

V2N 네트워크 지연 환경에서 저속 이동 로봇 원격주행 모의실험을 통한 성능 분석

Analysis of Remote Driving Simulation Performance for Low-speed Mobile Robot under V2N Network Delay Environment

송유승* · 민경욱** · 최정단***

* 주저자 및 교신저자 : 한국전자통신연구원 자율주행지능연구실 책임연구원

** 공저자 : 한국전자통신연구원 자율주행지능연구실 책임연구원

*** 공저자 : 한국전자통신연구원 지능로봇시스템연구본부 책임연구원

Yooseung Song* · Kyoung-wook Min* · Jeong Dan Choi*

* Electronics and Telecommunications Research Institute

† Corresponding author : Yooseung Song, yssong00@etri.re.kr

Vol. 21 No.3(2022)
June, 2022
pp.18~29

pISSN 1738-0774
eISSN 2384-1729
<https://doi.org/10.12815/kits.2022.21.3.18>

Received 15 April 2022
Revised 11 May 2022
Accepted 23 May 2022

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

요약

국내외적으로 V2X 통신기술을 접목한 C-ITS 사업 및 자율주행 고도화 실증연구가 활발히 진행되고 있다. 실증 초기 1단계에서는 경고메시지, 차량주행정보, 교통정보 등의 방송서비스에서 점차 실시간성을 요구하는 군집주행, 원격주행, 원격정보공유 등의 고도화된 서비스로 발전하고 있다. 또한, 네트워크 서비스 고도화를 위해 전송속도와 지연시간 등을 개선하기 위한 기술개발이 여러모로 진행되고 있다. 본 논문에서는 3GPP 표준 기반 C-V2X 기술을 바탕으로 안정적인 드로이드 형태의 저속 로봇의 원격주행 서비스 제공을 위해 네트워크 지연시간 측면에서 요구사항을 분석하였다. 원격주행 성능평가를 위해 오퍼레이터를 포함한 시스템 모델링을 통한 시뮬레이션을 수행하였고, 해당 실험 조건에서 90% 이상의 성능 만족을 위해 30ms 이내의 코어 및 액세스 네트워크 지연시간이 요구된다는 것을 알 수 있었다.

핵심어 : 차량용 통신기술, 협력형 지능형교통체계, 원격주행, 네트워크, 지연시간

ABSTRACT

Recently, cooperative intelligent transport systems (C-ITS) testbeds have been deployed in great numbers, and advanced autonomous driving research using V2X communication technology has been conducted actively worldwide. In particular, the broadcasting services in their beginning days, giving warning messages, basic safety messages, traffic information, etc., gradually developed into advanced network services, such as platooning, remote driving, and sensor sharing, that need to perform real-time. In addition, technologies improving these advanced network services' throughput and latency are being developed on many fronts to support these services. Notably, this research analyzed the network latency requirements of the advanced network services to develop a remote driving service for the droid type low-speed robot based on the 3GPP C-V2X communication technology. Subsequently, this remote driving service's performance was evaluated using system modeling (that included the operator behavior) and simulation. This evaluation showed that a respective core and access network latency of less than 30 ms was required to meet more than 90 % of the remote driving service's performance requirements under the given test conditions.

Key words : V2X, C-ITS, Remote driving, Network, Latency

I. 서 론

V2X(Vehicle-to-Everything) 통신기술을 활용한 1단계 C-ITS(Cooperative Intelligent Transportation System) 사업은 RSU(Road Side Unit) 등의 교통 인프라를 활용하여 주변 커넥티드 차량에게 다양한 교통정보를 제공하거나, 커넥티드 차량 간 주행정보를 공유하는 등의 서비스를 통해 종래의 많은 교통 서비스에 대한 불편함을 해소하고 동시에 운전자에게 적시 적소의 편의 서비스를 제공할 수 있는 새로운 교통 서비스 시장을 개척하는 계기가 되었다(Papadimitratos et al., 2009). 1단계 기술의 특징은 100ms 이내의 지연시간과 수십 Mbps 전송 속도에 적합한 교통안전서비스 제공을 목표로 하여 개발되었으며 관련된 통신성능 연구도 활발히 진행되었다(Song and Choi, 2017). 또한, C-ITS 기술의 2단계 진화를 위해 초저지연 고신뢰 기반의 V2X 기술을 활용한 근집주행, 실시간 인식정보 공유, 원격제어 등의 첨단운전서비스 분야로 유즈케이스가 확대되고 있다(3GPP TR 22.886, 2018). 최근 자율주행기술의 빠른 발전으로 차량 센서의 인식 한계와 악천후로 인한 성능 열화 문제 등에 대처하는 방안으로 V2X 기술과의 융합을 통한 인식 성능과 주행 효율성을 개선하는 연구가 주목을 받고 있다(Butt et al., 2022). 차량 센서와 V2X 통신을 융합하여 주변 교통환경을 인식하는 기술은 상호 장단점 보완이 가능하다. 특히 자율주행단계 고도화를 위해 돌발 상황이나 긴급상황 발생시 위험 최소화를 위한 fall back MRC (Minimal Risk Condition) 기능이 필수 요건으로 제시되고 있으므로 V2N(Vehicle-to-Network) 기술을 활용하여 특정한 구간에 원격주행 서비스를 제공하는 방안은 해결책 중 하나로 활용이 가능하다. 무엇보다 원격제어와 같은 C-ITS 2단계 응용서비스 제공을 위해서는 대용량 데이터를 실시간 무결성 전송이 가능한 네트워크 기술개발이 필수적이다(Chen et al., 2020).

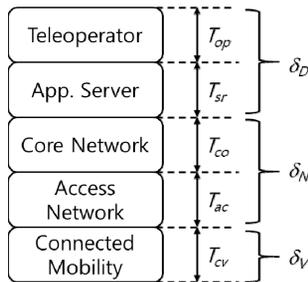
원격주행 혹은 원격이동체 제어를 위해서는 무엇보다 네트워크의 안정성이 매우 중요하며 최근 네트워크 기반 원격제어 및 서비스를 위한 네트워크 특성 분석과 지연으로 인한 성능 열화를 감소시키기 위한 다양한 기술들이 제안되었다. 고정적 혹은 가변적으로 네트워크 지연이 발생하는 조건에서 네트워크 지연으로 인한 성능 열화를 극복하기 위해 차량의 움직임 예측하거나 서버에 수신되는 영상 프레임을 버퍼링하여 일정한 간격으로 오퍼레이터에게 제공함으로써 원격제어 성능을 크게 개선하였다(Davis et al., 2010; Liu et al., 2017). 이러한 연구들은 주로 이동체의 원격제어 성능 분석을 위해 네트워크 특성을 모델링한 시뮬레이션 또는 실내 공간에서 RC 자동차와 같은 모형차량을 활용하는 형태로 수행되었다. 그뿐만 아니라 실제적인 환경에서의 성능 분석을 위해 일반 도심지에서 상용 네트워크를 활용한 연구결과도 발표되었다. (Neumeier et al., 2019)는 LTE(Long Term Evolution), EDGE(Enhanced Data Rates for GSM Evolution), HSPA(High Speed Packet Access), UMTS(Universal Mobile Telecommunication System) 등의 다양한 무선접속기술을 활용하였으며 실제 도심지 도로 환경에서 네트워크의 지연시간, 전송속도 등의 다양한 데이터를 분석하고 안정적인 원격제어 서비스를 위해 고품질의 네트워크 서비스지역을 선별하여 운영하는 방식을 제안하였다. 특히 이기종 네트워크 간의 핸드오버 수행 시 발생하는 급격한 성능 열화 문제를 회피하기 위해 동종 네트워크 간 핸드오버 필요성을 제안하였다. (Kanavos et al., 2021)는 이동 차량에 대한 무선통신 서비스 제공을 위해 3GPP에서 표준으로 채택된 LTE-V2X 및 5G-NR-V2X 통신기술에 대해 액세스 네트워크 인터페이스에 대한 전송속도와 지연시간 등을 분석하였다. 수치상으로 계산된 결과들을 바탕으로 (3GPP, 2018)에서 제시된 실시간 고신뢰 기반 자율주행서비스에 대한 요구사항 만족 여부를 분석하였다. 그러나 차량용 C-V2X 통신기술을 활용 시 네트워크 지연시간에 대한 특성을 반영한 원격제어 시뮬레이션 및 성능 분석 연구에 대해서는 제시되지 않았다.

따라서 본 논문에서는 지연시간이 발생하는 C-V2X 네트워크 환경에서 이동체 원격제어 성능검증과 네트워크 요구사항 분석을 위해 다음과 같은 방법론으로 연구를 진행하였다. 2장에서는 C-V2X 기반 원격제어 서

비스 제공을 위해 활용되는 대표적인 네트워크 인터페이스를 선정하고 지연시간의 특징을 분석하였다. 3장에서는 시뮬레이션을 통한 성능 분석을 위해 오퍼레이터의 조작행태, 네트워크 지연, 이동체의 움직임 등을 포함한 전체적인 시스템 모델링 수행하였다. 특히, 이동체의 움직임에 대한 모델링은 (Storms and Tilbury, 2015)에서 참고한 주행 환경과 실측값을 기반으로 수행되었으며 일반적인 자율주행 차량의 서비스 환경이라기보다는 저속으로 이동하는 드로이드 형태의 배송 로봇 환경에 적합하다고 볼 수 있다. 4장에서는 오퍼레이터, 서버, 네트워크 코어, 액세스 네트워크 및 이동체(차량)에서 각기 발생하는 지연시간을 시스템 모델링에 반영하여 시뮬레이션을 통한 성능 분석을 진행하였다. 5장의 결론에서 원격제어 성능 분석을 통해 얻은 결과를 토대로 네트워크 지연시간에 대한 요구사항을 제안하였다.

II. C-V2X 기반 원격제어 네트워크 지연시간 분석

오퍼레이터가 위치한 관제 시스템과 원격제어 이동체 간 데이터 송수신 지연을 일으키는 대표적인 요소로 인프라 네트워크의 데이터 처리시간, 영상 송수신 처리시간, 오퍼레이터의 인지 및 반응 시간, 이동체 내부의 네트워크 전달 및 제어까지의 처리시간 등으로 크게 구분할 수 있다.



<Fig. 1> Latency at each layer for remote driving service

<Fig. 1>에서는 원격제어 서비스 제공 시 관제 공간에 있는 오퍼레이터에서 제어 이동체까지 발생하는 시간 지연을 크게 5단계로 구분하여 설명한다. 원격 오퍼레이터는 영상 출력 모니터를 통해 상황을 인지/판단하고 실제 반응하기까지 T_{op} 지연시간이 발생한다. 서버에서는 이동 차량으로부터 수신된 영상을 디코딩하고 화면에 표출하기까지 T_{sr} 지연시간이 발생한다. 상기 두 시간 지연을 δ_D 로 정의하였다. 코어 및 액세스 네트워크에서는 각각 T_{co} , T_{ac} 지연시간이 발생하며 δ_N 으로 정의하였다. 그리고 차량용 통신 장치로부터 수신된 제어 메시지가 차량 시스템을 거쳐 차량의 액추에이터 지연까지 포함한 최종 차량제어에 적용되기까지 T_{cv} 지연이 발생하며 δ_V 로 정의하였다. 그 밖의 무선통신 장치 간 전파 지연시간(수백ns 정도) 등의 미비한 지연 등은 배제하였다(NIST, 2011). 원격제어 서비스는 상향/하향 통신링크를 통해 서비스를 제공하는 시나리오로 설정하였으며 차량 간 통신링크(SL, Side Link)를 통한 서비스 시나리오는 포함되지 않는다. 원격제어 서비스를 위해 원격제어 이동체가 RSU와 연결된 V2I보다 상대적으로 통신반경이 넓은 이동통신 기지국과의 V2N을 활용한 3GPP 표준기반의 LTE-V2X와 5G-NR-V2X 네트워크 사용을 전제하였다.

1. LTE-V2X 네트워크 지연시간

본 절에서는 먼저 C-V2X 기술로 3GPP Release 14 표준 기반 LTE-V2X 활용 시 네트워크 전반에 걸친 지연시간을 분석하였다. 데이터 전송 관련 네트워크 지연시간은 서버에서 차량 통신장치까지 패킷 도달 소요 시간으로 앞에서 설명된 응용서버(T_{sr}), 코어 네트워크(T_{co}) 및 액세스 네트워크(T_{ac})를 모두 포함한다. 액세스 네트워크에서 상향링크(UL, Uplink) 지연시간은 이동체 통신장치(UE, User Equipment)에서 기지국(eNB, evolved Node B)까지 패킷이 도달하는 시간으로써 스케줄링 방식에 따라 달라진다. 하향링크의 경우 사용자(원격이동체)별 맞춤형 제어 명령이 제공됨으로 MBMS(Multimedia Broadcast and Multicast Service)가 아닌 Unicast 메시지로 전송된다. 상향링크 자원 스케줄링 방식 및 파라미터값에 따라 코어 네트워크를 포함한 E2E(End-to-End) 네트워크 지연시간은 <Table 1>과 같다(3GPP TR 36.885, 2016).

<Table 1> E2E network latency for LTE-V2X

Configuration / Period [ms]			Latency(δ_N) [ms]			
Scheduling scheme		SR	Mandatory+optional		Only mandatory	
DS	SPS		Mean	Max.	Mean	Max.
BSR	-	1	311.6	472.1	47.6	48.1
		10	316.1	481.1	52.1	57.1
w/o BSR	-	1	303.6	464.1	39.6	40.1
		10	308.1	473.1	44.1	49.1
-	10	-	299.8	464.8	35.8	40.8
	40		314.8	494.8	50.8	70.8
	80		334.8	534.8	70.8	110.8

<Table 1>에서 Mandatory는 액세스 네트워크 상향 및 하향링크 지연시간과 코어 네트워크에서의 지연시간만을 고려한 경우이며, Optional은 RRC(Radio Resource Control)의 상태가 IDLE에서 CONNECTED로 천이되는 시간과 eNB로부터 UE가 Paging 메시지를 수신하는 데까지 소요시간을 모두 포함한 경우이다. 사용자 단말(UE)이 상향링크 데이터 전송을 위해 기지국(eNB)에게 자원을 요청(SR, Scheduling Request)하는 두 가지 방식이 존재한다. UE가 필요 시 상향링크 자원을 주기적으로 요청하는 DS(Dynamic Scheduling) 방식과 eNB에서 UE에게 주기적으로 자원을 할당해주는 SPS(Semi-Persistent Scheduling) 방식이 사용된다. 이때 DS 방식에는 단말의 버퍼 상태 정보를 함께 알려주는 BSR(Buffer Status Report) 사용이 가능하며 추가적인 지연시간이 발생한다. DS 방식은 UE가 자원을 요청하는 프로토콜이 추가됨으로써 SPS(10)보다 지연시간이 크다는 것을 알 수 있다. 또한, SR 및 SPS의 자원요청 주기가 커질수록 버퍼 대기시간 증가로 지연시간이 함께 증가하게 된다. eNB를 거쳐 SGW(Serving Gateway)/PGW(PDN Gateway)를 통해 응용 서버까지 왕복하는데 소요되는 백홀에서의 지연시간은 20ms로 가정하였다(3GPP TR 36.885, 2016).

2. 5G-NR 네트워크 지연시간

본 절에서는 C-V2X 기술로 3GPP 5G-NR 활용 시 네트워크 전반에 걸친 지연시간을 분석하였다. 3GPP 5G-NR 표준에서는 초저지연 패킷 전송을 위해 SCS(Subcarrier Spacing), OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) symbol duration, cyclic prefix 등을 유연하게 정의하는 Numerology를 제안하고 10ms의 프레임을

1ms의 길이를 갖는 10개의 subframe으로 구성하여 획기적인 지연시간을 개선하였다. 원격제어 데이터 송수신을 위해 5G-NR 기반 코어 네트워크와 액세스 네트워크를 통한 UE까지 전송지연 분석에 필요한 프로토콜과 조건들은 표준문서를 토대로 주파수 분할 송수신(FDD, Frequency Division Duplex) 방식, UE capability 2 그리고 자원 매핑 타입 A 조건에서 액세스와 코어 네트워크에 대한 지연시간을 도출하였다(3GPP TR 37.910, 2019). 코어 네트워크 지연시간은 기지국(gNB)과 EPC(Evolved Packet Core) 그리고 응용 서버를 거쳐 왕복하는데 대략 18ms의 지연시간을 가정하였다(5GAA, 2019).

전송데이터를 복조하는 데 필요한 레퍼런스 신호의 위치에 따라 Resource Mapping 타입 A와 타입 B로 구분되며 데이터 전송에 필요한 OS(OFDM symbol)의 수, 초기 에러 확률 및 SCS에 따라 User Plane에서 소요되는 지연시간은 <Table 2>와 같다. 참고로 데이터 전송을 위해 Control Plane에서는 RACH(Random Access Channel) 메시지를 활용한 RRC INACTIVE에서 CONNECTED로 상태 천이가 요구되며 20ms 정도의 추가적인 지연이 발생한다(3GPP TR 37.910, 2019). SCS가 커지게 되면 슬롯과 CP(Cyclic Prefix)의 길이가 짧아지게 되어 지연시간이 감소하게 된다. 또한, 초기 전송 에러 확률값(p)과 사용하는 OS 수는 지연시간과 비례함을 알 수 있다.

<Table 2> E2E network latency for 5G-NR user plane

Resource mapping type A		Latency(δ_N) [ms] / SCS		
OS	Initial error prob.	15kHz	30kHz	60kHz
4	p=0	20.2	19.2	18.77
	p=0.1	20.51	19.4	18.88
7	p=0	20.42	19.31	18.82
	p=0.1	20.75	19.51	18.93
14	p=0	21.6	19.88	19.12
	p=0.1	22.0	20.1	19.26

III. 네트워크 기반 원격제어 시스템

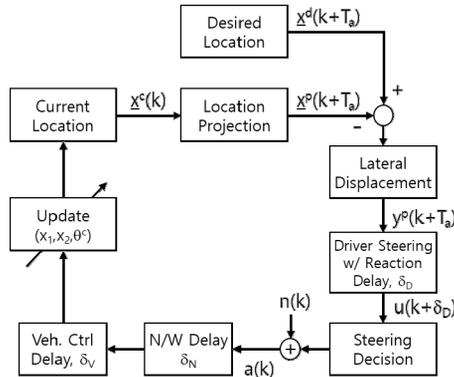
본 절에서는 V2N 네트워크를 활용한 원격이동체 제어 시나리오를 바탕으로 네트워크 지연시간, 오퍼레이터 조작형태 및 이동체 움직임 등이 반영된 전체 시스템을 모델링하였다. 시스템에 고려된 지연시간은 서버 처리시간을 포함한 오퍼레이터 대응 처리시간(δ_D), 코어 및 액세스 네트워크 지연시간(δ_N) 그리고 이동체 내부 데이터 처리 시간(δ_V)이다. 본 논문에서는 이동체가 일정한 속도(v)로 주행 시 간단한 2차원 키네마틱 주행 모델을 가정하여 주기적으로 방향각(θ)과 좌표(x_1, x_2)를 갱신하도록 하였다. 따라서 현재 위치(\underline{x}^c)는 다음과 같이 표현된다.

$$\underline{x}^c(k) = \begin{bmatrix} x_1^c \\ x_2^c \\ \theta^c \end{bmatrix}_k = \underline{x}^c(k-1) + \begin{bmatrix} v \cos \theta_k / f_r \\ v \sin \theta_k / f_r \\ \omega_r / f_r \end{bmatrix} \dots \dots \dots (1)$$

여기서 x_1 과 x_2 는 각각 종축 및 횡축 이동 위치를 의미하여 ω_r 는 각속도 f_r 은 시스템 주파수 θ_k 는 이동체

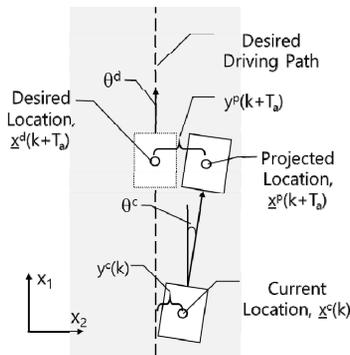
방향각 그리고 k 는 갱신 인덱스를 의미한다.

시스템 주기마다 원격이동체의 위치 오차를 계속해서 도출하고 오차를 최소화하기 위해 식 (1)의 방향각을 갱신하면서 주행을 하게 된다. 이때 오퍼레이터의 조향 제어 명령은 최종 이동체에 전달되어 반영되기까지 여러 단계의 시간 지연을 겪게 된다. 전체적인 시스템의 계산식 루프는 <Fig. 2>와 같다.



<Fig. 2> System update loop for teleoperated vehicle

원격제어 위치 오차를 계산하기 위해서는 전방주시 시간(look ahead time)을 반영한 예측 이동 위치와 목표 이동 위치 간의 오차 계산이 필요하다. 전방주시 시간을 T_a 로 가정할 때 예측 이동 위치와 목표 이동 위치 및 오차 계산은 <Fig. 3>과 같이 설명된다.



<Fig. 3> Projected location and displacement from the desired location

따라서 현재 차량 위치에서 일정한 속도로 주행 시 예측 이동 위치 $\underline{x}^p(k+T_a)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\underline{x}^p(k+T_a) = \begin{bmatrix} x_1^p \\ x_2^p \\ \theta^p \end{bmatrix}_{k+T_a} = \underline{x}^c(k) + \begin{bmatrix} v T_a \cos \theta_k \\ v T_a \sin \theta_k \\ 0 \end{bmatrix} \dots \dots \dots (2)$$

목표 이동 위치는 전방주시 시간을 고려한 예측 이동 위치(x_1^p, x_2^p)와 가장 근접한 거리를 갖는 목표 경로상의 좌표 (x_1^d, x_2^d) 값으로 도출하기 위해 유클리디안 거리를 활용한 수식 (3)을 통해 계산되며 방향각 (θ_{LSUPd})은 해당 지점에서의 목표 주행 방향이 된다.

$$(x_1^d, x_2^d) = \underset{(x_1, x_2) \in path}{\arg \min} \sqrt{(x_1 - x_1^p) + (x_2 - x_2^p)} \dots\dots\dots (3)$$

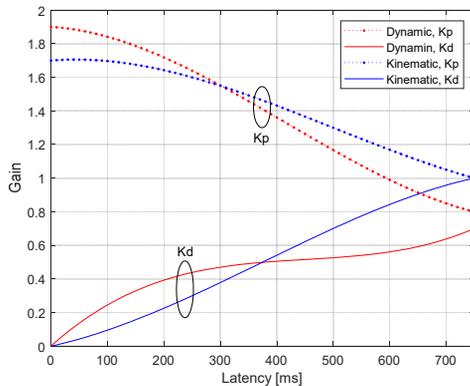
예측 이동 위치와 목표 이동 위치 간의 횡 방향 오차(lateral displacement)를 $y^p(k+T_a)$ 라고 정의할 때 오차의 값은 $\underline{x}^p(k+T_a)$ 에서 $\underline{x}^d(k+T_a)$ 지점의 수선 길이가 되며 수식 (4)를 통해 계산된다.

$$y^p(k + T_a) = (x_2^d - x_2^p)\cos\theta^d - (x_1^d - x_1^p)\sin\theta^d \dots\dots\dots (4)$$

실제 오퍼레이터의 개입 없이 시뮬레이션만으로 성능 분석을 수행하기 위해서는 횡 방향 오차 피드백을 통해 차량의 조향각을 목표 경로로 방향을 제어하는 운전자 모델링이 필요하다. 입력 에러값을 사용하여 시스템을 제어할 수 있는 PD(Proportional Differential) 제어를 통해 오퍼레이터 조향 모델링을 하였으며 오퍼레이터의 조작 지연 및 관제 시스템의 지연시간(δ_D)을 고려한 조향 출력값 $u(k+\delta_D)$ 은 다음과 같이 나타낼 수 있다(Nise, 2004).

$$u(k + \delta_D) = K_p y^p(k + T_a) + K_d \frac{y^p(k + T_a) - y^p(k + T_a - 1)}{\Delta t} \dots\dots\dots (5)$$

여기서 K_p 와 K_d 는 각각 비례항과 미분항에 대한 이득 값 그리고 Δt 은 샘플링 시간을 나타낸다. 해당 이득 값은 실제 오퍼레이터가 원격제어 운전을 통해 얻은 성능 결과와 동일한 이득 값을 찾는 방식으로 구할 수 있다. <Fig. 4>에서는 (Storms and Tilbury, 2015)가 실험을 통해 획득한 몇 개의 값에 대해 보간법을 사용하여 지연시간의 범위(0~750ms)에서의 제어 이득 값 도출하였다. 차량의 움직임 모델링 시 단순한 이동과 방향을 고려한 Kinematic 모델과 차량의 사시, 바퀴 및 구동 모터를 등의 동역학을 고려한 Dynamic 모델을 함께 비교하였다.



<Fig. 4> Control gain of Kp and Kd according to latency

실제로 조향 출력값 $u(k)$ 의 범위는 연속적 값으로 계산되나 시뮬레이션에서는 절댓값이 문턱값(μ) 보다 큰 경우 +1(우향) 혹은 -1(좌향)의 형태로 변환하여 적용하였다. 따라서 조향 제어를 위한 최종 출력값 $a(k)$ 은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$a(k) = \text{signum}(u(k)) + n(k) \dots\dots\dots (6)$$

여기서 signum 은 부호함수를 의미하며 $n(k)$ 는 실제 차량제어 입력에 더해지는 오차를 반영하기 위해 추가되었다. 참고문헌 (Storms and Tilbury, 2015)와 같이 $n(k)$ 는 [-0.1 0.1] 사이의 균등분포를 갖는 확률변수 값으로 설정됨으로 $a(k)$ 는 [-1.1 1.1] 사이의 분포 값을 갖게 된다.

차량 조향 제어를 위한 결정 값 $a(k)$ 는 코어 및 액세스 네트워크 지연시간(δ_N)과 이동체 내부 네트워크 (IVN) 및 제어까지의 추가적인 지연시간(δ_V)이 소요된 후 조향각 갱신을 위해 수식 (7)과 같이 표현된다.

$$\theta_k^c = \theta_{k-1}^c + a(k + \delta_N + \delta_V)\omega_r/f_r \dots\dots\dots (7)$$

결국, 조향각은 주어진 각속도(ω_r)와 시스템 갱신 시간($1/f_r$)에 좌/우 방향을 결정하는 조향 제어 출력값 $a(k)$ 을 반영하여 갱신된다.

IV. 시뮬레이션 성능 분석

본 절에서는 앞에서 살펴본 지연시간을 반영하여 이동체 제어 시뮬레이션을 통해 주행 성능을 분석하였다. 성능 분석을 위한 주요 파라미터 및 설정값은 다음과 같다.

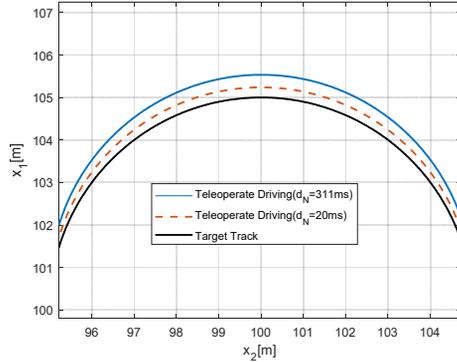
<Table 3> Simulation parameters

Parameter	Unit	Values	Description
δ_D	ms	200	Operator and server delay
δ_N	ms	20-530	Core and access network delay
δ_V	ms	20	IVN and system delay
T_a	sec	1.25	Look ahead time
μ	-	0.1	Control threshold
f_r	Hz	40	System running cycle
v	m/s	1.0	Mobility speed
ω_r	rad/s	0.2	Turn rate

도로 중심선에서부터 현재 위치까지 횡 방향 오차 $y^c(k)$ 를 트랙 추종 성능지표로 정의하였다. 현재 위치에서 가장 근접한 목표 중심좌표(x_1^d, x_2^d)는 현재 위치 좌표(x_1^c, x_2^c)를 수식 (3)에 대입하여 구할 수 있다. 현재 위치에서의 횡 방향 오차 $y^c(k)$ 는 수식 (4)를 활용하여 $\underline{x}^c(k)$ 에서 $\underline{x}^d(k)$ 지점의 수선 길이를 계산한다. 따라서 시뮬레이션 시간 동안 시스템의 총 갱신 횟수를 K 라고 할 때 도로 중심선 추종 성능점수 S 는 다음과 같다.

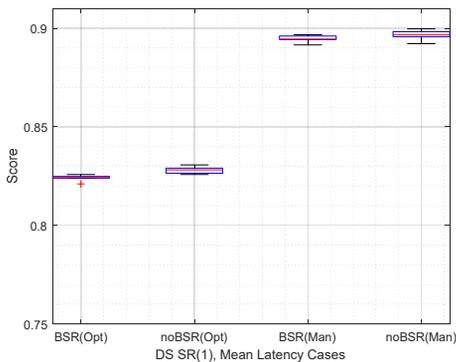
$$S = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \max(0, 1 - |y^c(k)|) \dots\dots\dots (8)$$

본 연구에서 성능평가를 위해 사용된 시험주행트랙은 폭 1미터 반경 5미터의 원형 교차로 트랙으로 구성하였으며 이동체 차량의 폭은 0.74미터 정도의 크기를 갖는다(Storms and Tilbury, 2015). 주어진 실험 조건에서 총 10번의 시뮬레이션을 통해 취득한 값으로 도로 중심선 추종 성능을 분석하였다. <Fig. 5>에서는 원형 교차로 트랙에서 네트워크의 지연시간이 각각 20ms와 311ms의 값을 가질 때 시험주행트랙 추종 성능을 예시로 보여준다. 네트워크 지연시간이 클수록 곡선부 조향 제어 오차가 크게 나타남을 쉽게 알 수 있다.

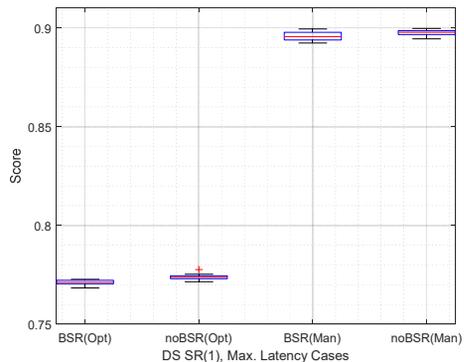


<Fig. 5> Target track following performance for 20ms and 311ms network delay

<Fig. 6>과 <Fig. 7>에서는 <Table 1>에 근거하여 LTE-V2X 자원할당 방식으로 DS SR(1)을 사용 시 BSR 사용 여부에 따른 평균 지연시간 및 최대 지연시간에 대해 주행트랙 추종 성능을 비교하여 보여준다. 평균 지연시간을 고려 시 Mandatory(Man)가 Optional(Opt) 보다 7% 정도 그리고 최대 지연시간의 경우 13% 정도 우수한 성능을 보여주고 있다. 반면 BSR의 유무에 따라서는 1% 이내의 성능 차이를 보여준다. 또한, Mandatory의 경우 평균 지연시간과 최대 지연시간 간의 성능 차이는 거의 미비하다는 것을 알 수 있다. 참고로, 본 시뮬레이션에서의 성능점수 0.9는 원격이동체의 주행 경로가 시험도로 중심선으로부터 평균 10cm의 떨어진 거리로 주행한다는 것을 의미한다.



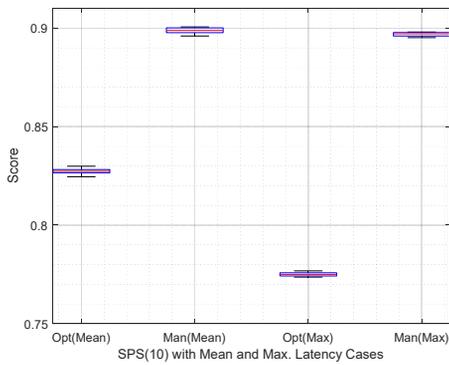
<Fig. 6> Path following score for mean latency under LTE-V2X DS SR(1)



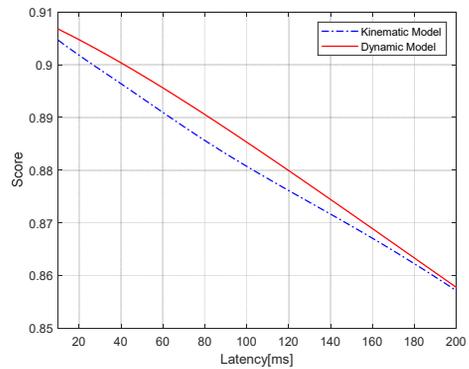
<Fig. 7> Path following score for maximum latency under LTE-V2X DS SR(1)

<Fig. 8>에서는 LTE-V2X 자원할당 방식으로 SPS(10)을 사용 시 평균 지연시간 및 최대 지연시간에 대해

주행트랙 추종 성능을 비교하여 보여준다. 평균 지연시간 조건에서 **Mandatory**가 **Optional**보다 7% 더 우수한 성능을 보이며, 최대지연시간 조에서는 12% 더 좋은 성능을 보여준다. 또한, **Mandatory**의 경우 평균 지연시간과 최대 지연시간 간의 성능 차이는 매우 미비하지만, **Optional**의 경우 5% 이상 성능 차이가 나는 것을 알 수 있다. <Fig. 9>에서는 5G-NR-V2X를 사용하는 네트워크 환경에서 <Table 2>에 제시된 자원할당방식과 사용자 단말기 조건에서 해당 지연시간의 범위를 포함한 최대 200ms까지의 지연시간에 대해 두 가지 차량 모델을 비교한 성능을 보여준다. 5G-NR-V2X 네트워크 환경에서는 22ms의 지연시간에서 시험주행트랙 추종 성능 0.9 이상을 두 차량 모델에서 모두 보여주고 있다. Control plane에서 소요되는 추가적인 20ms를 반영하더라도 추정성능은 0.89 이상이 가능함을 알 수 있다. Dynamic 차량 모델과 Kinematic 모델은 유사한 성능 추이를 보이거나 다양한 차량 동역학적 움직임을 고려한 Dynamic 모델은 지연시간이 작을수록 Kinematic 모델의 성능과 더 많은 차이를 가지며 참고문헌 (Storms, 2015)에 따르면 실제 원격 오퍼레이터가 작동한 결과와 더욱 흡사한 결과를 나타냄을 알 수 있다. 따라서, 200ms 이하의 낮은 지연시간에 대해서는 Dynamic 모델을 사용하는 것이 더욱 실제에 가깝게 모델링 된 결과를 얻을 수 있다고 할 수 있다.

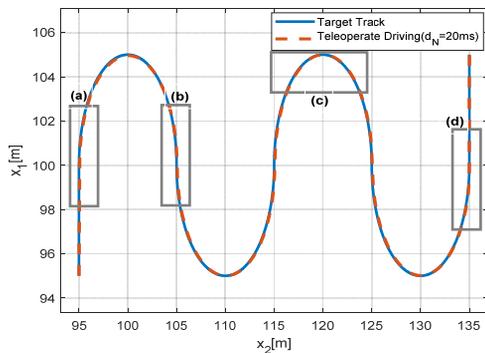


<Fig. 8> Path following score under LTE-V2X SPS

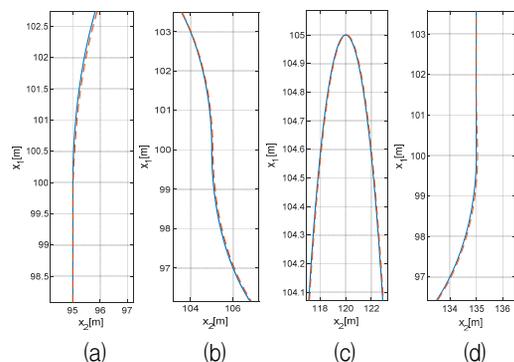


<Fig. 9> Path following score comparison between Kinematic and Dynamic vehicle model

<Fig. 10>에서는 원격주행의 성능을 보다 동적인 환경에서도 동작할 수 있는지 평가하기 위해 처음과 마지막 부분에 직선 구간을 포함한 S자 형태의 시험주행트랙을 구성하고 그 결과를 제시하였다.



<Fig. 10> Target track following performance with S-test track



<Fig. 11> Detail view of target track following performance

또한, 일부 구간에 대해서 정확한 트랙 추정의 성능을 확인하기 위해 <Fig.11>에서는 (a) ~ (d) 구간에 걸쳐 확대된 추종 성능을 표현하였다. 시험주행트랙에서 전체적인 성능점수는 0.9 이상을 만족함으로써 1m 이내의 횡 방향 오차를 보임으로써 본 논문에서 제시된 결과물이 S자 형태의 동적인 환경에서도 만족할 만한 성능을 확보할 수 있음을 검증하였다.

V. 결 론

본 논문에서는 V2N 네트워크 기반 드로이드 형태의 저속 원격이동체 제어 서비스 제공 시 네트워크 지연 시간으로 인한 성능을 분석하였다. 유무선 네트워크 기반 서비스에서는 오퍼레이터, 서버, 코어 및 액세스 네트워크 그리고 원격이동체 내부 시스템 등에서 주요 지연이 발생하게 된다. 본 논문에서는 네트워크 기반 원격제어 서비스 제공을 위해 3GPP LTE-V2X와 5G-NR-V2X 기술을 활용 시 각 구간에서 발생하는 지연시간을 도출하고 원격제어 주행 성능에 미치는 영향을 분석하였다. 원격제어 서비스 성능 분석 시뮬레이션을 위해 오퍼레이터 조향 제어, 이동체 주행 및 지연시간 등을 고려한 전체적인 시스템을 모델링하였다. LTE-V2X 환경에서는 기지국의 자원할당 방식에 따라 DS 방식과 SPS 방식을 구분하여 분석하였다. DS 방식의 경우 BSR의 사용 여부와 상관없이 Mandatory만 사용할 경우 대략 성능점수 0.89(목표 트랙에서 11% 정도의 오차)를 만족할 수 있으며 Optional을 모두 사용할 경우 성능점수는 최소 0.77에서 평균 0.83까지를 만족하였다. SPS 방식의 경우 평균과 최대 지연시간에 대한 성능점수는 DS와 유사한 성능 및 경향을 보였으나 프로토콜 상의 오버헤드 감소로 인한 근소한 성능 우위를 보여주었다. 5G-NR-V2X를 사용하는 경우 자원할당 옵션에 따라 19~22ms의 지연시간을 가지며 시험주행트랙 추정성능점수는 0.9 이상을 보여주었으며 Control plane의 오버헤드 20ms를 고려하더라도 큰 성능 열화는 없었다. 차량 모델로 Kinematic과 Dynamic 모델을 비교하였으며 Dynamic 모델은 특히 200ms 이하의 지연시간에서 성능 우위를 보이며 실제에 가까운 모델링 결과를 얻는 데 효과적임을 알 수 있었다. 따라서 주어진 실험 조건에서 트랙너비 1m를 기준으로 10% 이내의 추종 오차를 만족하기 위해서는 30ms 이내의 인프라 네트워크 지연시간이 요구된다는 결론을 도출할 수 있었다. 그 외 서버 및 이동체 시스템 등의 데이터 처리시간 최적화를 통해 추가적인 성능 개선이 가능하며 고속도로 또는 도심지의 실제적인 주행속도를 고려한 이동체의 원격주행 성능 분석이 향후 과제로 남아 있다.

ACKNOWLEDGEMENTS

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음 (과제번호 21AMDP-C161756-01)

REFERENCES

- 3rd Generation Partnership(3GPP) Technical Report 22.886 (V16.2.0)(2018), *Study on enhancement of 3GPP support for 5G V2X services*, Release 16 December 2018.
- 3rd Generation Partnership(3GPP) Technical Report 36.885 (V14.0.0)(2016), *Study on LTE-Based V2X Services*, Release 14 June 2016.

- 3rd Generation Partnership(3GPP) Technical Report 37.910 (V16.1.0)(2019), *Study on Self-Evaluation towards IMT-2020 Submission*, Release 16 September 2019.
- 5G Automotive Association(5GAA) White Paper(2019), *Cellular V2X Conclusions Based on Evaluation of Available Architectural Options*, February 2019.
- Butt, F. A., Chattha, J. N., Ahmad, J., Zia, M. U., Rizwan, M. and Naqvi, I. H.(2022), “On the integration of enabling wireless technologies and sensor fusion for next-generation connected and autonomous vehicles”, *IEEE Access*, vol. 10, pp.14643-14668.
- Chen, S., Hu, J., Shi, Y., Zhao, L. and Li, W.(2020), “A vision of C-V2X: Technologies, field testing, and challenges with chinese development”, *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 7, no. 5, pp.3872-3881.
- Davis, J., Smyth, C. and McDowell, K.(2010), “The effects of time lag on driving performance and a possible mitigation”, *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 26, no. 3, pp.590-593.
- Kanavos, A., Fragkos, D. and Kaloxylos, A.(2021), “V2X communication over cellular networks: Capabilities and challenges”, *Telecom, Multidisciplinary Digital Publishing Institute*, vol. 2, no. 1, pp.1-26.
- Liu, R., Kwak, D., Devarakonda, S., Bekris, K. and Ifto, L.(2017), “Investigating remote driving over the LTE network”, *In Proceedings of the 9th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*, pp.264-269.
- Neumeier, S., Walelgne, E. A., Bajpai, V., Ott, J. and Facchi, C.(2019), “Measuring the feasibility of teleoperated driving in mobile networks”, *Network Traffic Measurement and Analysis Conference(TMA)*, pp.113-120.
- Nise, N. S.(2004), *Control systems engineering* (4th ed.), John Wiley & Sons.
- NIST Technical Note 1557(2011), *Measurements and Models for the Wireless Channel in a Ground-Based Urban Setting in Two Public Safety Frequency Bands*, January 2011.
- Papadimitratos, P., De La Fortelle, A., Evensen, K., Brignolo, R. and Cosenza, S.(2009), “Vehicular communication systems: Enabling technologies, applications, and future outlook on intelligent transportation”, *IEEE Communications Magazine*, vol. 47, no. 11, pp.84-95.
- Song, Y. S. and Choi, H. K.(2017), “Analysis of V2V broadcast performance limit for WAVE communication systems using two-ray path loss model”, *Electronics and Telecommunications Research Institute Journal*, vol. 39, no. 2, pp.213-221.
- Storms, J. and Tilbury, D.(2015), “Equating user performance among communication latency distributions and simulation fidelities for a teleoperated mobile robot”, *2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation(ICRA)*.