비홀로노믹 이동로봇의 자율주행을 위한 기하학적 경로 추종 및 장애물 회피 방법

Geometric Path Tracking and Obstacle Avoidance Methods for an Autonomous Navigation of Nonholonomic Mobile Robot

김 동 형, 김 창 준, 한 창 수*
(Dong-Hyung Kim¹, Chang-Jun Kim¹, and Chang-Soo Han¹)
¹Hanyang University

Abstract: This paper presents a method that integrates the geometric path tracking and the obstacle avoidance for nonholonomic mobile robot. The mobile robot follows the path by moving through the turning radius given from the pure pursuit method which is the one of the geometric path tracking methods. And the obstacle generates the obstacle potential, from this potential, the virtual force is obtained. Therefore, the turning radius for avoiding the obstacle is calculated by proportional to the virtual force. By integrating the turning radius for avoiding the obstacle and the turning radius for following the path, the mobile robot follows the path and avoids the obstacle simultaneously. The effectiveness of the proposed method is verified through the real experiments for path tracking only, static obstacle avoidance, dynamic obstacle avoidance.

Keywords: mobile robot, path tracking, obstacle avoidance, pure pursuit, potential field, autonomous navigation

I. 서론

이동 로봇의 경로 추종 방법은 이동 로봇의 자기 위치 파악 및 외부 환경 인식 기술과 함께 자율 주행을 구현하기 위한 중요한 요소 중 하나이다. 대부분의 바퀴 타입 이동 로봇은 전 방향으로 움직일 수 없는 구속 조건을 지녔으며, 이러한 이동 로봇을 비홀로노믹(nonholonomic)이동 로봇이라 한다. 이러한 이동 로봇이 경로를 추종하고 장애물을 피하기 위한 운동을 생성하는 방법은 여전히 많은 부분이 연구되어야 한다.

일반적인 경로 추종 방법은 기준 경로(reference path)에서 이동 로봇이 떨어져 있는 정도와 기준 경로의 방향과 이동 로봇의 방향간의 차이를 각각 위치 오차와 방향 오차로 정의한 뒤, 이 오차를 줄이도록 제어한다[1]. 따라서 경로 추종 제어기의 안정성에 대한 보장이 필요하며 제어 변수들이 직접적으로 이동 로봇이 어떠한 운동을 할지 예측 가능하지가 않다. 반면 기하학적 경로 추종 방법[2-6]은 예견 거리(look-ahead distance)를 경로 추종기의 제어 변수로 사용함으로써 경로 추종 제어기가 이동 로봇의 목표 운동을 직접적으로 생성한다. 즉, 마치 운전자가 차량의 속도에 따라 일정한 거리를 바라보며 운전하듯이, 이동 로봇은 기준 경로 위에 예견 거리만큼 떨어진 예견 점(look-ahead point)을 바라보며 이동한다.

경로 계획방법으로부터 생성된 경로는 이동 로봇이 이동할 수 있는 경로이고 주변에 장애물이 없더라도, 실제로는 예상치 못한 장애물이 이동 로봇의 경로 상에 나타날 수 있다. 따라서 이동 로봇은 센서 기반으로 실시간 장애물 회피

동작을 계획해야 하며, 동시에 비홀로노믹 조건을 만족시키는 운동을 만들어야 한다. 이를 위해 [7-10]은 최소 회전 반경 구속조건을 지닌 이동로봇이 움직일 경로를 비홀로노믹 경로라 정의한 뒤, 계획된 경로를 실시간으로 변형하는 방법이 제안하였다. 즉, 장애물까지의 거리 정보를 이용해 장애물 포텐셜(obstacle potential)을 생성하고, 이 장애물 포텐셜이 경로의 변형 방향을 결정한다. 하지만 이 경우 실시간으로 경로를 따라 장애물 포텐셜 필드(obstacle potential field)를 계산해야 하므로, 실시간 제어기에 많은 연산 부담을 초래한다.

본 논문은 비홀로노믹 이동 로봇의 자율주행을 위한 경로 추종 및 장애물 회피를 통합하는 방법을 제안한다. Pure pursuit[2]라는 기하학적 경로 추종 방법을 사용하여 경로를 추종하기 위한 회전 반경을 얻음으로써, 이동 로봇의 비홀로노믹 구속 조건을 만족시키는 운동을 생성한다. 또한 경로 추종 중에 이동 로봇의 각속도 한계 값을 고려한 예견거리를 계산함으로써, 예견 거리 선정에 대한 문제를 해결하였다. 그리고 장애물을 회피 하기 위해 포텐셜 필드를 생성하는 대신, 가장 가까운 장애물로부터 장애물 포텐셜을 정의하고 이로부터 이동 로봇에 작용하는 가상의 힘을 만든다. 이 힘은 장애물을 회피하기 위한 회전 반경을 생성하는데 사용되므로, 이 또한 이동 로봇의 운동 구속조건을 만족시킨다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II 장에서는 이동 로봇의 기하학적 모델을 소개하고, III 장에서는 기하학적 경로 추종 방법인 pure pursuit 및 예견거리 선정 방법을 소개한다. IV 장에서는 장애물 포텐셜을 이용한 장애물 회피 방법을 먼저 소개한 뒤, 경로 추종 및 장애물 회피를 동시에 수행하기 위한 제어 시스템을 소개함으로써 본 논문의 내용을 요약한다. V 장에서 실험 결과를 보임으로써 제시한 경로 추종 및 장애물 회피 방법의 타당성을 검증하고, 마지막으로 VI 장은 본 논문의 결론을 보여준다.

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2010. 1. 26., 수정: 2010. 3. 18., 채택확정: 2010. 6. 29.

김동형, 김창준, 한창수: 한양대학교 기계공학과

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

※ 본 연구는 국토해양부 건설기술혁신사업(CTIP)의 연구비 지원에 의해 수행되었음.

II. 이동 로봇의 기구학 모델

그림 1은 임의의 회전 중심점을 기준으로 회전 반경 R 의 원을 선 속도 v 그리고 각속도 ω 로 이동하고 있는 두 바퀴 이동 로봇을 나타낸다. 그림 1에서 ${}^G X, {}^G Y$ 로 표현된 지구 좌표계(global coordinate)는 임의의 위치에 고정된 좌표계이며 ${}^R X, {}^R Y$ 로 표현된 로봇 좌표계(robot coordinate)는 이동 로봇의 중심점에 고정되어 이동하는 좌표계이다. 이동 로봇의 위치를 (x_R, y_R) 그리고 방향을 θ_R 이라 할 때 이동 로봇의 기하학적인 configuration은 아래와 같이 벡터 $\mathbf{q}$ 로 정의한다.

$$\mathbf{q} = [x_R \quad y_R \quad \theta_R]^T \quad (1)$$

따라서 이동 로봇의 기구학 모델은 행렬 형태로

$$\dot{\mathbf{q}} = \begin{bmatrix} \cos \theta_R & 0 \\ \sin \theta_R & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{u} \quad (2)$$

와 같이 표현되며, 여기서 $\mathbf{u} = [v \quad \omega]^T$ 는 제어 입력 벡터이다. 본 논문은 이동 로봇의 후방 운동을 고려하지 않으므로, v 는 0보다 크거나 같다.

위 식 (2)로 주어진 기구학적 모델에는 비홀로노믹 구속조건(nonholonomic constraint)이 존재한다. 비홀로노믹 구속조건은 속도 구속조건을 의미하며 이는 아래와 같은 식으로 표현된다.

$$\dot{x}_R \sin \theta_R - \dot{y}_R \cos \theta_R = 0 \quad (3)$$

즉 이동 로봇의 속도가 느려서 바퀴에 가해지는 종방향 힘(longitudinal force)과 횡방향 견인력(lateral traction force)이 바퀴와 지면간의 최대 정지 마찰력을 넘지 못한다고 가정하였을 때, 식 (3)과 같이 로봇 좌표계 기준으로 Y 축 방향 속도 성분은 0이 되므로 이동 로봇의 바퀴와 지면간에 미끄러짐은 없다.

식 (2)의 기구학적 모델은 제어 입력으로 이동 로봇의 선속도와 각속도를 사용하지만, 바퀴가 모터로 직접 구동되는 경우 최종 제어 입력은 양 쪽 바퀴의 선속도가 되어야 한다. 이 때, 그림 1과 같이 이동 로봇이 회전 반경 R 로 선회하기 위한 양 바퀴의 속도는 다음 식 (4)로부터 결정된다.

그림 1. 이동 로봇의 기구학 모델.

Fig. 1. Kinematic model of the mobile robot.

$$v_L = v \left(1 - \frac{b}{2R} \right), \quad v_R = v \left(1 + \frac{b}{2R} \right) \quad (4)$$

여기서 v_L 과 v_R 은 각각 왼쪽, 오른쪽 바퀴의 선속도이며 b 는 이동 로봇의 양 쪽 바퀴간 거리이다.

III. 기하학적 경로 추종 방법

본 장은 기하학적 경로 추종 방법 중 하나인 pure pursuit를 소개하고, 이 경로 추종 제어기의 튜닝을 위한 예견 거리 선정 방법을 제안한다. 본론에 앞서, 이동 로봇의 경로를 정의하고자 한다. 경로는 i) 연속적인 경로(continuous path), ii) 불연속적인 경유점들의 집합(set of discrete waypoints) 이렇게 두 가지 종류로 구분한다. 하지만 i)의 경우, 2차원 평면상에 함수로 경로를 정의해야 하므로 실제 하드웨어로의 적용 시 불필요한 계산량을 초래한다. 따라서 본 논문에서는 ii)와 같이 경유점들의 집합으로 이동로봇이 추종할 경로를 정의한다.

1. Pure pursuit 경로 추종 방법

Pure pursuit은 이동 로봇이 기존 경로로 되돌아오기 위한 회전 반경을 생성하는 기하학적 경로 추종 방법이다. 그림 2와 같이, 회전반경은 이동 로봇의 중심점에서 예견거리 L 만큼 떨어진 경로상의 예견 점(그림 2에서 o로 표시된 지점)과 이동 로봇의 중심점을 지나는 원의 반지름을 계산함으로써 얻을 수 있으며, 여기서 원은 로봇 좌표계의 X 축에 접한다. 예견 점이 로봇 좌표계 기준으로 y 축으로 y_L , x 축으로 x_L 만큼 떨어져 있을 때, 그림 2의 기하학적 관계로부터 아래와 같이 식 3개를 얻는다.

$$x_L^2 + y_L^2 = L^2 \quad (5)$$

$$a^2 + x_L^2 = R_{track}^2 \quad (6)$$

$$a = R_{track} - y_L \quad (7)$$

식 (7)을 식 (6)에 대입하면

$$x_L^2 + y_L^2 = 2y_L R_{track} \quad (8)$$

를 얻을 수 있으며, 식 (5)를 식 (8)에 대입하면 그림 2의 원의 반경, 즉 경로를 추종하기 위한 회전 반경 R_{track} 을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$R_{track} = \frac{L^2}{2y_L} \quad (9)$$

그림 2. Pure pursuit 기하.

Fig. 2. Geometry of pure pursuit.

그림 3. 경로를 추종하는 로봇의 연속적인 위치.

Fig. 3. Sequential robot positions tracking a path.

제어 시스템의 sample time을 Δt 라 할 때, 그림 3은 pure pursuit 경로 추종 방법을 사용함으로써 이동 로봇이 기준 경로로 돌아오는 과정을 보여주고 있다. 경로 위에 예견 점을 찾아 식 (9)로부터 회전 반경을 계산하고, 계산된 회전 반경은 식 (4)로 적용되어 최종적으로 이동 로봇의 각 바퀴 속도 입력으로 사용된다. 이 과정을 매번 sample time 마다 수행하여 이동 로봇은 경로를 추종한다.

2. 예견 거리 선정

기하학적 경로 추종방법을 사용한 경로 추종 제어기의 성능은 예견거리에 의존한다. 예견거리가 길 경우 이동로봇은 선회를 일찍 시작하므로, 경로를 정확하게 추종하게 만들기 위해서는 반대로 예견 거리는 짧아져야 한다. 하지만 예견거리를 짧게 선정할 경우 이동 로봇은 작은 회전 반경으로 선회하므로 큰 각속도가 발생한다. 이는 이동 로봇의 바퀴와 지면간에 미끄러짐을 유발하며, 이동 로봇의 바퀴 제어 및 바퀴 회전을 통해 자신의 위치를 계산하는 오도메트리(odometry) 기법에 영향을 미친다. 따라서 운전자가 빠른 속도로 운전을 하고 있을 때 먼 거리를 바라보며 운전하는 것과 같이, 이동로봇의 예견거리 또한 속도가 변함에 따라 주어진 운동 구속 조건을 만족시키면서 변화되어야 한다. 시행착오로 예견 거리를 선정하거나 혹은 예견거리를 임의로 변화시키면서 경로 추종 결과를 비교하였던 이전 연구와 달리, 본 논문은 이동 로봇의 각속도를 제한하기 위한 예견거리 선정 방법을 제안한다.

예견 점과 이동 로봇간의 거리는 예견 거리 L 이므로, 예견 점은 이동 로봇을 중심으로 하고 반지름이 L 인 원의 둘레에 존재한다. 즉, 이동 로봇이 경로를 벗어남에 따라 로봇 좌표계의 X축 상에 존재하던 예견 점은 원의 둘레를 따라 이동한다. X축 상에 예견 점이 존재하는 경우 이동 로봇의 회전

그림 4. 이동 로봇의 최소 회전 반경과 예견 점.

Fig. 4. Minimum turning radius and the look-ahead point of the mobile robot.

반경은 무한대가 되는 반면, 예견 점의 위치가 로봇 좌표계 Y축 상에 있는 경우 회전반경은 최소가 된다. 즉, 그림 4와 같이 Look-ahead Point A와 Look-ahead Point B 두 가지 경우에 대하여 pure pursuit 경로 추종 방법은 최소 회전 반경 R_{min} 을 계산한다. 그림 4에서 이동 로봇의 최소 회전 반경과 예견 거리는 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$L = 2R_{min} \quad (10)$$

따라서 이동 로봇이 경로를 속도 v 로 추종하는 동안 발생하는 각속도를 ω_{lim} 로 제한하기 위한 예견 거리는 위 식에 $R_{min} = v/\omega_{lim}$ 를 대입함으로써 얻을 수 있다.

$$L = 2 \frac{v}{\omega_{lim}} \quad (11)$$

그림 4와 같이 이동 로봇이 최소 회전 반경으로 회전하는

그림 5. 3개의 L 값에 따른 이동 로봇의 궤적.

Fig. 5. Trajectory of the mobile robot with three L values.

그림 6. 3개의 L 값에 따른 이동 로봇의 각 속도.

Fig. 6. Angular velocity of the mobile robot with three L values.

경우는 경유점과 경유점을 잇는 직선 경로들 사이의 각도가 180도인 경우, 즉 이동 로봇이 180도 회전을 해야 되는 경우 발생한다. 이를 검증 하기 위해 시뮬레이션 상에서 pure pursuit 경로 추종 방법을 사용하여 이동 로봇이 (0, 0), (6m, 0), (0, 0) 순서로 경유점들을 따라가도록 하였다. 여기서 이동 로봇은 초기 0도를 향하고 있으며 기준 속도는 0.5m/s 이다. 그 결과 최대 각속도 30degree/sec, 60degree/sec, 90degree/sec를 발생시키는 예견거리는 각각 1.9099m, 0.9550m, 0.6366m였으며 그림 5와 그림 6는 이 세 가지 경우에 대한 이동 로봇의 궤적과 각속도를 나타낸다. 이 결과로부터 식 (11)이 유효함을 확인하였다.

IV. 경로 추종 및 장애물 회피 통합

1. 장애물 감지 및 좌표계 변환

이동 로봇은 그림 7과 같이 2D 레이저 스캐너를 통하여 장애물의 형상 정보를 획득한다. 여기서 레이저 스캐너의 최

그림 7. 장애물 감지를 위한 좌표계.

Fig. 7. Coordinate systems for detecting the obstacle.

대 측정 거리는 $d_{\max}$ 이며 스캐닝 범위는 α 이다. 레이저 스캐너의 중심에 레이저 스캐너 좌표계를 정의하였으며, ${}^L X$ 와 ${}^L Y$ 는 레이저 스캐너 좌표계의 X축, Y축 이다. 로봇 좌표계의 X축과 레이저 스캐너 좌표계의 X축은 동일 선상에 놓여있는 반면, 로봇 좌표계의 Y축과 레이저 스캐너 좌표계의 Y축은 c 만큼의 오프셋을 가지고 있다.

레이저 스캐너를 통해 얻어진 장애물의 형상 정보는 불연속적인 점들의 집합이다. 이는 총 N 개의 위치 벡터로 표현되며, 그림 7에 나타낸 것과 같이 이 중 i 번째 위치 벡터를 $\mathbf{p}_{Oi} = [x_{Oi} \ y_{Oi}]^T$ 로 정의한다. ${}^L \mathbf{p}_{Oi}$, ${}^R \mathbf{p}_{Oi}$ 그리고 ${}^G \mathbf{p}_{Oi}$ 는 각각 벡터 $\mathbf{p}_{Oi}$ 의 기준 좌표계가 레이저 스캐너 좌표계, 로봇 좌표계, 지구 좌표계인 경우를 나타내며, 좌표계 간에 변환 행렬(transformation matrix)을 정의할 수 있다. 따라서 변환 행렬을 사용하면 ${}^R \mathbf{p}_{Oi}$ 와 ${}^L \mathbf{p}_{Oi}$ 사이에는

$$\begin{bmatrix} {}^R \mathbf{p}_{Oi} \\ 1 \end{bmatrix} = {}^R_L \mathbf{T} \begin{bmatrix} {}^L \mathbf{p}_{Oi} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

의 관계가 성립하고, ${}^G \mathbf{p}_{Oi}$ 과 ${}^L \mathbf{p}_{Oi}$ 사이에서는

$$\begin{bmatrix} {}^G \mathbf{p}_{Oi} \\ 1 \end{bmatrix} = {}^G_R \mathbf{T} {}^R_L \mathbf{T} \begin{bmatrix} {}^L \mathbf{p}_{Oi} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

와 같은 관계가 성립한다. 여기서 ${}^R_L \mathbf{T}$ 와 ${}^G_R \mathbf{T}$ 는 각각 레이저 스캐너 좌표계에서 로봇 좌표계로, 로봇 좌표계에서 지구 좌표계로의 변환 행렬이며, 각 변환 행렬은 식 (14)와 같다.

$${}^R_L \mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & c \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad {}^G_R \mathbf{T} = \begin{bmatrix} \cos \theta_R & -\sin \theta_R & x_R \\ \sin \theta_R & \cos \theta_R & y_R \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

2. 장애물 포텐셜

앞에서 정의한 위치 벡터를 사용하여 가장 가까운 장애물까지 거리 d 는 아래와 같이 표현된다.

$$d = \min_{i=1,2,\dots,N} |{}^R \mathbf{p}_{Oi}| \quad (15)$$

i 번째 위치 벡터의 크기가 장애물까지 가장 가까운 거리일 때, 위 거리 d 로부터 장애물 포텐셜(obstacle potential) v_i 는 다음과 같이 정의된다.

$$v_i = \begin{cases} \frac{1}{d+d_0} + \frac{d}{(d_i+d_0)^2} & \text{if } 0 \leq d \leq d_i \\ \frac{1}{d_i+d_0} + \frac{d_i}{(d_i+d_0)^2} & \text{if } d > d_i \end{cases} \quad (16)$$

여기서 d_0 는 d 가 0인 경우 장애물 포텐셜이 무한대가 되는 것을 방지하기 위한 상수이다. 따라서 가상의 힘 $\mathbf{f}_i$ 는 장애물 포텐셜의 gradient를 구함으로써 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \mathbf{f}_i &= -\nabla v_i \\ &= \begin{cases} -\left(\frac{1}{(d_i+d_0)^2} - \frac{1}{(d+d_0)^2} \right) \frac{{}^R \mathbf{p}_{Oi}}{d} & \text{if } 0 \leq d \leq d_i \\ 0 & \text{if } d > d_i \end{cases} \quad (17) \end{aligned}$$

그림 8. 경로 추종 및 장애물 회피를 위한 제어 시스템.

Fig. 8. The control system for path tracking and obstacle avoidance.

앞의 수식 (16) 및 (17)에서 알 수 있듯이 오직 장애물 유효 거리 d_i 내에 장애물에 대해서만 가상의 힘이 생성된다.

3. 장애물 포텐셜

본 논문에서는 식 (3)과 같은 비홀로노믹 구속조건을 갖는 이동 로봇을 다루므로, 식 (17)로 주어진 가상의 힘의 모든 방향으로 이동 로봇이 움직이는 것은 불가능 하다. 이러한 구속조건을 고려하기 위해 본 논문은 장애물 포텐셜로부터 생성된 가상의 힘의 크기를 사용하여 장애물을 피하기 위한 회전반경을 생성하는 방법을 제안한다. 포텐셜의 크기가 장애물까지 거리에 반비례 하도록 정의된 포텐셜 필드 방법 [15]의 개념으로부터, 장애물 회피 회전 반경을 가상의 힘의 크기에 반비례 하도록 정의한다. 또한 가장 가까운 장애물이 로봇의 이동 방향에 놓여있는 경우 이동 로봇은 더욱 작은 회전 반경으로 회피 동작을 수행해야 한다. 따라서 장애물 회피 회전 반경은 다음과 같은 수식으로 정의된다.

$$R_{avoid} = \begin{cases} \frac{\varepsilon}{k_1 |\mathbf{f}_i|} & \text{if } \theta_{O_i} - \theta_R = 0 \\ \frac{\text{sgn}(\theta_{O_i} - \theta_R)}{k_1 |\mathbf{f}_i|} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (18)$$

여기서 k_1 는 임의의 gain값이고 θ_{O_i} 는 장애물까지 위치벡터 ${}^R\mathbf{p}_{O_i}$ 가 지구 좌표계의 X축과 이루는 각도이다. 그리고 ε 은 회전 반경이 0으로 계산되는 경우를 방지하기 위한 매우 작은 상수이다. 위 식 (18)에서 $\theta_{O_i} - \theta_R$ 는 이동 로봇의 진행 방향, 즉 이동 로봇 좌표계의 X축을 기준으로 장애물의 방향에 따라 -90도부터 +90도 사이의 값을 가진다. 이 값의 부호에 따라 이동 로봇이 장애물을 회피하기 위한 이동 로봇의 회전 방향이 결정된다.

4. 이동 로봇의 선 속도 및 예견 거리 변화

본 논문은 장애물로부터 가상의 힘이 발생할 경우, 이동 로봇의 선 속도 v 를 아래 식을 이용하여 감소시킨다.

$$v = v_{ref} - k_2 |\mathbf{f}_i|^2 \quad (19)$$

여기서 v_{ref} 는 기준 속도이며 k_2 는 임의의 gain값이다. 장애물

과 이동 로봇 간에 거리가 가까울수록 앞의 식 (19)로부터 이동 로봇의 속도는 감소하고, 식 (11)에 감소된 속도 v 가 사용됨으로써 예견거리 또한 감소된다.

5. 경로 추종 및 장애물 회피를 위한 회전 반경 계산

앞에서 pure pursuit 경로 추종 방법과 장애물 회피 방법은 각각 회전 반경을 식(9)와 식(18)로 계산하며, 다음과 같이 각 속도로 표현 가능하다.

$$\omega_{track} = \frac{v}{R_{track}}, \omega_{avoid} = \frac{v}{R_{avoid}} \quad (20)$$

경로 추종과 장애물 회피를 동시에 하기 위한 각속도 ω_{navi} 는 위의 경로 추종을 위한 각속도 ω_{track} 와 장애물 회피를 위한 각속도 ω_{avoid} 들을 조합하여 아래와 같이 얻을 수 있다.

$$\omega_{navi} = \omega_{track} + \omega_{avoid} = v \left(\frac{R_{track} + R_{avoid}}{R_{track} R_{avoid}} \right) \quad (21)$$

따라서 이동 로봇이 경로 추종과 장애물 회피를 동시에 하기 위한 회전 반경은 아래와 같다.

$$R_{navi} = \frac{R_{track} R_{avoid}}{R_{track} + R_{avoid}} \quad (22)$$

6. 경로 추종 및 장애물 회피를 위한 제어 시스템

이동 로봇이 따라갈 경유점들을 전역 경로 계획기(global path planner)로부터 제공받았을 때, 경로 추종 및 장애물 회피를 수행하기 위한 방법을 그림 7과 같이 제어 시스템으로 요약할 수 있다. Pure pursuit 경로 추종 방법은 경유점, 예견 거리 및 이동 로봇의 위치와 방향을 피드백 받아 경로 추종을 위한 회전 반경 R_{track} 을 생성한다. 장애물 추종 방법은 이동 로봇의 위치와 방향, 그리고 레이저 스캐너로부터 얻어지는 장애물까지 위치 벡터들을 가지고 장애물 회피를 위한 회전 반경 R_{avoid} 을 생성한다. 최종적으로 이동 로봇 양 쪽 바퀴의 속도 지령이 앞에서의 두 회전 반경과 선 속도에 의해 결정되며, 장애물로 인한 가상의 힘 $\mathbf{f}$ 의 크기가 커질수록 선 속도가 감소하며 이에 따라 감소되는 예견거리는 다시 pure pursuit 경로 추종 방법으로 피드백 된다.

V. 실험 결과

본 논문에서는 그림 9에서 보이는 것과 같이 LMS200 레이저 스캐너를 장착한 Pioneer 2-DXE를 사용하여 경로 추종 및 장애물 회피 실험을 수행하였다. Pioneer 2-DXE는 약 9Kg 중량의 소형 두 바퀴 이동 로봇으로써, 이동 로봇 관련 연구에 빈번히 사용되는 하드웨어이다. Pioneer 2-DXE의 양 쪽 바퀴간 거리 b 는 0.33m 이고, 레이저 스캐너는 로봇의 중심으로부터 0.05m 뒤에 설치되었으므로 오프셋 c 는 -0.05m 이다. 또한 레이저 스캐너의 스캔 가능 거리 $d_{\max}$ 는 8.191m이며 범위는 180 degree이다.

실험은 그림 10과 같이 지면의 상태가 고르며 경사가 없는 실내에서 진행되었다. 초기 위치를 포함해 총 4 개의 경유점이 주어졌으며, 경유점들의 위치는 지구 좌표계 기준으로 (0, 0), (8m, 0), (8m, 6m), (14m, 6m) 이다. 본 논문에서는 이렇게 주어진 경유점에 대하여 첫 번째로 경로 추종에 대한 실험을 수행하였고, 두 번째로 경유점들 사이에 장애물을 놓은 상태에서 경로 추종 및 정적 장애물 회피에 대한 실험을 수행하였다. 마지막으로 이동 로봇이 주어진 경로를 추종하는 도중에 사람이 이동 로봇을 향해 걸어오므로써 동적 장애물 회피 실험을 수행하였다. 그리고 위와 같은 세 가지의 실험을 수행할 때 표 1의 변수들이 사용되었다.

1. 경로 추종 실험

이동 로봇은 표 1에서 주어진 기준 속도 $v_{ref}=0.5m/s$ 를 유지하며 장애물 없는 경로를 추종하였다. 이 때 이동 로봇은 그림 11과 같이 경로를 추종하였으며, 이 때 발생한 이동 로봇의 선속도와 각속도는 각각 그림 12, 13과 같다.

그림 9. 레이저 스캐너 LMS200을 장착한 Pioneer 2-DXE.

Fig. 9. Pioneer 2-DXE with Laser Scanner, LMS200.

그림 10. 실험 장소 및 주어진 경로.

Fig. 10. The site of the experiment and the given path.

표 1. 변수 설정.

Table 1. Parameter setting.

Parameter	Description	Value
v_{ref}	Reference Velocity	0.5 m/s
ω_{lim}	Limit on the Angular Velocity	50 deg/sec
k_1	Gain value for Avoiding the Obstacle	7

그림 11. 이동 로봇의 궤적 (경로 추종).

Fig. 11. Trajectory of the mobile robot (path tracking).

그림 12. 이동 로봇의 속도 (경로 추종).

Fig. 12. Velocity of the mobile robot (path tracking).

그림 13. 이동 로봇의 각속도 (경로 추종).

Fig. 13. Angular velocity of the mobile robot (path tracking).

2. 경로 추종 및 정적 장애물 회피 실험

약 (5m, 0) 과 (8m, 5m) 부근에 임의의 장애물을 설치한 후 경로 추종 및 정적 장애물 회피 실험을 수행하였다. 그림 14의 이동 로봇의 궤적과 같이 이동 로봇은 장애물을 인식하고 회피하였다. 또한 장애물 회피로 인해 이동 로봇의 각속도

그림 14. 이동 로봇의 궤적 (경로 추종 및 정적 장애물 회피).
Fig. 14. Trajectory of the mobile robot (path tracking and static obstacle avoidance).

그림 15. 이동 로봇의 속도 (경로 추종 및 정적 장애물 회피).
Fig. 15. Velocity of the mobile robot (path tracking and static obstacle avoidance).

그림 16. 이동 로봇의 각속도 (경로 추종 및 정적 장애물 회피).
Fig. 16. Angular velocity of the mobile robot (path tracking and static obstacle avoidance).

변화가 경로 추종만을 수행하였을 때 보다 크게 발생하였음을 그림 16에서 확인할 수 있다.

3. 경로 추종 및 동적 장애물 회피 실험

동적 장애물 회피 실험은 사람이 직접 이동 로봇을 향해 걸어오므로써 수행되었다. 그림 17에서 보이듯이, 동작 시간

그림 17. 이동 로봇의 궤적 (경로 추종 및 동적 장애물 회피).
Fig. 17. Trajectory of the mobile robot (path tracking and dynamic obstacle avoidance).

그림 18. 이동 로봇의 속도 (경로 추종 및 동적 장애물 회피).
Fig. 18. Velocity of the mobile robot (path tracking and dynamic obstacle avoidance).

그림 19. 이동 로봇의 각속도 (경로 추종 및 동적 장애물 회피).
Fig. 19. Angular velocity of the mobile robot (path tracking and dynamic obstacle avoidance).

그림 20. 시간에 따른 예견 거리.

Fig. 20. Time versus look-ahead distance.

이 약 14초일 때 레이저 스캐너의 센싱 영역에 사람이 감지되었으며 이동 로봇은 왼쪽으로 선회함으로써 사람을 회피하였다.

4. 예견 거리 변화

앞의 세 가지 실험에서, 시간에 따른 예견 거리는 그림 20와 같다. 경로 추종만을 실험한 경우, 장애물을 만나지 않았으므로 예견 거리 $L=1.146\text{m}$ 로 일정하다. 하지만 정적 장애물 회피까지 수행하였을 때에는 두 개의 장애물을 회피하였으므로, 두 번의 예견 거리의 감소가 있었다. 그리고 동적 장애물 회피의 경우에는 사람이 이동 로봇에 가까이 접근함에 따라 예견 거리가 급속하게 감소함을 그림 19에서 알 수 있다. 따라서 그림 15, 그림 18에서 알 수 있듯이 예견 거리가 감소함으로써 이동 로봇의 목표 선속도가 감소하고, 이동 로봇은 최대 각속도 조건을 넘지 않으면서 작은 회전 반경으로 이동하였다.

VI. 결론

본 논문은 비홀로노믹 이동로봇의 자율주행을 위한 기하학적 경로 추종 및 장애물 회피 방법을 제안하였다. 기하학적 경로 추종 방법인 pure pursuit은 경로를 추종하기 위한 회전 반경을 생성하며, 뿐만 아니라 장애물로부터 생성되는 가상의 힘 또한 장애물을 회피하기 위한 회전 반경을 생성한다. 따라서 두 개의 회전 반경으로부터 이동 로봇이 경로 추종 및 장애물 회피를 동시에 수행하기 위한 목표 운동을 얻었으며, 이를 실제 이동 로봇에 적용하여 실험을 수행하였다. 실험 결과로부터 이동 로봇에게 주어진 각속도 한계 구속 조건을 넘지 않았음을 확인할 수 있었으며, 동적 장애물 회피의 경우 예견 거리가 급속히 감소함으로써 동적인 상황에서도 경로 추종과 장애물 회피를 동시에 수행할 수 있음을 검증하였다.

참고문헌

- [1] K. C. Koh and H. S. Cho, "A smooth path tracking algorithm for wheeled mobile robots with dynamic constraints," *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, vol. 24, pp. 367-385, 1999.
- [2] 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.

- [3] R. C. Coulter, "Implementation of the pure pursuit path tracking algorithm," Technical Report CMU-RI-TR-92-01, Robotics Institute, Carnegie Mellon University, 1992.
- [4] J. Morales, J. L. Martínez, M. A. Martínez, and A. Mandow, "Pure-pursuit reactive path tracking for nonholonomic mobile robots with a 2D laser scanner," *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, vol. 2009, Article ID 935237, 10 pages, 2009.
- [5] 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, 2004.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] O. Lefebvre, F. Lamiroux, C. Pradaliere, Th. Fraichard, "Obstacles avoidance for car-like robots, integration and experimentation on two robots," *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, New Orleans, LA, USA, April 2004.
- [9] O. Lefebvre, F. Lamiroux, and D. Bonnafous, "Fast computation of robot-obstacle interactions in nonholonomic trajectory deformation," *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Barcelona, Spain, April 2005.
- [10] C. Pradaliere, J. Hermosillo, C. Koike, C. Braillon, P. Bessière, and C. Laugier, "The cycab: a car-like robot navigating autonomously and safely among pedestrians," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 50, no. 1, pp. 51-68, 2005.
- [11] 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, 2002.
- [12] 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 AeroSense Symposium*, vol. 2738, Orlando, FL, pp. 176-186, April 1996.
- [13] 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, 1999.
- [14] D. Fox, W. Burgard, and S. Thrun, "The dynamic window approach to collision avoidance," *IEEE Robotics and Automation Magazine*, vol. 4, pp. 23-33, 1999.
- [15] H. Choset, K. M. Lynch, S. Hutchinson, G. Kantor, W. Burgard, L. E. Kavraki, and S. Thrun, "Principles of robot motion: theory, algorithms, and implementations," The MIT Press, Chapter 4, 2005.

김 동 형

2008년 한양대학교 기계공학과 졸업. 2010년 한양대학교 대학원 기계공학과 석사 졸업. 2010년~현재 한양대학교 대학원 기계공학과 박사과정 재학중. 관심분야는 자율주행로봇, 차량 동역학 및 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.

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.