}{2} \cong \frac{l}{R} = l\kappa \tag{1}$$

여기서 δ_i 와 δ_o 는 각각 내측 및 외측 조향각이고, 전륜의 평균 조향각도인 δ 는 전륜 조향각이다. R 은 선회반경, κ 는 곡률, l_f 과 l_r 은 각각 무게 중심으로부터 전륜 축까지 거리 그리고 후륜 축까지 거리이다. 그리고 차축거리 $l = l_f + l_r$ 이다.

차량의 위치 (x, y) , 방향 θ 그리고 전륜 조향각 δ 으로 차량의 기하학적인 configuration은 $\mathbf{q} = [x \ y \ \theta \ \delta]^T$ 로 정의된다. 이로부터 차량 기구학 모델은 아래와 같이 표현된다.

$$\dot{\mathbf{q}} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \\ \frac{\tan \delta}{l_f} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} \tag{2}$$

여기서 선속도 $v_1 = v$, 조향각 속도 $v_2 = \dot{\delta}$ 는 제어 입력이다. 그리고 차량 좌표계의 원점이 무게 중심점에 있으므로, 식 (2)에서 차축거리 대신 l_f 가 사용된다.

III. 기하학적 경로 추종 방법

1. Pure pursuit 경로 추종 방법

Pure pursuit은 차량이 기준 경로로 되돌아오기 위한 선회 반경을 생성하는 기하학적 경로 추종 방법이다[5]. 그림 2는 pure pursuit 경로 추종 방법을 사용하여 선회 반경을 생성하는 것을 나타낸다. 선회 반경은 차량의 중심점에서 예견거리 L 만큼 떨어진 경로상의 예견점과 차량의 중심점을 지나는 원을 생성함으로써 얻을 수 있다. 예견점의 위치가 차량 좌표계 기준으로 Y 축으로 y_L , X 축으로 x_L 만큼 떨어져 있을 때, 그림 2의 기하학적 관계로부터 아래 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} x_L^2 + y_L^2 &= L^2 \\ a^2 + x_L^2 &= R_{track}^2 \\ a + y_L &= R_{track} \end{aligned} \tag{3}$$

따라서 위 식 (3)으로부터 경로를 추종하기 위한 선회 반경 R_{track} 을 아래와 같이 얻을 수 있다.

$$R_{track} = \frac{L^2}{2y_L} \tag{4}$$

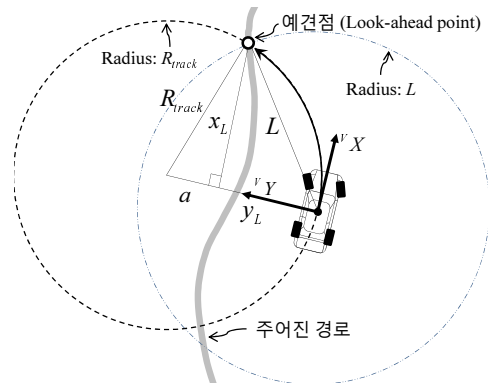


그림 2. 경로 추종을 위한 선회 반경 생성.
Fig. 2. Determining the turning radius to follow the path.

2. 요 레이트를 제한하기 위한 예견거리 선정

기하학적 경로 추종방법을 사용한 경로 추종방법의 성능은 예견거리에 의존한다. 마치 운전자가 빠른 속도로 운전하고 있을 때 먼 거리를 바라보며 운전하는 것과 같이, 속도 변화에 따라 예견거리는 변화되어야 한다. 예견거리가 길 경우 차량은 선회를 일찍 시작하므로, 큰 선회를 하며 경로를 추종한다. 경로를 정확하게 추종하게 만들기 위해서는 반대로 예견 거리는 짧아져야 하지만, 예견거리를 짧게 선정할 경우 차량은 작은 선회 반경으로 인하여 차량에 큰 횡 가속도 및 요 레이트가 발생한다. 따라서 본 논문은 이를 고려하기 위하여 요 레이트를 제한하기 위한 예견거리 선정방법을 제안한다.

그림 3에서 보이는 반원 음영 부분은 pure pursuit 방법으로 생성될 수 있는 차량의 순간 운동 궤적들의 집합이다. 즉, 예견 거리가 L 로 주어졌을 때, 예견점은 반원 둘레에 생성될 수 있으며 이에 따라 순간 운동 궤적은 앞의 pure pursuit 방법에 따라 결정된다. 그림 3에서 예견점 A와 B는 반원 둘레에 생성되는 예견점이 차량 좌표계의 Y 축 상에 놓인 경우이다. 이때 pure pursuit 경로 추종법으로부터 경로를 추종하기 위한 선회 반경 R_{track} 의 최솟값 $\min(R_{track})$ 이 계산되며, $\min(R_{track})$ 는 차량의 선 속도 v 와 요 레이트 γ 의 최댓값 $\max(\gamma)$ 으로 표현된다.

$$\min(R_{track}) = \frac{v}{\max(\gamma)} \quad (5)$$

여기서 차량의 미끄러짐은 고려하지 않으므로 $\gamma = \dot{\theta}$ 이 성립한다.

차량의 요 레이트를 γ_{lim} 로 제한하기 위하여 위 식 (5)의 $\max(\gamma)$ 를 γ_{lim} 로 표현한다. 그리고 그림 3으로부터 예견거리 L 과 최소 선회 반경의 관계는 다음 식으로 나타낸다.

$$L = 2 \min(R_{track}) \quad (6)$$

따라서 식 (5)를 (6)에 대입하면 차량의 요 레이트를 γ_{lim} 로 제한하기 위한 예견거리 L 은 아래 식으로부터 얻을 수 있다.

$$L = 2 \frac{v}{\gamma_{lim}} \quad (7)$$

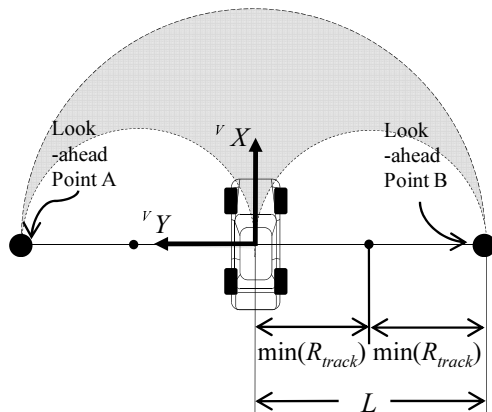


그림 3. 경로 추종을 위한 선회 반경 생성.
Fig. 3. Determining the turning radius to follow the path.

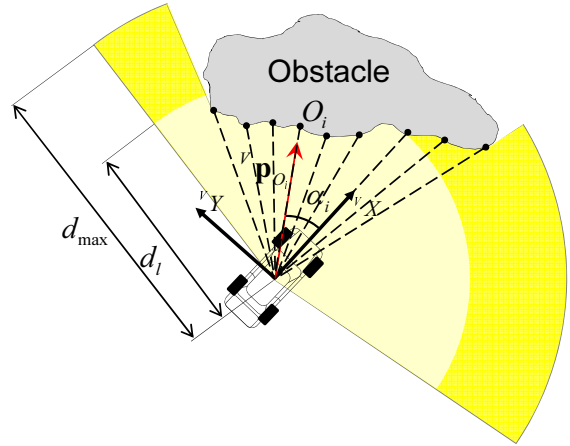


그림 4. 2D 레이저 스캐너를 통한 장애물 감지.
Fig. 4. Obstacle detecting with 2D laser scanner.

IV. 센서 기반 장애물 회피 방법

본 논문은 차량에 장착된 거리 센서로부터의 장애물 감지를 고려한다. 장애물의 경계는 장애물 점(obstacle point)들의 집합으로 표현된다. 그림 4에서 거리 센서의 측정 가능 거리 d_{max} 는 센서의 종류 및 성능에 따라 충분히 클 수 있으므로, d_i 내에 존재하는 장애물 점만을 차량 장애물 회피 운동 생성에 고려한다. 차량 좌표계 기준으로 i 번째 장애물 점 O_i 를 가리키는 벡터는 $v_{p_{O_i}}$ 로 정의되며, $v_{p_{O_i}}$ 는 차량의 X 축으로부터 α_i 의 각도를 갖는다.

1. 장애물 포텐셜

차량의 측면보다 정면에 놓인 장애물에 대하여 더 큰 장애물 회피 운동을 생성하기 위해 그림 5과 같이 i 번째 장애물 점까지 거리 $n(\mathbf{q}, O_i)$ 를 정의한다.

$$n(\mathbf{q}, O_i) = \begin{cases} d(\mathbf{q}, O_i) & \text{if } \alpha_i = 0 \\ \frac{L}{\sin \alpha_i} \alpha_i + d(p_L, O_i) & \text{if } d(\mathbf{q}, O_i) > L \text{ and } \alpha_i \neq 0 \\ \frac{d(\mathbf{q}, O_i)}{\sin \alpha_i} \alpha_i & \text{if } d(\mathbf{q}, O_i) \leq L \text{ and } \alpha_i \neq 0 \end{cases} \quad (8)$$

즉, 식 (8)에서 장애물 점이 정면에 있는 경우 $\alpha_i = 0$ 이므로 장애물까지 직선 거리인 $d(\mathbf{q}, O_i)$ 가 장애물까지 거리이다. 이와 달리 $\alpha_i \neq 0$ 일 때, $d(\mathbf{q}, O_i) > L$ 이면 장애물 점까지 직선 거

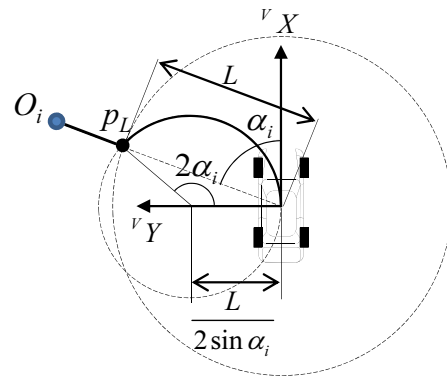


그림 5. 장애물 점까지 거리.
Fig. 5. Distance to the obstacle point.

리가 예견거리보다 긴 경우이다. 따라서 p_L 까지 호의 길이 $L\alpha_i / \sin\alpha_i$ 와 p_L 에서 O_i 까지 직선의 길이 $d(p_L, O_i)$ 의 합이 장애물까지 거리이다. 그리고 $\alpha_i \neq 0$ 이면서 $d(\mathbf{q}, O_i) \leq L$ 가 성립하는 경우는 장애물 점이 예견거리 내에 있는 것이며, 이 경우에는 O_i 까지 호의 길이 $d(\mathbf{q}, O_i)\alpha_i / \sin\alpha_i$ 가 장애물까지 거리이다.

본 논문은 장애물 점 O_i 에 대한 장애물 포텐셜 v_i 를 아래와 같이 정의한다.

$$v_i = \begin{cases} \frac{1}{n(\mathbf{q}, O_i) + d_0} + \frac{n(\mathbf{q}, O_i)}{(d_i + d_0)^2} & \text{if } 0 \leq d(\mathbf{q}, O_i) \leq d_i \\ \frac{1}{d_i + d_0} + \frac{d_i}{(d_i + d_0)^2} & \text{if } d(\mathbf{q}, O_i) > d_i \end{cases} \quad (9)$$

여기서 d_0 는 장애물까지 거리 $n(\mathbf{q}, O_i)$ 가 0일 때 식 (9)가 무한대로 발산하는 것을 막기 위한 상수이다. 따라서 총 N 개의 장애물 점이 존재할 때, 전체 장애물 포텐셜 U 는 아래와 같이 표현된다.

$$U = \sum_{i=1}^N v_i \quad (10)$$

i 번째 장애물 점으로 생성되는 가상의 힘은 $\mathbf{f}_i = -\nabla v_i$ 와 같이 포텐셜에 gradient를 취해줌으로써 계산된다.

$$\mathbf{f}_i = \begin{cases} -\left(\frac{1}{(d_i + d_0)^2} - \frac{1}{(n(\mathbf{q}, O_i) + d_0)^2} \right) \mathbf{u}_i & \text{if } 0 \leq d(\mathbf{q}, O_i) \leq d_i \\ 0 & \text{if } d(\mathbf{q}, O_i) > d_i \end{cases} \quad (11)$$

여기서

$$\mathbf{u}_i = \frac{r \mathbf{p}_{O_i}}{\left| \frac{r \mathbf{p}_{O_i}}{r} \right|}$$

앞의 식 (10)과 유사하게, 전체 가상 힘 \mathbf{F}_0 는 식 (11)을 사용하여 아래 식으로부터 계산된다.

$$\mathbf{F}_0 = \sum_{i=1}^N \mathbf{f}_i \quad (12)$$

식 (12)에서 알 수 있듯이, 전체 가상 힘 \mathbf{F}_0 는 모든 장애물로부터 가상 힘들의 합이다. 따라서 그림 6과 같이 등가 장애물 점 (equivalent point obstacle) O 를 고려할 경우, 가상 힘 \mathbf{F}_0 는 이 등가 장애물 점으로부터 생성되는 단일 힘 벡터로

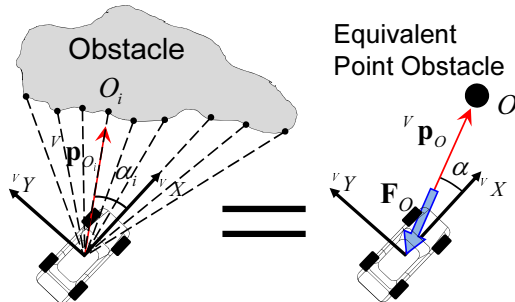


그림 6. 장애물 점들과 등가 장애물 점.
Fig. 6. Obstacle points and its equivalent point obstacle.

사료될 수 있다. 그림 6에서 알 수 있듯이 $r \mathbf{p}_O$ 는 차량 좌표계 기준으로 등가 장애물 점을 가리키는 벡터이며, 가상 힘 \mathbf{F}_0 와 반대 방향이다. 그리고 $r \mathbf{p}_O$ 는 차량 좌표계의 X 축과 α 만큼의 각을 이룬다.

2. 장애물 회피 운동 생성

차량의 운동 구속 조건으로 인하여 식 (12)를 가지고 일반적인 포텐셜 필드 방법을 통한 장애물 회피 운동 생성은 불가능하다. 따라서 본 논문은 장애물 회피 운동 생성을 위해 다음 식과 같이 장애물 회피 선회 반경 생성을 제안한다.

$$R_{avoid} = \begin{cases} \frac{-\text{sgn}(\alpha)}{k_a |\mathbf{F}_0|} & \text{if } \alpha \neq 0 \\ \frac{1}{k_a |\mathbf{F}_0|} & \text{if } \alpha = 0 \end{cases} \quad (13)$$

여기서 k_a 는 장애물 회피 선회 반경 계산시 사용되는 gain 값이며, 선정 방법은 다음 장에서 다룬다. 그리고 등가 장애물 점이 정면에 있는 경우는 α 는 0이 되며, 그렇지 않은 경우에는 α 의 부호에 따라 위 식 (13)의 $\text{sgn}(\alpha)$ 로부터 장애물을 피하기 위한 선회 방향을 결정한다. 일반적으로 장애물의 형상이 크고 차량과 거리가 가까울 경우에 2D 레이저 스캐너로부터 다수의 장애물 점이 생성되며, 이 때 가상의 힘 벡터 \mathbf{F}_0 의 크기는 증가한다. 따라서 이 경우 식 (13)으로부터 더 작은 선회 반경이 계산됨을 알 수 있다.

V. 로봇형 차량의 운동 계획법

1. 저속 선회 가능 영역

차량의 미끄럼을 무시할 수 있는 저속 선회시에, 차량의 횡 가속도는 $a_y = v^2/R = v^2\kappa$ 와 같이 차속과 선회 반경 혹은 곡률로 표현된다. 차량의 횡 가속도를 $a_{y,lim}$ 로 제한해야 될 경우, 앞의 식을 사용하여 선회 반경의 크기를 아래 식과 같이 제한한다.

$$|R(t)| = \begin{cases} b & \text{if } 0 \leq v(t) < v_s \\ \delta_{max} & \\ \frac{v^2(t)}{a_{y,lim}} & \text{else if } v_s \leq v(t) \leq v_{max} \end{cases} \quad (14)$$

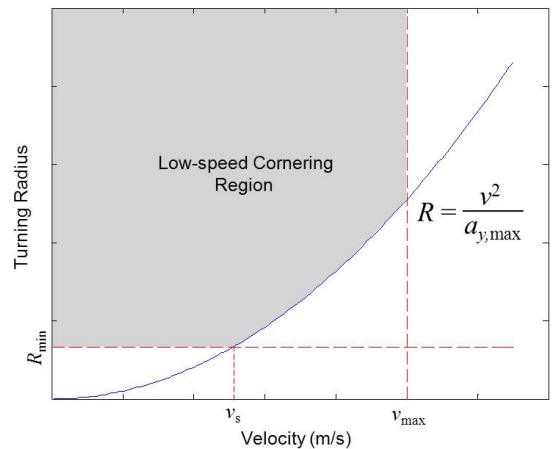


그림 7. 저속 선회 가능 영역.
Fig. 7. Feasible range for the low-speed cornering.

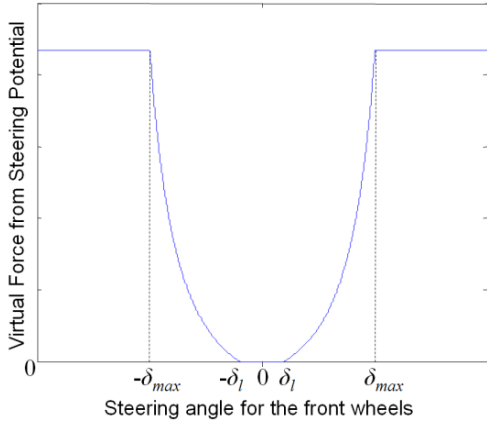


그림 8. 조향 포텐셜로부터의 가상 힘.

Fig. 8. Virtual force from steering potential.

여기서 $v_s = \sqrt{a_{y,lim} R_{min}}$, $R_{min} = b/\delta_{max}$ 이며 v_{max} 는 저속 주행을 만족시키는 차량 속도의 최댓값이다. 그림 8 그래프의 음영 부분은 식 (14)가 의미하는 저속 선회 가능 영역을 나타낸다. 따라서 차량에게 주어지는 목표 선회 반경은 이 영역 안으로 구속된다.

2. 선 속도 계획

효율적인 운동 계획을 위해 차량은 최소한의 시간 내에 목표 점에 도착할 수 있어야 한다. 따라서 본 논문은 저속 주행을 만족시키는 한도 내의 최대 속도를 정의한 뒤, 아래와 같은 두 가지의 상황을 제외하고 차량은 최대 속도를 유지하여 효율적인 자율 주행을 수행토록 한다.

- 1) 급 선회를 위한 과도한 조향각.
- 2) 차량에 근접한 장애물 감지.

기준 선 속도를 유지한 상태로 차량의 전륜의 조향각이 커질 경우, 차량의 요 레이트 및 횡 가속도는 급격히 증가된다. 이를 방지하기 위하여 조향각의 크기에 따라 차량의 속도를 감속시켜야 한다. 이를 위해, 앞의 IV 장에서 언급한 장애물 포텐셜과 유사한 방법으로 차량 전륜 조향 포텐셜 (Steering potential) 을 정의한다. 따라서 이 포텐셜로부터 가상의 힘은 아래와 같이 표현된다.

$$f_\delta(\delta) = \begin{cases} 0 & \text{if } 0 \leq |\delta| < \delta_l \\ \frac{1}{((\delta_{max} - \text{sgn}(\delta)\delta + \delta_0)^2 - (\delta_{max} - \delta_l + \delta_0)^2)} & \text{if } \delta_l \leq |\delta| < \delta_{max} \\ \frac{1}{\delta_0^2} - \frac{1}{(\delta_{max} - \delta_l + \delta_0)^2} & \text{if } |\delta| \geq \delta_{max} \end{cases} \quad (15)$$

여기서 δ_{max} 는 전륜의 최대 조향각이고, δ_l 은 전륜 포텐셜로부터 힘을 생성시키지 않는 조향각 범위의 경계 값이다. 또한 δ_0 는 조향 포텐셜로부터의 가상 힘을 발산하지 않도록 해주는 상수 값이다. 조향각 δ 에 따른 $f_\delta(\delta)$ 는 그림 7과 같이 표현된다.

차량의 선 속도는 식 (12)로 주어진 장애물 포텐셜로부터의 가상 힘 F_o 의 크기와, 식 (15)로 주어진 조향 포텐셜로부

터의 가상 힘 $f_\delta(\delta)$ 에 비례하여 감속된다.

$$v(t) = v_{max} - k_o |F_o| - k_\delta f_\delta(\delta) \quad (16)$$

여기서 k_o 와 k_δ 는 각각 장애물로부터 가상 힘 및 조향 포텐셜로부터 가상 힘에 대한 gain 값이다. 차량이 경로 추종 및 장애물 회피를 할 수 있음에도 불구하고, gain 값의 선택에 따라 차량의 속도가 0이 되어 버리는 상황이 발생할 수 있다. 이를 local minima 라고 하며, 이를 방지하기 위해 아래와 같은 조건을 만족시키는 gain 값을 선택한다.

$$v_{max} - k_o F_{max} - k_\delta f_\delta(\delta_{max}) > 0 \quad (17)$$

여기서 F_{max} 는 장애물로부터 가상 힘의 최댓값이며 아래와 같이 표현된다.

$$F_{max} = \max |F_o| \quad (18)$$

위 식 (17)으로 주어진 조건이 두 개의 gain 값을 구하기 위한 충분한 조건이 아니므로, 장애물이 없는 상황에서 k_δ 를 먼저 선정토록 한다. 차량이 수행 가능한 최소 회전 반경이 $R_{min} = b/\delta_{max}$ 임을 고려할 때, 최소 회전 반경으로 선회시에 요 레이트 제한 γ_{lim} 를 넘지 않을 조건은 아래와 같다.

$$k_\delta > \frac{v_{max} - R_{min} \gamma_{lim}}{f_\delta(\delta_{max})} \quad (19)$$

그러므로 위 식 (19)로 k_δ 를 선택한 뒤, 그 값을 식 (17)에 대입하여 k_o 를 선택한다. 이러한 과정을 거쳐 gain 값을 선정할 경우, local minima 는 존재하지 않는다.

3. 조향각 계획

앞서 III 장과 IV 장에서는 각각 경로 추종을 위한 선회 반경과 장애물 회피를 위한 선회 반경을 식 (4), 식 (13)으로 정의하였다. 위 식들은 아래와 같이 곡률로 표현 가능하다.

$$\kappa_{track} = \frac{1}{R_{track}}, \kappa_{avoid} = \frac{1}{R_{avoid}} \quad (20)$$

위 식 (20)에서 κ_{track} 과 κ_{avoid} 는 각각 경로를 추종하기 위한 운동과 장애물을 회피하기 위한 운동을 유발한다. 이러한 특성을 가지고, 차량의 조향을 결정하기 위해 아래와 같이 기준 곡률을 아래와 같이 정의한다.

$$\kappa_{ref} = \kappa_{track} + \kappa_{avoid} \quad (21)$$

차량 전륜의 조향각은 식 (1)로부터 다음과 같이 표현된다.

$$\delta = b\kappa_{ref} \quad (22)$$

차량의 장애물과 충돌하지 않는 운동 생성은 식 (13)의 k_a 값의 선택에 의존한다. 따라서 본 논문은 기하학적으로 장애물과 충돌하지 않는 경로를 찾는 대신, 장애물과 충돌하지 않는 순간 운동을 만들기 위한 조건을 찾는다. 이를 위해, 그림 9의 왼쪽 그림과 같이 등가 장애물 점의 방향이 차량 좌표계 기준으로 음의 방향일 경우를 고려한다. Pure pursuit 경로 추종 방법에서 음의 방향으로 곡률의 최댓값 $-\max(\kappa_{avoid})$ 를 계산 하더라도, 식 (21)로 계산되는 기준 곡률은 양의 값이 되어야 한다. 이 조건은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\kappa_{total} = -\max(\kappa_{track}) + \min(\kappa_{avoid}) < 0 \quad (23)$$

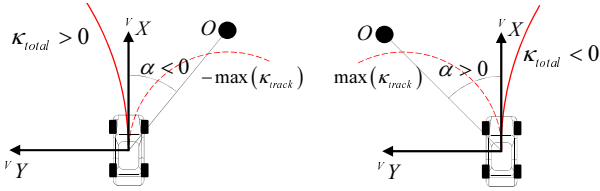


그림 9. 등가 장애물 점의 방향에 따른 기준 곡률 부호.
Fig. 9. The sign of the reference curvature depending on the orientation of the equivalent point obstacle.

여기서

$$\min(\kappa_{avoid}) = \frac{1}{R_{avoid}(F_{min}, \alpha)} = k_a F_{min}$$

이다. 여기서 F_{min} 은 장애물로부터 생성되는 가상 힘의 최소 크기이며, 0 보다 큰 값으로 정의한다. 여기서 식 (6)을 위 (23)에 대입하여 아래와 같은 조건을 얻는다.

$$k_a > \frac{2}{F_{min} L} \tag{24}$$

그림 9의 오른쪽 그림에 해당하는 경우에도 식 (24)와 같은 결과를 얻는다. 따라서 식 (24)로 주어진 조건을 만족시키는 k_a 를 선택할 경우, F_{min} 보다 더 큰 가상 힘을 유발하는 장애물에 대하여 기준 곡률 κ_{ref} 은 항상 등가 장애물과 부딪히지 않는 방향으로 부호를 갖는다.

VI. 시뮬레이션 결과

본 논문이 제안하는 차량의 운동 계획 방법의 성능을 확인하기 위하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션은 식 (2)로 주어진 차량 모델을 대상으로 경유점들을 순서대로 따라 목적지까지 도착하도록 차량의 운동을 계획하는 것이다. 이를 통하여 차량이 주어진 경로를 각 속도 및 횡 가속도와 같은 구속 조건을 만족하면서 주행하는 것과 경로 상에 장애물과 충돌하지 않으며 주행하는 것을 동시에 만족시킴을 검증하도록 한다.

차량의 l_f 과 l_r 은 각각 0.83m, 0.895m 이며 차축거리 l 는 1.725m 이다. 이 외에 시뮬레이션 위해 사용된 파라미터는 표 1과 같으며, 여기서 차량의 최대 속도는 36km/h, 요 레이트 및 횡 가속도 구속 값은 각각 60degree/sec, 0.8G 로 주어졌음을 알 수 있다. 또한 표 1에 나타내어진 k_b , k_o , k_a 의 값들은 임의로 선택된 장애물로부터 힘의 최솟값 F_{min} 과 최댓값 F_{max} 를 사용하여 식 (17), 식 (19)와 식 (24)의 조건들로 부터 선정된 값이다. 차량의 초기 위치는 (0, 0), 그리고 방향은 0도이며, 차량이 추종할 경유점들의 좌표는 표 2와 같다. 이러한 시뮬레이션 환경에서, 그림 10에서 보이는 차량의 이동 궤적은 차량이 경유점을 순서대로 추종함과 동시에 장애물을 회피하였음을 나타낸다. 시뮬레이션 수행 시간에 따른 차량의 위치 및 방향은 그림 11과 같다. 그리고 차량의 조향각 및 요 레이트는 그림 12과 같이 발생하였다. 그림 13에서 보듯이 차량이 장애물에 가까이 접근하거나 급한 경사를 갖는 궤적으로 운동할 때, 차량의 속도와 예견거리는 감소한다. 이는 차량에 발생하는 횡 가속도를 감소시킴을 위함이며, 그림 14로부터 횡 가속도가 0.8G로 제한되었음을 알 수 있다.

표 1. 시뮬레이션을 위한 파라미터.

Table 1. Parameters for simulation.

Symbol	Parameter	Value
v_{max}	Maximum velocity	36 km/h
$\dot{\gamma}_{lim}$	Limit on the yaw rate	60 degree/sec
$a_{y,lim}$	Limit on the lateral acceleration	0.8 G
d_{max}	Maximum range of 2D laser scanner	70 m
d_l	Effective sensing range of 2D laser scanner	50 m
F_{min}	Minimum value of virtual force from obstacle	0.008
F_{max}	Maximum value of virtual force from obstacle	0.045
δ_{max}	Maximum steering angle	30 degree
δ_l	Boundary value of steering angle	3 degree
δ_0	Constant for steering potential	1.5
k_b	Gain for velocity planning, 1	40
k_o	Gain for velocity planning, 2	50
k_a	Gain for steering angle planning	14

표 2. 시작점, 경유점 및 목표점의 좌표.

Table 2. Coordinates of start point, waypoints and goal point.

Point	Coordinates
Start point	(0, 0)
Waypoint 1	(50m, 0)
Waypoint 2	(50m, 45m)
Waypoint 3	(95m, 45m)
Waypoint 4	(95m, 0)
Waypoint 5	(125m, 0)
Waypoint 6	(218m, 98m)
Waypoint 7	(210m, 105m)
Waypoint 8	(170m, 70m)
Goal point	(0, 70m)

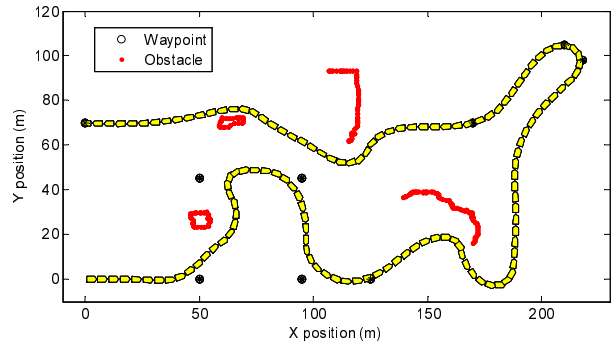


그림 10. 차량 궤적.
Fig. 10. Vehicle trajectory.

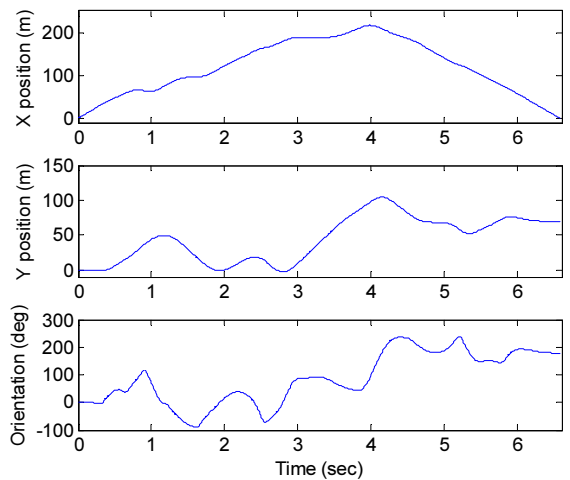


그림 11. 시간에 따른 차량 위치 및 방향.
Fig. 11. Time versus vehicle position and orientation.

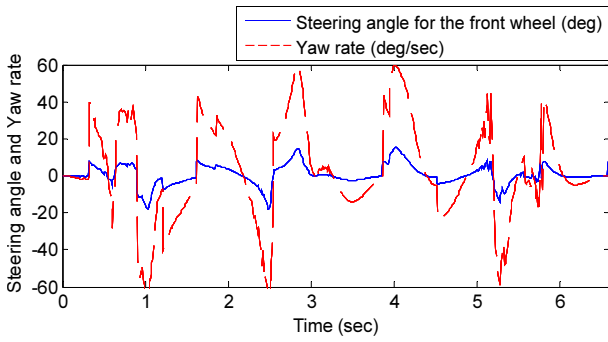


그림 12. 조향각 및 요 레이트.
Fig. 12. Steering angle and yaw rate.

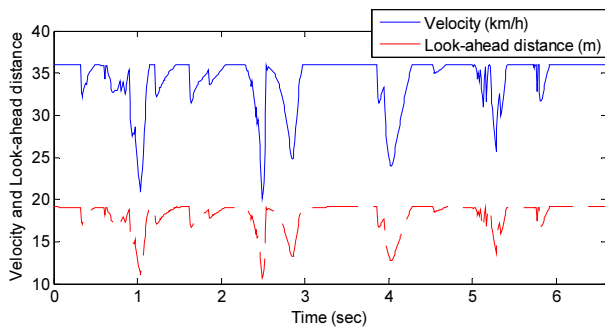


그림 13. 차량 속도 및 예견거리.
Fig. 13. Vehicle velocity and look-ahead distance.

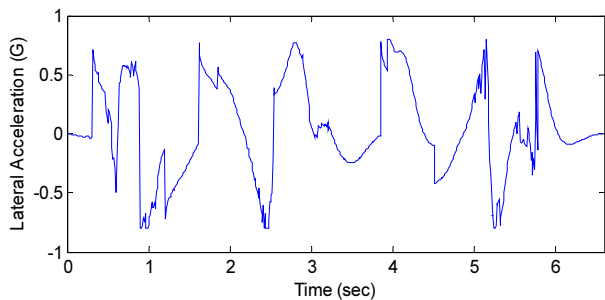


그림 14. 차량 횡 가속도.
Fig. 14. Lateral acceleration of vehicle.

VII. 결론

본 논문은 로봇형 차량의 자율주행을 위한 센서 기반 운동 계획법을 제안하였다. 기하학적인 경로 추종 방법을 사용하여 차량이 경유점들로 주어진 경로를 추종하기 위한 운동을 생성하였다. 2D 레이저 스캐너를 통한 장애물 감지를 고려함으로써, 획득한 장애물 점들로부터 차량이 장애물을 회피하기 위한 운동을 생성하도록 하였다. 경로 추종과 장애물 회피가 동시에 이루어질 수 있는 차량의 운동 생성 방법을 제안함으로써, 시뮬레이션을 통하여 제안된 방법의 성능을 검증하였다.

참고문헌

[1] M. Buehler, K. Iagnemma, and S. Singh, *The DARPA Urban Challenge*, Springer, 2009.
[2] A. Rankin, C. Crane, A. Armstrong, A. Nease, and H. E. Brown,

“Autonomous path planning navigation system used for site characterization,” *Proc. of the SPIE 10th Annual Aero Sense Symposium*, Orlando, FL, vol. 2738, pp. 176-186, Apr. 1996.
[3] A. Ollero and G. Heredia, “Stability analysis of mobile robot path tracking,” *Proc. of the International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Pittsburgh, PA, pp. 461-466, Aug. 1995.
[4] T. Hellström and O. Ringdahl, “Follow the past - a path tracking algorithm for autonomous vehicles,” *Int. J. Vehicle Autonomous Systems*, vol. 4, pp. 216-224, 2006.
[5] R. Craig Coulter, “Implementation of the pure pursuit path tracking algorithm,” *Technical Report CMU-RI-TR-92-01*, Robotics Institute, Carnegie Mellon University, 1992.
[6] J. Witt, C. D. III Crane, and D. Armstrong, “Autonomous ground vehicle path tracking,” *Journal of Robotic Systems*, vol. 21, no. 8, pp. 439-449, Aug. 2004.
[7] J. Giesbrecht, D. Mackay, J. Collier, and S. Verret, “Path tracking for unmanned ground vehicle navigation,” *DRDC Suffield TM 2005-224*, Defence R&D Canada-Suffield, Dec. 2005.
[8] O. Khatib, “Realtime obstacle avoidance for manipulators and mobile robots,” *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 500-505, Mar. 1985.
[9] S. S. Ge and Y. J. Cui, “Dynamic motion planning for mobile robots using potential field method,” *Autonomous Robots*, vol. 13, no. 3, pp. 207-222, Nov. 2002.
[10] J. Borenstein and Y. Koren, “The vector field histogram - fast obstacle avoidance for mobile robots,” *Journal of Robotics and Automation*, vol. 7, pp. 278-288, Jun. 1991.
[11] I. Ulrich and J. Borenstein, “VFH*: local obstacle avoidance with look-ahead verification,” *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, San Francisco, CA, pp. 2505-2511, Apr. 2000.
[12] R. Simmons, “The curvature-velocity method for local obstacle avoidance,” *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 3375-3382, Apr. 1996.
[13] D. Fox, W. Burgard, and S. Thrun, “The dynamic window approach to collision avoidance,” *IEEE Robotics and Automation Magazine*, vol. 4, pp. 23-33, Mar. 1997.
[14] K. O. Arras, J. Persson, N. Tomatis, and R. Siegwart, “Real-time obstacle avoidance for polygonal robots with a reduced dynamic window,” *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Washington, DC, vol. 170, pp. 3050-3055, May. 2002.
[15] F. Lamiroux, D. Bonnafous, and O. Lefebvre, “Reactive path deformation for nonholonomic mobile robots,” *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 20, no. 6, pp. 967-977, 2004.
[16] D. Kim, C. Kim, and C. Han, “Geometric path tracking and obstacle avoidance methods for an autonomous navigation of nonholonomic mobile robot,” *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems(in Korean)*, vol. 16, no. 8, pp. 771-779, Aug. 2010.
[17] I. Kim, “Obstacle avoidance and local path planning for mobile robots using the fast elastic band,” *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems(in Korean)*, vol. 16, no. 8, pp. 794-798, Aug. 2010.
[18] J. Minguez and L. Montano, “Extending collision avoidance methods to consider the vehicle shape, kinematics, and dynamics of a mobile robot,” *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 25, no. 2, Apr. 2009.



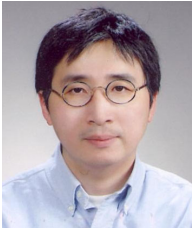
김 동 형

2008년 한양대학교 기계공학과 졸업. 2010년 한양대학교 대학원 기계공학과 석사 졸업. 2010년~현재 한양대학교 대학원 기계공학과 박사과정 재학중. 관심분야는 모바일 로봇 및 차량의 운동 계획, 비홀로노믹 로봇의 경로 계획 및 제어, 인휠 구동 전기 차량의 운동 제어.



김 창 준

2004년 한양대학교 기계공학과 졸업. 2006년 한양대학교 대학원 메카트로닉스 공학과 석사 졸업. 2006년~현재 한양대학교 대학원 기계공학과 박사과정 재학중. 관심분야는 능동조향, 복합조향.



이 지 영

1991년 서울대학교 기계설계학과(공학사), 1992년 서울대학교 대학원 기계설계학과(공학석사). 2003년 Carnegie Mellon University, Mechanical Engineering(공학박사). 2007년~현재 한양대학교(ERICA) 기계공학과 조교수. 관심분야는 로봇경로 계획, 운동제어.



한 창 수

1983년 한양대학교 기계공학과(공학사). 1985년 Texas at Austin Mechanical Engineering(공학석사). 1989년 Texas at Austin Mechanical Engineering(공학박사). 1990년~현재 한양대학교 기계정보경영학부 교수. 관심분야는 로봇 메커니즘 설계 및 해석, 차량동역학, 필드로봇, 서비스 로봇, Wearable robot.