

# Stanley 제어 기반 무인 이동체의 경로 추적 성능

양승건, 조은호, 김찬형, 임요진, 임승찬\*

한경대학교

tmdrjs1543@naver.com, jehwow@naver.com, cksguddl841@hknu.ac.kr, drwls605@naver.com,  
\*sclim@hknu.ac.kr

## Path Tracking Performance of Unmanned Vehicles With Stanley Controller

Seung Geon Yang, Eun Ho Cho, Chan Hyung Kim, Yojin Lim, Seung-Chan Lim\*

Hankyong National University.

### 요약

본 논문에서는 불완전한 액추에이터가 장착된 무인 이동체에 대하여 Stanley 제어 알고리즘의 경로 추적 성능을 분석한다. 기준 경로에 급격한 곡률이 있거나 시스템에 불확실성이 존재할 때, 높은 정확도와 안정성을 갖는 Stanley 알고리즘을 설계하기 위해서는 제어 이득의 신중한 설정이 매우 중요하다는 사실을 검증하였다.

### I. 서론

무인 이동체가 외부 환경을 스스로 인지함으로써 기준 경로(reference path)를 따라 자율 주행하기 위해서는 강인한 성능을 갖는 경로 추적(path tracking) 알고리즘이 요구된다. 하지만, 기준 경로에 갑작스러운 변화가 발생하거나 고속 주행할 때는 높은 경로 추적 정확도와 안정성을 보장하기 어렵다 [1].

Stanley 제어는 무인 이동체의 현재 상태와 기준 경로의 기하학적 관계를 이용하여 조향각을 제어하기 때문에 비교적 빠른 수렴성과 낮은 복잡도를 가지지만 고속 주행 시 안정성 확보에 어려움이 있다. 또한, 주요 제어 파라미터인 제어 이득(control gain)의 설정에 따라 경로 추적 성능이 민감하게 반응하므로 신중한 파라미터 설정이 필요하다.

본 논문에서는 불확실성이 존재하는 무인 이동체에 대하여 Stanley 제어 알고리즘의 추적 성능을 분석한다. Stanley 알고리즘을 이용해 조향각을 제어하고 불완전한 액추에이터(actuator)에 의하여 고속 주행할 때, 제어 이득의 설정에 따른 추적 성능을 시뮬레이터를 통하여 평가한다. 이를 통해, 기준 경로의 급격한 변화와 불확실성을 고려하여 Stanley 알고리즘 설계 시 제어 이득 설정의 중요성을 검증한다.

### II. 시스템 모델

Stanley 제어 알고리즘은 대표적인 기하학적 경로 추적 기법으로서 그림 1의 개념도로 표현된다. 시간 인덱스  $t$ 에 대하여 무인 이동체가  $\varphi_t$ 의 heading 방향을 가지고  $v_t$ 의 속도로 주행하는 상황을 가정하자. 전륜 축과 기준 경로 상 목표지점 간 거리 오차를  $e_t$ 로 나타내고, 기준 경로의 방향과 heading 방향 간의 각도 오차를  $\theta_t$ 로 표기한다. 이때, 계산되는 조향각을 다음과 같이 표현할 수 있다 [1]:

$$\delta_t = \theta_t + \tan^{-1} \frac{ke_t}{v_t}. \quad (1)$$

여기서  $k$ 는 제어 이득으로써 Stanley 제어 알고리즘의 경로 추적 성능에 큰 영향을 미친다. 일반적으로  $k$ 를 크게 설정하면, 경로 추적 정확도는 높아지지만 오버슈팅이 크게 발생하여 안정성이 열화될 수 있다. 반대로,

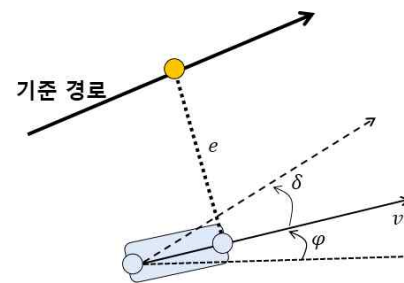


그림 1. Stanley 제어의 개념도.

작은  $k$ 를 설정하면, 오버슈팅이 완화됨에 따라 높은 안정성이 확보되지만 경로 높은 추적 정확도를 보장할 수 없다. 따라서, 경로 추적의 높은 정확도와 안정성을 확보하기 위하여 제어 이득을 신중히 설정해야 한다.

본 논문에서 고려하는 무인 이동체는 네 개의 바퀴가 장착된 사륜 조향(four-wheel steering) 모델을 통해 주행함을 가정한다. 그림 2에 표현된 사륜 조향 모델에서는 바퀴의 반지름을  $R$ , 앞뒤 바퀴와 주행 모델 중심축 사이의 거리를 각각  $L_f$ ,  $L_r$ 로써 나타내었다. 무인 이동체의 주행을 위하여 제어기를 통해 결정된 조향각  $\delta_t$ 이 입력되면, 앞바퀴의 조향각  $\varphi_{t+1,f}$ 와 뒷바퀴의 조향각  $\varphi_{t+1,r}$ 은 다음과 같이 설정되고,

$$\varphi_{t+1} = -\varphi_{t+1,f} = \varphi_{t+1,r} = \tan^{-1} \left( \frac{\tan \delta_t}{v_t} \right) \quad (2)$$

앞바퀴의 각속도  $\omega_{t+1,f}$ 와 뒷바퀴의 각속도  $\omega_{t+1,r}$ 은 다음의 식으로 계산된다:

$$\omega_{t+1,f} = \omega_{t+1,r} = \frac{v_t}{R \cos(\varphi_t)}. \quad (3)$$

바퀴의 조향각과 각속도가 결정되면, 시간 인덱스  $t+1$ 에서의 선속도  $v_{t+1}$ 와 각속도  $\omega_{t+1}$ 를 다음과 같이 각각 계산할 수 있다:

$$v_{t+1} = \frac{R}{2} (\omega_{t+1,f} \cos \varphi_{t+1,f} + \omega_{t+1,r} \cos \varphi_{t+1,r}),$$

$$\omega_{t+1} = \frac{R}{L_f + L_r} (\omega_{t+1,f} \sin \varphi_{t+1,f} - \omega_{t+1,r} \sin \varphi_{t+1,r}). \quad (4)$$

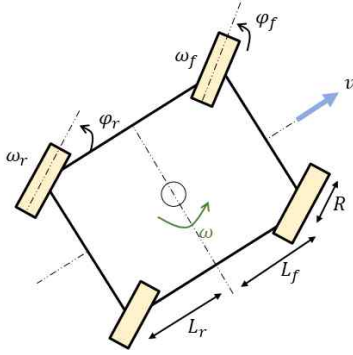


그림 2. 사륜 조향 모델의 개념도

식 (4)로 표현되는 주행 모델은 이상적인 액추에이터가 장착된 경우를 가정한다. 반면, 하드웨어적 오차/결함이 있거나 지면의 굴곡/마찰 등의 요인으로 인해 불확실성이 존재한다면, 실제 주행에 불가피한 오류가 발생한다 [2]. 본 논문에서는 시스템에 존재하는 불확실성을 반영하기 위하여 식 (4)의 이상적인 구동 모델에 잡음(noise)을 첨가함으로써 보다 현실적인 주행을 모델링한다. 제어를 통해 결정된  $\nu_{t+1}$ 과  $\omega_{t+1}$ 에 대하여 실제 구동되는 선속도  $\tilde{\nu}_{t+1}$ 와 각속도  $\tilde{\omega}_{t+1}$ 를 다음과 같이 표현한다:

$$\begin{aligned}\tilde{\nu}_{t+1} &= \nu_{t+1} + n_v, \\ \tilde{\omega}_{t+1} &= \omega_{t+1} + n_\omega.\end{aligned}\quad (5)$$

여기서  $n_v$ 와  $n_\omega$ 는 각각 각속도와 조향각에 첨가되는 확률변수로써 평균이 0이고 분산이  $\sigma^2$ 인 가우시안 분포를 따른다.

### III. 시뮬레이션 결과

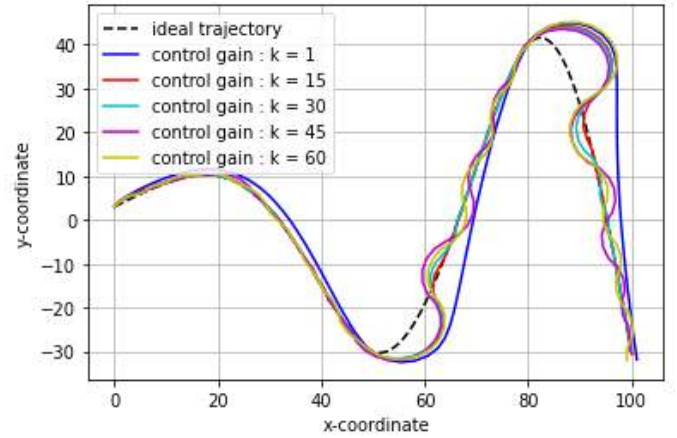
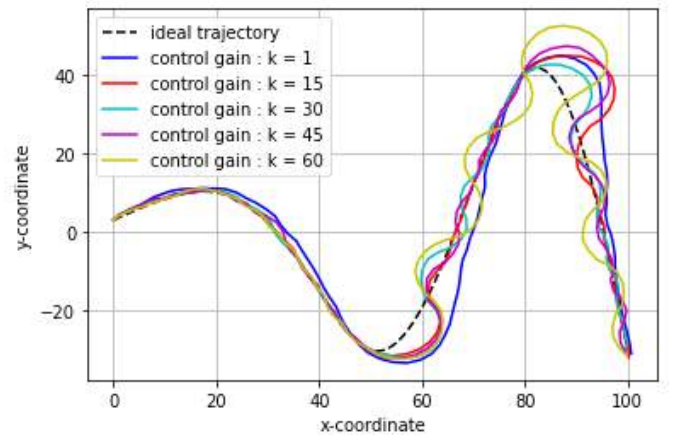
본 논문에서는 Stanley 제어 알고리즘의 제어 이득  $k$ 의 설정에 따른 경로 추적 성능을 분석하기 위하여 주어진 기준 경로에 대한 실제 주행 경로를 확인한다. 성능 분석을 위하여 표 1에 기재된 파라미터를 설정하여 무인 이동체가 100 km/h로 고속 주행하는 시뮬레이션 환경을 구성하였고 최대 조향각은  $25^\circ$ 로 제한하였다.

표 1. 시뮬레이션 파라미터.

파라미터	값
$k$	{1, 15, 30, 45, 60}
$R$	0.64 m
$L_f, L_r$	1.5 m
$\nu_x$	100 km/h
$\sigma^2$	{0, 0.5}

그림 3은 무인 이동체가 이상적인 액추에이터( $\sigma^2 = 0$ )를 통해 주행할 때, Stanley 알고리즘의 제어 이득  $k$ 에 따른 경로 추적 성능을 보여준다. 제어 이득  $k$ 를 작게 설정하면, 오버슈팅이 완화된 부드러운 경로로 주행하지만, 기준 경로의 곡률이 큰 구간에서 정확도가 크게 열화되는 사실을 관찰할 수 있다. 반대로  $k$ 를 크게 설정하면, 곡률이 큰 구간에서의 오차는 감소하지만 오버슈팅이 크게 발생함에 따라 안정성이 열화된다.

그림 4는 불확실성이 첨가된 주행 모델( $\sigma^2 = 0.5$ )을 가정했을 때, Stanley 알고리즘의 주행 경로를 보여준다. 그림 3의 결과와 비교하였을 때, 시스템에 존재하는 불확실성의 영향으로 인해 주행 경로의 정확도 및 안정성이 상대적으로 더 열화되는 사실을 볼 수 있다.

그림 3. 이상적인 주행 모델( $\sigma^2 = 0$ )에 대한 주행 경로.그림 4. 실제적인 주행 모델( $\sigma^2 = 0.5$ )에 대한 주행 경로.

### IV. 결론

본 논문에서는 Stanley 알고리즘으로 제어되고 사륜 조향 모델을 통해 구동되는 무인 이동체의 추적 성능을 분석하였다. 시뮬레이션 결과를 통하여 높은 정확도와 안정성을 보장하는 Stanley 알고리즘을 설계하기 위해서는 기준 경로의 곡률뿐만 아니라 시스템 잡음의 영향까지 신중히 고려되어야 한다는 사실을 검증하였다.

### ACKNOWLEDGMENT

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2022R1G1A1010641).

### 참고 문헌

- [1] A. Abdelmoniem, A. Osama, M. Abdelaziz, and S. A. Maged, "A path-tracking algorithm using predictive Stanley lateral controller," *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2020.
- [2] S. Thrun, W. Burgard, D. Fox, Probabilistic robotics, MIT Press, Cambridge, Mass, 2005.