

자율주행 자동차의 제어권 전환 시간 확보를 위한 차간 통신 기반 종방향 제어 알고리즘 개발

이혜원* · 송태준* · 윤영민** · 오광석***,† · 이경수****

Development of a Longitudinal Control Algorithm based on V2V Communication for Ensuring Takeover Time of Autonomous Vehicle

Hyewon Lee*, Taejun Song*, Youngmin Yoon**, Kwangseok Oh***,†, Kyongsu Yi****

Key Words : Takeover time(제어권 전환 시간), Autonomous vehicle(자율주행 자동차), Model predictive control(모델 예측 제어), Longitudinal control(종방향 제어), Fail-safe system(고장-안전 시스템)

ABSTRACT

This paper presents a longitudinal control algorithm for ensuring takeover time of autonomous vehicle using V2V communication. In the autonomous driving of more than level 3, autonomous systems should control the vehicles by itself partially. However if the driver's intervention is required for functional safety, the driver should take over the control reasonably. Autonomous driving system has to be designed so that drivers can take over the control from autonomous vehicle reasonably for driving safety. In this study, control algorithm considering takeover time has been developed based on computation method of takeover time. Takeover time is analysed by conditions of longitudinal velocity of preceding vehicle in time-velocity plane. In addition, desired clearance is derived based on takeover time. The performance evaluation of the proposed algorithm in this study was conducted using 3D vehicle model with actual driving data in Matlab/Simulink environment. The results of the performance evaluation show that the longitudinal control algorithm can control while securing takeover time reasonably.

1. 서론

현대인의 필수품으로 자리 잡은 자동차는 안전성 및 편의성을 위해 다양한 기술 연구 및 개발이 이루어지고 있다. 현재 판매되는 자동차에는 적응형 정속주행 제어(Adaptive Cruise Control) 및 차선 이탈 자동 복귀 시스

템(Lane Keeping Assist System) 등 다양한 첨단 운전자 지원 시스템(Advanced Driver Assistance System) 기술이 차량에 탑재되어 있다.

자율주행 자동차가 점차 대중적으로 확산되고 있음에 따라 운전자 및 탑승자를 위한 고장-안전 시스템의 연구 개발 또한 필수적이다. 따라서 고장-안전 시스템을 위한 다양한 연구가 이루어지고 있다.

송태준 등⁽¹⁾은 자율주행 시스템의 기능 안전을 위해 고장 단계의 판단 알고리즘을 개발하였으며 이종민 등⁽²⁾은 자율주행을 위한 고장진단의 체계에 대해서 기능적 관점으로 접근 한 방법들에 대해 설명하였다. 오광석 등⁽³⁾은 종방향 자율주행을 위해 사용되는 센서의 고장 탐지

* 한경대학교 기계공학과, 석사과정

** 서울대학교 기계항공공학부, 석박사통합과정

*** 한경대학교 기계공학과, 교수

**** 서울대학교 기계항공공학부, 교수

† 교신저자

E-mail : hyewon20@hknu.ac.kr

를 위해 다중 슬라이딩 모드 관측기를 이용한 모델 예측 기반 종방향 자율주행 센서 고장 탐지 알고리즘을 개발하였다.

고장-안전 시스템은 고장을 감지 및 재건하는 인지 단계, 고장의 정도에 따라 분류하는 판단 단계, 그리고 고장에 대응하기 위한 제어단계로 이루어진다. 제어 단계에서는 판단된 고장의 정도에 따라 정상 주행, 경고, 제어권 전환, 갓길 주차, 긴급 정지의 제어 입력이 인가되며 고장의 판단에 따라 운전자에게 선택적으로 또는 필수적으로 제어권이 전환된다. Table 1은 기존 연구를 통해 본 연구에서 고려된 자율주행 자동차의 고장-안전 체계를 나타낸다.

Table 1 Fail-safe system of autonomous vehicle¹⁾

Division	Contents
Perception	<ul style="list-style-type: none"> - Fault detection - Fault classification - Fault reconstruction
Decision	<ul style="list-style-type: none"> - Safe level - Warning level - Emergency level - Emergency stop level
Control	<ul style="list-style-type: none"> - Normal driving - Tolerant control - Takeover control - Parking on the sideway - Emergency stop

자율주행 중 고장 발생 시 고장의 정도에 따라 수동운전 모드로 전환해야 하는 상황이 발생하며, 이를 제어권 전환(Takeover)이라고 한다. 이때 수동운전 모드로 전환하는 과정이 특정 시간 내에 이루어지지 않는다면 운전자에게 치명적인 사고가 발생할 수 있다. 따라서 자율주행 자동차는 운전자가 제어권을 전환 받을 수 있는 합리적인 제어권 전환 시간이 필요하며, 이를 위한 국내외 기업 및 대학에서 다양한 연구가 이루어지고 있다.

Christian Gold 등⁽⁴⁾은 제어권 전환 시간, 충돌까지 걸리는 시간, 충돌 확률 등을 예측하는 모델을 제시하였다. 민경보 등⁽⁵⁾은 시나리오를 설계하여 운전자에게 다양한 상황에 적합한 알림을 전달할 수 있는 시스템을 제안하였다. 김두용 등⁽⁶⁾은 고장을 주입한 시뮬레이션 환경을 구축하여 고장 안전성 평가 사례연구의 활용성을 검증하였다. 김나은 등⁽⁷⁾은 인지 과정을 분석하여 작업 도메인 분석을 통한 HMI(Human Machine Interface) 아이디어를 도출하였으며 정보 유형에 따라 미치는 영향을 탐구하였

다. Moritz 등⁽⁸⁾은 실험을 통해 운전자가 다중 작업과 반응 시간의 성능이 예측될 수 있는지에 대해 분석하였다. 박정철⁽⁹⁾은 기존의 모델들을 통하여 제어권 전환을 유발하는 동기와 관련 인터페이스에 대한 설계 이슈를 분석하였으며 이강원 등⁽¹⁰⁾은 적응형 정속 주행 시스템의 영향의 평가를 위한 종방향 인간 주행 모델을 시간-속도 평면을 기반으로 개발하였다. Foghor 등⁽¹¹⁾은 운전자에게 제어권 전환 중 운전자를 적절하게 지원하는데 필요한 프레임 워크를 갖추기 위한 변수의 범위와 종속성에 대해 분석하였다.

기존 연구들을 살펴보면 자율주행 자동차의 기능 안전 향상을 위한 고장 탐지 및 운전자들의 제어권 전환 상황 분석에 따른 필요 시간에 대한 연구가 이루어졌다. 하지만 제어권 전환 상황에서의 사고를 예방하기 위해서는 특정 제어권 전환 시간을 유지하며 주행하는 안전 확보 제어가 필수적이다. 따라서 본 연구에서는 자율주행 시 제어권 전환 상황에서의 안전 확보를 위해 선행차량 속도 기반 종방향 제어 알고리즘을 개발하였다. 가정된 상황은 센서의 고장으로 인해 제어권 전환 알림을 준 시점부터 선행차량 및 자차량의 정보를 알 수 없으며 따라서 마지막 계측된 데이터를 이용하여 제어권 전환 가능 시간을 도출하였다. 또한 제어권 전환 가능 시간 수식을 기반으로 요구 제어권 전환 시간을 적용한 desired clearance를 도출하도록 종방향 제어 알고리즘을 설계하였다. 이를 위해 선행차량의 속도를 세 가지 조건으로 구분하여 시간-속도 평면에서 운전자가 제어권 전환 가능한 시간을 도출하였으며, 요구 제어권 전환 시간을 기반으로 속도 및 가속도 조건에 따른 desired clearance를 도출하였다. 도출된 desired clearance를 이용하여 모델 예측 제어 알고리즘 기반 desired clearance 추종 제어 알고리즘을 제안하였다. 본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 2 장에서는 제어권 전환 시간 도출에 대해 기술하며, 3 장에서는 도출된 제어권 전환 시간을 기반으로 종방향 제어 알고리즘을, 4 장에서는 모델 예측 제어와 3 차원 차량 모델을 기반으로 성능 평가를 보여준다. 5 장에서는 향후 계획을 비롯한 결론을 기술한다.

2. V2V통신을 이용한 선행차량 속도 기반 제어권 전환 시간 도출

미국 자동차공학회(The Society of Automotive Engineers, SAE)에서 제시한 자율주행 기술 레벨에서는 level 3 이하의 기술은 주행 중 비상 상황 발생 시 운전자의 개입을

통한 대처가 필요한 단계라고 정의하였다. 또한 고도화된 level 4의 기술에서 센서 및 액추에이터의 고장 발생 시 운전자의 개입을 통해 사고를 방지함으로써 운전자 및 보행자의 안전을 확보할 수 있다. 고장-안전 시스템의 제어권 전환은 자율주행 모드 중 특정한 상황으로 인하여 운전자에게 수동 주행모드로 전환을 하는 것을 의미한다. 또한 운전자의 안전을 위해서는 운전자에게 제어권 전환 가능 시간을 적용함으로써 특정 시간 내에 운전자의 신호 입력이 정확하게 이루어지지 않는다면 갓길 주차 또는 긴급제동과 같은 제어를 통한 제어 입력이 필요하다. 본 연구에서는 V2V 통신을 이용하여 선행차량의 속도 정보가 획득되었을 때의 상황을 가정하여 제어권 전환 시간을 도출하였다. 또한 제어권 전환 시간을 도출하기 위한 주행 조건은 V_p (선행차량의 속도)가 $0[m/s]$ 일 때와 V_s (자차량의 속도)를 기준으로 V_p 가 큰 경우와 작은 경우 세 가지의 경우로 구분하였다. Table 2는 가정된 세 가지의 경우의 구분된 조건을 나타낸다.

Table 2 Divided condition of assumed cases

Division	Case-1	Case-2	Case-3
Condition	$V_p = 0$	$V_p > V_s$	$V_p \leq V_s$

2.1. 선행차량의 속도가 $0[m/s]$ 의 상황에서의 제어권 전환 시간 도출

다음의 가정된 상황은 선행차량이 차선을 변경하였을 때 정지해있는 차량이 있거나 장애물이 있는 상황에 대하여 적용 가능하며, Fig. 1은 다음의 가정된 상황을 보여준다.

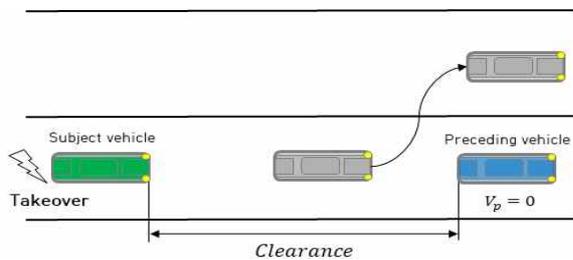


Fig. 1 Assumed situation of case-1 ($V_p = 0$)

위와 같은 주행 상황은 도로에서 빈번히 발생할 수 있고, 관련 상황의 제어권 전환 시간을 TOT(Takeover Time)로 정의하였으며, TOT의 도출을 위해 시간-속도 평면에서 기구학적 분석을 수행하였다. Fig. 2는 제어권 전환 가

능 시간을 도출하기 위한 시간-속도 그래프 및 제어권 전환 시 선행차량과의 거리를 나타내며 TOT를 기점으로 두 영역을 A1 및 A2로 구분하여 나타냈다. Braking point는 제동장치에 신호가 들어오는 시점을 나타내며 stop point는 차량이 정지한 시점을 나타낸다. 은 case-1의 제어권 전환 시간을 의미한다.

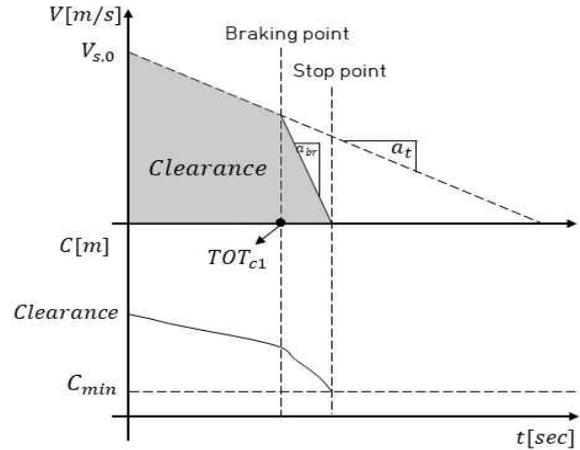


Fig. 2 Time-velocity graph for derivation of takeover time (case-1 : $V_p = 0$)

Case-1에서는 고장이 발생하고 선행차량의 정보를 알 수 없기 때문에 자차량의 속도만을 이용해 시간-속도 평면에서 기구학적 분석을 수행하였으며 고장 발생 전 마지막 계측된 선행차량과의 거리 값을 이용하여 제어권 전환 시간을 도출하였다. 고장 발생 후 제어권 전환 시간 동안 운전자의 제어가 정확하게 입력되지 않는다면 제동감속도(a_{br})를 통해 긴급제동이 이루어져야 하며 갑작스러운 긴급제동으로 인한 운전자의 사고를 방지하기 위해 제어권 전환 시간 동안에는 특정한 값을 적용한 감속도(a_t)가 필요하다. 제어권 전환 시간 동안의 특정 감속도(a_t)는 긴급 제동이 필요한 상황 전 제어권 전환 동안 차량의 거동을 결정하는 감속도이며 향후 다양한 관점에서의 설계가 가능하다. 따라서 제동감속도(a_{br}) 및 제어권 전환 시간 동안의 감속도(a_t)의 조건을 적용하여 제어권 전환 시간을 도출하였다. Fig. 2에서는 제어권 전환 알림이 이루어진 후 자차량이 특정감속도(a_t)로 감속하는 그림을 나타낸다. 정지를 위한 거리를 제외한 영역을 braking point로 정의하였으며 이때가 제어권 전환 가능 시간 (Takeover time)이 된다. Clearance는 센서 고장 전 마지막 선행차량과의 거리 값이며, C_{br} 은 긴급제동 시 차량이 정지하는데 필요한 거리이다. 전체 clearance에서

C_{br} 을 제외한 거리를 이용하여 도출된 TOT를 기점으로 영역을 구분하여 다음과 같은 식을 도출하였다. Fig. 3은 clearance와 C_{br} 을 각각 A1, A2로 구분한 영역을 나타내며 영역을 도출하면 수식 (2), (3)과 같다.

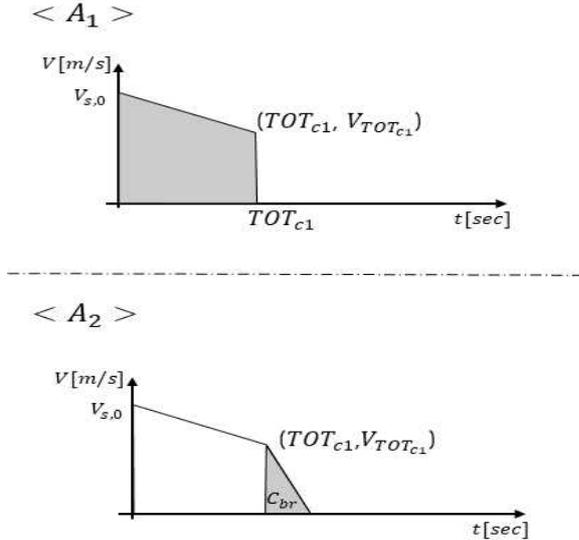


Fig. 3 Separated areas (case-1 : $V_p = 0$)

$$V \tag{1}$$

$$A_1 = \frac{1}{2} \tag{2}$$

$$A_2 = -V \tag{3}$$

수식 (1)은 제어권 전환 시점에서의 속도 수식이며 수식 (2)는 시간-속도 평면에서의 사다리꼴 공식을 통해 도출하였다. 수식 (3)은 제동거리 공식을 통해 도출하였으며 위 수식들은 각 영역의 면적인 거리를 의미하며 두 면적의 합은 충돌을 방지하기 위한 최소한의 거리(C_{min})을 제외한 거리이다. 이 거리를 C_{eff} 라고 정의하였으며 따라서 현재 clearance에서 최소한의 거리(C_{min})를 제외한 영역을 의미한다. A1과 A2 두 영역의 합은 C_{eff} 와 같으며 따라서 다음의 조건을 기반으로 TOT를 도출할 수 있다.

$$C_{eff} = A_1 + A_2 = \frac{1}{2} \tag{4}$$

$$\pm \left(\frac{\sqrt{V_{s,0}^2 (a_{br,t})^2 - a_t a_{br,t} (-2C_{eff} a_{br} - V_{s,0}^2)}}{a_t a_{br,t}} \right) \tag{5}$$

$a_{br,t} = a_{br} - a_t$ 이고, 수식 (4)은 두 영역의 합인 C_{eff} 를 나타내며 수식 (5)는 도출된 TOT를 나타낸다. 다음 2.2절에서는 선행차량의 정보를 획득한 상황을 가정한 제어권 전환 시간 도출에 대해 기술한다.

2.2. 선행차량의 속도를 고려한 제어권 전환 시간

다음의 상황은 선행차량의 정보를 V2V 통신을 이용하여 실시간으로 속도를 받는 상황을 가정하였으며 V_p 가 V_s 보다 빠를 때와 느릴 때의 두 가지 상황으로 구분하였다. 제어권 전환 시간 도출을 위해 시간-속도 평면에서의 기구학적 분석을 수행하였으며 case-1과 마찬가지로 영역을 구분하여 합한 값을 통해 TOT를 도출하였다.

2.2.1. 선행차량의 속도가 자차량의 속도보다 빠른 상황을 고려한 제어권 전환 시간 도출

선행차량의 속도가 자차량의 속도보다 빠를 때는 고장 발생시 불가피한 사고를 예방하기 위해 선행차량이 제동 감속도(a_{br})를 통해 긴급 정지를 하는 상황으로 가정하였다. 또한 case-1의 상황과 마찬가지로 자차량은 운전자의 사고를 방지하기 위한 제어권 전환 시간 동안의 감속도(a_t) 및 제동감속도(a_{br})의 조건을 적용하였다. 선행차량의 속도가 자차량의 속도보다 빠를 상황이기 때문에 선행차량의 속도가 자차량의 속도가 같아지는 시점까지는 clearance 값이 증가하며 자차량의 속도가 빠를 시점부터는 clearance가 지속적으로 감소한다. 또한 case-1의 상황과 마찬가지로 제어권 전환을 받지 못한다면 긴급 정지를 해야하는 braking point를 제어권 전환 가능 시간으로 정의하였다. 따라서 자차량의 고장 발생 및 제어권 전환 알림이 주어진 후 선행차량은 제동감속도로 감속을 하며 자차량은 특정 제어권 전환 감속도로 감속을 한다. Fig. 4는 선행차량의 속도가 자차량의 속도보다 빠를 때의 시간-속도 그래프 및 제어권 전환 동안의 선행차량과의 거리를 나타내며 Fig. 5는 clearance와 C_{br} 을 각각 A1, A2, A3로 구분한 영역을 나타낸다.

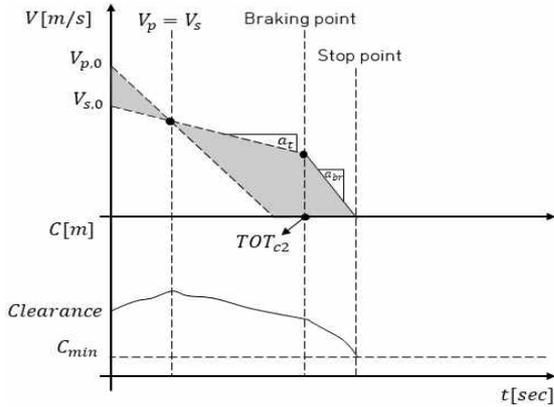


Fig. 4 Time-velocity graph for derivation of takeover time (case-2 : $V_p > V_s$)

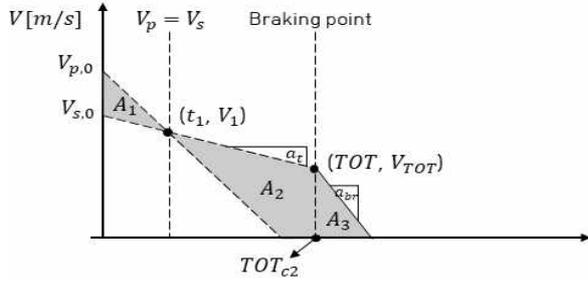


Fig. 5 Separated areas (case-2 : $V_p > V_s$)

다음의 영역을 도출하면 아래의 수식과 같다. 수식 (6), (7), (8)은 도출된 거리 영역을 의미한다. 수식 (9)는 C_{min} 를 제외한 거리 C_{eff} 를 나타내며, $V_p = V_s$ 시점까지는 선행차량과의 거리가 증가하므로 A_1 의 영역만큼 감소한다. 수식 (10)은 제어권 전환 시간을 도출하기 위한 수식을 나타낸다.

$$A_1 = \frac{1}{2}t_1(V_{p,0} - V_{s,0}) \quad (6)$$

$$A_2 = (V_1 + V \quad (7)$$

$$A_3 = V \quad (8)$$

$$C_{eff} = -A_1 + A_2 + A_3 \\ = -\frac{1}{2}t_1(V_{p,0} - V_{s,0}) + (V_1 + V \quad (9) \\ \left(\frac{a_t}{2} - \frac{a_{br}^2}{2a_{br}}\right)$$

$$+ C_{eff} - \frac{1}{2}N(V_{p,0} - V_{s,0}) - \frac{MN}{2} - \frac{V_{s,0}^2 + V_1^2}{2a_{br}} = 0 \quad (10)$$

$$M = a_t \left(\frac{V_{p,0} - V_{s,0}}{a_t - a_{br}} \right) + 2V_{s,0} \quad (11)$$

$$N = \left(\frac{V_{p,0} - V_{s,0}}{a_t - a_{br}} \right) \quad (12)$$

수식 (11), (12)는 수식 (10)의 제어권 전환 시간 도출을 위해 정리된 부분적 수식을 나타낸다.

2.2.2. 선행차량의 속도가 자차량의 속도보다 느린 상황을 고려한 제어권 전환 시간 도출

선행차량의 속도가 자차량의 속도보다 느릴 때는 case-2 상황과 마찬가지로 고장 발생 후 선행차량이 제동감속도 (a_{br})를 통해 긴급 정지를 하며 자차량은 제어권 전환 시간 동안의 감속도(a_t)로 감속 후 제동감속도(a_{br})를 적용하는 상황을 가정한다. 선행차량이 자차량보다 속도가 느리기 때문에 선행차량과의 거리(Clearance)는 꾸준히 감

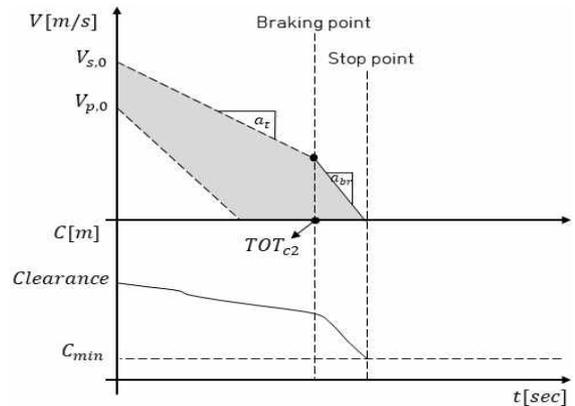


Fig. 6 Time-velocity graph for derivation of takeover time (case-3 : $V_p \leq V_s$)

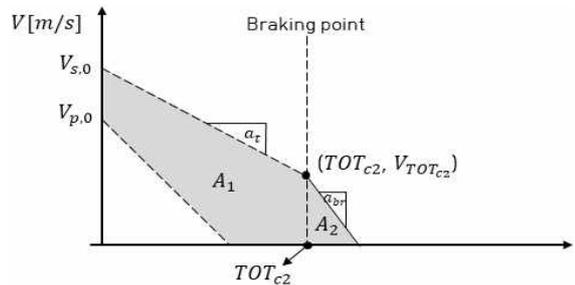


Fig. 7 Separated areas (case-3 : $V_p \leq V_s$)

소하며 다른 상황과 마찬가지로 제어권 전환을 받지 못한 다면 긴급 정지를 해야하는 braking point를 제어권 전환 가능 시간으로 정의하였다. 다음의 구분된 기점으로 영역을 도출하였으며 Fig. 6, Fig. 7은 두 조건의 구분된 영역을 나타낸다.

다음의 영역을 도출하면 아래의 수식과 같으며 수식 (13), (14)는 도출된 거리 영역을 의미한다. 수식 (15)는 C_{eff} 를 나타내며, case-1의 거리 영역에서 선행차량이 정지하는데 필요한 영역을 제외한 나머지 영역을 나타낸다. 수식 (16)은 제어권 전환 시간을 도출하기 위한 수식을 나타낸다.

$$A1 = \frac{1}{2} \tag{13}$$

$$A2 = -V \tag{14}$$

$$C_{eff} = A1 + A2 = \frac{1}{2} \tag{15}$$

$$\left(\frac{a_t}{2} - \frac{a_t^2}{2a_{br}}\right) + \frac{V_{p,0}^2 - V_{s,0}^2}{2a_{br}} - C_{eff} = 0 \tag{16}$$

3. 제어권 전환 시간 기반 종방향 제어 알고리즘

자율주행 중 센서 고장 발생 시 그에 대한 대응으로 센서 대체 및 허용 제어가 가능한 상황 혹은 대체 및 허용 제어가 불가능한 상황이지만 선행차량과의 충분한 거리가 있을 때는 운전자에게 제어권을 전환함으로써 기능 안전을 확보해야 한다. 자율주행 시스템으로부터 제어권 전환 알림이 주어진 후 운전자의 부주의 및 짧은 제어권 전환 시간으로 인해 운전자에게 제어권 전환이 합리적으로 이루어지지 못할 수 있다. 이러한 상황은 선행차량과 함께 주행하는 경우 충돌에 의한 치명적인 사고가 유발할 수 있기 때문에 합리적인 제어권 전환 시간 확보 및 충돌 방지를 위해서는 긴급제동 기술이 필요하다. 이때 사고를

방지하기 위해서는 충분한 안전거리가 확보되어야 하며 또한 자율주행 자동차는 앞서 기술된 대응 방안으로써 운전자에게 합리적 제어권 전환을 위해 주행 시 선행차량과의 적절한 거리 유지가 필요하다. 그러므로 본 연구에서는 특정 제어권 전환 시간 적용을 통해 안전을 확보하면서 제어권 전환 시간을 확보할 수 있는 종방향 제어 방법을 제안한다. 2장에서 도출한 제어권 전환 시간 도출 함수를 기반으로 $C(k)$ 라고 정의한 현재 선행차량과의 거리에 대해 정리하여 desired clearance를 도출하였으며, 수식 (17)은 case-1의 desired clearance를, 수식 (18)은 case-2의 desired clearance를, 수식 (19)는 case-3의 desired clearance를 도출하였다. 그러므로 특정 요구 제어권 전환 시간인 TOT_{des} 값의 정의를 통해 요구되는 선행차량과의 거리를 도출하였으며, 아래 식 (17), (18), (19)는 가정된 3가지 조건의 특정 TOT_{des} 를 도출하기 위한 수식 (5), (9), (15)를 통해 도출된 요구 거리를 나타내며 Fig. 8은 제어권 전환 시간을 고려하는 desired clearance 계산 과정의 모델 개략도를 보여준다.

$$C_{des.c1}(k) = -\frac{1}{2a_{br}} V_{s,0} + a_{br,t} + a_t a_{br,t} \tag{17}$$

$$C_{des.c2}(k) = -\frac{1}{2} t_1 (V_{p,0} - V_{s,0}) + (V_1 + V + \frac{V_1^2}{2a_{br}} + V) \tag{18}$$

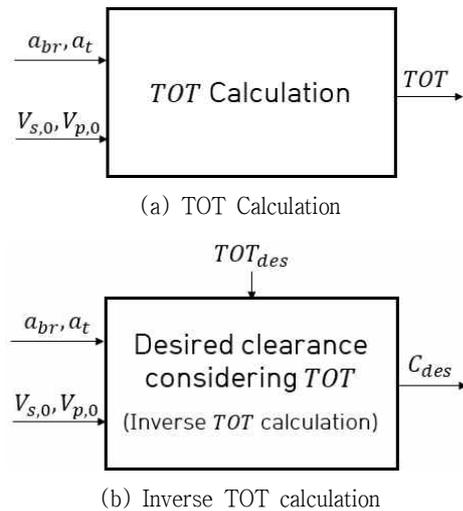


Fig. 8 Model schematic for desired clearance considering desired takeover time

$$C_{des_c3}(k) = \frac{1}{2} + \frac{V_{p,0}^2}{2a_{br}} - V \quad (19)$$

도출된 desired clearance는 모델 예측 제어 알고리즘의 거리에 대한 목표값으로 적용되었고, 속도에 대한 목표값은 선행차량의 속도로 정의되었다. 정의된 목표값들을 이용하여 모델 예측 제어 알고리즘을 기반으로 종방향 요구 가속도를 도출하였다. 도출된 가속도를 이용하여 역동역학 모델 기반 3 차원 차량 동역학 모델을 이용하여 성능 평가를 수행하였으며, 다음 4장에서는 수행된 성능 평가 결과를 보여준다.

4. 시뮬레이션 기반 성능 평가

합리적인 성능 평가를 위해 모델 예측 제어 알고리즘과 3차원 차량 모델을 이용하였다. 두 가지 가속도 조건인 제동 감속도와 제어권 전환 감속도는 각각 $a_{br} = -0.5g \text{ m/s}^2$ 와 $a_t = -0.315g \text{ m/s}^2$ 로 적용되었다. 적용된 제동 감속도는 임의의 감속도 값을 적용하였으며, 제어권 전환 감속도는 iso-2631-1을 기반으로 운전자가 불편함을 느끼지 않는 감속도를 적용하였다⁽¹²⁾. 본 연구에서 적용한 요구 제어권 전환 시간은 이며, 이는 기존 논문을 참고하여 적용하였다. 레벨 2 이상의 자율주행 시뮬레이션 실험을 통해 계측된 제어권 전환 시간들을 비교 및 분석하여 도출된 제어권 전환 시간의 평균값을 적용하였다⁽¹³⁾. 충돌 방지를 위해 적용된 C_{min} 은 1m로 적용되었으며, clearance 및 속도 정보를 레이더를 통해 획득한 실 주행 데이터를 이용하여 성능 평가를 수행하였다.

4.1. 제어권 전환 시간 도출

제어권 전환 시간의 성능 평가는 일반 운전자의 특성을 고려한 자율주행 제어를 기반으로 제어권 전환 시간을 도출 및 비교하였다. 일반 운전자의 특성을 고려한 제어는 운전자들의 주행 실험 데이터를 기반으로 도출된 속도에 대한 상대 거리 관계식(차두 시간)을 통해 도출된 평균값 $t_h = 1.36s$ 를 적용하였다⁽¹⁴⁾. 선행차량이 정지하였을 때와 선행차량의 속도를 고려하였을 때 두 가지 상황에 대해 요구 제어권 전환 시간을 고려하는 desired clearance를 도출하였다. 도출된 desired clearance를 통해 MPC (Model Predictive Control) 및 3D vehicle model을 기반

으로 성능 평가를 수행하였다. Fig. 9는 성능 평가를 위한 전체적인 모델 개략도를 보여주며 Fig. 10은 본 연구에서 사용된 MPC 알고리즘의 상세 모델 개략도를 보여준다.

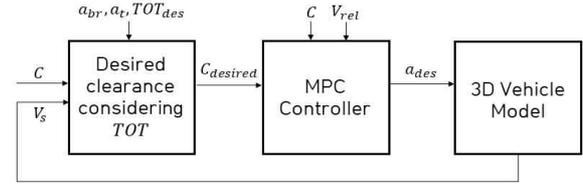


Fig. 9 Overall model schematic for performance evaluation

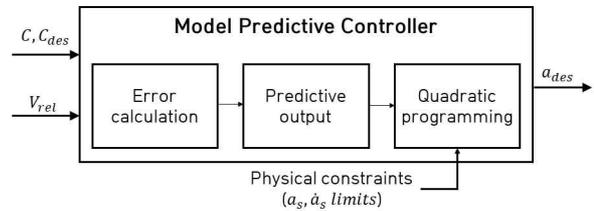
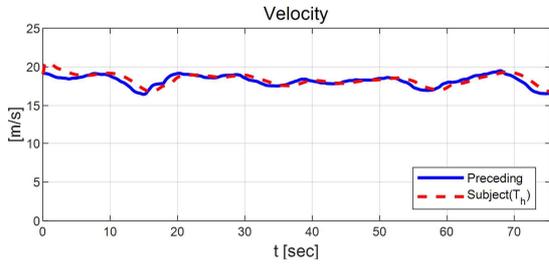
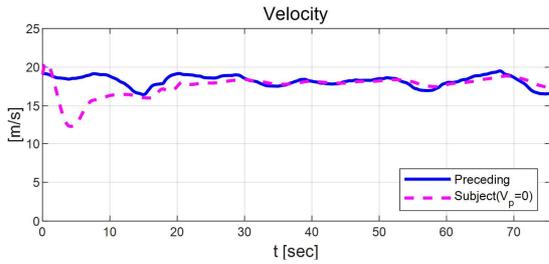


Fig. 10 Detailed schematic of model predictive control

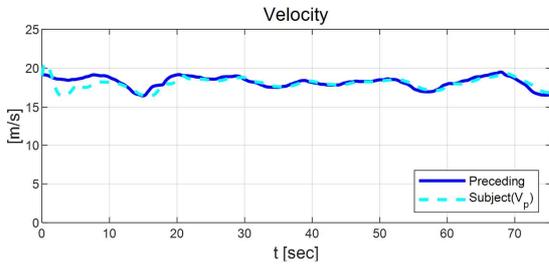
Fig. 10 내 Error calculation 블록에서는 TOT를 고려하여 도출된 desired clearance와 레이더에서 계측된 clearance 및 상대속도를 이용하여 오차를 계산한다. Predictive output 블록에서는 계산된 오차를 이용하여 N 스텝 예측 출력을 도출하고, 도출된 예측 출력 값을 이용하여 Quadratic programming 블록에서는 물리적 제약조건(가속도 한계, 가속도 변화율 한계) 기반 예측 최적 입력 값들을 도출한다. 성능 평가는 일반 운전자의 특성을 고려한 종방향 자율주행 제어 결과와 요구 제어권 전환 시간의 종방향 자율주행 제어 결과를 비교 및 분석하였다. 운전자가 2.72s의 제어권 전환 시간을 확보 및 유지하며 자율주행 하도록 설계하였으며 다음은 제어권 전환 시간을 고려한 종방향 자율주행 시뮬레이션 결과를 보여준다. Fig. 11 및 Fig. 14는 케이스 별 속도 그래프를 나타내며, (a)는 운전자 특성을 반영한 주행 상황, (b)는 선행차량 속도가 0[m/s]인 case-1의 상황, (c)는 선행차량 속도를 고려한 case-2, case-3의 상황의 속도 그래프를 나타낸다. Fig. 12 및 Fig. 15는 종방향 자율주행시 제어권 전환 시간을 도출한 그래프를 나타낸다. (a)는 case-1 상황에서 요구 제어권 전환 시간을 적용한 주행 상황 및 운전자 특성을 반영한 주행 상황의 제어권 전환 시간을 보여준다. (b)는 case-2, 3의 상황을 적용하여 주행하였을 때의 제어권 전환 시간 및 운전자 특성을 반영한 제어권 전환 시간을 보여준다. Fig. 13 및 Fig. 16은 종방향 제어 결과인 선행차량과의



(a) Velocity based on driver's characteristic

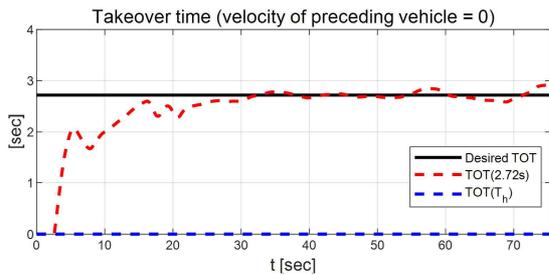


(b) Velocity based on case-1

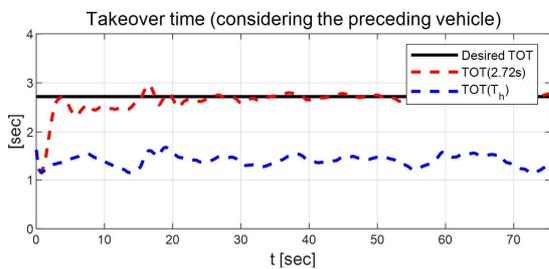


(c) Velocity based on case-2, case-3

Fig. 11 Velocity according to cases (situation-1)



(a) Takeover time based on case-1

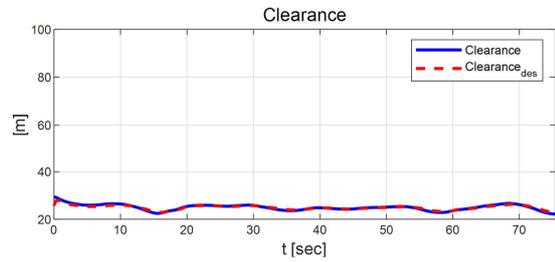


(b) Takeover time based on case-2, case-3

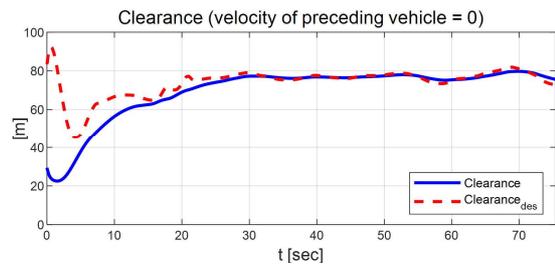
Fig. 12 Results of derivation of takeover time (situation-1)

거리를 나타낸다. (a)는 운전자의 특성을 반영한 제어의 실제 거리 및 요구거리를, (b)는 case-1의 상황의 제어권 전환 시간을 적용하였을 때의 실제 거리 및 요구거리, (c)는 case-2, 3의 제어권 전환 시간을 적용하였을 때의 실제 거리 및 desired clearance를 나타낸다.

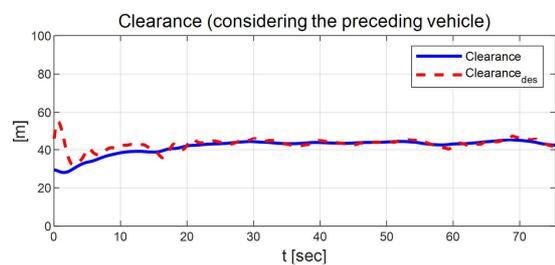
3차원 차량 모델을 이용한 알고리즘의 성능 평가 결과 일반 운전자의 특성을 고려한 제어는 선행차량 속도와 유사하게 주행하되, 제어권 전환을 위한 시간은 고려되지 않고 주행하며 선행차량과의 거리를 약 20~30m를 유지하면서 주행하는 것을 확인할 수 있었다. 선행차량의 속도가 $v_p = 0 \text{ m/s}$ 의 조건에서의 제어권 전환 시간을 도출하였을 때는 약 2.72초의 제어권 전환 시간을 유지하며 제어가 수행되는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 선행차량과의 거리가 운전자 특성을 고려한 제어 결과 대비 상대적으로 큰 거리를 유지하면서 주행하는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 선행차량의 속도를 고려한 종방향 제어 결과에서는 요구 제어권 전환 시간을 유지하며 주행하되,



(a) Clearance based on driver's characteristic

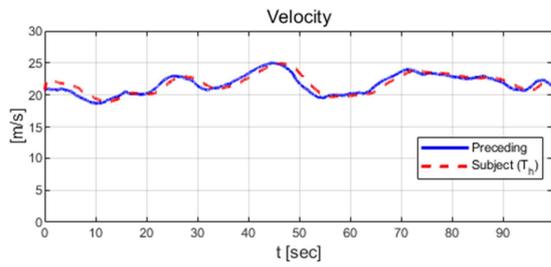


(b) Clearance based on case-1

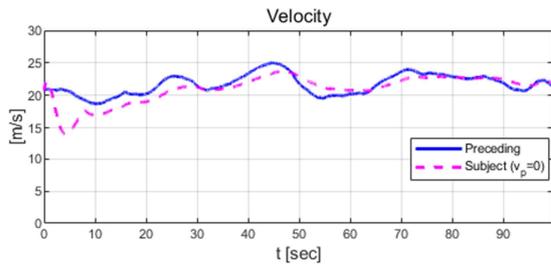


(c) Clearance based on case-2, case-3

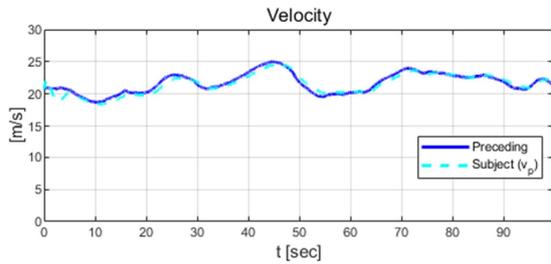
Fig. 13 Results of longitudinal control (situation-1)



(a) Velocity based on driver's characteristic

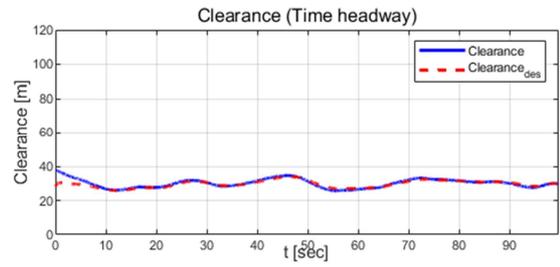


(b) Velocity based on case-1

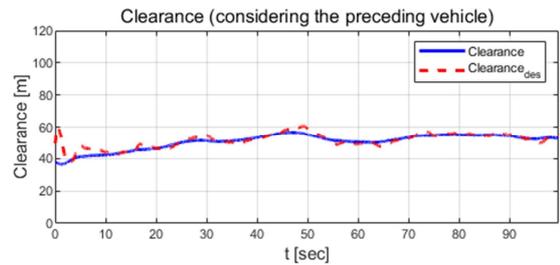


(c) Velocity based on case-2, case-3

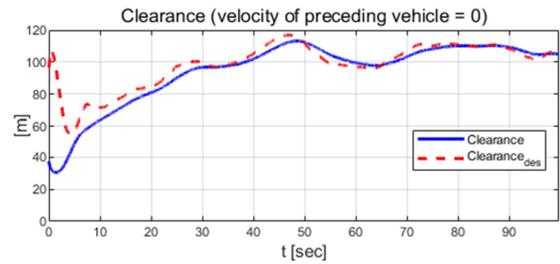
Fig. 14 Velocity according to cases (situation-2)



(a) Clearance based on driver's characteristic

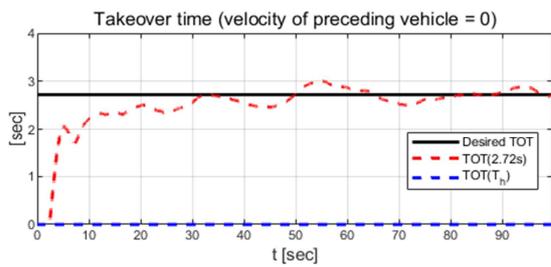


(b) Clearance based on case-1

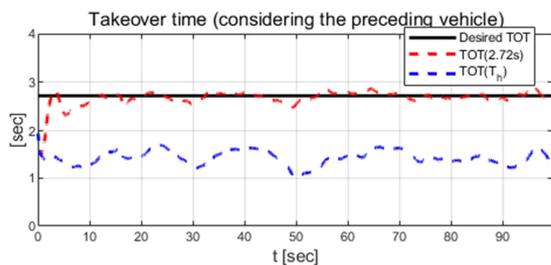


(c) Clearance based on case-2, case-3

Fig. 16 Results of longitudinal control (situation-2)



(a) Takeover time based on case-1



(b) Takeover time based on case-2, case-3

Fig. 15 Results of derivation of takeover time (situation-2)

선행차량과의 거리가 상대적으로 줄어든 것을 확인할 수 있었다. 따라서 본 연구에서 제안하는 제어 알고리즘은 운전자의 합리적 제어권 전환 시간을 고려한 제어를 수행할 수 있었으며, 향후 운전자의 특성 및 제어권 전환 시간을 동시에 고려하는 자율주행 종방향 제어 알고리즘의 개발을 계획하고 있다.

5. 결론

본 연구에서는 합리적인 제어권 전환 시간 확보를 위한 desired clearance를 V2V 통신 기반 선행차량의 종방향 속도 조건에 따라 도출하였으며, 그 결론은 다음과 같이 요약될 수 있다.

- 1) 선행차량과의 주행 상태에 따른 제어권 전환 시간 (TOT)을 도출하기 위해 시간-속도 평면에서의 가속도 조건 기반 도출 알고리즘을 설계하였다.

- 2) 선행차량의 속도 조건에 따른 세 가지 주행 상황을 구분하여 제어권 전환 시간을 도출하였으며 이를 기반으로 desired clearance를 도출하였다.
- 3) 도출된 desired clearance를 모델 예측 제어 알고리즘에 적용함으로써 제어권 전환 시간을 고려하는 종방향 제어 알고리즘을 제안하였다.
- 4) 성능 평가 결과 본 연구에서 정의한 요구 제어권 전환 시간을 합리적으로 확보하면서 제어하는 것을 확인할 수 있었다.

실 주행 데이터를 이용한 성능 평가 결과 본 연구에서 제안하는 제어권 전환 시간을 고려하는 종방향 제어가 가능함을 확인하였다. 하지만 case-1의 경우 제어권 전환 시간을 도출할 때 고장 발생 시 선행차량이 정지했다는 가정이 적용되었고, 고장 발생 시 이전까지 예측된 선행차량과의 상대 거리를 이용할 수 있다고 가정하였다. 적용된 가정들로 인해 종방향 제어 시 요구 상대 거리가 상대적으로 크게 도출되면서 센서의 물리적 한계 및 교통 상황 그리고 인간 요소를 고려하지 못한 제어가 될 수 있다. 또한 case-2, case-3의 경우 선행차량의 V2V(vehicle-to-vehicle)을 이용하여 선행차량의 정보를 알고 있는 주행 상황을 가정하였다. 향후 운전자의 특성을 반영하며 제어권 전환 시간을 고려한 안전 확보 제어 알고리즘을 개발하는 것을 계획하고 있다. 본 연구에서 제안하는 제어권 전환 시간을 고려한 종방향 제어 알고리즘은 향후 3~4 단계 자율주행의 기능 안전 확보를 위한 알고리즘으로 적용 가능할 것으로 기대한다.

후 기

본 연구는 정부(미래창조과학부)의 재원(NRF-2016 R1E1A1A01943543)으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 사업임.

참고문헌

- (1) 송태준, 이혜원, 오광석, 박성렬, 이경수, 2019, “자율주행 자동차의 기능 안전을 위한 고장 단계 판단 알고리즘 및 종방향 고장 탐지 기반 성능평가”, Trans. Koreans Soc. Eng. A, Vol. 43, No. 2, pp. 119~128.
- (2) 이종민, 박성렬, 오광석, 정용환, 이경수, 2017, “자율주행을 위한 기능적 관점에서의 고장안전 체계”,

- 대한기계학회 학술대회, pp. 1574~1578.
- (3) 오광석, 박성렬, 이경수, 2019, “다중 슬라이딩 모드 관측기를 이용한 모델 예측 기반 종방향 자율주행 센서 고장 탐지 알고리즘”, Trans. Koreans Soc. Eng. A, Vol. 43, No. 3, pp. 161~168.
 - (4) Christian, G., Riender, H. and Klaus, B., 2018, “Modeling take-over performance in level 3 conditionally automated vehicles”, Accident Analysis & Prevention 116, pp. 3~13.
 - (5) 민경보, 허룡, 김광오, 최명진, 이상원, 2017, “자율주행차량의 제어권 전환을 위한 시나리오 기반 알람 시스템 제안”, 한국HCI학회 학술대회, pp. 1156~1160.
 - (6) 김두용, 임재환, 이혁기, 최인성, 신재곤, 홍윤석, 박기홍, 2017, “ADAS 시스템의 고장 주입 시뮬레이션 환경 개발 및 고장 안전성 평가 사례 연구”, Transaction of the Korean Society of Automotive Engineers, Vol. 25, No. 6, pp. 767~777.
 - (7) 김나은, 양민영, 이지인, 김진우, 2018, “자율주행 자동차의 제어권 전환 상황에서 요구되는 정보 유형에 관한 연구”, Journal of Digital Contents Society, Vol. 19, No. 1, pp. 113~122.
 - (8) Körber, M., Weißgerber, T., Kalb, L., Blaschke, C., & Farid, M., 2015, “Prediction of take-over time in highly automated driving by two psychometric tests”, Dyna, 82(193), pp. 195~201.
 - (9) 박정철, 2017, “첨단운전지원시스템의 제어권 이양에 대한 리뷰”, Journal of the Ergonomics Society of Korea, Vol. 36, No. 6, pp. 665~675.
 - (10) Kangwon Lee and Huei Peng, 2008, “A longitudinal human driving model for adaptive cruise control performance assessment”, ASME 2002 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, pp. 675~682.
 - (11) Foghor Tanshi and Dirk Soffker, 2019, “Modeling of takeover variables with respect to driver situation awareness and workload for intelligent driver assistance”, IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), pp. 1667~1672.
 - (12) ISO, “Mechanical Vibration and Shock Evaluation of Human Exposure to Whole Body Vibration”, Part 1: General requirement, ISO 2631-1.

- (13) Bo Zhang, Joost de Winter, Silvia Varotto, Riender Happee and Marieke Martens, 2019, "Determinants of take-over time from automated driving: A meta-analysis of 129 studies", *Transportation Research Part F* 64, pp. 285~307.
- (14) Seungwuk Moon and Kyongsu Yi, 2008, "Human driving data-based design of a vehicle adaptive cruise control algorithm", *Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility*, 46(8), pp. 661~690.