

# Vector Pursuit 경로 추종 알고리즘을 이용한 Nonholonomic 이동 로봇의 안전 선회에 관한 연구

## A Study of The Safety Cornering of Nonholonomic Mobile Robot Using Vector Pursuit Path Tracking Algorithm

\*김동형<sup>1</sup>, 유병갑<sup>1</sup>, #한창수<sup>1</sup>, #이지영<sup>1</sup>

\*D. H. Kim<sup>1</sup>, B. G. Yu<sup>1</sup>, #C. S. Han(cshan@hanyang.ac.kr)<sup>1</sup>, #J. Y. Lee(jiyeongl@hanyang.ac.kr)<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 한양대학교 기계공학과

Key words : Mobile robot, Path tracking, Vector pursuit

### 1. 서론

이동 로봇이 커브 길을 추종할 경우, 이동 로봇에게 각 가속도가 발생한다. 이동 로봇의 각 가속도는 관성력을 발생시키며, 관성력은 이동 로봇의 바퀴와 지면간의 미끄러짐의 원인이 된다. 이는 Odometry, 즉 엔코더로 바퀴의 회전 수를 얻어 로봇의 위치 및 방향을 예측하는 기법에서 누적 오차를 발생시킨다. 뿐만 아니라 관성력은 이동 로봇의 전복과 같은 문제도 유발 시킬 수 있다.

본 연구에서는 Nonholonomic 이동 로봇이 경로를 추종함에 있어 위와 같은 문제를 해결하기 위해 Vector Pursuit 경로 추종 알고리즘을 사용하였다. 이전 Vector Pursuit 경로 추종 알고리즘[1][2]은 이동 로봇의 속도에 따라 예견 거리(Look-ahead distance)를 적절하게 설정하여 이동로봇의 경로 추종 성능을 튜닝 할 수 있는 알고리즘이다.

본 논문에서는 예견 거리를 이동로봇의 기본 속도와 한계 각 가속도에 대한 함수로 만듦으로써 이동 로봇이 경로를 추종하는 도중에 발생하는 각 가속도에 한계를 주었다. 따라서 구속 조건이 주어진 이동 로봇은 보다 안전하게 경로를 추종할 수 있다.

### 2. Vector Pursuit 경로 추종 알고리즘

Vector pursuit 는 나사 이론(Screw theory)을 이용한 기하학적 경로 추종법 이다. 나사 이론은 강체의 운동을 나사에 붙여 회전하면서 중심선을 따라 병진운동 하는 것처럼 표현하는 방법으로[1][2], 2차원 평면상에서 이동 로봇의 순간적인 병진 운동과 회전 운동을 나타내는데 적용할 수 있다.

중간 점(waypoint)  $w_{i-1}$  에서  $w_i$  로 이동 로봇이 움직여야 할 때, 이것이 로봇의 경로가 되고 좌표계 설정은 다음과 같다. 첫 번째로, Fig.1 에서 볼 수 있듯이 전체 좌표계(World coordinate system)은  $z$  축이 지면 안으로 향하고 있는 고정된 좌표계 이다. 두 번째로 로봇 좌표계(Robot coordinate system 혹은 Vehicle coordinate system)는 로봇에 부착되어 움직이는 좌표계로,  $x$  축은 진행방향과 평행하다. 전체 좌표계의  $x$  축 으로부터 로봇 좌표계의  $x$  축까지 각도는 오른손 좌표계 기준으로  $\theta_v$  이다. 마지막으로, 로봇의 위치에서 경로로 그은 수선의 발, 예견 점(Look-ahead point)에서 경로 방향으로  $L$  만큼 떨어진 곳에 예견 좌표계(Look-ahead coordinate system)의 원점이 위치한다. 좌표계의  $x$  축의 방향은 경로 방향과 동일하며,  $L$  은 예견 거리이다. 그리고 전체 좌표계의  $x$  축 으로부터 예견 좌표계의  $x$  축까지 각도는 오른손 좌표계 기준으로  $\theta_l$  이다.

Vector Pursuit 경로 추종 알고리즘은 세 단계로 나누어진다. 자세한 계산 과정은 [1]에 기술되어 있다.

- I. 두 개의 순간적 나선(Instantaneous screw),  $\underline{s}_v$  와  $\underline{s}_l$  를 계산

로봇 위치에서 예견 점까지의 병진 나사(Translation screw),  $\underline{s}_t$  를 구한다. 그리고 로봇의 방향에서 예견 점에서 방향까지의 위치회전 나사

(Rotation screw),  $\underline{s}_r$  을 구한다.

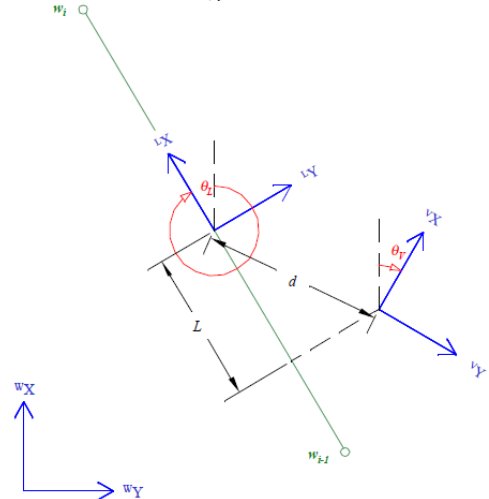


Fig. 1 Defined coordinate systems

- II. 순간 원하는 운동을 정의하는 나사,  $\underline{s}_d$  를 계산

$${}^w \underline{s}_d = {}^w \underline{s}_v + {}^w \underline{s}_r \quad (1)$$

위 첨자는 기준 좌표계를 의미하며,

Nonholonomic 구속 조건은 다음 과정에서 고려한다.

- III. 원하는 선회 반경을 계산

로봇이 예견 점까지 병진 나사를 통해 도달하는데 걸리는 시간을  $t_l$ , 예견 점에서의 방향까지 회전 나사를 통해 도달하는데 걸리는 시간을  $t_r$  라고 하자. 둘 사이의 관계를 다음과 같이 가정하면,

$$t_r = k t_l \quad (\text{여기서 } k \text{ 는 } 0 \text{ 보다 큰 양의 상수}) \quad (2)$$

II 에서 구했던 나사  $\underline{s}_d$  의 중심점의 위치는 전체 좌표계 기준과 로봇 좌표계 기준으로 구해진다.

Nonholonomic 구속조건을 고려해주기 위해 새로운 나사  $\underline{s}_d$  를 이전 나사  $\underline{s}_d$  에 근거하여 구한다. 새로운 예견 점과 로봇 중심점을 동시에 지나고 로봇 진행 방향에 수직인 원이 생성된다. 이 원의 반지름이 원하는 선회 반경이며, 새로운 예견 점의 좌표가 다음과 같이 로봇 좌표계 기준으로 구해질 경우

$$\begin{pmatrix} v x_p \\ v y_p \end{pmatrix} \quad (3)$$

원하는 회전 반경은

$$R = \frac{L^2}{2v y_p} \quad (4)$$

이다.

### 3. 안전 선회를 위한 예견 거리 함수

일단 예견 거리  $L$  이 경로 추종 성능에 미치는 영향을 생각해 보자. 일반적으로, 이동 로봇의 속도가 빨라질수록 예견 거리는 증가해야 한다. 예견 거리를 가짐으로써 경로

상의 커브에 닿기 전에 미리 선회를 시작하게 되는 것이다. 즉, 이동 로봇이 빠르면 빠를수록, 선회를 빨리 시작해야 한다[1].

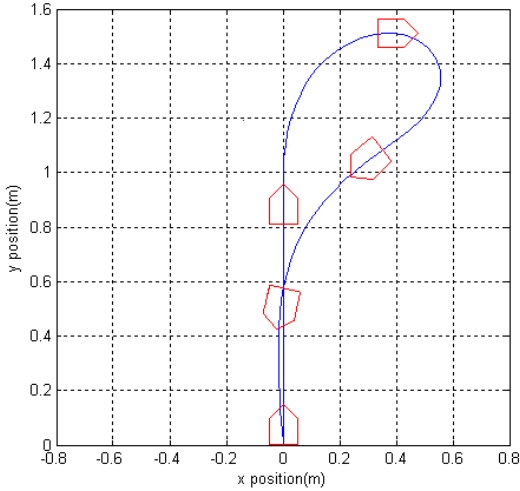


Fig. 2 The case that the maximum angular acceleration is occurred in path tracking

이동 로봇에게 가장 큰 각 가속도가 발생할 수 있는 상황을 고려해 보았다. 경로를 연속된 직선으로 생각할 때, 임의의 직선과 다음 직선이 이루는 각도로 인해 이동 로봇은 선회를 하게 된다. 이 각도가 가장 큰 경우가 180 도이며, 이 때 가장 큰 각 가속도가 발생함을 시뮬레이션으로 확인하였다. 이동 로봇의 자세를  $(x, y, \theta)$ 로 정의하고,  $(0,0)$ 에서  $(0,1m)$ 로 향하는 경로를 Path A,  $(0,1m)$ 에서  $(0,0)$ 로 향하는 경로를 Path B 라고 하자. Fig. 2 는 예견거리  $L=0.3m$ , 속도  $v=0.5m/s$  일 때, 초기 자세  $(0,0,90^\circ)$ 에서 Path A, B 를 순서대로 따라 간 이동 궤적이다.

예견 거리  $L$  을 이동 로봇의 각 가속도를 제한해주는 함수로 만들었다. 먼저, 예견 거리  $L$  은 한계 각 가속도와 속도에 종속된다. 따라서 함수는 다음과 표현할 수 있다.

$$L = f(\alpha_{max}, v) \tag{5}$$

$L$  과  $v$  는 비례 관계이고, 따라서  $v$  를 단위 속도로 놓고  $L$  과 최대 각 가속도  $\alpha_{max}$  의 관계를 찾으면 된다. Fig. 3 에서 볼 수 있듯이, 최대 각 가속도는 예견 거리에 반 비례하는 경향을 보인다. 이를 멱 함수로 피팅(fitting)했으며, 따라서 예견 거리 함수는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$L = 10.8001\alpha_{max}^{-0.489414} v \tag{6}$$

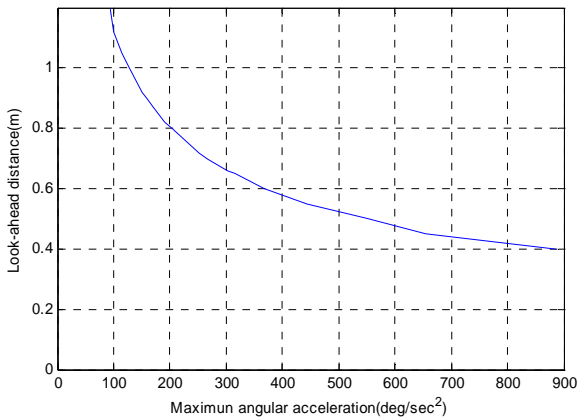


Fig. 3 Relation between the maximum angular acceleration and look-ahead distance with unit velocity

#### 4. 경로 추종 시뮬레이션

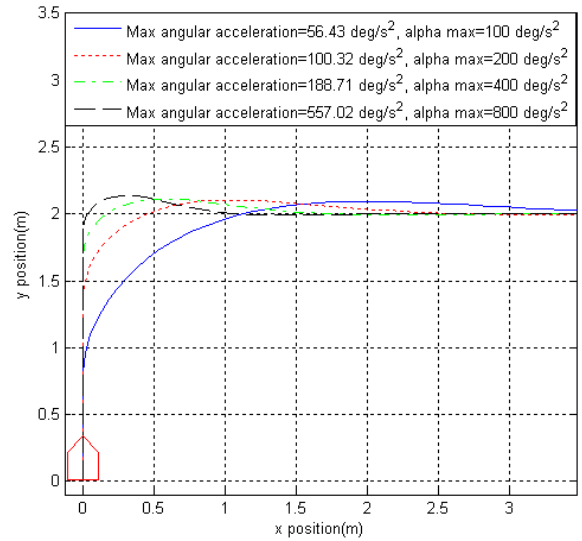


Fig. 4 The simulation result for path tracking with various maximum angular acceleration constraints

앞에서의 식(6)을 적용하여 Vector pursuit 경로 추종 시뮬레이션을 수행했다. 시뮬레이션 조건으로 이동 로봇의 초기 자세는  $(0,0,90^\circ)$  이고 속도는  $v=1m/s$  이다. 그리고 이동 로봇은  $(0,0)$ 에서  $(0,2m)$ 로 향하는 경로, 그리고  $(0,2m)$ 에서 양의  $x$  축 과 평행한 방향으로의 경로를 순서대로 추종한다. Fig. 4 는 최대 각 가속도  $\alpha_{max}$  를  $100deg/s^2$ ,  $200deg/s^2$ ,  $400deg/s^2$ ,  $800deg/s^2$ 와 같이 다르게 해 주었을 때 경로를 추종한 궤적이다.  $\alpha_{max}$  값이 작을수록 선회를 빨리 시작하였으며, 각 경우에 발생한 최대 각 가속도는 한계 값으로 준  $\alpha_{max}$  를 넘지 않았다.

#### 5. 결론

본 논문에서는 이동 로봇의 경로 추종 시 필요한 안전 선회에 대해 다루었다. Vector Pursuit 경로 추종 알고리즘을 이용하였으며, 예견 거리를 이동 로봇의 각 가속도에 제한을 주기 위한 함수로 표현함으로써 안전 선회를 구현하였다. 즉, 이동 로봇은 단순히 최단 경로를 따라 가는 것이 아니라 구속 조건들을 고려 하면서 경로를 추종하게 되는 것이다.

향후 이동 로봇, 특히 속도가 빠른 이동 로봇에 본 연구 내용의 적용이 필요하다. 본 연구에서 제시하는 안전 선회가 되었을 때와 그렇지 않았을 경우를 비교하는 연구가 진행되어야 한다.

#### 후기

본 연구는 국토해양부 건설기술혁신사업의 연구비 지원(06 첨단융합 C01)에 의해 수행되었음.

#### 참고문헌

1. Wit, J. S., "Vector Pursuit Path Tracking for Autonomous Ground Vehicles", Ph.D. Thesis, University of Florida, 2000.
2. Wit, J., Crane, C., and Armstrong, D., "Autonomous Ground Vehicle Path Tracking", Journal of Robotic Systems, **21**, 439-449, 2004.
3. Coulter, R. C., "Implementation of the Pure Pursuit Path Tracking Algorithm", Technical Report CMU-RI-TR-92-01, Robotics Institute, Carnegie Mellon University, 1992.
4. Lundgren, M., "Path Tracking and Obstacle Avoidance for a Miniature Robot", Master Thesis, University of Umeå, 1993.