

Pure-Pursuit 알고리즘의 피드백 제어 이득과 전방주시거리 설계에 따른 자율주행 자동차의 경로 추종 성능 변화

주형진¹⁾ · 이기범^{*2,3)}한라대학교 기계자동차공학부¹⁾ · 한라대학교 스마트모빌리티공학부²⁾ · 가천대학교 미래자동차학과³⁾

Changes in Path Tracking Performance of Autonomous Vehicle According to Design Feedback Gain and Look-ahead Distance of Pure-pursuit Algorithm

Hyungjin Joo¹⁾ · Kibeom Lee^{*2,3)}¹⁾School of Mechanical and Automotive Engineering, Halla University, Gangwon 26404, Korea²⁾School of Smart Mobility Engineering, Halla University, Gangwon 26404, Korea³⁾Department of Future Mobility, Gachon University, Gyeonggi 13120, Korea

(Received 19 April 2021 / Revised 18 May 2021 / Accepted 27 May 2021)

Abstract : Various researches on small autonomous driving platforms have been conducted for unmanned delivery or surveillance. Among the autonomous driving algorithms, the path tracking algorithm is the most basic algorithm for performing missions, but many vehicles have difficulty in ensuring tracking performance. The most commonly used pure-pursuit algorithm is difficult to tune and invests a lot of time because the two design parameters, such as feedback gain and look-ahead distance, have complex effects on performance. In this research, the tracking characteristics of pure-pursuit algorithm are identified, and the optimal controller conditions suitable for a small platform are determined. The tracking performance evaluation is conducted based on the ERP-42 autonomous driving platform. The controller design parameters are swept, and the maximum lateral and heading offset are measured under all parameter conditions.

Key words : Autonomous vehicle(자율주행 자동차), Look-ahead distance(전방주시거리), Path tracking(경로 추종), Pure-pursuit(푸어퍼수잇), Tracking performance(추종 성능)

Nomenclature

α	: look-ahead point angle, deg
d_{la}	: look-ahead distance, m
δ	: steering angle, deg
L	: wheel base, m
l_f	: distance of CG to front axle, m
l_r	: distance of CG to rear axle, m
m	: mass, kg
R	: curvature radius, m
T	: torque, Nm
v_x	: longitudinal speed, km/h

1. 서론

최근 무인 배송 또는 무인 경찰 등의 목적으로 소형 차량 형태의 자율주행 플랫폼에 대한 연구가 진행되고 있다.^{1,2)} 다양한 형태의 차량이 개발되고 있지만, 대부분이 차도와 골목을 다니기 위하여 차량과 동일한 형태의 전방 에커만(Ackermann) 스티어링 구조를 가지고 있다. 자율주행을 위하여 인지, 판단 등 자율주행 알고리즘이 매우 필수적이고 많은 연구가 진행되고 있지만, 목표 지점에 도달하기 위하여 생성된 경로를 정확하고 안전하게 추종하는 것 또한 필수적이다.³⁻⁵⁾ 편리하고 다양한 환경에서의 자율주행 알고리즘 개발을 위하여, 시뮬레이터와 연동한 Vehicle-in-the-Loop 시스템 등 최신 방법들이 사용되고 있지만, 비선형성을 가진 차량 동역학 경로 추

*Corresponding author, E-mail: kibeom.lee@gachon.ac.kr

[†]This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium provided the original work is properly cited.

종을 다루기 위해서는 실험이 필요하다.^{6,7)} 현재까지 정밀한 경로 추종을 위한 Linear Quadratic Gaussian(LQG), Model Predictive Control(MPC) 등 다양한 고급 추종 제어 기 연구가 진행 되어왔다.⁸⁻¹⁰⁾ 하지만 고급 제어를 사용 하더라도 실제 차량에서 튜닝 과정을 배제할 수 없고, 제어 기 설계의 어려움으로 아직도 매우 많은 자율주행 플랫폼 에서 지오메트리 기반의 추종 제어를 사용하고 있다.¹¹⁾

대표적인 지오메트리 기반 추종 알고리즘으로는 스탠 리(Stanley), 퓨어퍼수잇(Pure-pursuit) 등이 있다. 스탠 리는 DARPA Grand Challenge의 Stanley 차량에서 처음 사용 되었으며, 전방 바퀴에서의 횡방향 오차를 기반으로 피드백 제어를 진행한다.¹²⁾ 퓨어퍼수잇 또한 DARPA Grand Challenge에서 많은 차량들이 사용한 방법으로, 전 방주시거리(Look-ahead distance)의 끝 점이 추종 목표 경 로와 닿았을 때 차체와 전방주시거리 사이의 각도를 측 정하여 피드백 제어를 진행한다.^{13,14)} 두가지 추종 방법 은 추종 경로의 형태에 따라 다른 특성을 보이며 장 단점 을 가지고 있다. 퓨어퍼수잇 알고리즘의 경우 설계 변수 로 전방주시거리를 가지며, 이를 속도에 따라 적절하게 변화해가며 스탠리 방식에 비하여 속도 변화에 좋은 적 응 능력을 가지고 있다. 하지만 이와 같은 지오메트리 기 반 알고리즘의 경우 플랫폼의 속도, 크기, 무게 등 특성 에 따라서 튜닝에 큰 노력이 필요하며, 개발자들은 자율 주행 플랫폼 개발 시 추종 제어기 튜닝에 많은 시간을 할 애한다. 퓨어퍼수잇 알고리즘의 성능을 향상시키고 튜 닝 노력을 줄이기 위한 다양한 알고리즘들이 연구되고 있지만, 여러 파라미터에 대한 특성 파악이 우선적으로 필요하다.^{15,16)}

지오메트리 기반 추종 알고리즘은 추종 알고리즘 설 계 인자인 전방주시거리와 피드백 게인(Kp)에 따라 추종 특성이 변화한다. 두개의 튜닝 파라미터는 추종 성능에 미치는 영향이 서로 밀접하게 연관되어 있어 튜닝을 위 해서는 두개의 특성을 파악하는 것이 필수적이다.

이 연구에서는, 추종 성능에 영향을 미치는 두개의 파 라미터인 전방주시거리와 피드백 게인을 일정 범위 내 에서 스윕핑하여 실험을 진행하며, 각 인자가 주행 성능 에 미치는 영향을 파악하고, 최적의 제어 파라미터를 설 계한다.

2. Autonomous Vehicle Platform

이 연구에서 사용된 ERP-42 기반 자율주행 배송 플랫 폼에 대하여 설명한다. 차량의 동역학적 특성을 나타내 는 파라미터와 자율주행을 위한 센서와 제어 시스템을 설명한다.

2.1 ERP-42 based Autonomous Platform

경로 추종 제어를 위한 자율주행 플랫폼으로는 ERP-42기반의 차량을 사용하였으며, 주행 모습을 Fig. 1 에 나타내었다. 실제 차량과 동일한 사이즈의 바퀴를 사 용하고, 전방 에커만 조향을 사용함으로써 차량과 비슷 한 동역학적 특성을 가진다. 일반 차량보다 크기가 작고 가벼워 배송 플랫폼 또는 정찰용 플랫폼으로 사용이 검 토되고 있다.



Fig. 1 Autonomous delivery platform based on ERP-42

2.2 Autonomous System

자율주행을 위한 시스템으로는 LiDAR, Camera, GNSS 등 다양한 센서가 포함되어 있지만, 추종 제어를 위해서는 Real-Time Kinematic(RTK)를 통하여 기존에 생 성된 경로만을 추종한다. 전체 제어 시스템은 Robot Operating System(ROS)를 기반으로 설계 하였으며, 시스 템 구조는 Fig. 2와 같다.

차량 제어를 위하여 설치된 GNSS RTK와 제어PC에 대한 성능은 Table 1에 정리하였다.

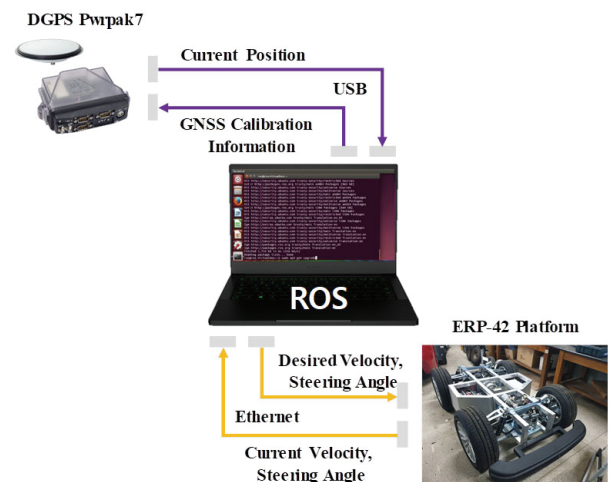


Fig. 2 Trajectory tracking system architecture

Table 1 Autonomous system specifications

	Parameter	Specification
GNSS RTK (Model: PwrPak7)	Position accuracy (RMS)	1 cm + 1 ppm
	Data rate	100 Hz
Control PC	Processor	i7-9750HF (2.6 GHz)
	Memory	16 GB

2.3 Vehicle Dynamic Parameter

자율주행 플랫폼은 소형 플랫폼의 주행 안정성 등을 고려하여 최대 주행 속도는 20 km/h로 제한되어있다. 3000 W의 주행 모터를 장착하고 있으며, 작은 크기로 인하여 일반 차량보다 매우 짧은 휠베이스를 가지고 있다. 플랫폼의 자세한 파라미터는 Table 2에 정리하였다.

Table 2 Test vehicle parameters

	Parameter	Nominal value
Speed	V_x (km/h)	15
Torque	T (Nm)	9.55 (rate)
		45 (peak)
Mass	m (kg)	222
Center of gravity point	L (m)	1.04
	l_f (m)	0.52
	l_r (m)	0.52

3. Pure-pursuit Tracking Algorithm

실험 대상인 자율주행 배송 플랫폼의 경로 추종 알고리즘인 퓨어퍼수잇 알고리즘과 경로를 추종하기 위한 피드백 시스템에 대하여 설명한다.

3.1 Feedback System for Tracking Control

자율주행 차량의 경로 추종을 위한 피드백 시스템은 Fig. 3과 같으며, 제어하고자 하는 차량 동역학과 조향 시스템 동역학으로 분리된다. 센서를 통해 측정된 오차값을 기반으로 목표 경로와의 오차를 측정하여 Pure-pursuit 방법의 결과값을 기반으로 PID 제어를 진행한다. 이 연구에서는 피드백 이득과 전방주시거리의 영향을 확인하

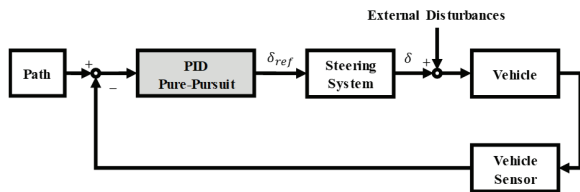


Fig. 3 Feedback control system of tracking control

기 위하여 PID 제어기 중 Kp 만을 변화시키며 성능을 비교한다.

3.2 Pure-Pursuit Algorithm

퓨어퍼수잇 알고리즘의 경로 추종 방법을 나타낸 개략도는 Fig. 4와 같다. 알고리즘의 설계 값으로 전방주시거리(Look-ahead distance, d_{la})가 결정되며, 이 길이의 시작은 후륜 축의 중앙에 위치하며, 끝은 추종 목표 경로상에 존재한다. 이 때 차량의 방향과 전방주시거리 사이의 각도(α)를 측정하고, 전방주시 거리가 목표 경로와 만나는 점으로 원운동을 하기 위한 에커만 조향 각도를 계산한다. 즉, 차량의 방향과 전방주시거리 사이의 각도(α)를 피드백 값으로 하여 경로 추종 제어를 진행한다.

에커만 조향 각을 기준으로 목표 지점까지 원호를 그리며 주행할 때, 차량이 주행하게 되는 원호의 반지름은 식 (1)과 같다.

$$R = \frac{d_{la}}{2\sin(\alpha)} \tag{1}$$

전방 조향 차량의 에커만 조향각은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있으며, 식 (1)을 대입하여 나타낼 수 있다.

$$\tan(\delta) = \frac{L}{R} = \frac{2L \cdot \sin(\alpha)}{d_{la}} \tag{2}$$

따라서 α 의 각도 차이가 발생하였을 때, 목표 경로로 수렴하기 위한 차량의 조향각은 식 (3)와 같이 계산할 수 있다. 전방주시거리는 주로 속도에 비례하여 크기를 조절하므로 $k_{pp} \cdot v_x$ 와 같이 나타낸다.

$$\delta = \tan^{-1}\left(\frac{2L \cdot \sin(\alpha)}{d_{la}}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{2L \cdot \sin(\alpha)}{k_{pp} \cdot v_x}\right) \tag{3}$$

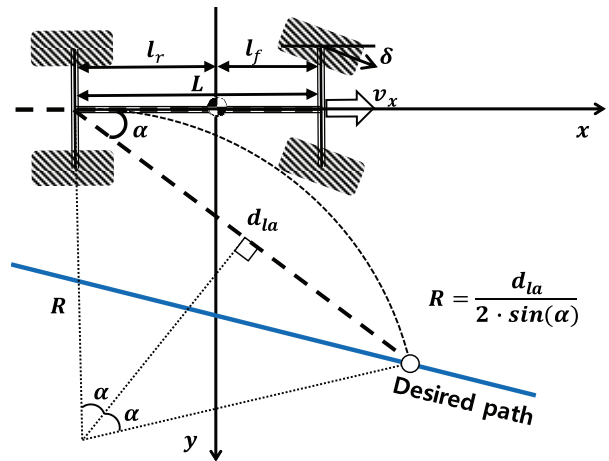


Fig. 4 Description of pure-pursuit algorithm

3.3 Look-ahead Distance Characteristics

퓨어퍼수잇 알고리즘에서 전방 주시 거리는 추종 경로와 차량 사이의 오차를 각도로 변환시켜 피드백하는 필수 요소이며, 전방주시거리에 따른 주행 특성은 Fig. 5에 나타내었다. 전방 주시 거리가 짧은 경우 빠른 피드백으로 추종 성능은 좋아지지만, 급격한 경로 변화에서 오버슈팅이 발생하고 이로 인하여 차량에는 떨림이 발생한다. 반면 전방 주시 거리가 긴 경우에는 급격한 경로 변화에서 코너 안쪽으로 회전하며 추종 성능은 떨어지지만, 오버슈팅이 발생하지 않고 부드럽게 경로로 수렴한다. 실제 제어시스템에서는 댐핑 값과 비슷한 역할을 하는 것을 볼 수 있다.

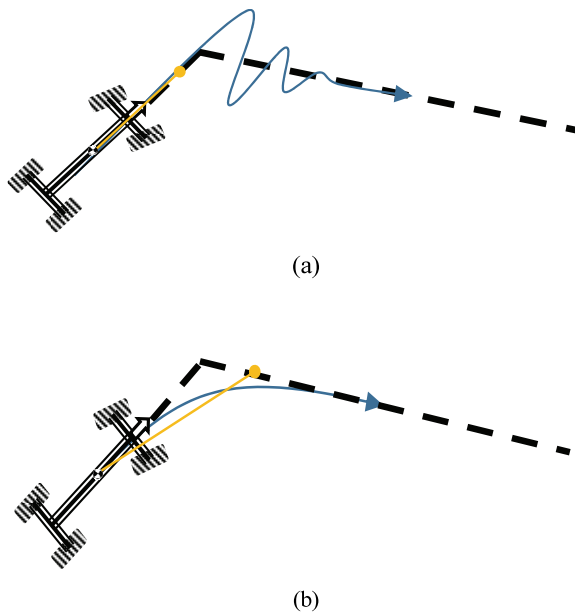


Fig. 5 Tracking characteristics according to look-ahead distance. (a) Short look-ahead distance, (b) Long look-ahead distance

3.4 Tracking Performance Metric

차량의 경로 추종 성능을 평가하기 위한 평가 지표에 대해 설명한다. 횡방향 오차(Lateral offset)와 방향 오차(Heading offset)의 측정 방법에 대해 설명한다.

3.4.1 Lateral Offset

횡방향 오차는 경로 추종의 가장 기본적인 지표로써 차량이 목표 경로와 떨어진 정도를 나타낸다. 목표 경로의 GNSS RTK Waypoint와 차량의 좌표계는 Fig. 6과 같이 나타내었을 때, 횡방향 오차는 차량의 무게중심과 가장 가까운 경로상의 Waypoint와의 거리를 계산한다.

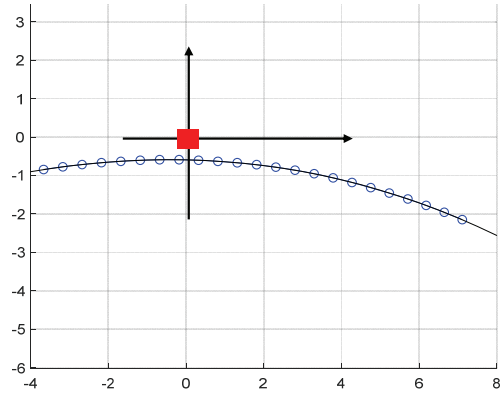


Fig. 6 Descriptions of GNSS RTK waypoint and vehicle coordinate

3.4.2 Heading Offset

방향 오차는 추종 목표 경로와 차량의 방향 차이를 나타낸다. 차량의 무게중심과 가장 가까운 경로상의 Waypoint를 선택하고 그 점에서의 경로의 접선의 방향을 계산한다. 이때, 경로의 방향과 차량의 방향 차이를 계산한다.

4. Path Tracking Experiment

실제 제어기의 피드백 계인과 전방주시거리 설계에 따른 경로 추종 성능의 변화를 확인하기 위하여 제작된 차량을 기반으로 추종 성능 실험을 진행한다. 실험 조건을 결정하고 실험 결과를 분석한다.

4.1 Experiment Settings

차량 시험을 위한 경로를 설명하고, 스위핑 하기 위한 피드백 계인과 전방주시거리의 설계 설정 값을 설명한다.

4.1.1 Tracking Path

주행 테스트 도로는 최대 직선거리는 40 m, 최소 곡률 반지름 10 m로 직선 추종 성능과 다양한 곡률 추종 성능을 평가할 수 있도록 시나리오 경로를 설정하였다. 주행 경로는 Fig. 7에서 자세하게 나타내었다.

4.1.2 Tracking Algorithm Design Parameter

퓨어퍼수잇 알고리즘에서 디자인이 가능한 변수는 속도에 따른 전방주시거리와 피드백 계인(Kp)이다. 따라서 각 계인 값의 범위를 Table 3과 같이 설정하고, 각 조합별로 스위핑하며 실험을 진행하였다. 각 파라미터가 추종 성능에 미치는 영향을 파악하기 위하여, Kp의 기준값은 1.0로 설정하였고, 전방주시거리의 기준 값은 7.5 m로 설정하였다.

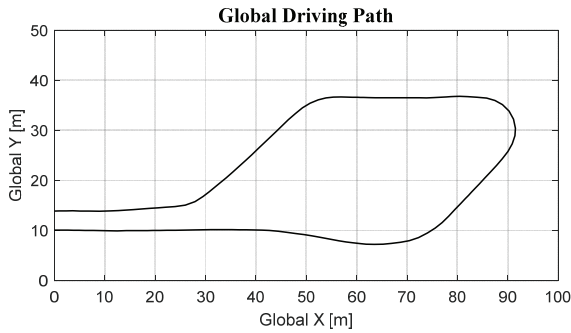
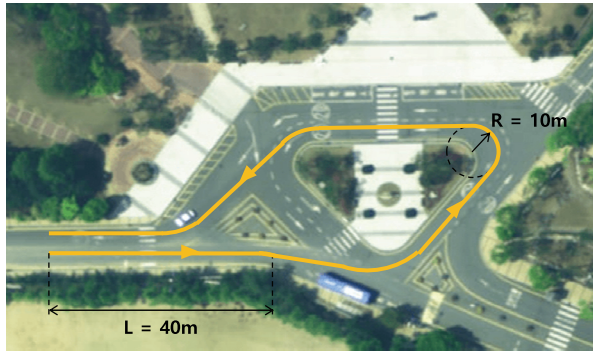


Fig. 7 Driving test path at the Halla University

Table 3 Tracking algorithm design parameter

Parameter	Value			
Feedback gain (Kp)	0.8	1.0	1.2	1.4
Look-ahead distance	7.0 m	7.5 m	8.0 m	8.5 m

4.2 Experiment Results

피드백 게인을 고정하고 전방주시거리에 변화를 주는 실험과, 전방주시거리를 고정하고 피드백 게인에 변화를 주면서 주행 특성을 분석하였다.

4.2.1 Performance Change according to Feedback Gain

전방주시거리를 7.5 m로 고정하고 피드백 게인을 0.8 부터 1.4까지 변화를 주며 실험한 결과는 Fig. 8과 같다. 피드백 게인이 0.8인 경우는 횡방향 오차가 4.34 m까지 발생하는 것에 비하여, 피드백 게인을 1.4까지 증가시켰을 때는 1.33 m까지 줄어드는 것을 볼 수 있다. 방향 오차 또한 피드백 게인이 0.8인 경우에는 71.7 deg의 오차를 보였으나, 피드백 게인을 증가시키자 37.2 deg까지 줄어드는 것을 볼 수 있었다. 피드백 게인이 커질수록 횡방향 오차와 방향 오차 모두 줄어드는 것을 볼 수 있었으며, 실험 조건의 게인 값(1.4)보다 값이 커지는 경우에는 차량이 불안정한 추종 상태를 보이는 것을 볼 수 있었다.

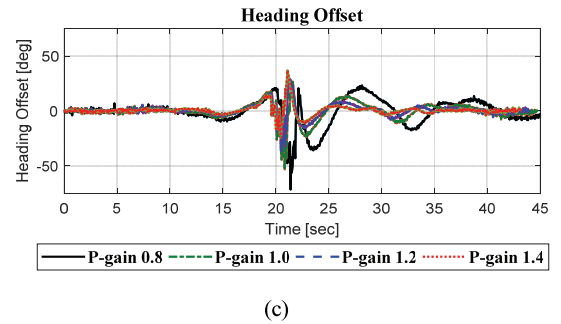
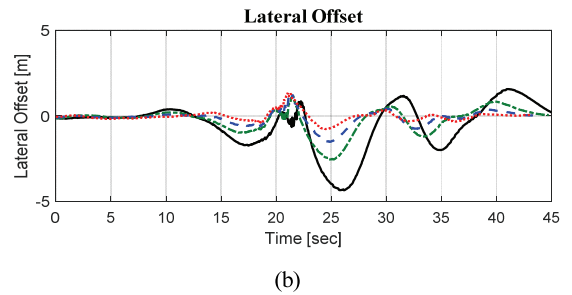
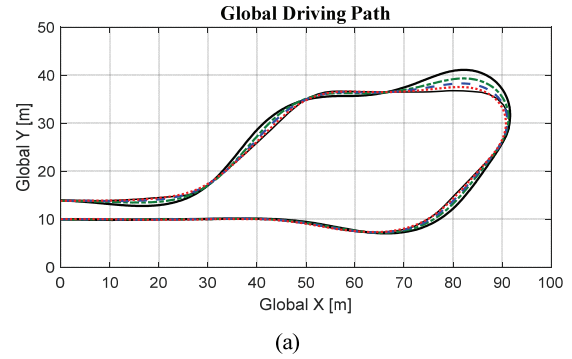


Fig. 8. Tracking performance experiment results with feedback gain changes (20 kph). (a) Global driving path, (b) Lateral offset, (c) Heading offset

4.2.2 Performance Change according to Look-ahead Distance

피드백 게인을 1.0으로 고정하고 전방주시거리에 변화를 주며 실험한 결과는 Fig. 9와 같다. 전방주시거리가 7.0 m인 경우에는 횡방향 오차가 2.34 m였으나, 전방주시거리를 늘리자 8.5 m에서 횡방향 오차가 3.14 m까지 커지는 것을 볼 수 있었다. 반면 방향 오차는 전방주시거리가 7.0 m일 때 65.2 deg에서, 전방주시거리가 8.5 m일 때 37.4 deg로 전방주시거리가 길어질수록 방향 오차가 줄어드는 것을 볼 수 있었다. 전방주시거리가 실험 조건의 최소 범위인 7.0 m보다 짧아지는 경우에는 횡방향 오차가 매우 커지며 경로를 제대로 추종하지 못하였고, 8.5 m보다 커지는 경우에는 곡선 주로에서 내부로 경로를 파고들며 연석을 넘어가는 것을 볼 수 있다.

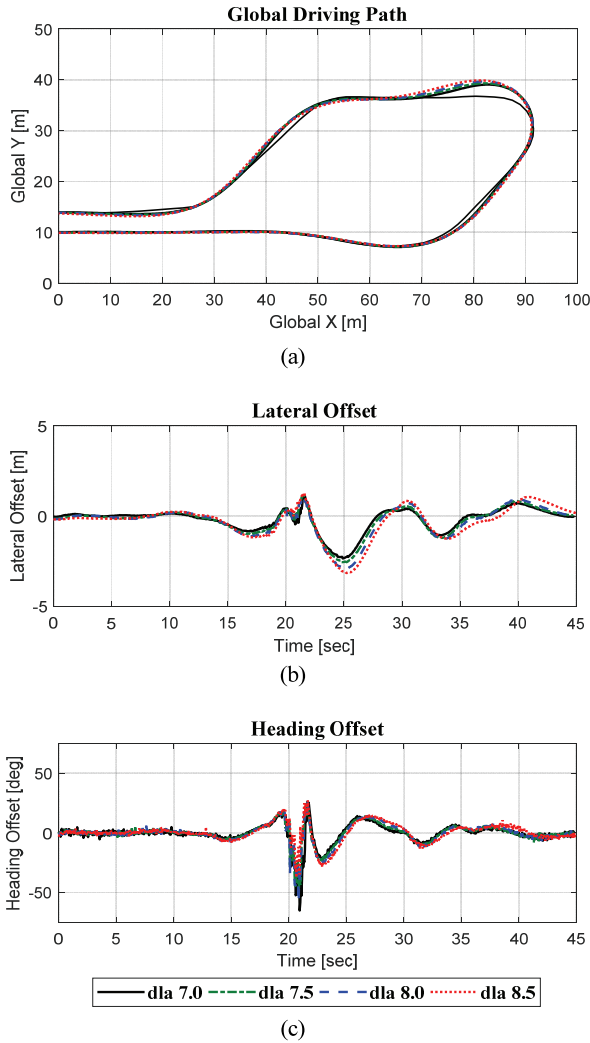


Fig. 9 Tracking performance experiment results with look-ahead distance parameter changes (20 kph). (a) Global driving path, (b) Lateral offset, (c) Heading offset

두 설계 변수의 변화를 주며 진행한 실험을 통하여 각 파라미터의 영향을 파악할 수 있었다. 피드백 게인(Kp)의 경우 커질수록 추종 성능이 좋아지는 것을 보았으며, 전방주시거리의 경우 짧을수록 추종 성능이 좋아지는 것을 보았다. 단, 피드백 게인이 너무 커지거나 전방주시거리가 기준 이하로 짧아질 경우 추종 시스템이 불안정해 지는 것을 볼 수 있었다. 또한 피드백 게인이 너무 작거나 전방주시거리가 더 길어질 경우 경로를 추종하지 못하거나 곡선 주행로에서 내부로 파고들며 주행하는 문제가 발생하여, 정상적으로 경로를 추종할 수 있는 범위 내에서 파라미터 범위를 결정하였다.

4.2.3 Optimal Design Parameter Setting

각 설계 파라미터의 영향을 파악하고, 최적의 주행 성능을 만족하기 위한 제어기 설계를 위하여 모든 파라미터 범위에 대하여 최대 횡방향 오차와 최대 각도 오차를 측정하였으며, 결과는 Table 4와 Table 5에 정리하였다.

각 파라미터 테이블에서 최대 횡방향 오차를 측정한 결과는 Table 4와 같다. 앞의 분석과 마찬가지로 피드백 게인이 커질수록 횡방향 오차가 줄어들며, 전방주시거리가 짧아질수록 횡방향 오차가 줄어드는 것을 볼 수 있다. 즉 표의 우측 상단 방향으로 갈수록 좋은 성능을 보였다.

각 파라미터 테이블에서 최대 방향 오차를 측정한 결과는 Table 5와 같다. 앞의 분석과 마찬가지로 피드백 게인이 커질수록 방향 오차가 줄어들었으나 어느정도 줄어든 이후에는 일정 값을 유지하는 것을 볼 수 있었다. 반면 전방주시거리는 길어질수록 최대 방향 오차 값이 줄어드는 것을 볼 수 있었다.

Table 4 Test results of maximum lateral offset [m]

d_{la} \ P	0.8	1.0	1.2	1.4
7.0	3.98	2.34	1.39	1.36
7.5	4.34	2.56	1.53	1.33
8.0	4.75	2.91	1.72	1.47
8.5	4.96	3.14	1.96	1.67

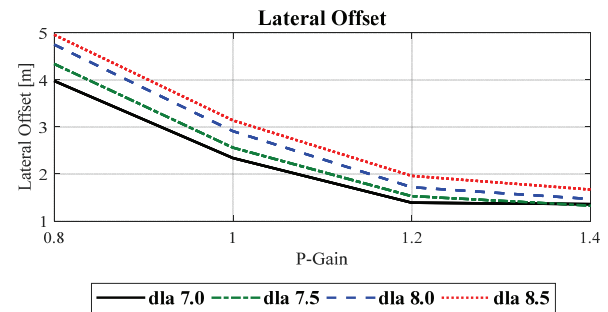


Fig. 10 Test results of maximum lateral offset

Table 5 Test results of maximum heading offset [deg]

d_{la} \ P	0.8	1.0	1.2	1.4
7.0	75.9	65.2	52.1	48.1
7.5	71.7	53.5	36.4	37.2
8.0	57.4	57.5	38.4	37.6
8.5	53.6	37.4	33.3	37.1

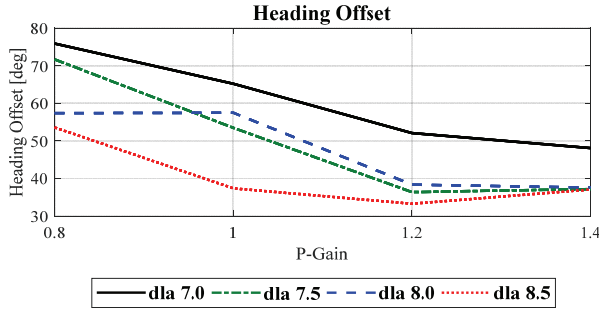


Fig. 11 Test results of maximum heading offset

피드백 게인과 전방주시거리를 종합적으로 판단하였을 때, 현재 자율주행 플랫폼의 조건에서는 피드백 게인 1.4, 전방주시거리 7.5 m가 횡방향 오차와, 방향 오차 복합적인 면에서 가장 좋은 성능을 내는 것을 볼 수 있었다. 전방주시거리의 경우 짧아지면 오차가 커지면서 좌우 떨림이 심해지고, 길어지면 곡선을 파고들게 되는데, 두 경계 사이에서 최대의 성능을 가지는 전방주시거리를 찾을 수 있었다.

5. 결론

퓨어퍼수잇 경로 알고리즘은 이론적 배경없이 제어기 튜닝을 통하여 가장 쉽게 사용할 수 있는 추종 알고리즘임에도 불구하고, 서로 연관되어 있는 설계 및 튜닝 파라미터로 인하여 좋은 성능을 내는 제어기를 설계하기 어려웠다. 이와 같은 문제를 해결하기 위하여 피드백 게인과 전방주시거리를 스위핑 해가며 실험을 진행하여, 파라미터의 변화에 따른 추종 성능 변화를 분석하였다.

피드백 게인이 커지면서 곡선에서의 추종 성능이 크게 향상되었지만, 수준 이상으로 커지면서 차량의 떨림이 심해지는 것을 볼 수 있었으며, 전방주시거리는 길어질수록 횡방향 오차는 늘어나고 방향 오차는 감소하는 트레이드오프 관계를 가지는 것을 볼 수 있었다. 또한 전방주시거리가 너무 짧아질 경우 큰 곡률에서 거동이 불안정해지는 것을 확인하였다. 위 방법을 통하여 현재 플랫폼의 조건에서는 피드백 게인 1.4, 전방주시거리 7.5 m라는 최종 제어기를 설계할 수 있었다.

이를 통하여 자율주행 자동차 뿐 아니라 자율주행 배송, 정찰 시스템 등으로 확장이 가능한 퓨어퍼수잇 알고리즘의 파라미터 특성을 확인 할 수 있었으며, 여러 자율주행 시스템의 추종 성능을 확보하는데 도움이 되고 안전성을 향상시킬 수 있을 것으로 기대한다.

후 기

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2021R1C1C004154).

References

- 1) B. Vundurthy and K. Sridharan, "Protecting an Autonomous Delivery Agent Against a Vision-Guided Adversary: Algorithms and Experimental Results," IEEE Transactions on Industrial Informatics, Vol.16, No.9, pp.5667-5679, 2019.
- 2) H. Shanavas, S. A. Ahmed and M. H. S. Hussain, "Design of an Autonomous Surveillance Robot using Simultaneous Localization and Mapping," International Conference on Design Innovations for 3Cs Compute Communicate Control, pp.64-68, 2018.
- 3) H. Shin, M. Kim and J. Kim, "Path Generation and Tracking Algorithm of Auto Valet Parking System Development," Transactions of KSAE, Vol.28, No.6, pp.389-399, 2020.
- 4) T. Lee, M. Kim and Y. Kang, "Nonlinear Model Predict Controller Strategy considering Velocity Reduction by Large Steering Angle in Extreme Maneuver," Transactions of KSAE, Vol.27, No.2, pp.133-144, 2019.
- 5) C. Park and S. Kee, "Implementation of Autonomous Driving System in the Intersection Area Equipped with Traffic Lights," Transactions of KSAE, Vol.27, No.5, pp.379-387, 2019.
- 6) C. Park and H. Lee, "Modular Vehicle in the Loop," Transactions of KSAE, Vol.27, No.6, pp.487-494, 2019.
- 7) M. Fu, J. Ni, X. Li and J. Hu, "Path Tracking for Autonomous Race Car Based on G-G Diagram," Int. J. Automotive Technology, Vol.19, No.4, pp.659-668, 2018.
- 8) K. Lee, S. Jeon, H. Kim and D. Kum, "Optimal Path Tracking Control of Autonomous Vehicle: Adaptive Full-State Linear Quadratic Gaussian (LQG) Control," IEEE Access, Vol.7, pp.109120-109133, 2019.
- 9) Y. Zhang, H. Zhao, M. Qiu, F. Qin and B. Zhang, "Model-based Control of Synchronizer Shifting Process for Trajectory Tracking Control," Int. J. Automotive Technology, Vol.21, No.4, pp.943-952, 2020.

- 10) C. Hu, H. Jing, R. Wang, F. Yan and M. Chadli, "Robust H_∞ Output-feedback Control for Path Following of Autonomous Ground Vehicles," *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol.70, pp.414-427, 2016.
- 11) M. Elbanhawi, M. Simic and R. Jazar, "Receding Horizon Lateral Vehicle Control for Pure Pursuit Path Tracking," *Journal of Vibration and Control*, Vol.24, No.3, pp.619-642, 2018.
- 12) R. Rajamani, H. Tan, B. K. Law and W. Zhang, "Demonstration of Integrated Longitudinal and Lateral Control for the Operation of Automated Vehicles in Platoons," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol.8, No.4, pp.695-708, 2000.
- 13) M. Buehler, K. Iagnemma and S. Singh, *The 2005 DARPA Grand Challenge: The Great Robot Race*, Vol.36, Springer, New York, 2007.
- 14) R. Wallace, A. Stentz, C. E. Thorpe, H. Maravec, W. Whittaker and T. Kanade, "First Results in Robot Road-following," *International Joint Conference on Artificial Intelligence Proceedings*, pp.1089-1095, 1985.
- 15) Z. Li, B. Wang, J. Gong, T. Gao, C. Lu and G. Wang, "Development and Evaluation of Two Learning-based Personalized Driver Models for Pure Pursuit Path-Tracking Behaviors," *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, pp.79-84, 2018.
- 16) H. Wang, X. Chen, Y. Chen, B. Li and Z. Miao, "Trajectory Tracking and Speed Control of Cleaning Vehicle Based on Improved Pure Pursuit Algorithm," *Chinese Control Conference*, pp.4348-4353, 2019.