

속도 제어와 차간거리 제어 수용성 개선을 위한 종방향 알고리즘 개발

Development of Longitudinal Algorithm to Improve Speed Control and Inter-vehicle Distance Control Acceptability

김재이* · 박만복**

* 주저자 : 한국교통대학교 전자공학과 석사과정

** 교신저자 : 한국교통대학교 전자공학과 교수

Jae-lee Kim* · Man-bok Park**

* Dept. of Electronic engineering Korea National Univ, of Transportation

** Dept. of Electronic engineering Korea National Univ, of Transportation

† Corresponding author : Man bok Park, ohnuri@ut.ac.kr

Vol. 21 No.3(2022)
June, 2022
pp.73~82

pISSN 1738-0774
eISSN 2384-1729
<https://doi.org/10.12815/kits.2022.21.3.73>

Received 20 December 2021
Revised 28 December 2021
Accepted 13 June 2022

© 2022. The Korea Institute of Intelligent Transport Systems. All rights reserved.

요약

자율주행 시스템의 수용성 보장은 중요하다. 시스템 수용성 요소 중 하나인 자율주행 종방향 제어기는 상위 제어기와 하위 제어기로 구성된다. 상위 제어기는 Cruise 제어와 Space 제어를 상황에 맞는 제어를 결정하고 필요한 목표 속도를 만든다. 하위 제어기에서는 목표 속도를 추종하기 위한 가속도 신호를 만들어서 제어를 수행한다. 본 논문에서는 상위 제어기에서 Cruise 제어와 Space 제어전환 문제에서 발생하는 차간거리 변동을 개선하는 알고리즘을 제안한다. 제안한 방법은 Cruise 제어에서 Space 제어로 전환되는 시점에 Cruise 제어에 Approach 알고리즘을 추가하여 전환 거리에서 Space 제어로 전환되도록 하는 것이다. 이를 통해서 ±12m 초기 오차에서 ±4m까지 오차를 개선했으며 실차검증을 수행하였다.

핵심어 : 자율주행 종방향 제어기, 상위 제어기, Approach 알고리즘, 차간거리 변동

ABSTRACT

Driver acceptance of autonomous driving is very important. The autonomous driving longitudinal controller, which is one of the factors affecting acceptability, consists of a high-level controller and a low-level controller. The host controller decides the cruise control and the space control according to the situation and creates the required target speed. The sub-controller performs control by creating an acceleration signal to follow the target speed. In this paper, we propose an algorithm to improve the inter-vehicle distance fluctuations that occur in the cruise control and space control switching problems in the host controller. The proposed method is to add an approach algorithm to the cruise control at the time of switching from cruise control to space control so that it is switched to space control at the correct switching distance. Through this, the error was improved from 12m error to 4m, and actual vehicle verification was performed.

Key words : Autonomous vehicle longitudinal controller, Upper-level controller, Approach algorithm, Headway fluctuation

I. 서론

1. 연구의 배경 및 목적

최근 10여 년간 자율주행 제어 분야는 교통 효율성, 연비, 안정성을 증가시키는 큰 잠재력으로 많은 관심을 받고 있다. 본 논문에서 자율주행 종방향 제어기는 상위 제어기(Upper-level Controller)와 하위 제어기(Lower-level controller)로 구성되었다. 상위 제어기는 환경 센서를 통해 얻은 정보를 바탕으로 전환 여부를 결정하고 목표 속도를 만든다. 하위 제어기는 상위 제어기에서 만들어진 목표 속도를 추종하는 Brake와 Throttle input 신호를 만들어서 자율주행 차량이 제어에 필요한 감속도와 가속도를 결정하여 차량이 Space 제어와 Speed 제어를 가능하게 한다 (Zhou and Peng, 2005). Space 제어는 설정된 속도를 유지하는 것만 아니라 설정된 거리를 유지하고, Speed 제어는 설정된 속도 달성만을 목적으로 한다(Wang and Rajamani, 2004).

본 논문에서는 상위 제어기의 모드 전환을 주로 다루었다. Space 제어의 성능은 선행 차량의 주행 환경에 의존하는 경우가 많으므로 조건이 나쁜 경우 에러(Distance Error)가 크게 발생하고 에러가 제어에 직접적인 영향을 끼쳐서 자율주행 시스템 전체의 안정성을 낮추기 때문에 효율적인 전환 전략이 필요하다(Fancher and Bareket, 1994). 차간거리와 차량 종방향 제어 알고리즘은 운전자 수용성을 결정하는 주요한 요소이다. 불연속적 차량 가속과 거리 변동은 운전자와 차량을 불안정하게 만든다(Moon and Yi, 2008).

2. 기존 연구 고찰

최근 여러 연구자들이 운전자 수용성 보장을 위한 종방향 제어기의 설계와, 제어기 간의 전환 문제에 대해서 연구하고 있다. 적응형 퍼지 제어기(Holve et al., 1995)나, 두 모드의 가속도를 비교하여 최소 가속도를 적용하는 새로운 기준 속도 알고리즘(Dermann and Isermann, 1995)이 제시되었고 새로운 전환 알고리즘으로는 3가지 인자를 사용한 전환 전략이나(Zhenhai, 2016), 적응형 전환 전략이(Yang et al., 2020) 연구되었다. 그러나 연구된 전환 전략이나, 기준 속도 알고리즘으로는 선행 차량의 영향을 크게 받는 Space 제어의 특성상 전환 시 생기는 불연속적 거리 오차와 거리 조절에 필요한 제어 신호에 의해 운전자 수용성을 강건하게 보장하기 어렵다. 본 논문에서는 개선된 전환 전략으로 차량 가속도의 연속성을 보장하여 운전자 수용성을 보장하려 한다. 이를 위해서 선행 차량의 움직임(거리와 속도)을 기반(Rajamani, 2011)으로 새로운 알고리즘을 적용했다. 적용된 알고리즘은 Space 제어로 전환 될 시에 발생하는 속도 및 거리 오차와 불필요한 감속을 줄여서 자율주행 시스템의 안정성을 높이는 것을 목표로 했다.

3. 연구의 내용 및 방법

본 연구는 자율주행 시스템 중 자율주행 종방향 제어 시스템 전환 모드 중 approach 알고리즘을 추가하여 전환을 매끄럽게 하여 안정성을 높임으로써 운전자 수용성을 보장할 수 있도록 하였다.

이를 검증하기 위해서 선행 차량과 제어 차량 추종 시험을 실시하였으며, 감속 및 가속 상황과 전환 상황 그래프를 고찰하였다.

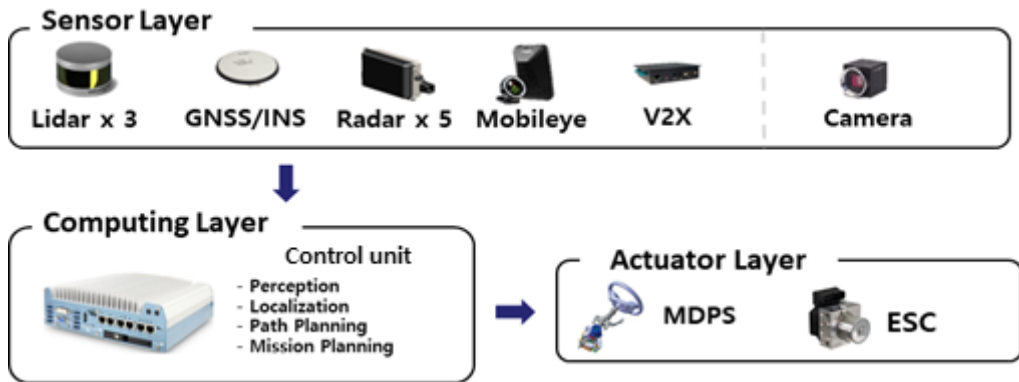
Headway time은 4초로 설정하였고, Cruise 제한 속도는 50km/h로 설정하였는데, 이는 센서 인식 범위(80m)에 근거하여 설정하고 시험했다. k-city에서 실차 시험을 수행하였다. 자율 주행 종방향 제어 차량 추종 시 운전자 수용성을 결정하는 요소인 차간거리와 상대 속도를 전환 상황에서 R-R diagram을 통해서 고찰하였다. 그 결과 차간거리와 상대 속도의 변화율이 안정적으로 개선되었음을 확인했다.

II. 본 론

1. 시스템 구성

1) Hardware composition

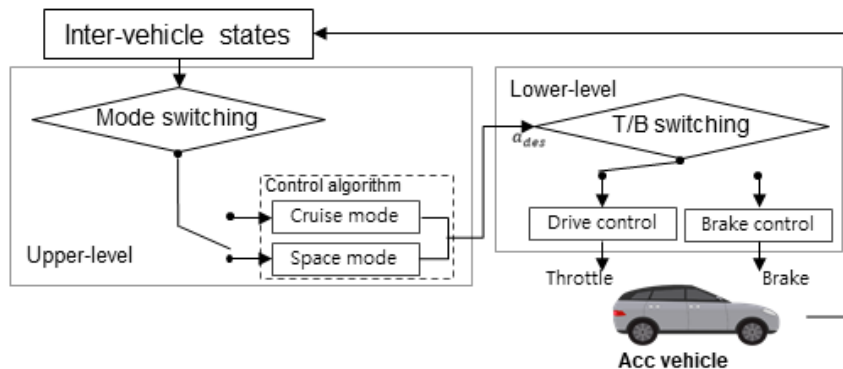
<Fig. 1>과 같이 하드웨어 구조는 센서, 계산, 구동부로 구성되며, 센서 계층(Sensor Layer)은 전방 2개의 라이다 및 후방 1개의 라이다와 5개의 레이더 센서로 구성되었다. 센서 계층을 통해서 들어온 신호로 Control unit(Computing Layer)은 자율주행에 필요한 인지, 판단, 제어에 필요한 연산을 수행한다.



<Fig. 1> Autonomous Vehicle Hardware Architecture

2) Software Composition

자율주행 차량 시스템은 일반적으로 인지, 결정, 제어로 구성되어 있다. <Fig. 2>와 같이 본 논문에서 차량 제어 알고리즘은 두 가지 영역으로 나뉜다. 상위 제어기에서는 센서의 환경 인식 정보를 근거로 필요한 제어 모드를 결정하고 필요한 목표 속도를 하위 제어기로 전달한다. 하위 제어기는 차량의 현재 속도와 목표 속도를 비교하여 목표 가속도를 구동부 계층(Actuator Layer)으로 전달한다. 구동부 계층에서는 목표 가속도를 정보로 가속 밸브와 브레이크를 이용해서 차량을 제어한다. 본 논문에서는 상위 제어기의 설계를 주로 다루었다.

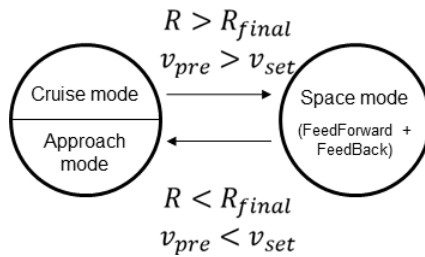


<Fig. 2> Cascaded Controller Structure

2. 알고리즘 구성

1) State Machine

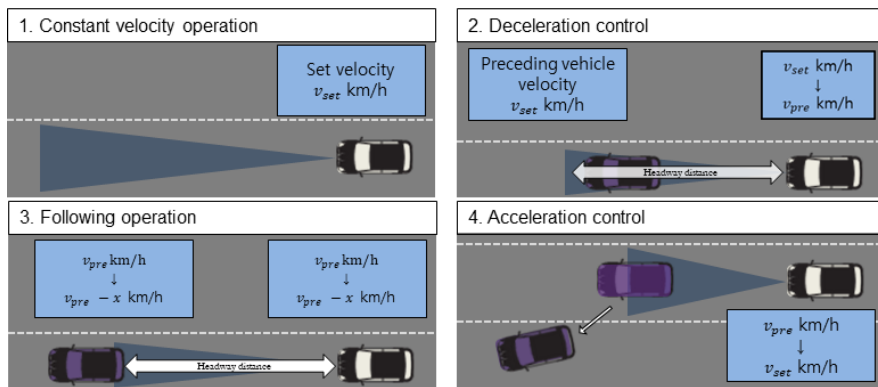
본 논문에서는 전방 저속 차량의 유무에 따라서 자기 차량과 선행 차량 간 움직임 분석을 기반 (Distance-Speed Based)으로 제어 모드가 Cruise, Space 두 가지로 나뉜다. 선행 차량과의 거리 편차(R)이 목표 거리(R_{final})값보다 크다면 감속을 위해서 Space mode로 전환된다. 반대로 선행 차량과의 R 값이 R_{final} 보다 작으면 Cruise mode로 전환되며, 선행 차량 속도(v_{pre})가 cruise mode 제한 속도(v_{set})보다 높은 경우에도 Cruise mode로 전환한다. State Machine은 <Fig. 3>과 같이 구성했다.



<Fig. 3> State Machine for Longitudinal Control System

2) 제어전환

자율주행 차량은 다양한 교통 상황에 따라서 필요한 제어를 결정하고 전환할 수 있어야 한다. 전환은 <Fig. 4>과 같이 이루어진다. <Fig. 4> 속도 유지 주행은 직진 차량이 없거나, 앞차와 운전자 차량 사이의 거리가 멀 때 등속을 유지하도록 한다. <Fig. 4> 감속 주행은 저속으로 앞서가는 차량이 감지되면 시스템이 Throttle을 사용하여 운전자 차량을 감속시키며, 필요시에 브레이크를 사용하여 감속한다. <Fig. 4> 추종 주행은 선행 차량의 뒤를 따라갈 때 Throttle과 Brake를 제어하여 차량 사이의 운전자 차량의 속도에 비례하는 차간거리(Headway Distance)를 유지한다. <Fig. 4> 가속 주행은 차선 변경과 같은 이유로 앞차가 없을 때, 시스템에 설정된 속도까지 가속한다(Zhai et al., 2011).



<Fig. 4> Longitudinal Control Mode Switching




3. 제안 알고리즘

Cruise 제어에서 Headway Distance 내에 차량이 감지된 경우에 Space 제어로 전환되기 이전에 Space 모드의 속도 편차와 거리 편차를 줄여서 시스템 안정성을 확보하기 위해 제안된 Approach 알고리즘은 Approach 인식 거리 내에 차량이 감지된 경우 속도를 근거로 상대적 저속인 경우, 자율 주행 차량은 속도 편차와 거리 편차를 줄이기 시작한다. Space 제어는 Headway distance와 상대 속도를 목표로 제어하기 때문에, 속도 편차와 거리 편차가 적을수록 안정적인 제어에 유리하다. Space 제어기로의 전환 과정에서 초기 \dot{R} 와 R 의 클 경우에 상대 거리가 제어 안정성을 보장하지 못하는 영역에 도달하여 차량이 크게 감속하여야 하며(Rajamani, 2011), 제안 알고리즘은 \dot{R} 와 R 의 변동폭을 줄여 운전자 수용성을 보장한다.

1) 제어 알고리즘

<Fig. 5>와 같이 전방 차량이 존재하지 않거나, 전방 차량의 속도가 Cruise 제어의 목표 속도보다 빠를 때 Cruise 제어로 전환된다. Cruise 제어는 자율주행 차량 속도와 Cruise 목표 속도 사이의 편차를 0으로 유지하도록 자율주행 차량의 속도와 목표 속도 사이의 편차를 기반으로 하여 PI 제어기로 설계하였다. (Vicente et al., 2012).

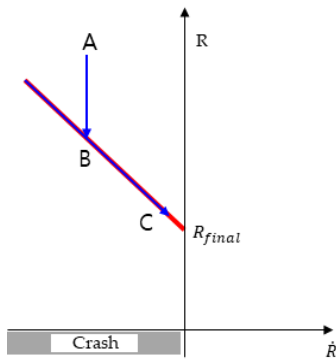
<Fig. 5>와 같이 전방 저속 차량이 Headway Distance 내에 존재하면 Space 모드로 전환된다. Space 모드의 목표는 선행 차량과의 속도 편차(\dot{R})와 거리 편차(R)를 동시에 0으로 유지하도록 P 제어기는 \dot{R} 과 R 을 기반으로 설계하였다(Vicente et al., 2012). Headway Distance 내에 전방 저속 차량이 존재하거나, 자율주행 차량이 목표 속도보다 느린 경우에 Space 모드로 전환한다.

Control mode	Motion relationship	Acceleration
Cruise	None target vehicle 	$accel_{cruise} = k_v(v_{target} - v) + k_i \int (v_{des} + v_{ego}) dt$
	If $R <$ approach algorithm distance 	
Space	If $R <$ headway distance 	$accel_{space} = k_v(v_{pre} - v)$

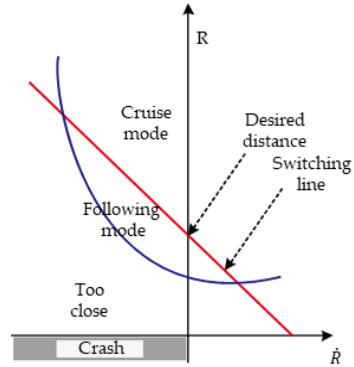
<Fig. 5> Longitudinal Control Mode for Autonomous Vehicle

2) 기존 알고리즘

기존 알고리즘은 <Fig. 6>, <Fig. 7>과 같이 A점에서 저속 차량을 만나자마자 바로 제동을 시작하지 않고, 자율 주행 차량은 원래 속도로 주행하다가 전환 라인(Switching line)인 B점을 만나면 안전을 위해서 R_{final} 지점인 C점까지 감속 주행한다. 기존 알고리즘은 안전을 위해서 감속하기 때문에 대부분의 상황에서 C점을 넘는 지점까지 감속하고, 서서히 가속하여 R_{final} 점까지 도달하도록 한다.(Wang and Rajamani, 2004)



<Fig. 6> Previous Algorithm Direction

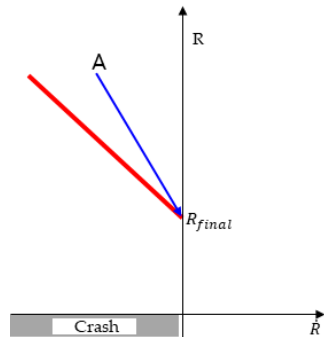


<Fig. 7> Previous Algorithm

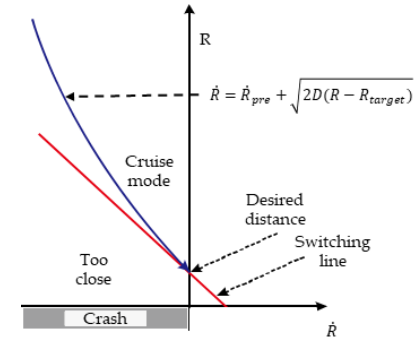
3) 제안 알고리즘

본 논문에서는 모드 전환 오차를 줄이기 위해서 approach 알고리즘을 추가하여 전환 과정에서의 \dot{R} 과 R 을 줄여서 전환 과정의 과도 상태 오차를 줄였다.

제안된 알고리즘은 <Fig. 8>,<Fig. 9>와 같이 Cruise 제어에서 전환 라인 내에 차량이 감지되어 Space 제어 로 전환되기 이전에 Space 제어의 \dot{R} 와 R 오차를 줄여준다. 따라서 기존 알고리즘과 다르게 R_{final} 로 바로 수렴되도록 하여 전환 과정의 과도 상태 오차를 줄임으로써 차량의 감속과 가속 간의 전환이 덜 일어나게 하여 시스템의 안정성을 높일 수 있다.



<Fig. 8> Suggested Algorithm Direction



<Fig. 9> Suggested Algorithm

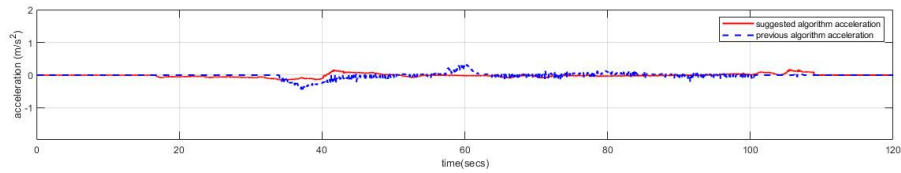
III. 시험 결과

Approach 알고리즘의 효율성을 검증하기 위해서 본 논문에서는 K-city 도로 테스트를 수행하였으며 종방향 제어 시스템 구현을 위한 차량은 G70 차량을 기반으로 제작되어 제어기와 센서는 대상 차량에 설치되었다. 모드 전환 과정이 안정적임을 보이기 위해서 시험은 감속과 가속하는 결과를 확인하고 Approach 알고리즘 적용 전후를 비교하여 결과를 확인하였다.

Approach 알고리즘을 적용한 시험 차량과 적용 전의 시험 차량으로 시험을 진행하였으며 그 외에 Cruise 제어나 Space 제어 알고리즘은 동일하게 적용하였다.

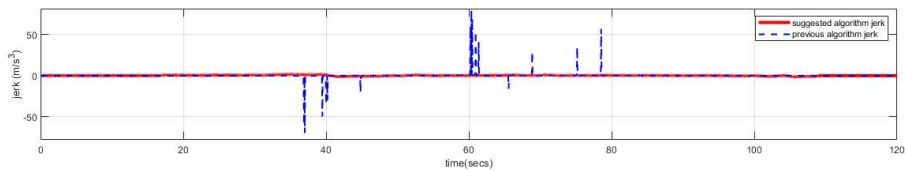
1. 개선 전후 결과 비교

<Fig. 10>과 <Fig. 11>는 제안된 알고리즘과 기존 알고리즘 간의 가속 비교 값을 나타낸다. <Fig. 10>에서 제안된 알고리즘은 진동으로부터 제어 모드 전환 과정을 안정적으로 보호한다.



<Fig. 10> Acceleration vs. time in the test

<Fig. 11>에서 제안된 알고리즘의 최대 가속률은 5.58인 반면 기존 방식의 최대 가속률을 58이며, 이 수치는 약 13배 가량 더 크다. 이로 제안된 알고리즘의 제어 모드 전환이 더 부드럽고 운전자의 수용성 측면에서 더 우수함을 증명할 수 있다.

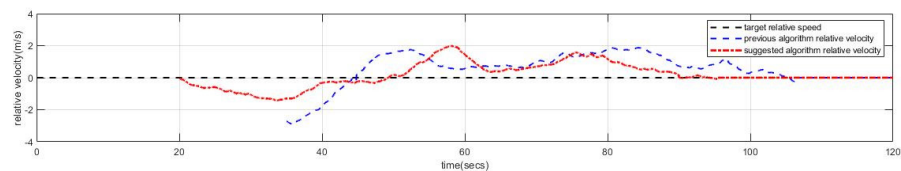


<Fig. 11> Acceleration rate vs. time in the test

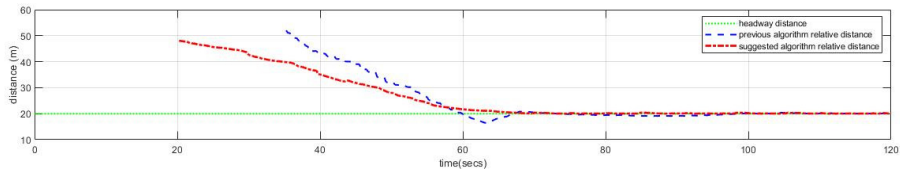
<Fig. 12>과 <Fig. 13>은 제안된 알고리즘과 기존 알고리즘 간의 자기 차량과 선행 차량 사이의 상대 속도와 상대 거리 값을 나타낸다.

<Fig. 12>은 상대 속도 값을 나타내었다. 제안된 알고리즘과 기존 알고리즘 간의 상대 속도 값은 유사하지만 제안된 알고리즘이 목표 상대 속도에 20초 가량 빨리 도달하고 안정화 된다.

<Fig. 13>에서는 상대 거리 값을 비교하였는데, 큰 차이를 확인하기 어려우나 기존 알고리즘이 목표 거리에 도달하고도 -5m가량의 오차를 가지는 반면, 제안된 알고리즘은 -0.5m가량의 오차 값만 가지는 결과를 얻었다.

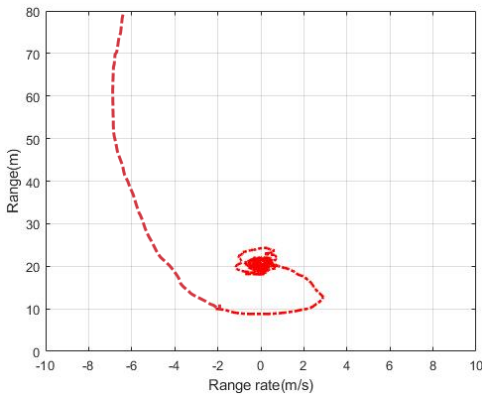


<Fig. 12> Relative velocity vs. time in the test

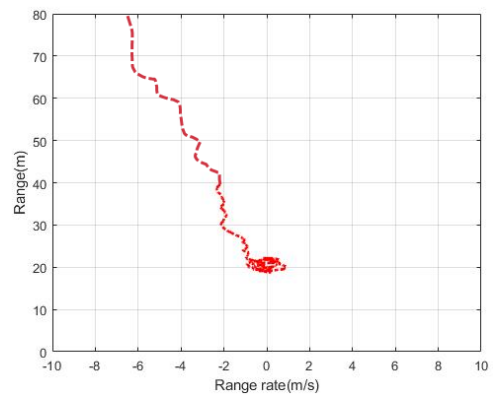


<Fig. 13> Relative distance vs. time in the test

<Fig. 14>과 <Fig. 15>에서는 $R-\dot{R}$ 다이어그램(Fancher and Bareket, 1994)을 통해서 제안된 알고리즘과 이전 알고리즘을 비교하여 얼마나 수용성 결정 요소를 개선했는지 확인하였다. R 은 12m만큼, \dot{R} 은 4m/s만큼 오차를 줄여서 제안된 알고리즘의 수용성 개선됨을 확인하였다.



<Fig. 14> Previous Algorithm $R-\dot{R}$ Diagram



<Fig. 15> Suggested Algorithm $R-\dot{R}$ Diagram

IV. 결 론

자율주행 운전자 수용성을 개선하기 위해서 본 논문에서는 Cruise 제어와 Space 제어 전환 문제에서 발생하는 차간거리 변동을 개선하는 Approach 알고리즘을 제안했다. 본 논문에서는 새로운 알고리즘을 포함한 자율주행 종방향 제어를 설계 및 검증했으며, 다음과 같은 결론을 얻었다. 모드 전환 중에 발생하는 차간거리 변동이 Approach 알고리즘에 의해서 줄어들었다. 따라서 전환 중 생기는 목표 가속도의 변경도 선형적으로 개선하여, 자율주행 종방향 제어 안정성을 강건하게 했다.

도로 시험 결과, 본 논문에서 제안하는 Approach 알고리즘을 포함한 전환 전략은 실제 교통 상황에 따라 안정적으로 제어 모드 전환을 실현할 수 있음을 보여주었다. 또한 Approach 알고리즘이 포함되지 않은 전환 전략보다 부드럽고 전환 되는 동안 목표 가속도가 더 적게 변동하였으며, 차간거리 변동과 상대 속도가 연속적으로 변함으로써 운전자 수용성이 개선되었다.

ACKNOWLEDGEMENTS

본 논문은 산업통상자원부가 지원한 ‘자율주행기술개발혁신사업’의 지원을 받아 수행된 연구 결과입니다. [과제명: Lv.4 자율주행시스템의 FailOperational 기술개발 / 과제번호: 20018055]. 본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 22AMDP-C160501-02). 또한 이 연구는 2022년도산업통상자원부가 지원한 ‘자율주행기술개발혁신사업’의 지원을 받아 수행된 연구 결과입니다. [과제명 : 수요응답형 자동발렛주차 및 서비스 기술 개발 / 과제번호 : 20018448]

REFERENCES

- Dermann, S. and Isermann, R.(1995), “Nonlinear distance and cruise control for passenger cars”, *In American Control Conference, Proceedings of the 1995, IEEE*, vol. 5, pp.3081-3085.
- Fancher, P. and Bareket, Z.(1994), “Evaluating headway control using range versus range-rate relationships”, *Vehicle. System. Dynamics*, vol. 23, pp.575-596.
- Hedrick, J. K., McMahon, D., Narendran, V. and Swaroop, D.(1991), “Longitudinal vehicle controller design for IVHS systems”, *In American Control Conference, 1991, IEEE*, pp.3107-3112.
- Holve, R. P., Protzel, J. and Bernash, K. N.(1995), “Adaptive fuzzy control for driver assistance in car-following”, *Proceedings of the 3rd European Congress on Intelligent Techniques and Soft Computing-EUFIT’ 95*, Aachen, Germany, August, pp.1149-1153.
- Lihua, L., Ping, L. and Hui, W.(2012), “Vehicle adaptive cruise control design with optimal switching between throttle and brake”, *Journal of Control Theory and 144Applications*, vol. 10, no. 4, pp.426-434.
- Möbus, R., Baotic, M. and Morari, M.(2003), “Multi-object Adaptive Cruise Control”, *Lecture Notes in Computer Science*, Springer, Berlin, vol. 2623, pp.359-374.
- Moon, S. and Yi, K.(2008), “Human driving data-based design of a vehicle adaptive cruise control algorithm”, *Vehicle. System. Dynamics*, vol. 46, no. 8, pp.661-690.
- Rajamani, R.(2011), *Vehicle dynamics and control*, Springer Science & Business Media, 2011.
- Sandberg, A., Sivencrona, H. and Törngren, M.(2007), *Setting requirements on speed and yaw rate in automotive sensor systems*, Available at www.mecel.se/about/papers/20080527-DependableTargetSelection.pdf
- Vicente, M., Jorge, V. and Jorge, G.(2012), “Comparing Fuzzy and Intelligent PI Controllers in Stop-and-Go Manoeuvres”, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 20, no. 3, pp.770-778.
- Wang, J. and Rajamani, R.(2004), “Should adaptive cruise control systems be designed to maintain a constant time gap between vehicles”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 53, no. 5, pp.1480-1490.
- Yang, L., Chunyun, F., Xiaolin, T., Cong, G. and Minghui, H.(2020), “A Comparison of Mode Switching Strategies for Adaptive Cruise Control”, *2020 4th CAA International Conference on Vehicular Control and Intelligence*, Hangzhou, China, pp.465-470.

- Zhai, Y., Lingxi, L., Glenn, R. W. and Yaobin, C.(2011), “Design of switching strategy for adaptive cruise control under string stability constraints”, *In American Control Conference(ACC), IEEE*, pp.3344-3349.
- Zhenhai, G.(2016), “Control mode switching strategy for ACC based on intuitionistic fuzzy set multi-attribute decision making method”, *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, vol. 31, no. 6, pp.2967-2974.
- Zhou, J. and Peng, H.(2005), “Range policy of adaptive cruise control vehicles for improved flow stability and string stability”, *IEEE Transaction on Intelligent Transportation Systems*, vol. 6, no. 2, pp.229-237.