

〈응용 논문〉

자율주행 모빌리티 원격 관제 시스템의 통신 지연을 고려하는 예측 주행 경로 시각화 알고리즘

이 광 록¹⁾ · 정 호 현¹⁾ · 오 광 석^{1,2)}한경국립대학교 ICT로봇기계공학부¹⁾ · 한경국립대학교 기계융합기술연구소²⁾

A Predicted Driving Path Visualization Algorithm Considering Communication Delay for Tele-Operated System of Autonomous Mobility

Gwangrok Lee¹⁾ · Hohyeon Jeong¹⁾ · Kwangseok Oh^{*1,2)}¹⁾School of ICT, Robotics & Mechanical Engineering, Hankyong National University, Gyeonggi 17579, Korea²⁾Hankyong National University Institute of Machine Convergence Technology, Gyeonggi 17579, Korea

(Received 24 July 2025 / Revised 10 September 2025 / Accepted 15 September 2025)

Abstract : Tele-operated driving technology for autonomous mobility enables bypass response operation in the event of system failure from the perspective of autonomous driving fail-safety, and can also be applied from the perspective of user convenience. This paper introduces a methodology that is easy to operate even under communication delays, which is one of the major limitations of tele-operated driving technology for autonomous mobility, even in an LTE environment where communication configuration is relatively inexpensive compared to 5G communication. To overcome communication delay, this paper is also proposing a mobility driving path prediction and a target driving path visualization algorithm to ensure stable mobility operation. Furthermore, this paper suggests using a target path point transmission/reception-based steering compensation algorithm that considers communication delay. The performance of the proposed algorithm was evaluated in a real-time human-in-the-loop simulation environment.

Key words : Autonomous mobility(자율주행 모빌리티), Tele-operated driving(원격 관제 주행), Path prediction(경로 예측), Communication delay(통신 지연), Driving path visualization(주행 경로 시각화), HiLs(인간 참여형 시뮬레이션)

Nomenclature

L	: distance between front axle and rear axle, m
L_b	: distance between front bumper and rear axle, m
θ_{sw}	: driver steering wheel angle, rad
N_s	: motion ratio of steering system, -
v_x	: longitudinal velocity, m/s
τ_u	: uplink delay, sec
τ_d	: downlink delay, sec
τ_h	: time headway, sec

1. 서 론

원격 관제 주행(Tele-operated Driving, ToD)란 이동 통

신망을 통해 인터넷에 연결된 모빌리티를 원격지에서 운전자가 조작하여 주행하는 기술이다. 자율주행 모빌리티의 원격 관제 주행 기술은 자율주행 고장-안전(Fail-safety) 관점에서 시스템 고장에 우회 대응 조작성 가능하게 할 수 있는 기술이며, 이용자 편의 관점에서도 응용될 수 있는 기술이다.

자율주행 모빌리티의 연구 및 개발이 활발하게 이루어지면서 원격 관제 주행 기술의 주요 한계점 중 하나인 통신 지연을 극복하기 위한 연구 및 관련 기술 개발 또한 활발하게 이루어지고 있다. 관제 센터에서 차량의 데이터 수신 지연시간을 Downlink delay, 관제 센터에서 차량으로 제어 명령 등을 송신할 때 소요되는 지연시간을

*A part of this paper was presented at the KSAE 2024 Fall Conference and Exhibition

^{*}Corresponding author, E-mail: oks@hknu.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.

Uplink delay라고 한다. 운전자는 관제 센터 모니터의 시각적 이미지 데이터에 의존하기 때문에, 운전자가 모니터를 응시하며 주행할 때, 운전자 조작에 따른 모빌리티 거동에 대한 시각적 피드백을 받기까지 Uplink delay와 Downlink delay만큼의 시간지연이 발생한다. 이러한 모빌리티 조작과 피드백 간 각각의 지연시간이 커질수록 관제 운전자는 불필요한 조작 입력을 인가할 수 있기 때문에 모빌리티의 거동이 불안정해질 수 있다.^{3,4)}

Zheng 등¹⁾은 원격 관제 모빌리티의 헤딩 각도를 모델 기반 실시간 추정 및 지연 보상하는 알고리즘을 제안하였다. Saparia 등²⁾은 자율주행 모빌리티 원격 관제 시 운전자의 입력을 추정하고 모빌리티가 장애물과 충돌 위험이 판단될 때 회피 제어하는 MPC 기반 운전자 보조 알고리즘을 제안했다. 해당 알고리즘 기반의 경로 시각화 또한 제안되었지만, 모빌리티 측의 MPC에서 적용되었기에 결국 Downlink delay만큼의 지연이 소요되는 한계점이 있다. Prakash 등³⁾은 관제 센터의 Smith predictor를 기반으로 모빌리티의 거동 예측 및 카메라 이미지 왜곡 기반 운전자에게 지연시간 관점의 조작 도움을 주었다. 하지만 모빌리티 측에서 수신되는 조작 신호의 지연시간에 대해서 보상 또는 예측되지 않는 한계점이 있다. Yu와 Lee는 원격 주행의 성패는 낮고 안정적인 지연에 달려 있으며, 이를 위해 UDP 기반의 슬라이싱 · 멀티스레드 · 이중 버퍼링 구조가 효과적이라는 전제하에 ROS/TCP/UDP 비디오 이미지전송 성능을 비교 · 평가하는 실험 방법론을 제시하였다.⁵⁾

본 논문은 5G 통신 대비 비교적 통신 구성이 상대적으로 저렴한 LTE 환경에서 자율주행 모빌리티의 원격 관제 주행 기술의 주요 한계점 중 하나인 통신 지연에 대응할 수 있는 방법론을 제안한다. LTE 통신 환경에서 원격 관제 주행 시 Uplink delay는 약 60 ms 부근에서 분포하며, Downlink delay는 약 200 ms 부근에서의 분포를 보인다.³⁾ 이러한 시간지연 한계점 극복을 위해 통신 지연이 고려된 모빌리티 예측 주행 경로 시각화 및 목표 주행 경로 시각화 알고리즘을 제안한다. 또한, 이와 결합하여 통신 지연이 고려된 목표 도달점 송/수신 기반 보상 조향 알고리즘을 제안한다. 제안하는 알고리즘은 실시간 Human in the loop simulation 환경에서 성능이 평가되었다.

2. 예측 경로 시각화 및 조향 보정 알고리즘

원격 관제 센터에서 모빌리티의 조향각 크기와 같은 제어량을 직접 전송할 경우, 데이터가 Uplink delay만큼 뒤늦게 전달되어 목표하고자 한 움직임보다 늦춰진 차량 거동이 발생하게 된다. 모빌리티의 통신 지연이 고려된 운전자의 목표 도달점으로 주행하도록 목표 도달점

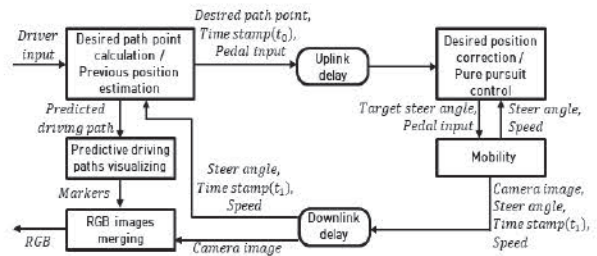


Fig. 1 Overall block diagram of the proposed algorithm

기반 조향 보정 알고리즘이 구성되었다. 조향 보정 알고리즘은 관제 센터와 모빌리티 간 차량 좌표계 기준 목표 도달점을 송/수신하도록 설계되었다. 운전자가 목표하는 도달점을 모빌리티 측에서 수신하며, 예측되는 통신 지연시간 기반 보정된 목표 도달점을 도출한다. 최종적으로 모빌리티가 보정된 목표에 도달하기 위한 목표 조향각이 계산된다. 또한, 원격 관제 운전자가 모니터에 송출된 화면에서 통신 지연이 고려된 예측 주행 경로를 바라보며 운전할 수 있는 알고리즘이 구성되었다. Fig. 1은 제안하는 알고리즘의 전반적 블록선도를 보여준다.

관제 센터와 모빌리티 간 통신 시 전송 시각에 대한 타임스탬프를 함께 전송하면 수신 측에서 이를 수신 시각과 비교하여 Uplink delay(τ_u)와 Downlink delay(τ_d)가 예측될 수 있다. 다음 Fig. 2는 타임라인 관점에서 각각의 delay 개념을 보여준다.

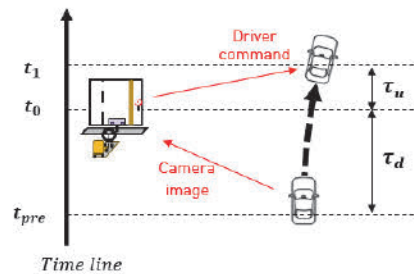


Fig. 2 Time delay concept of tele-operated driving time line

2.1 목표 도달점 도출 및 전송

목표 도달점(x_{des}, y_{des})은 기존의 연구를 기반으로 도출되었다. 차량을 운전하는 운전자의 시점에 관한 기존의 연구를 통해, 운전자들은 도로상 목표 도달점을 바라보며 운전함을 확인할 수 있다.⁶⁻¹⁰⁾ 모니터로 주행 환경이 출력되는 주행 시뮬레이션 상황에서 운전자 시점에 관한 연구를 통해 모니터를 보며 시뮬레이션 주행 환경에서도 도로상 목표 도달점에 대한 차량 운전자들의 시선 전략이 비슷한 경향을 보였다.¹⁰⁾

운전자 조향 입력(θ_{sw}) 기반 다음 식 (1)과같이 운전자

목표 선회 반지름(R_{des})이 계산될 수 있다.

$$R_{des} = L / \tan(\delta_{des}) \quad (1)$$

where,

$$\delta_{des} = N_s \times \theta_{sw}$$

운전자는 차량이 도달할 지점인 차두시간(Time headway, τ_h)을 예상하며 주행하는 특성이 있다. 차두시간은 개인별 편차가 있지만 대부분 실험자의 차두시간은 1 ~ 2 sec 이내로 알려져 있다.⁹⁾ 본 논문에서는 모든 운전자에게 1.5 sec의 차두시간을 일괄적으로 적용하여 성능평가가 수행되었으며, 향후 운전자별 차두시간 변화 적용에 따른 평가를 계획하고 있다. 모빌리티의 속도(v_x), 차두시간을(τ_h) 통해 목표 주행 거리(d_{des})가 계산되며 2.3절에서 기술된다. 식 (2)와 같이 운전자의 목표 주행 거리와 운전자의 목표 선회 반지름을 통해 목표 요 각도(ψ_{des})와 식 (3)을 통해 목표 도달점(x_{des}, y_{des})을 도출한다.

$$\psi_{des} = d_{des} / R_{des} \quad (2)$$

where,

$$d_{des} = \tau_h \times v_x$$

$$x_{des} = R_{des} \sin(\psi_{des}) \quad (3a)$$

$$y_{des} = R_{des} - R_{des} \cos(\psi_{des}) \quad (3b)$$

다음 Fig. 3은 차량 좌표계 기준의 운전자 목표 도달점(x_{des}, y_{des})을 기하학적으로 나타낸다.

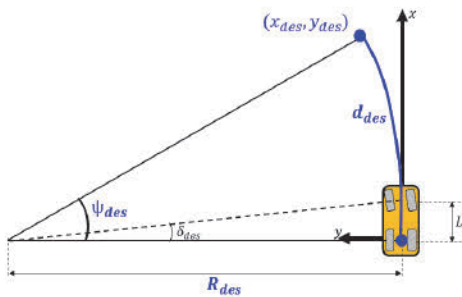


Fig. 3 Desired target path point derivation

2.2 수신된 목표 도달점 보정 및 조향

모빌리티가 수신한 목표 도달점의 좌표는 수신 시점(t_1) 대비 Uplink delay만큼의 이전 시점(t_0)에 운전자가 목표했던 지점이다. 따라서 지연된 시간 동안 모빌리티가 움직인 변위를 추정하여 보정된 목표 도달점

(x_{con}, y_{con})을 추종제어 해야 한다. Uplink delay 동안 모빌리티의 선회 반지름 변화가 무시할 수 있을 만큼 작다고 가정하면, 식 (4)와 같이 모빌리티의 현재 조향각(δ)을 통해 지연시간 동안 선회 반지름을 다음과 같이 계산할 수 있다. 앞서 기술된 가정들이 적용되기 어려운 주행 조건의 경우 예측 경로의 상대적 부정확성에 의해 운전자의 조작 불안정성이 증대될 수 있기 때문에 다양한 주행 조건에서의 성능평가를 계획하고 있다.

$$R_0 = L / \tan(\delta) \quad (4)$$

$$\psi_0 = -d_0 / R_0 \quad (5)$$

where,

$$d_0 = \tau_u \times v_x$$

$$x_0 = -R_0 \sin(\psi_0) \quad (6a)$$

$$y_0 = R_0 - R_0 \cos(\psi_0) \quad (6b)$$

따라서 모빌리티에서 다음 식 (7)을 이용하여 통신 지연이 보정된 운전자 목표 도달점을 차량 좌표계 기준으로 계산한다.

$$\begin{bmatrix} x_{con} \\ y_{con} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\psi_0) & -\sin(\psi_0) \\ \sin(\psi_0) & \cos(\psi_0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{des} \\ y_{des} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Fig. 4는 모빌리티 측에서 추정한 통신 지연 간 이동 궤적 및 보정 목표 도달점(x_{con}, y_{con})을 보여준다.

보정된 목표 경로점을 추종하기 위한 전륜 조향각(δ_{con}) 도출은 에커먼 조향 기반 기하학적 조향 알고리즘인 Pure pursuit 알고리즘을 적용하였다. 식 (8)과 같이 모빌리티의 후륜 중심점으로부터 목표 도달 지점까지의 거리(l_d)와 사잇각(α), 축거(L)를 이용해 추종을 위한 필요 조향각이 계산된다.

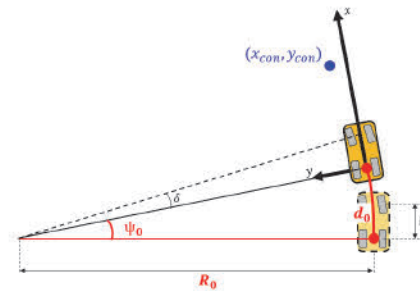


Fig. 4 Target point uplink delay correction

$$\delta_{con} = \tan^{-1}(2L\sin\alpha/l_d) \quad (8)$$

where,

$$l_d = \sqrt{x_{con}^2 + y_{con}^2}$$

$$\alpha = \tan^{-1}(y_{con}/x_{con})$$

다음 Fig 5는 차량 좌표계 기준의 Pure pursuit 알고리즘을 기하학적으로 표현한 것을 보여준다.

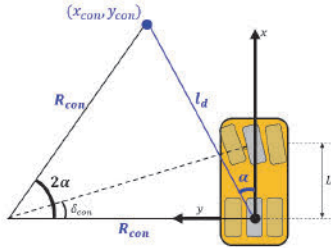


Fig. 5 Geometry-based pure pursuit controller

2.3 통신 지연 고려 주행 예측 경로 도출 및 시각화

운전자는 관제 센터 측 모니터를 통해 모빌리티를 조작하며, 통신 지연으로 인해 현재 주행 중인 차량의 시점이 아닌 시간 지연 이전 차량의 주행 시점을 본다. 제안하는 알고리즘은 현재 시점(t_0)에 이미 도달한 지점, 즉 주행 완료된 궤적을 추정하여 전송받은 시점(t_{pre})의 카메라 이미지 위에 주행 완료 추정 궤적과 예측 주행 궤적을 시각화하며, 운전자 입력에 따른 예측 주행 궤적 시각화 알고리즘을 제안한다. 이를 통해 통신 지연이 존재함에도 모빌리티의 예측되는 주행 궤적을 즉각적으로 피드백할 수 있다. Fig. 6은 관제 센터 측에서 주행 궤적을 시각화했을 때, 모빌리티의 주행 완료 추정 궤적(빨간색)과 이어서 그려지는 예측 주행 경로(파란색)의 개념을 관제 타임라인과 함께 확인할 수 있다.

모빌리티의 종방향 속도와 Downlink delay를 통해 목표 주행 거리(d_{des})를 계산한다. 운전자가 Uplink delay 이전 시점(t_{pre})에서 모니터를 통해 바라보는 차두시간 기반 목표 주행 거리는 다음 식 (9)과같이 계산된다. 모빌리티의 가속도를 무시할 수 있는 만큼 작다고 가정하면

Downlink delay 간 모빌리티가 움직인 거리(d_{pre})는 다음 식 (10)과같이 계산된다. Downlink delay 동안의 선회 반지름 변화를 무시할 수 있는 만큼 작다고 가정하면, 식 (11)과 같이 조향각을 통해 선회 반지름이 계산된다. 식 (12)~(13)과 같이 애커먼 조향 기반 지연시간 이전의 모빌리티 자세와 위치가 계산된다.

$$d_{des} = (\tau_h - \tau_d) \times v_x \quad (9)$$

$$d_{pre} = \tau_d \times v_x \quad (10)$$

$$R_{pre} = L/\tan(\delta) \quad (11)$$

$$\psi_{pre} = -(d_{pre}/R_{pre}) \quad (12)$$

$$x_{pre} = -R_{pre}\sin(\psi_{pre}) \quad (13a)$$

$$y_{pre} = R_{pre} - R_{pre}\cos(\psi_{pre}) \quad (13b)$$

지연시간 이전의 모빌리티 위치(x_{pre}, y_{pre})와 2.1절의 목표 도달점(x_{des}, y_{des})을 각각 차량 좌표계의 원점과 x축에 접하게 두 원호를 그리면 t_0 시점 모빌리티 기준의 주행 완료 추정 궤적과 주행 예측 궤적을 다음 Fig. 7(a)과 같이 도출할 수 있다.

추정 및 예측된 모빌리티의 주행 경로는 관제 센터의 t_{pre} 시점 주행 카메라 이미지 위에 그려져야 하므로, Fig. 7(b)과 같이 주행 완료 추정 궤적 시작점이 좌표계 원점에 일치하도록 변환하여야 한다. 원격 관제 운전자 시점은 차량의 전방을 함께 바라보며 주행하기에 Fig. 7(c)과 같이 전방 범퍼의 궤적으로 변환하여 시각화할 필요가 있다.

예측 주행 궤적을 기준으로 일정하게 생성한 마커군 (M_0)을 t_0 시점의 모빌리티 기준 생성한 예측 주행 경로 예시는 다음 Fig 8과 같다.

주행 완료 추정 궤적 시작점이 좌표계 원점에 일치하

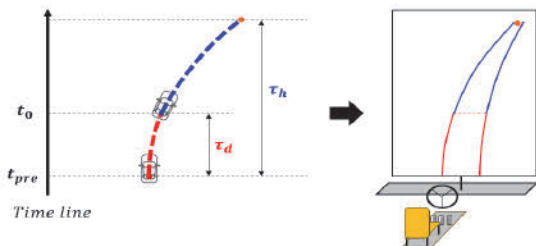


Fig. 6 Concept of the predicted path visualization with line

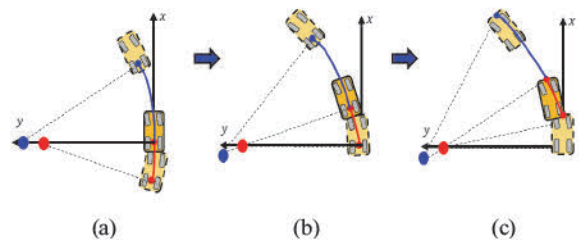
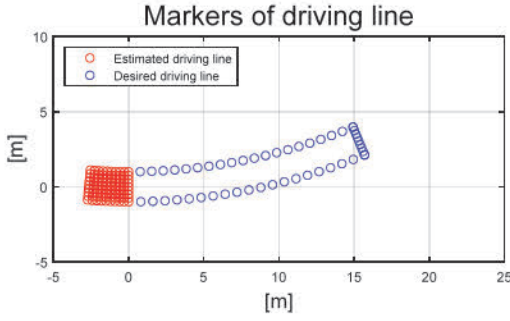
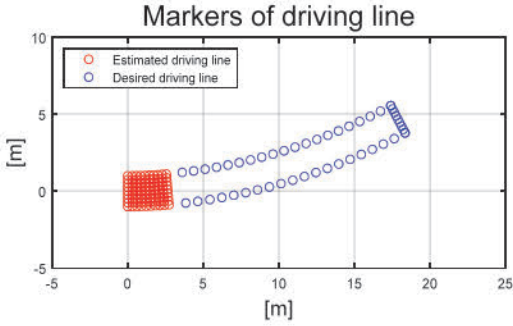


Fig. 7 Transforming the predicted driving path


Fig. 8 Driving line markers from t_0 perspective

Fig. 9 Driving line markers from t_{pre} perspective

는 주행 궤적 마커군(M)을 도출하기 위한 식은 다음 식 (14)와 같으며 Fig. 9는 변환된 마커 예시다.

$$M = R_{pre} \times M_0 - T_{pre} \quad (14)$$

where,

$$R_{pre} = \begin{bmatrix} \cos(\psi_{pre}) & -\sin(\psi_{pre}) \\ \sin(\psi_{pre}) & \cos(\psi_{pre}) \end{bmatrix}$$

$$T_{pre} = \begin{bmatrix} x_{pre} \\ y_{pre} \end{bmatrix}$$

마지막으로, 직관적인 관제 주행 및 충돌 방지를 위해 범퍼의 궤적으로 변환하여 시각화할 필요가 있다. 완료 주행 궤적과 예측 주행 궤적을 각각 M_{bF} , M_{bP} 라고 할 때, 이를 변환하기 위한 식은 각각 다음 식 (15)와 식 (16)에서 확인할 수 있다.

$$M_{bF} = A_{bF} \times R_{bF} \times M_F \quad (15)$$

where,

$$\theta_{bF} = \tan(L_b/R_{pre})$$

$$R_{bF} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{bF}) & -\sin(\theta_{bF}) \\ \sin(\theta_{bF}) & \cos(\theta_{bF}) \end{bmatrix}$$

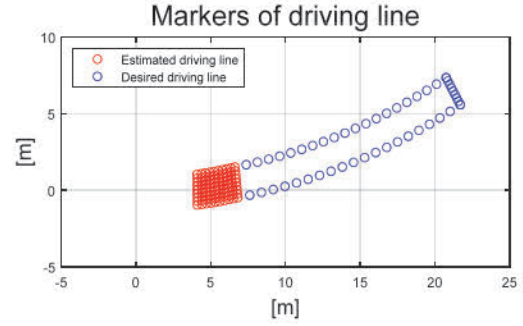


Fig. 10 Driving line markers based on front bumper

$$A_{bF} = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{R^2 + L_{bp}^2}}{R} & 0 \\ 0 & \frac{\sqrt{R^2 + L_{bp}^2}}{R} \end{bmatrix}$$

$$M_{bP} = A_{bP} \times R_{bP} \times M_P \quad (16)$$

where,

$$\theta_{bP} = \tan(L_b/R_{des})$$

$$R_{bP} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{bP}) & -\sin(\theta_{bP}) \\ \sin(\theta_{bP}) & \cos(\theta_{bP}) \end{bmatrix}$$

$$A_{bP} = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{R_{des}^2 + L_{bp}^2}}{R_{des}} & 0 \\ 0 & \frac{\sqrt{R_{des}^2 + L_{bp}^2}}{R_{des}} \end{bmatrix}$$

전방 범퍼의 궤적으로 변환된 두 주행 궤적 마커군 (M_{bF} , M_{bP})은 모빌리티의 폭에 따라 일정하게 마커를 생성한 예시는 Fig. 10과 같다.

실 성능평가 환경에서는 Fig. 11과 같이 원격 주행 운전자의 직관적 이해를 위해 범퍼 도달 지점의 색상을 달리하고, 모빌리티 목표 도달점도 시각화하였다.

주행 궤적 시각화를 위해 생성된 마커는 평면 좌표계 기준으로 정의된 좌표이다. Fig. 12와 같이, 이를 카메라의 픽셀 좌표로 변환을 위해 원근교정 및 회전/이동 변환이 필요하다. 월드 좌표(X, Y, Z)를 카메라 픽셀 좌표(x, y)로 변환을 위한 원근교정행렬 및 회전/이동 변환 행렬이 적용된 수식은 식 (17)과 같다.

$$\begin{bmatrix} xs \\ ys \\ s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

where,

f_x, f_y : focal length

c_x, c_y : principal point

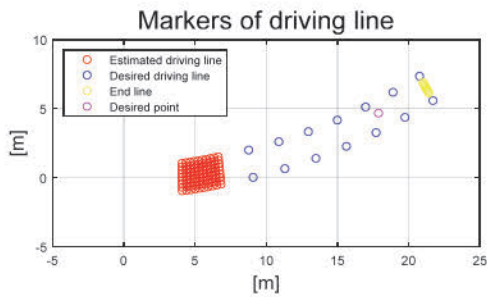


Fig. 11 Actual applied driving line markers

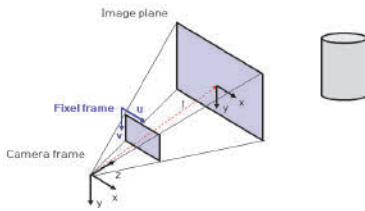
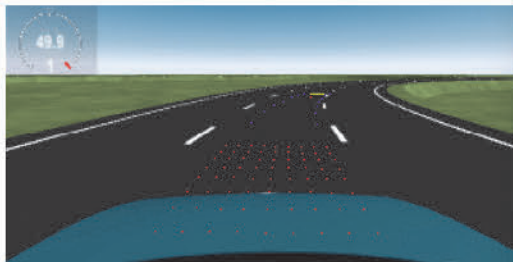


Fig. 12 Pixel coordinate system transformation



(a) Visualized predicted path : right turn



(b) Visualized predicted path : left turn



(c) Visualized predicted path : straight

Fig. 13 Predicted path visualization in CarMaker simulation

$r_{i,j}$: rotation matrix element

$t_{i,j}$: translation matrix element

최종적으로 카메라에 대한 원근교정행렬 및 회전/이동 변환 행렬에 적합한 파라미터를 적용하면 예측 주행 경로가 카메라 좌표계에 투영될 수 있다. Fig. 13은 본 알고리즘의 성능평가를 위하여 시뮬레이션 기반 구성된 환경에서의 관제 주행¹¹⁾이다.

3. 성능평가

3.1 HiLs 기반 성능평가 환경구성

차량 동역학 시뮬레이션 소프트웨어인 IPG CarMaker를 이용한 실시간 성능평가를 진행했으며, 차량은 소프트웨어 내 Demo car 중 현대 Ioniq5 모델을 사용하여 진행하였다. 시각화 및 조향 알고리즘은 Mathworks Matlab/Simulink를 이용하여 CarMaker와 Co-simulation 되었다. 운전자의 입력과 모빌리티 사이의 가상 Uplink delay는 100 ms로 설정하였으며 모빌리티 카메라 이미지와 실험자 모니터 사이의 가상 Downlink delay는 300 ms로 설정하였다.

시뮬레이션의 카메라로 촬영되는 이미지는 카메라 시뮬레이션의 실시간 렌더링 화면을 0.05 sec 주기로 캡처하는 방식으로 구성되었다. 시뮬레이션의 카메라로 촬영되는 이미지 해상도는 320 × 180으로 시판 중인 16:9 카메라(90 deg FOV)의 스펙을 참고하였다. Fig. 15와 같이 카메라의 장착 위치는 지면으로부터 1.7 m 떨어진 지점에 장착하였으며, 카메라 각도는 아래로 15 degree 향하게 적용하였다.

시뮬레이션 환경의 이상적인 카메라이기 때문에 원근 교정행렬의 주점(c_x, c_y)은 각각 중앙점인 160, 90이 적용되었다. 초점거리(f_x, f_y)는 캘리브레이션을 통해 각각 160이 적용되었다. 회전/이동 변환 행렬 또한 카메라의 부착 위치와 각도에 맞게 적용되어, 다음 식 (18)을 통해 주행 궤적이 변환되었다.

$$\begin{bmatrix} xs \\ ys \\ s \end{bmatrix} = S \times RT \times \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

where,

$$S = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 \cos d(15) & -\sin d(15) & 1.7 \\ 0 \sin d(15) & \cos d(15) & -2.18 \end{bmatrix}$$

$$RT = \begin{bmatrix} 160 & 0 & 160 \\ 0 & 160 & 90 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

주행 시나리오는 차선 변경 후 차선 유지 주행, 연속 장애물 회피 주행 그리고 트랙 주행 총 3가지로 구성되었다. 성능평가 참여자는 운전 경험에 따른 비교적 안정화된 집단(면허 취득 4~6년 경과자)을 대상으로 선정함으로써 피험자의 운전 미숙으로 인한 평가 저하 요인을

최소화하였다. 참여자들은 제안하는 예측 주행 경로 시각화 원격 관제 알고리즘(Predicted Visualized Tele-Operated Driving, PVToD)이 적용된 시나리오(w/ PVToD)를 주행하였다. 비교군을 위해 제안하는 알고리즘 미적용 시나리오(w/o PVToD)가 수행되었으며 성능평가에 앞서 각 시나리오 연습주행을 1회 실시하였다. 성능평가 참가자들의 운전면허 취득 시점은 아래 Table 1과 같다.

Table 1 Driver license information of experiment participants

Driver	Date of getting a driver's license
1	2019. 12. 13
2	2018. 08. 16
3	2021. 11. 08
4	2019. 04. 22
5	2019. 01. 17

시나리오별 정량적 평가는 Driver 1의 주행 데이터를 그래프로 분석하고, 모든 운전자의 주행 데이터는 포로 정리되어 경향성을 확인할 수 있다.

3.2 시나리오 1 : 차선 변경 후 차선 유지 주행

Fig. 16은 PVToD 알고리즘의 직진 유지 성능 확인을 위해 초기 속도 50 km/h로 차선 변경 후 주행 경로의 수렴성을 평가하였다.

Table 2는 5명의 실험 참가자의 데이터이다. 데이터의 분산 정도를 파악하기 위해 표준편차(Standard deviation, STD)를 사용했으며, 수치의 대푯값을 알기 위해 평균(Average, AVG)을 산출하여 데이터를 정량적으로 표현했다. 차선 변경 후 차선 유지 시나리오에서 PVToD가 적용되었을 때 모든 운전자의 경로 오차 표준편차가 감소함을 확인하였다. 경로 오차가 줄어들면서 평균 속도의 증가는 운전자 주행 자신감 증가로 볼 수 있다. 또한, 요 각속도 편차, 조향 휠 각도 및 각속도의 표준편차가 알고리즘이 적용된 경우가 알고리즘이 적용되지 않았을 때보다 비교적 작은 값을 보이며 주행 안정성 개선이 확인되었다.

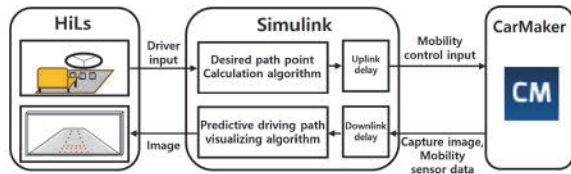


Fig. 14 Block diagram for performance evaluation

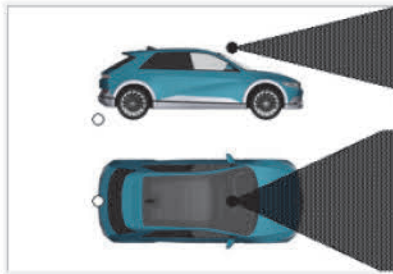


Fig. 15 Setup of camera (from CarMaker)

3.3 시나리오 2 : 연속 장애물 회피주행

PVToD 알고리즘의 종/횡방향 주행 성능평가를 위해 40 m 간격의 규칙적 장애물 회피 시나리오가 적용되었으며, Figs. 21~25는 평가 결과를 보여준다.

Table 2 Scenario 1 performance evaluation results

Division	Driver	1	2	3	4	5	AVG
	PV						
Path error STD [m]	w/o	1.3335	0.9266	0.9633	0.7730	0.5313	0.91
	w/	0.2665	0.1639	0.1806	0.1329	0.3973	0.23
Yaw rate STD [deg/s]	w/o	9.9495	8.2889	7.9598	3.7672	10.7593	8.14
	w/	2.2286	2.7549	2.7083	2.5303	8.3958	3.72
Speed AVG [km/h]	w/o	45.2984	44.5785	53.3752	54.2645	44.0598	48.32
	w/	60.9100	54.4616	56.9852	55.4189	44.9496	54.55
Steering wheel angle STD [deg]	w/o	44.1559	35.5453	30.4155	15.2500	42.4557	33.56
	w/	8.8477	10.9895	10.8920	10.2467	32.7576	14.75
Steering wheel angular velocity STD [deg/s]	w/o	0.0809	0.0704	0.0663	0.0344	0.0756	0.07
	w/	0.0137	0.0245	0.0220	0.0246	0.0183	0.02

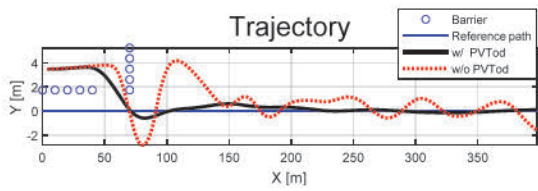


Fig. 16 Trajectory of mobility (Driver-1)

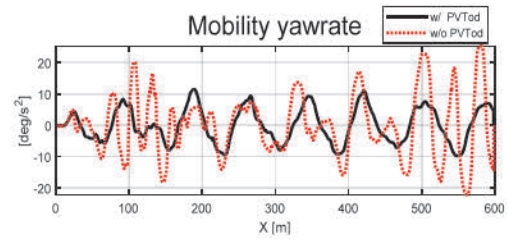


Fig. 22 Yaw rate of mobility (Driver-1)

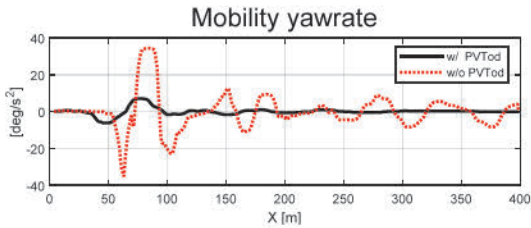


Fig. 17 Yaw rate of mobility (Driver-1)

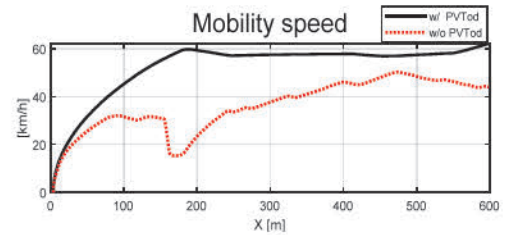


Fig. 23 Speed of mobility (Driver-1)

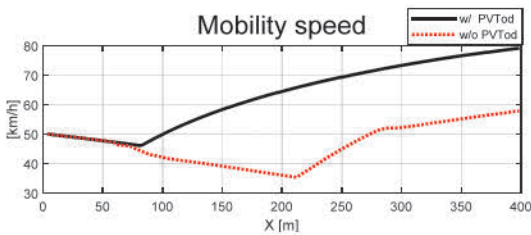


Fig. 18 Speed of mobility (Driver-1)

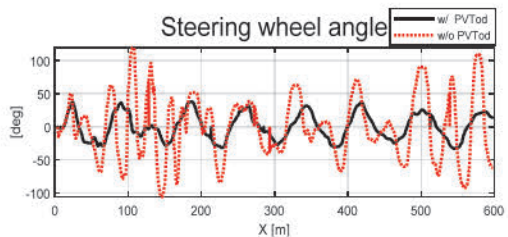


Fig. 24 Driver steering wheel angle (Driver-1)

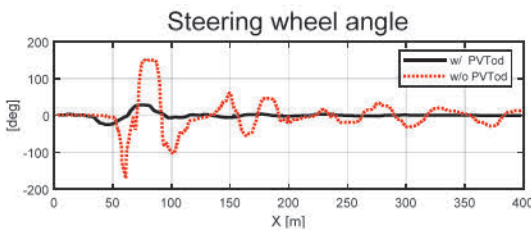


Fig. 19 Driver steering wheel angle (Driver-1)

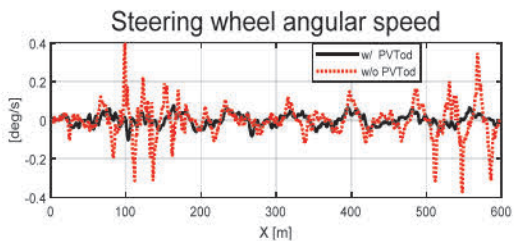


Fig. 25 Driver steering wheel angular speed (Driver-1)

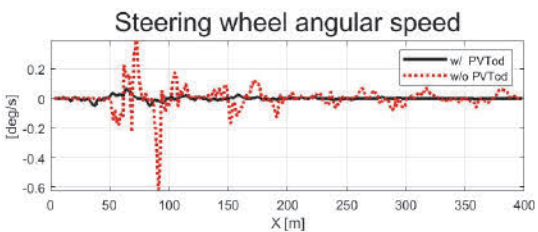


Fig. 20 Driver steering wheel angular speed (Driver-1)

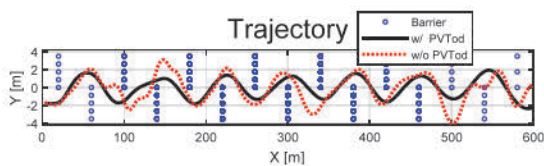


Fig. 21 Trajectory of mobility (Driver-1)

Figs. 21 ~ 25와 정량적 결과가 정리된 Table 3에서 모든 운전자가 PVToD가 적용되었을 때 도로 중심점으로부터의 최대 이탈량은 알고리즘이 적용되지 않은 경우보다 상대적으로 작음을 확인할 수 있다. 제안하는 알고리즘이 적용되면 실험 참가자들의 조향 휠 각도 편차와 조향 휠 각속도 편차 모두 비교적 감소함에 따라 모빌리티의 요 각속도 편차가 줄어들어 주행 안정성 개선이 확인되었다. 모빌리티의 평균 속도는 제안하는 알고리즘이 적용될 때 2번 운전자를 제외한 모든 운전자에게서 상대적으로 큰 값을 보였다. 이는 예측 주행 경로 시각화

Table 3 Scenario 2 performance evaluation results

Division	Driver		1	2	3	4	5	AVG
	PV							
Y-axis offset MAX [m]	w/o		4.9294	5.3337	4.9288	4.0723	3.8195	4.62
	w/		3.6973	3.9871	3.8019	3.8867	3.5869	3.79
Yaw rate STD [deg/s]	w/o		8.7481	6.7933	5.4637	6.5033	5.8467	6.67
	w/		4.9633	4.8199	4.3079	5.5380	5.1233	4.95
Speed AVG [km/h]	w/o		30.2788	37.7251	32.0735	33.7961	30.9847	32.97
	w/		44.1116	36.6409	32.5039	43.6365	40.2870	39.44
Steering wheel angle STD [deg]	w/o		25.2262	29.1268	25.6612	30.6525	30.2796	28.19
	w/		18.9331	21.1591	21.3827	22.0663	21.1551	20.94
Steering wheel angular velocity STD [deg/s]	w/o		0.0755	0.0547	0.0389	0.0455	0.0493	0.05
	w/		0.0273	0.0277	0.0228	0.0298	0.0264	0.03

알고리즘이 적용될 때, 실험 참가자들이 상대적으로 더 높은 주행 자신감을 가지게 됨을 보여준다.

3.4 시나리오 3 : 곡선 경로 주행

PVToD 알고리즘의 조향 성능평가를 위해 50 km/h 등속 자동 유지(카메이커 운전자 모델 활용) 조건에서 선회 주행 경로를 설계하였다. 차두시간은 개인별로 편차가 있지만 대부분 실험자의 차두시간은 1~2 sec 이내로 알려져 있다.⁸⁾ 본 논문에서는 운전자별 정량적인 주행결과를 동일한 환경에서 취득하기 위하여 통신 지연시간과 차두시간을 모든 운전자가 같은 상황에서 주행할 수 있도록 차두시간을 일괄적으로 적용하여 성능평가가 수행되었다. 아래 테이블은 차두시간에 따른 운전자의 조향 휠 각도 및 각속도 표준 편차를 보여준다.

Driver3을 제외한 모든 운전자의 조향각 표준편차가 차두 시간이 1.5 sec일 때 가장 낮게 나타났다. 조향 각속도를 비교할 때 Driver2와 Driver3을 제외하면 모두 1.5 sec일 때 비교적 작은 각속도를 보인다. 이는 조향 안정성이 1.5 sec일 때 비교적 안정하다고 판단되기 때문에 모든 운전자의 차두시간은 1.5 sec으로 고정하여 평가를 진행하였다. 해당 경로 및 성능평가 조건은 도로상 자차

만 존재하는 경우이며, 주변 차량 등 환경적인 요인에 의한 변수가 고려되지 않고 PVToD 알고리즘의 조향에 대한 성능만 고려하는 성능평가가 수행되었다.¹¹⁾ Figs. 26~31은 주행 궤적을 포함하는 평가 결과를 보여준다.

Figs. 26~31과 정량적 결과가 정리된 Table 4에서 모든 운전자가 PVToD가 적용되었을 때 알고리즘을 적용하지 않은 경우보다 비교적 경로 오차의 편차가 작음을 확인할 수 있다. 추가로 모빌리티의 요 각속도 편차, 조향 휠 입력 편차, 조향 휠 각속도 편차 모두 제안하는 알고

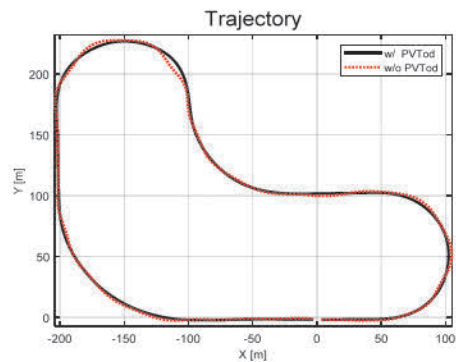


Fig. 26 Trajectory of mobility (Driver-1)

Table 4 Scenario 3 STD of steering wheel angle and its rate

Division	Driver		1	2	3	4	5
	Time headway						
STD [deg]	1.0		34.58	34.58	35.14	35.97	34.36
	1.5		32.04	32.04	33.23	32.61	32.75
	2.0		34.04	34.04	31.86	34.38	33.42
STD [deg/s]	1.0		0.035	0.025	0.039	0.046	0.039
	1.5		0.016	0.026	0.023	0.019	0.018
	2.0		0.032	0.017	0.016	0.037	0.020

Table 5 Scenario 3 performance evaluation results

Division	Driver		1	2	3	4	5	AVG
	PV							
Path error STD [m]	w/o		1.3277	0.8034	1.5369	0.8680	1.6939	1.25
	w/		0.4868	0.3938	0.4002	0.3075	0.4138	0.40
Yaw rate STD [deg/s]	w/o		11.8818	11.4096	12.7224	9.3309	10.7593	11.22
	w/		8.2334	8.5193	8.5094	8.3344	8.3958	8.40
Speed AVG [km/h]	w/o		44.0067	43.9794	44.0039	43.9518	44.0598	44.00
	w/		43.9648	43.9600	43.9700	43.9525	43.9496	43.96
Steering wheel angle STD [deg]	w/o		47.3409	45.0843	50.4643	36.5765	42.4557	44.38
	w/		32.0481	33.3330	33.2333	32.6119	32.7576	32.80
Steering wheel angular velocity STD [deg/s]	w/o		0.0710	0.0907	0.0812	0.0407	0.0756	0.07
	w/		0.0158	0.0268	0.0233	0.0193	0.0183	0.02

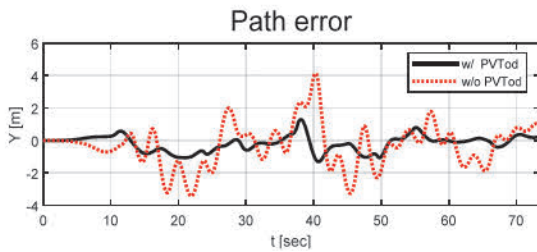


Fig. 27 Path error of mobility (Driver-1)

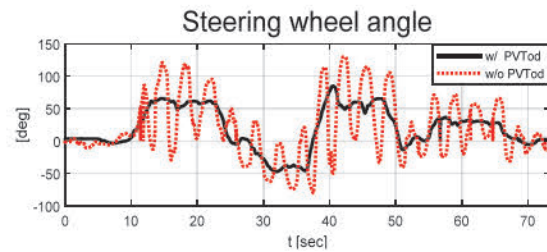


Fig. 30 Driver steering wheel angle (Driver-1)

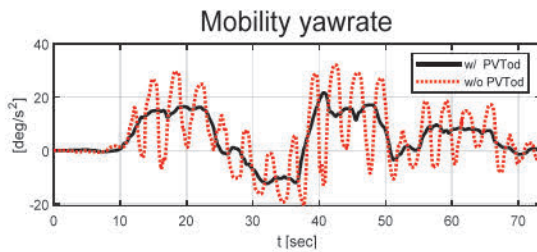


Fig. 28 Yaw rate of mobility (Driver-1)

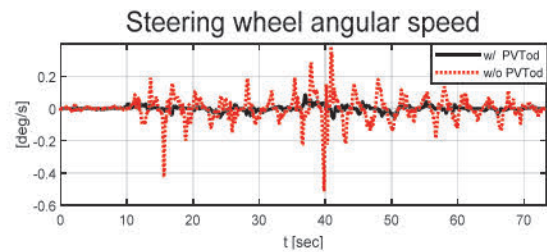


Fig. 31 Driver steering wheel angular speed (Driver-1)

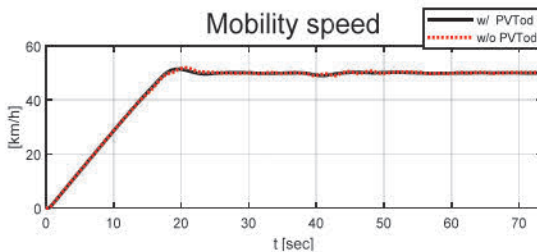


Fig. 29 Speed of mobility (Driver-1)

리즘이 적용되었을 때 상대적 작은 값으로 주행할 수 있음을 확인하였다.

4. 결론

본 논문에서는 자율 주행 모빌리티 원격 관제 주행기술의 주요 한계점 중 하나인 통신 지연을 극복하기 위한 방법론으로 예측 주행 경로 시각화 알고리즘 및 지연 보상 조향 보정 알고리즘을 제안하였다. LTE 통신 환경에서 원격 관제 주행 시 Uplink delay는 60 ms 부근에서, Downlink delay는 200 ms 부근에서 분포하는 반면,³⁾ 가상 지연시간을 각각 100 ms와 300 ms로 설정하여 비교적 큰 통신 지연시간에서의 성능을 확인하였다. 5인의 실험 운전자를 통해 HiLs 기반 성능평가가 진행되었으며, PVTod가 적용될 때 모빌리티의 경로 수렴성 및 주행 안정성, 운전자의 주행 자신감의 향상과 조작 노력 감소를 확인할 수 있었다. 이에 5G 통신 대비 비교적 저렴한 LTE 통

신의 환경에서도 제안하는 알고리즘을 통해 원격 관제 주행의 안정성과 편의성을 기대할 수 있다.

한계점으로, 현 연구 단계에서는 통신 지연시간을 고정값으로 가정하였기 때문에 통신 지연시간의 가변 상황에서도 제안하는 알고리즘이 우수한 주행 성능을 보이는지 평가될 필요가 있다. 그러므로 향후 통신 지연 현상 구현을 위해 GEV(Generalized Extreme Value) 분포 기반 난수 생성 기법을 통해 가상 통신 지연 구현 및 성능 평가 고도화를 계획하고 있다. 본 논문의 성능평가는 상대적 낮은 해상도의 영상과 도로상에 자차만 존재하는 경우로 한정하여 평가하였다. 향후 해상도를 높이면서 실 도심구간 및 주변 환경요소(차량, 보행자) 등 여러 변수를 적용하여 제안하는 경로 시각화 알고리즘이 향후 자율주행 모빌리티의 현실적 원격 관제를 위한 기술로 적용될 수 있도록 후속 연구가 진행될 예정이다.

References

- 1) Y. Zheng, M. J. Brudnak, P. Jayakumar, J. L. Stein and T. Ersal, "A Delay Compensation Framework for Predicting Heading in Teleoperated Ground Vehicles," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol.24, No.5, pp.2365–2376, 2019.
- 2) S. Sapia, A. Schimpe and L. Ferranti, "Active Safety System for Semi-Autonomous Teleoperated Vehicles," *Proc. of the 2021 IEEE Intelligent Vehicles Symposium Workshops (IV Workshops)*, pp.141–147, 2021.
- 3) J. Prakash, M. Vignati, D. Vignarca, E. Sabbioni and F. Cheli, "Predictive Display with Perspective Projection of Surroundings in Vehicle Teleoperation to Account Time-Delays," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol.24, No.9, pp.9084–9097, 2023.
- 4) G. Lee and K. Oh, "An Investigation on Simulation-Based Tele-Operated Driving Performance of Autonomous Mobility with Communication Delay," *KSAE Annual Conference Proceedings*, pp.1170–1171, 2024.
- 5) Y. Yu and S. Lee, "Remote Driving Control with Real-time Video Streaming over Wireless Networks: Design and Evaluation", *IEEE Access*, Vol.10, pp.64920–64932, 2022.
- 6) B. Song, J. Lim, S. Lee and J. Park, "A Study on the Analysis of Driver's Visual Behavior Characteristics according to the Type of Curve Radius," *Journal of the Korean Society of Safety*, Vol.27, No.2, pp.117-126, 2012.
- 7) O. Lappi, E. Lehtonen, J. Pekkanen and T. Itkonen, "Beyond the Tangent Point: Gaze Targets in Naturalistic Driving," *Journal of Vision*, Vol.13, No.13, Paper No.11, 2013.
- 8) Y. Okafuji and T. Fukao, "Theoretical Interpretation of Drivers' Gaze Strategy Influenced by Optical Flow," *Scientific Reports*, Vol.11, Paper No.2389, 2021.
- 9) S. Tuhkanen, J. Pekkanen, P. Rinkkala, C. Mole, R. M. Wilkie and O. Lappi, "Humans Use Predictive Gaze Strategies to Target Waypoints for Steering," *Scientific Reports*, Vol.9, No.1, Paper No.8344, 2019.
- 10) R. M. Wilkie, G. K. Kountouriotis, N. Merat and J. P. Wann, "Using Vision to Control Locomotion: Looking Where You Want to Go," *Experimental Brain Research*, Vol.204, pp.361–373, 2010.
- 11) Control Lab, Simulation-Based Tele-Operated Driving (ToD) with Prediction (Curved Path), <https://www.youtube.com/watch?v=uGjkiRSm5G8>, 2025.