

정밀 도로지도 정보를 활용한 자율주행 하이브리드 제어 전략 Hybrid Control Strategy for Autonomous Driving System using HD Map Information

유동연¹ · 김동규¹ · 최호승¹ · 황성호^{1*}

Dongyeon Yu¹, Donggyu Kim¹, Hoseung Choi¹ and Sung-Ho Hwang^{1*}

Received: 02 Nov. 2020, Revised: 12 Nov. 2020, Accepted: 21 Nov. 2020

Key Words : Autonomous Driving(자율주행), Path Tracking Algorithm(경로 추종 알고리즘), HD Map(정밀 도로 지도), Pure-Pursuit Controller(Pure-Pursuit 제어기), Stanley Controller(Stanley 제어기)

Abstract: Autonomous driving is one of the most important new technologies of our time; it has benefits in terms of safety, the environment, and economic issues. Path following algorithms, such as automated lane keeping systems (ALKSs), are key level 3 or higher functions of autonomous driving. Pure-Pursuit and Stanley controllers are widely used because of their good path tracking performance and simplicity. However, with the Pure-Pursuit controller, corner cutting behavior occurs on curved roads, and the Stanley controller has a risk of divergence depending on the response of the steering system. In this study, we use the advantages of each controller to propose a hybrid control strategy that can be stably applied to complex driving environments. The weight of each controller is determined from the global and local curvature indexes calculated from HD map information and the current driving speed. Our experimental results demonstrate the ability of the hybrid controller, which had a cross-track error of under 0.1 m in a virtual environment that simulates K-City, with complex driving environments such as urban areas, community roads, and high-speed driving roads.

기호 설명

δ : Front tire angle, rad

δ_{PP} : Pure-Pursuit control angle, rad

δ_{Stan} : Stanley control angle, rad

V : Vehicle velocity, m/s

Δy_f : Lateral offset error, m

Δy_{ld} : Offset error at look-ahead point, m

L : Wheelbase, m

l_d : Look-ahead distance, m

ψ : Heading error, rad

α : Look-ahead point angle, rad

R : Path curvature, m

k : Lateral offset error gain

k_p : Hybrid model Pure-Pursuit gain

k_s : Hybrid model Stanley gain

1. 서론

자율주행 자동차는 안전, 환경, 교통약자 등의 문제를 해결할 수 있는 새로운 대안으로 떠오르고 있으며, 4차 산업혁명 시대의 핵심 기술들과 연관된 주요 산업으로 각광받고 있다. 자율주행 기술은 미국자동차공학회(SAE) J3016 표준에 따라 레벨 0(완전 수동)부터 레벨 5(완전 자동)의 여섯 단계로 분류할 수 있다¹⁾. 최근, 국내외에서 본격적으로 부분적 자율주행에 해당하는 레벨 3 자율주행 기술에 관한 규정과

* Corresponding author: hsh0818@skku.edu
1 Department of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 16419, Korea
Copyright © 2020, KSFC

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.

관련법이 제정되고 있다²⁾. 레벨 3 자율주행 단계부터는 자율 차선 유지 시스템(Automated Lane Keeping System; ALKS)과 같은 경로 추종 기능이 포함되어 다양한 주행 환경에 강건하게 동작할 수 있는 경로 추종 알고리즘의 중요성이 높아지고 있다.

차량 제어 알고리즘에 관한 연구는 고전 PID 제어 이론에서부터 LQR 최적제어, 슬라이딩 모드 제어(Sliding Mode Control; SMC), 모델 예측 제어(Model Predictive Control; MPC) 등 다양한 이론을 바탕으로 진행되었다³⁻⁴⁾. 여러 가지 제어 알고리즘의 유효성이 제안되었지만, 모델의 복잡성과 연산 시간, 그리고 한계점이 여전히 존재한다. 모델이 단순하고 외란에 강건한 대표적인 기하학적 제어 방법인 Pure-Pursuit 제어기와 Stanley 제어기를 이용한 경로 추종에 관한 연구들이 진행되었다⁵⁻⁷⁾. 단일 제어 알고리즘을 적용할 경우 주행 속도와 경로 형상에 따라 제어 파라미터 최적화 작업을 수행해야 하며, 특정 구간에서는 제어 성능이 떨어지기도 한다. 이러한 한계를 극복하기 위해 특정 조건을 경계로 제어 로직을 스위칭하거나⁸⁾, Pure-Pursuit 제어기와 PID 제어기를 강화학습을 이용해 융합하는 연구가 진행되었다⁹⁾. 그러나 특정 조건에서 제어 로직이 전환될 경우 순간적으로 제어 입력이 불연속적으로 크게 바뀔 수 있어 안정성 측면에서 불리하다.

상기 기술한 제어 방식을 검증함에 있어 제한된 도로 형상과 주행 속도 하에서 진행되어 복합적인 주행 환경에 적용하는데 한계가 있다. 이에 본 논문에서는 차량 주행 속도와 경로 곡률 정보를 바탕으로 Pure-Pursuit 제어 알고리즘과 Stanley 알고리즘을 복합적으로 사용하는 하이브리드 제어 전략을 제시한다. 경로 추종 난이도가 높은 환경에서 각 제어기의 장점과 한계 상황을 분석하고, 상호 보완할 수 있는 제어기 융합 모델을 개발하였다. 정밀 도로지도를 이용하여 시뮬레이션 환경을 구축하고 제어 알고리즘 구성에 활용하여 하이브리드 제어기의 유효성을 검증하였다.

2. 정밀도로지도 기반 시뮬레이션

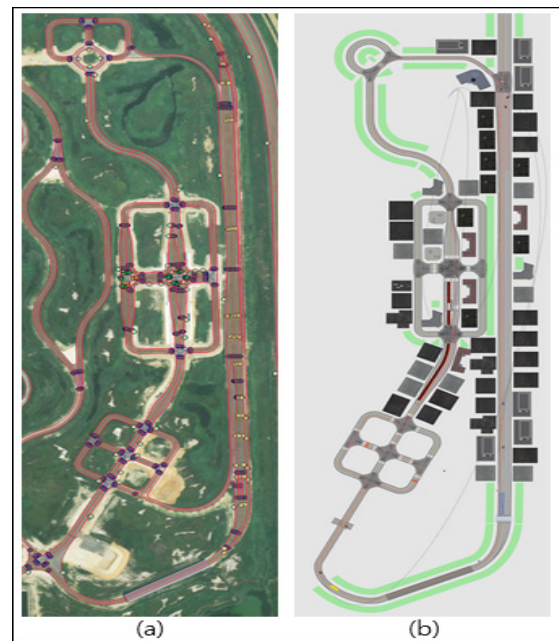
정밀도로지도란 MMS(Mobile Mapping System)차량에 설치된 GNSS/INS, 카메라, LiDAR, 차량 CAN 데이터를 이용해 정밀한 위치 정보 및 객체 속성 정보를 구축해 놓은 전자지도 데이터이다. 카메라, 라이다, 레이더 센서는 각 하드웨어의 성능에 따라 인식

범위가 제한되어 있고, 주변 환경적 영향에 따라 오차가 발생할 수 있다. 따라서 현재 수준의 센서 인식 한계를 극복하고 안정적인 측위 및 인식 시스템을 개발하기 위해 정밀도로지도 정보를 융합하는 연구가 진행되고 있다¹⁰⁻¹¹⁾.

국내에서는 국토지리정보원에서 2016년부터 고속도로 및 자율주행 시범운행구간을 시작으로 현재까지 42개 고속국도 구간과 18개 일반도로 구간에 대한 정밀 도로지도를 구축하여 제공하고 있다.

자율주행 연구에 많이 사용되는 시뮬레이션 소프트웨어(IPG CarMaker, SIEMENS Prescan, VIRES VTD 등)들은 실도로 환경의 구현을 위해 다양한 서식의 지도 정보를 불러올 수 있는 기능을 제공한다. 그러나 GIS(Geographic Information System)에 사용되는 Shapefile 포맷으로 제공되는 국토지리정보원 정밀 도로지도 데이터를 가상환경 시뮬레이터에 적용하기 위해서는 OpenDrive 포맷으로 변환하거나 위/경도 정보를 추출하여야 한다.

본 연구에서는 한국교통안전공단 자동차안전연구원의 자율주행 실험도시 K-City의 정밀 도로지도 정보를 바탕으로 IPG CarMaker 소프트웨어를 이용해 시뮬레이션 환경을 개발하였다. K-City는 도심부도로, 커뮤니티도로, 자동차전용도로, 교외도로, 자율주차 시설 등 다양한 주행 테스트 환경으로 구성되어 있어 자율주행 제어 알고리즘을 평가하기에 적합하다.



(a) Satellite and HD map, (b) Simulation environment

Fig. 1 K-City

Fig. 1 (a)는 GIS 응용 프로그램을 이용해 위성 지도와 국토지리정보원 제공 K-City 정밀지도 데이터를 불러온 모습이고, 해당 데이터를 바탕으로 Fig. 1 (b)와 같이 시뮬레이션 환경을 구축하였다.

자율주행 시뮬레이션 소프트웨어는 기본적인 차량 파워트레인/다이내믹스 모델을 비롯하여 도로 네트워크, 교통 요소 등 정적 환경과 주변 주행 차량 및 보행자 등을 이용한 동적 시나리오를 생성할 수 있으며, 카메라/LiDAR/GNSS 등 자율주행 기술 개발에 필요한 센서 데이터를 제공한다.

3. 하이브리드 제어 알고리즘

3.1 기하학적 경로 추종 알고리즘

경로 추종 알고리즘은 크게 기하학적 제어 이론과 모델기반 제어 이론으로 분류할 수 있다. 기하학적 제어 이론은 차량과 목표 경로 사이에 기하학적 관계를 이용해 제어하는 방식이며 일반적으로 모델기반 제어 이론과 비교하면 제어기가 단순하여 연산 시간이 빠르고 비교적 외란 상쇄에 이점이 있다. 그러나 모델 예측 제어 등과 달리 현시점의 상태만을 고려하여 제어를 수행하기 때문에 상대적으로 고속 주행에서 안정성 확보에 어려움이 있다^{5-7,12}.

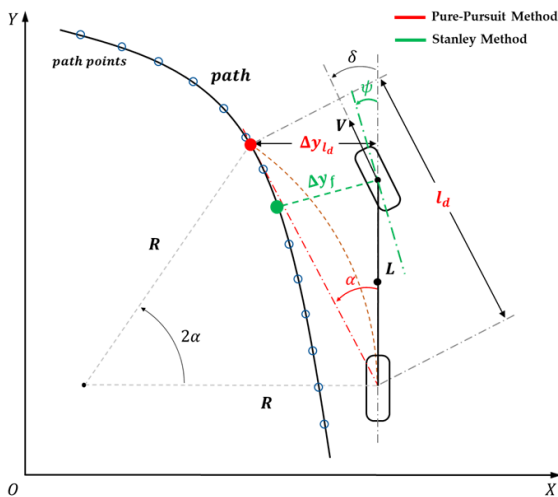


Fig. 2 Geometry of Pure-Pursuit and Stanley

• Pure-Pursuit 제어기

Pure-Pursuit 제어기는 전방 목표 경로의 특정 지점과 차량 후륜 중심을 연결하는 원호의 곡률을 이용하는 제어 방법이다. 제어 목표 지점이 되는 예견점(Look-ahead point)은 기본적으로 차량 속도에 따라 결정하며, 조향 제어 시스템의 반응성을 고려하여 거

리를 적절하게 조절함으로써 오버슈트와 수렴 시간을 제어할 수 있다. 사인(sin)법칙을 이용해 예견점과 차량 heading 방향이 이루는 각도 α 를 계산하고 2자유도 애커만 조향각(Ackerman steering angle) 모델을 적용하면 식 (1)과 같이 목표 조향 각도 δ_{pp} 를 도출할 수 있다.

$$\delta_{PP} = \tan^{-1}\left(\frac{2L\sin\alpha}{l_d}\right) \quad (1)$$

• Stanley 제어기

Stanley 제어기는 목표 경로와의 heading 각도 오차와 횡방향 오프셋(offset) 오차를 이용하는 제어 방법이다. 앞바퀴와 가장 가까운 목표 경로 점을 선택하여 해당 지점의 접선 방향과 차량 heading 방향의 차이로 heading 에러 ψ 가 결정된다. 횡방향 오프셋 Δy_f , 추종 계인 k , 차량 속도 V 를 적용하면 식 (2)와 같이 목표 조향 각도 δ_{stan} 를 계산할 수 있다.

$$\delta_{Stan} = \psi + \tan^{-1}\left(\frac{k \cdot \Delta y_f}{V}\right) \quad (2)$$

횡오차를 제어에 직접 적용하기 때문에 경로 중심으로 빠르게 수렴하는 장점이 있고, 속도를 반영하여 강건성을 확보할 수 있다¹³.

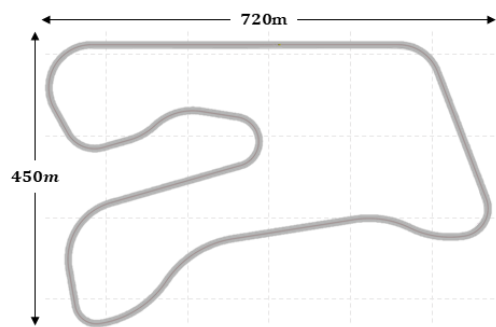


Fig. 3 Simulation track for verification of vehicle control algorithm

Jarrod의 연구 논문에서⁵ 기하학적 제어 이론의 파라미터 튜닝에 따른 차량 주행 특성을 분석한 것과 같이, 가로 720m, 세로 450m의 Fig. 3 형상의 코스에서 각 제어기의 장단점을 분석하였다. 본 연구에서는 한 가지 제어기만을 이용해 다양한 속도와 목표 경로 형상에 대응할 때 발생하는 문제점과 이를 극복할 수 있는 하이브리드 제어 전략을 제안한다.

3.2 주행 경로 보정 알고리즘

정밀 도로지도 데이터에는 차선 및 주행 차로 중심의 고정밀 위치 정보가 포함되어 있다. 정밀지도 데이터와 실시간 센서 데이터를 융합하여 측위, 인식 기술의 정확도를 향상할 수 있으며¹⁴⁾, 주행 차로 중심 위치 정보에 해당하는 링크 데이터를 레퍼런스 경로로 활용할 수 있다. 그러나 정밀 도로지도 링크 데이터는 교차로 부분이 비어있고 포인트들의 간격이 일정하지 않아 제어 명령이 불연속적으로 발생할 수 있다. 링크 데이터의 각 포인트 사이에 거리를 누적한 뒤 일정 간격으로 보간함으로써 경로 포인트를 재배치하였다. 현재 주행 차선과 다음 차선 사이를 마찬가지로 일정 간격으로 연결하였다.

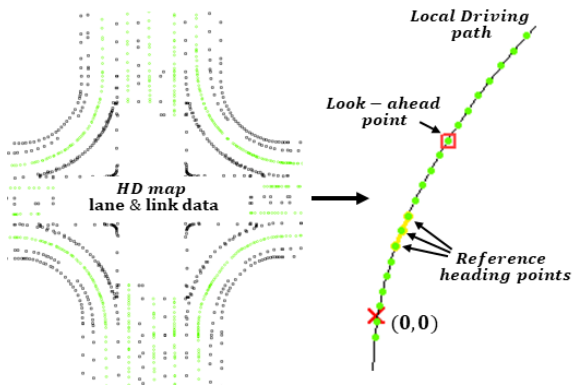


Fig. 4 HD map data and corrected driving path

3.3 하이브리드 제어 전략

시뮬레이션 환경에 스티어링 시스템의 지연 요소를 반영하기 위해 제어 알고리즘과 시뮬레이션 제어 명령 입력 사이에 1차 지연 전달함수를 구성하였다.

Pure-Pursuit 제어기는 예견점의 거리를 속도에 따라 멀리 둘수록 완만한 궤적으로 주행하게 되며, 코너 구간에서 경로의 안쪽으로 파고드는 cut-corner 현상이 크게 발생한다. Fig. 5의 급격한 코너 구간에서 다른 제어기들에 비해 상대적으로 안쪽으로 파고드는 cut-corner 현상이 Pure-Pursuit 제어 결과에 나타난다. 반대로 예견점을 가까이 둘 경우 제어에 사용되는 조향각이 커지고 시스템 반응성에 민감해지면서 오버슈트가 발생하거나 제어기 발산 위험성이 있다.

Stanley 제어기는 매우 정밀한 경로 추종이 가능하지만, 곡률이 큰 구간에서도 속도에 따라 멀리 내다보지 않고 일정한 위치를 목표로 제어하기 때문에 Fig. 6과 같이 상대적으로 변화량이 큰 조향 제어 입력값을 사용하게 된다. 따라서 차량의 슬립이나 하드웨어 반응성에 더 큰 영향을 받게 되고 경로 곡률이 급격하게 바뀌는 구간에서 안정성 확보에 어려움이 있다.

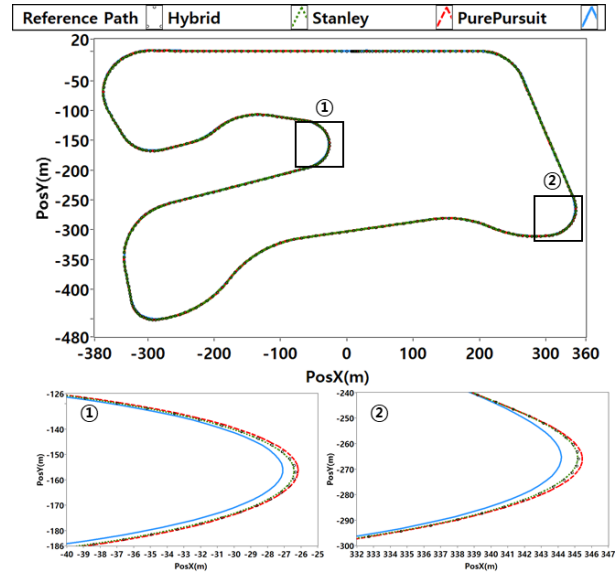


Fig. 5 Driving result on the simulation track(X, Y position)

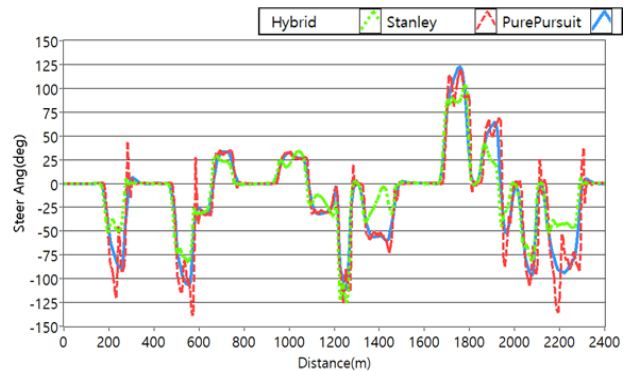


Fig. 6 Steering control input results

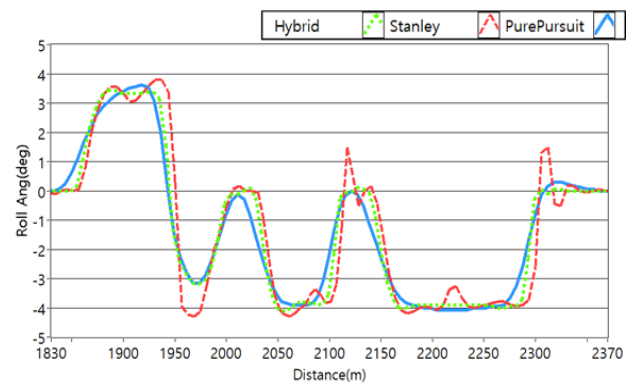


Fig. 7 Vehicle roll angle results

자율주행차량 이용 의지에 있어서 제어 정밀도와 더불어 탑승자가 느끼는 편안함과 안정감 또한 중요한 요소인데¹⁵⁾, 급격한 조향각을 이용하게 되면 Fig. 7과 같이 차량의 Roll angle이 커지기 때문에 승차감 측면에서도 불리하다.

따라서 부드러운 제어 입력으로 안정성 측면에서 유리한 Pure-Pursuit 제어기와 정밀한 경로 추종에 장점이 있는 Stanley 제어기를 복합적으로 사용하는 하이브리드 제어 전략을 이용해 높은 수준의 정밀성과 안정감을 확보할 수 있다.

제어기 융합 모델은 Fig. 8과 같이 현재 주행 속도와 주행 구간의 곡률 상태에 따라 각 제어기의 가중치를 조절한다. 곡률 정보는 로컬 인덱스(Local Index)와 글로벌 인덱스(Global Index)의 합으로 계산한다. 로컬 인덱스는 제어에 사용되는 약 40m 내외의 지역 목표 경로의 양 끝점 사이 거리에 대한 각 지점 사이 횡방향 거리 총합의 비율로 계산한다. 글로벌 인덱스는 정밀도로지도의 링크 데이터를 이어붙인 전역 경로 중 전방 200m 구간의 평균 곡률에 해당한다. 곡률 판단에 글로벌 인덱스의 비중을 높일수록 점진적인 전환이 되고, 로컬 인덱스의 비중이 높으면 곡률 변화에 민감하게 각 제어기의 가중치가 조절된다.

3장의 주행 결과와 같이 Pure-Pursuit 제어기는 연속적인 제어 입력으로 일반적인 교차로 수준의 곡률 구간에서 매우 안정적으로 주행할 수 있다. Stanley 제어기는 조향 시스템의 반응성에 따라 고속 영역 또는 불연속적인 곡률 변화 구간에서 발산 위험이 있지만, 정밀한 경로 추종이 가능하다. 따라서 Fig. 9의 그림과 같이 각 제어기의 성능이 우수한 상황에서 높은 가중치를 부여하는 융합 모델을 개발하였다. 부드러운 조향 제어에 유리한 Pure-Pursuit 제어기의 비중을 최소 35%에서 최대 85%까지 상대적으로 크게 유지하면서, Stanley 제어기는 최소 15%에서 최대 65%의 가중치를 부여하였다. 식 (1)과 (2)에서 각각 계산된 목표 조향각에 제어기 융합 모델의 결과가

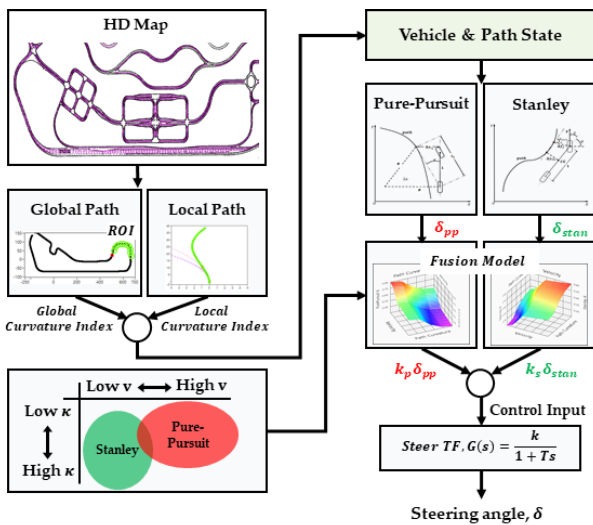


Fig. 8 Hybrid control strategy flowchart

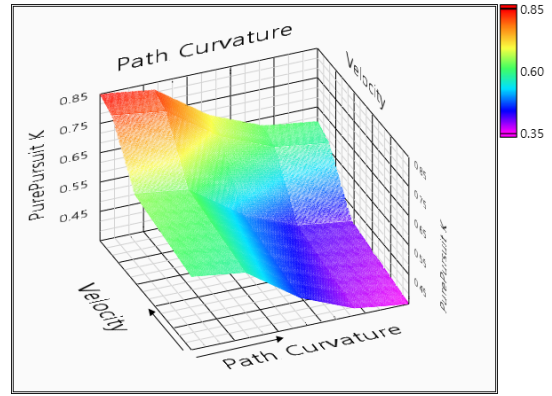


Fig. 9 Controller fusion model base on vehicle velocity and path curvature

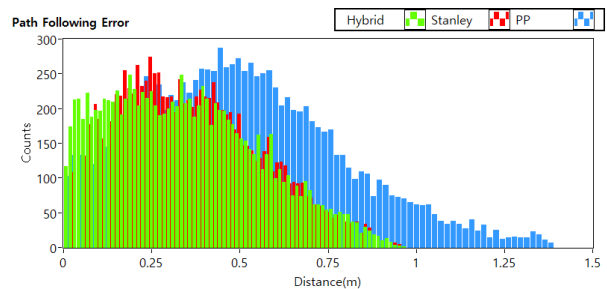


Fig. 10 RMS cross track error histogram

중치를 곱하여 최종 제어 목표 조향각을 결정한다. 계산된 제어 입력은 1차 지연 전달함수를 거쳐 시뮬레이션 차량의 조향각으로 입력된다.

$$\delta = k_p \cdot \delta_{pp} + k_s \cdot \delta_{Stan} \tag{3}$$

Fig. 3의 시뮬레이션 트랙을 최고 90kph, 평균 83kph의 속도로 고속주행 했을 때, Pure-Pursuit 제어기는 커브 구간에서의 cut-corner 현상이 발생하여 Fig. 10의 결과와 같이 상대적으로 큰 오차가 발생하였다. Stanley 제어기는 고속의 커브 구간에서도 중앙 경로를 정밀하게 지키기 위해 변화량이 큰 조향 값을 사용하고 일부 구간에서는 오버슈트가 발생하였다. 하이브리드 제어 전략을 통해 Stanley 제어기 수준의 낮은 Cross track error를 확보하면서 급격한 조향 제어를 억제하여 주행 안정성을 향상할 수 있었다.

4. K-City 주행 시뮬레이션

Fig. 3의 시뮬레이션 트랙에서 개발한 하이브리드 제어기를 자율주행 실험도시 K-City 모사 시뮬레이션 환경에서 동일하게 적용하여 주행 테스트를 진행하였다.

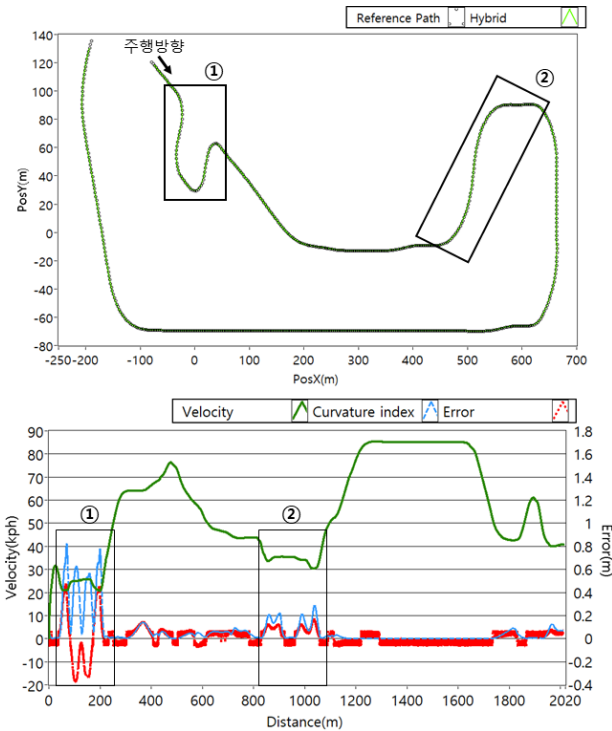


Fig. 11 Driving simulation result in K-City

단일 제어기만을 사용해 제어 알고리즘을 구성하기 위해서는 각 제어기의 한계 상황을 개선하기 위해 주행 환경에 맞춰 제어 게인 값의 최적화 과정이 필요하다. 그러나 하이브리드 제어기는 별도의 튜닝 작업 없이 K-City 환경에 적용하여도 Fig. 11의 결과와 같이 전체 구간에서 안정적으로 주행하였다. 코스 중 ①구간은 좌/우회전 도로 곡률이 매우 큰 보행자 중심의 커뮤니티부 도로이며 과속방지턱이 설치되어 있다. 최대 약 43cm의 cross track error가 발생하였지만, 차량 바퀴가 차선을 침범하는 경우는 없었다.

전체 구간에서의 평균 cross track error는 0.016m이고, RMS cross track error는 0.081m로 나타났다. Fig. 12는 전체 주행 결과에 대한 에러 히스토그램을 나타내며, 평균과 표준편차는 Table 1과 같다.

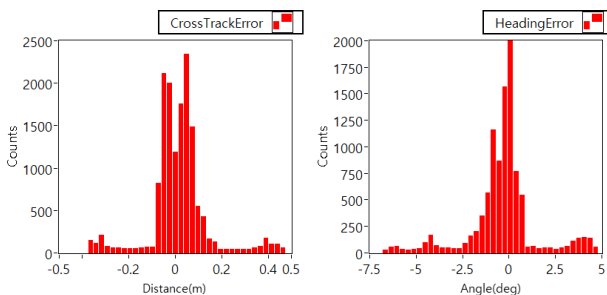


Fig. 12 Error histogram (a) Cross track error, (b) Heading error

Table 1 Mean and standard deviation of errors

	Cross Track Error(m)	Heading Error(deg)
Mean	0.016	-0.231
RMS Mean	0.081	0.772
SD	0.125	1.485

5. 결론

본 연구에서는 대표적인 기하학적 경로 추종 알고리즘인 Pure-Pursuit 제어기와 Stanley 제어기를 복합적으로 사용하는 하이브리드 제어 전략을 제안하였다. 급격한 커브와 직진 구간으로 이루어진 시뮬레이션 트랙에서 평균속도 83kph의 공격적 주행으로 각 제어 알고리즘의 특성과 한계 상황에 대해 분석하였다.

또한, 국토지리정보원에서 제공하는 정밀도로지도 데이터를 바탕으로 보정된 레퍼런스 경로를 생성하고 복합제어 알고리즘의 판단 기준이 되는 곡률 인덱스를 도출하였다. 주행 속도와 도출된 곡률 인덱스로부터 각 제어기의 가중치를 결정하는 제어기 융합 모델이 적용된 하이브리드 제어 알고리즘을 개발하였다.

자율주행 실험도시 K-City의 정밀 도로지도도를 이용해 시뮬레이션에 주행 환경을 구축하고 제안하는 하이브리드 제어 알고리즘의 유효성을 검증하였다. 각 제어기의 한계 상황을 상호 보완하면서 차선을 침범하지 않고 평균 8.1cm의 RMS cross track error의 경로 추종 제어 결과를 확인하였다.

후 기

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 교통물류연구사업의 연구비지원(전기동력 방식의 대용량 BRT 자율주행 기반기술 개발)과 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 대학ICT연구센터지원사업의 연구결과로 수행되었음.

(IITP-2020-2018-0-01426)

References

- 1) SAE, "J3016 : Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles," 2018.
- 2) UNECE, "Proposal for a new UN Regulation on uniform provisions concerning the approval of

- vehicles with regards to Automated Lane Keeping System,” World Forum for Harmonization of Vehicle Regulations, 2020.
- 3) D. H. Shin, “Design of Adaptive Neural Networks Based Path Following Controller Under Vehicle Parameter Variations,” Journal of Drive and Control, Vol.17, No.1, pp.13-20, 2020.
 - 4) K. S. Yi and J. Y. Lee, “Vehicle Dynamics Control Applications to Automobiles: Survey and Some New Trends,” Journal of Institute of Control, Robotics and Systems, Vol.20, No.3, pp.298-312, 2014.
 - 5) J. M. Snider, “Automatic Steering Methods for Autonomous Automobile Path Tracking,” Technical Report CMU-RI-TR-09-08, Carnegie Mellon University Robotics Institute, 2009.
 - 6) M. W. Park, S. W. Lee and W. Y. Han, “Development of lateral control system for autonomous vehicle based on adaptive pure pursuit algorithm,” 14th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS), IEEE, pp. 1443-1447, 2014.
 - 7) H. W. Lee, “Research on lateral error correction Pure Pursuit considering vehicle weight distribution for stable following on curved path for autonomous vehicle,” Kookmin University, 2017.
 - 8) M. Cibooglu, U. Karapinar and M. T. Söylemez, “Hybrid controller approach for an autonomous ground vehicle path tracking problem,” 25th Mediterranean Conference on Control and Automation(MED), IEEE, 2017.
 - 9) L. Chen, Y. Chen, X. Yao, Y. Shan and L. Chen, “An Adaptive Path Tracking Controller Based on Reinforcement Learning with Urban Driving Application,” 2019 IEEE Intelligent Vehicles Symposium(IV), IEEE, pp.2411-2416, 2019.
 - 10) H. G. Seif and X. Hu, “Autonomous Driving in the iCity-HD Maps as a Key Challenge of the Automotive Industry,” Engineering, Vol.2, No.2, pp.159-162, 2016.
 - 11) R. Liu, J. Wang and B. Zhang, “High Definition Map for Automated Driving: Overview and Analysis,” The Journal of Navigation, Vol.73, No.2, pp.324-341, 2020.
 - 12) J. Kong, M. Pfeiffer, G. Schildbach and F. Borrelli, “Kinematic and dynamic vehicle models for autonomous driving control design,” 2015 IEEE Intelligent Vehicles Symposium(IV), IEEE, pp.1094-1099, 2015.
 - 13) G. M. Hoffmann, C. J. Tomlin, M. Montemerlo and S. Thrun, “Autonomous Automobile Trajectory Tracking for Off-Road Driving : Controller Design, Experimental Validation and Racing,” Proceedings of the 2007 American Control Conference, 2007.
 - 14) E. Yurtsever, J. Lambert, A. Carballo and K. Takeda, “A Survey of Autonomous Driving : Common Practices and Emerging Technologies,” IEEE Access, Vol.8, 2020.
 - 15) M. Elbanhawi, M. Simic and R. Jazar, “In the Passenger Seat : Investigating Ride Comfort Measures in Autonomous Cars,” IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, Vol.7, No.3, pp.4-17, 2015.
 - 16) S. Y. Cheon, S. W. Choi and S. Y. Yang, “Development of Hydraulic Simulation Model for ESP Real Time Simulation,” Journal of Drive and Control, Vol.16, No.2, pp.36-42, 2019.
 - 17) S. Y. Cheon, S. W. Choi and S. Y. Yang, “Development of Real-time Simulator for Vehicle Electric Brake System,” Journal of Drive and Control, Vol.16, No.1, pp.22-28, 2019.