

사이버-물리 교차로 시스템에서 참조이동모형 기반 녹색신호 최적화 가속도 조언의 설계 및 구현

정 한 유[°], 수라마다 토미 앳히야사^{*}, 응웬 호아 흥^{*}

Design and Implementation of Green Light Optimal Speed Advisory Based on Reference Mobility Models (GLOSA-RMM) in Cyber-Physical Intersection Systems (CPIS)

Han-You Jeong[°], Tommy Adhyasa Suramardhana^{*}, Hoa-Hung Nguyen^{*}

요 약

본 논문에서는 교차로 주변의 고정된 위치에 있는 노변기지국과 WAVE/DSRC 기반 자동차통신단말, 그리고 스마트폰 앱을 긴밀하게 상호 연동하는 사이버-물리 교차로 시스템(CPIS)을 소개한다. CPIS 구조를 기반으로 교차로 정지시간과 연료소모를 줄이기 위한 참조이동모형 기반 녹색신호 최적화 속도조언(GLOSA-RMM)을 제안한다. GLOSA-RMM은 자동차의 다양한 참조이동모형들을 기반으로 자동차의 현재 위치/속도 정보와 교차로 교통신호 정보를 고려하여 적절한 속도조언을 결정하고, 이를 화면과 음성으로 동시에 제공하여 운전자의 부주의를 최소화한다. 임베디드 시스템 기반의 노변기지국과 자동차통신단말, 그리고 안드로이드 앱(App)의 개발을 통해 CPIS 시작품을 구축하고, 실차 환경에서 실험을 수행하여 GLOSA-RMM 알고리즘이 교차로 정지시간과 연료 소모를 줄일 수 있음을 보인다.

Key Words : Cyber-physical intersection system (CPIS), green light optimal speed advisory (GLOSA), reference mobility model, intersection stopping time

ABSTRACT

In this paper, we introduce a cyber-physical intersection systems (CPIS) which intimately interconnects roadside units (RSU) located at intersection, on-board units (OBU) of moving vehicles, and smartphone apps. Based on the architecture of CPIS, we also present a green light optimal speed advisory based on the reference mobility models (GLOSA-RMM) to reduce intersection stopping time (IST) and fuel consumption. Based on several reference mobility models, the GLOSA-RMM determines the appropriate speed advisory by taking into account the current mobility and the intersection traffic light status, and then provides screen/voice GLOSA instructions to minimize the driver's distraction. We show that the GLOSA-RMM can reduce both the IST and the fuel consumption through the numerical results obtained from the prototype of the CPIS consisting of the OBU, the RSU and the smartphone app.

※ 이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(NRF-2013R1A1A1012290)

° First and Corresponding Author : Institute of Logistics IT, Pusan National University, hyjeong@pusan.ac.kr, 종신회원

* Department of Big Data, Pusan National University, tommy.adhyasa@gmail.com, 학생회원, nguyenhoahungit@gmail.com, 학생회원
논문번호 : KICS2014-04-136, Received April 17, 2014; Revised July, 3, 2014; Accepted August 8, 2014

I. 서 론

도로교통공단 교통사고분석시스템의 통계자료에 의하면 2002년부터 2012년까지 10년간 자동차등록대수와 운전면허소지자의 수가 각각 35.3 퍼센트와 33.2 퍼센트 증가하였다¹⁾. 반면, 동일한 기간에 도로연장거리의 증가율은 13.6 퍼센트에 불과하여, **도로 공급의 부족으로 인한 도로교통의 효율성이 갈수록 저하되고 있는 실정**이다. 일반적으로 도로 공급을 늘리는 교통 정책은 수년 이상의 시간과 천문학적인 예산 투자가 필요하기 때문에 기하급수적인 도로교통 수요를 감당하는데 어려움이 있다.

이러한 문제점들을 해결하기 위해 자동차 V2X (Vehicle-to-Everything) 네트워크를 활용한 협력적 지능형 교통 시스템 (Cooperative ITS, C-ITS) 기술이 제안되었다²⁻⁶⁾. 자동차 V2X 네트워크는 자동차통신단말(On-Board Unit)들 간 또는 자동차통신단말과 노변기지국(Roadside Unit) 간을 WAVE (Wireless Access in Vehicular Environment) 표준 기반의 무선 통신으로 연결하는 애드 혹 (Ad-Hoc) 네트워크이다²⁾. C-ITS에서 각각의 자동차는 주변 자동차들의 주행 및 도로위험상황에 대한 정보를 자동차 통신을 통해 사전에 인지하여 이에 대비함으로써 **도로 교통의 안전성과 효율성을 획기적으로 향상**할 수 있다^{5,6)}.

한편, 지속적인 인구의 도시 집중화로 인해 대부분의 교통 정체가 교통량이 많은 도심과 그 주변 간선도로에서 발생하기 때문에, **교차로 교통 효율성을 향상하기 위한 기술의 개발이 매우 중요하다**. 최근 자동차 V2X 네트워킹을 기반으로 교차로 교통 효율성을 향상하기 위한 **녹색신호 최적화 속도조연 (Green Light Optimal Speed Advisory, GLOSA)** 문제를 해결하기 위한 연구들이 수행되었다⁷⁻⁹⁾. 우선, 단순한 등가속도 기반 GLOSA 알고리즘이 교차로 정지시간 및 연료 소모에 미치는 영향을 시뮬레이션으로 검증하였다⁷⁾. 또한, 연속된 다수의 교차로 교통신호정보를 기반으로 각 도로구간별 평균속도를 계산하는 유전 알고리즘을 제시하였고⁸⁾, 도심의 도로환경에서 관성 주행을 고려한 GLOSA 알고리즘의 CO₂ 배출량과 교차로 정지시간에 대한 결과를 시뮬레이션을 통해 도출하였다⁹⁾. 위의 연구들은 GLOSA 알고리즘이 제공하는 추천속도를 시뮬레이터가 정확히 재연할 수 있음을 가정한다. 따라서, 실제 주행환경에서 GLOSA 알고리즘의 성능에 큰 영향을 미치는 **운전자 인터페이스**에 대해 고려하지 못한다.

한편, 자동차에 장착된 스마트폰 카메라 영상 신호

를 처리하여 교통신호의 변화를 인식하고, Wi-Fi 기반 애드 혹 네트워크를 통해 교통신호 정보를 공유하는 SignalGuru 앱을 제안하였다¹⁰⁾. SignalGuru 앱은 속도조연을 위해 스마트폰 카메라에서 수집한 교통신호 등 상태정보를 기반으로 교차로 교통신호 변경 시점까지 잔여시간을 스마트폰을 통해 제공한다. 그러나, 스마트폰의 화면을 통해 제공되는 정보는 운전 부주의를 유발하여 교통사고의 위험성을 증대시킬 수 있다.

본 논문에서는 **운전자의 스마트폰과 WAVE 표준 기반의 자동차통신단말 및 노변기지국을 긴밀하게 연동하는 사이버-물리 교차로 시스템(Cyber-Physical Intersection System, CPIS)에서 교차로의 교통 효율성 향상을 위한 참조이동모형 기반 GLOSA (GLOSA-RMM) 알고리즘을 제안하고 CPIS 시작품에서의 실험을 통해 그 성능을 검증**한다. 제안하는 CPIS는 교통신호정보를 주기적으로 방송하는 임베디드 시스템 기반의 **노변기지국과, 운전자의 운전 부주의를 최소화하기 위해 음성 기반 인터페이스를 제공하는 안드로이드 스마트폰, 그리고 스마트폰 연결을 위한 블루투스 동글과 노변기지국과의 통신을 위한 IEEE 802.11p 기반의 네트워크 카드**를 장착한 **자동차통신단말**로 구성된다. CPIS는 WAVE 표준과의 연동을 통해 C-ITS의 다양한 서비스들을 함께 제공할 수 있다.

GLOSA-RMM은 CPIS에서 운전자의 스마트폰 GPS 센서가 제공하는 자동차의 현재 주행속도와 교차로까지의 거리, 노변기지국으로부터 수신하는 교차로 교통신호의 상태 및 잔여시간, 주행도로의 최대/최소 속도, 자동차의 최대 가·감속도 등의 다양한 **주요 매개변수들을 모두 고려하여 다섯 가지 참조이동모형(Reference Mobility Model)을 제시하고 이를 기반으로 최적의 속도조연을 결정**한다. 또한, 속도조연 정보를 안드로이드 스마트폰 앱(App)을 통해 화면과 음성으로 제공하기 때문에 **운전 부주의를 최소화**하는 것이 GLOSA-RMM의 큰 장점이다. 표 1은 GLOSA-RMM과 위에서 설명한 GLOSA 알고리즘들의 특징을 요약하였다.

GLOSA-RMM의 성능 검증을 위해 임베디드 시스템 기반의 자동차통신단말과 노변기지국, 그리고 안드로이드 스마트폰 앱을 연동하는 **사이버-물리 교차로 시스템의 시작품을 개발**한다. CPIS 시작품의 서비스로 1) 교차로 교통신호 정보를 무선통신을 통해 보행자/운전자 단말에 나타내는 **교통신호표시 서비스**와 2) 주변에서 주행하는 자동차들의 이동성을 추적하는 **위치추적 서비스**를 구현하였다. 부산대학교 캠퍼스

표 1. GLOSA-RMM과 기존 GLOSA 알고리즘들과의 비교
Table 1. Comparison of GLOSA-RMM and the existing GLOSA algorithms

	Traffic Sensing	Max. Speed	Accel. Limit	Driver I/F	Period of Advisory	Type of Advisory	Verification
GLOSA [7]	X	X	X	X	X	Speed	Simulation
GLOSA [8]	X	O	X	X	X	Speed	Computation
GLOSA [9]	X	O	X	X	X	Speed	Simulation
SignalGuru [10]	Camera + Ad-hoc comm.	-	X	Screen	-	Speed/Time to phase change	Road Experiment
GLOSA-RMM	V2I Comm.	O	O	Screen/Voice	about 1 sec	Degree of accel./decel.	Road Experiment

내 교차로에서 수행된 실험 결과를 통해 GLOSA-RMM의 우수성을 검증한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 CPIS의 시스템 구조를 간단히 소개하고, 3장에서는 GLOSA-RMM 알고리즘을 제안한다. 4장에서는 실험 결과에 대해 논의하고, 마지막으로 5장에서 본 논문의 결론을 제시한다.

II. 사이버-물리 교차로 시스템(CPIS) 개요

사이버-물리 교차로 시스템은 1) 운전자들이 휴대하는 스마트폰 GPS 수신기의 센싱 정보와 교차로의 교통신호 정보를 2) 5.9 GHz DSRC (Dedicated Short-Range Communications) 채널에서 무선 통신을 활용하여 상호 공유하고, 3) 이를 기반으로 교차로에 접근하는 자동차통신단말이 적절한 속도조언을 결정 한 후, 4) 블루투스 연결을 통해 적절한 속도조언을 스마트폰에 전달하여 5) 운전자에게 화면과 음성으로

자동차의 속도를 조율·제어하게 하는 전체 시스템을 말한다. 그림 1은 스마트폰과 자동차통신단말, 그리고 노변기지국으로 구성된 CPIS의 모형을 나타낸다. 본 장에서는 CPIS의 각 구성 요소의 구조와 기능에 대해 설명한다.

2.1 노변기지국

그림 2에서는 노변기지국의 하드웨어 구성 및 소프트웨어 구조를 나타낸다. 구체적으로 그림 2 (a)에서는 함체에 포함된 노변기지국과 받침대, 그리고 하드웨어 구성을 보여준다. 노변기지국은 리눅스 기반 임베디드 보드에 자동차통신단말과의 V2X 네트워크를 위한 IEEE 802.11p 네트워크 카드, 보행자 단말과의 무선랜 연결을 위한 IEEE 802.11b/g/n 네트워크 카드), 그리고 운영 체제 및 노변기지국 프로그램을 탑재한 CF 카드를 장착한 시스템이다.

노변기지국의 주요 기능은 교차로에서 교통신호제어기와의 연동을 통한 교통신호상태 및 잔여시간 정

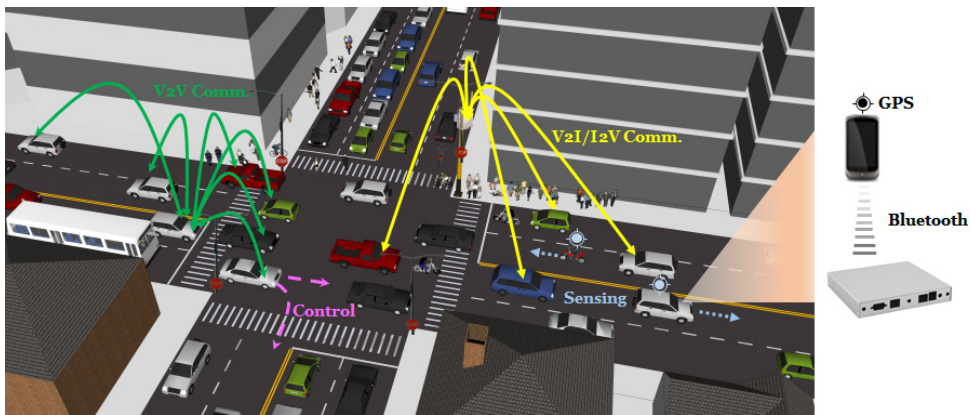


그림 1. 사이버-물리 교차로 시스템의 모형
Fig. 1. The concept of cyber-physical intersection systems (CPIS).

1) 노변기지국과 보행자 간의 연결 및 스마트폰 앱에 관한 내용은 논문 [11]을 참조하길 바란다.

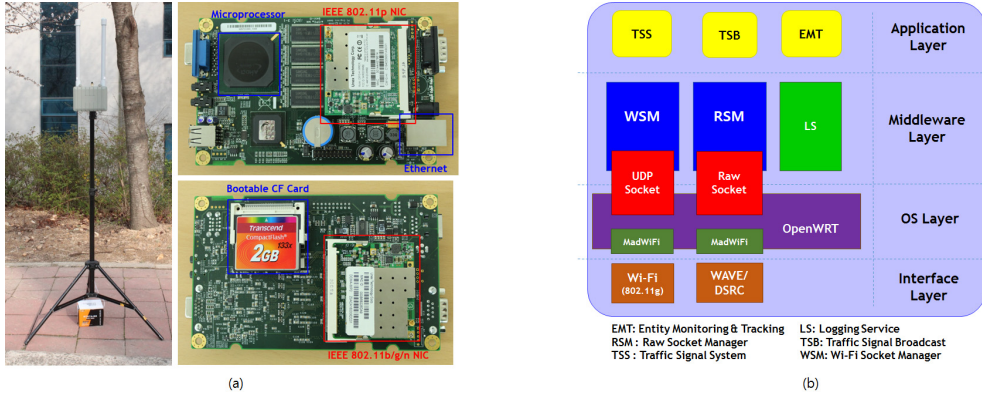


그림 2. 노변기지국: (a) 하드웨어 구성, (b) 소프트웨어 구조
 Fig. 2. Roadside units: (a) Hardware and (b) software architecture

보의 수집과 (센싱 기능) 자동차 V2X 네트워크 메시지 포맷을 정의하는 SAE J2735 표준에 정의된 MAP/SPaT (Signal Phase and Timing) 메시지의 생성 및 WAVE 기반 메시지 방송 (통신 기능), 그리고 교차로 주변에서 주행 중인 자동차들의 BSM (Basic Safety Message) 메시지 수신을 통한 자동차 추적 기능을 (연산 기능) 담당한다.

이와 같은 기능을 수행하기 위한 노변기지국의 소프트웨어 구조는 그림 2 (b)에 나타내었다. 노변기지국은 네트워크 장비의 운영체제로 널리 쓰이는 리눅스 기반의 OpenWRT 운영 체제에 Atheros 칩셋 기반의 네트워크 카드를 장착하고 ath5k 디바이스 드라이버를 사용하여 동작을 제어한다. 교통신호상태정보를 주변 자동차들에게 방송하기 위해 RAW 소켓 인터페이스를 통해 5.9 GHz DSRC 채널에 주기적으로 방송한다²⁾. 이러한 동작을 원활하게 수행하기 위해 미들웨어 계층에 네트워크 인터페이스를 추상화하는 RAW소켓관리(RSM) 모듈과 Wi-Fi소켓관리(WSM) 모듈을 정의하였다. 노변기지국의 세부 기능은 어플리케이션 계층에서 정의된 모듈들에서 수행된다. 교통신호시스템(TSS) 모듈은 교차로 교통신호의 상태전이도(State Transition Diagram)에 따라 현재의 교통신호상태와 잔여시간을 교통신호제어기와 동기화하고, 교통신호방송(TSB) 모듈은 두 네트워크 인터페이스를 통해 주기적으로 교통신호상태 정보를 방송한다. 마지막으로 객체 모니터링 및 추적(EMT) 모듈은 교차로 주변의 자동차들과 보행자들을 추적하는 역할을 담당한다.

2.2 자동차통신단말

그림 3에서는 자동차통신단말의 하드웨어/소프트웨어 구조를 나타낸다. 그림 3 (a)에서 자동차통신단말은 운영체제 및 단말 프로그램을 탑재한 CF 카드와, 노변기지국 연결을 위한 IEEE 802.11p 네트워크 카드, 그리고 스마트폰 연결을 위한 블루투스 동글을 장착한 임베디드 시스템이다.

자동차통신단말은 스마트폰 GPS 센서와 연동하여 자동차 주행 정보를 수집하는 센싱 기능과 스마트폰과 노변기지국 사이에서 자동차이동성/교통신호상태/속도조연 등의 다양한 정보를 중계하는 통신 기능, 그리고 1) 스마트폰과 노변기지국과의 연결을 자동으로 관리하고 2) BSM 메시지 수신을 통해 주변 자동차들의 위치를 추적하며 3) 교통 상황에 따라 최적의 속도조연을 결정하는 연산 기능을 수행한다. 뿐만 아니라, 스마트폰과의 연동을 통해 멀티미디어 기반 인터페이스를 운전자에게 제공하는 기능도 담당한다. 현재의 CPIS에서 자동차의 운전을 제어·조율하는 주체는 운전자이다. 향후, 무인자율자동차 등의 미래 스마트 자동차와 연동을 통해 CPIS는 속도조연을 기반으로 운전의 조율·제어에도 직접적으로 관여할 수 있을 것으로 기대된다.

그림 3 (b)에서는 자동차통신단말의 소프트웨어 구조를 나타내었다. 노변기지국과 동일한 OpenWRT 운영 체제를 기반으로 스마트폰과의 블루투스 통신을 위해 RFComm 인터페이스와 BlueZ 디바이스 드라이버를 사용하는 것이 주요 특징이다¹²⁾. 미들웨어 계층에서 블루투스와 WAVE 통신의 주요 기능을 추상화하기 위한 블루투스소켓관리(BSM) 모듈과 RAW소켓관리(RSM) 모듈을 정의하였다. 어플리케이션 계층은 자기차량의 이동성을 관리하고 속도조연을 결정하는

2) UDP 인터페이스는 보행자들의 스마트폰에 교통신호상태 정보를 방송하기 위해 사용한다¹¹⁾.

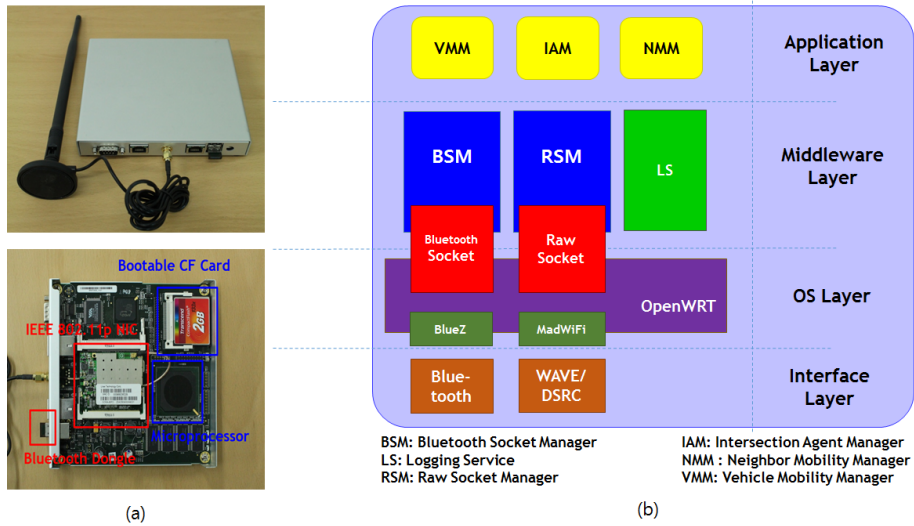


그림 3. 자동차통신단말: (a) 하드웨어 구성, (b) 소프트웨어 구조
 Fig. 3. On-board units: (a) Hardware and (b) software architecture

자차이동성관리(VMM) 모듈, 주변 차량의 이동성을 모니터링하는 주변차량이동성관리(NMM) 모듈, 그리고 노변기지국에서 수신한 교통신호상태 정보를 기반으로 교차로의 상태를 관리하는 교차로관리(IAM) 모듈로 구성이 된다.

III. 참조이동모형 기반 녹색신호 최적화 속도조건 (GLOSA-RMM)

GLOSA 서비스를 이용하지 않는 운전자는 현재의 교통신호등이 시야에 확보될 때까지 교차로 교통신호와는 무관하게 운전을 한다. 자동차가 교차로로부터 거리가 일정 거리 이내에 접근하면, 운전자는 시각을 통해 교통신호정보를 확보할 수 있지만, 신호등 변경 시점까지의 잔여 시간을 알 수 없으므로 사전에 이를 대비하기가 쉽지 않다. 이러한 경우, 운전자는 교차로에서 정지한 후 주행하는 Stop-and-Go (SaG) 운전을 하게 되는데, 이는 다음의 문제들을 발생시킨다. 첫째, SaG 운전 방식은 교차로 접근 이전에 엔진 연소를 통해 제공한 관성 에너지가 제동 과정을 통해 모두 버려지게 되어 에너지 효율성을 낮춘다. 둘째, SaG 운전 방식은 정지 상태에서 재출발하게 되므로 교차로의 교통 수율을 크게 저하시키고 일정한 주행 속도에 이를 때까지 소모하는 에너지의 양을 증가시킨다.

본 장에서는 2장에서 설명한 CPIS의 구조를 기반으로 **교차로 정지시간(Intersection Stopping Time,**

IST)을 최소화하여 도로교통 및 에너지 사용의 효율성을 향상하는 GLOSA-RMM 알고리즘을 제시한다. GLOSA-RMM 알고리즘은 노변기지국이 주기적으로 방송하는 교통신호상태 정보를 자동차 V2X 네트워킹을 통해 미리 수신할 수 있다. 따라서, 운전자는 교차로의 교통신호상태에 대비하여 운전을 할 수 있게 되므로 교차로 교통 효율성을 향상시킬 수 있다. GLOSA-RMM는 자동차의 현재 주행속도(v_{cur})와 교차로까지의 거리(D_{IA}), 교차로 녹색신호구간 [t_{GS} , t_{GE}], 도로 구간의 최대·최소 속도(v_{max} , v_{min}), 주행의 안락함을 유지하는 범위 내에서의 최대 가·감속도 (a_{max} , a_{min}) 정보를 기반으로 최소 교차로 정지시간 (IST)을 달성하기 위한 속도조건을 결정한다.

3.1 교차로 통과기준 시각

본 논문에서 자동차의 이동 패턴을 분류하기 위하여 다섯 개의 참조이동모형을 제안한다. 각각의 참조이동모형에 의해 현 시점에서 자동차가 교차로를 통과할 때까지의 시간을 교차로 통과 기준시각 (reference Time To go aCross the intersection, TTC)으로 정의하고, 그 값들을 수학적으로 도출한다. 각각의 교차로 통과기준 시각을 결정하는데 있어 자동차의 최대 가·감속도(a_{max} , a_{min})가 중요한 역할을 수행한다.

그림 4는 다섯 가지 교차로 통과기준 시각을 정의하기 위한 자동차의 참조이동모형을 나타낸다. 그림 4

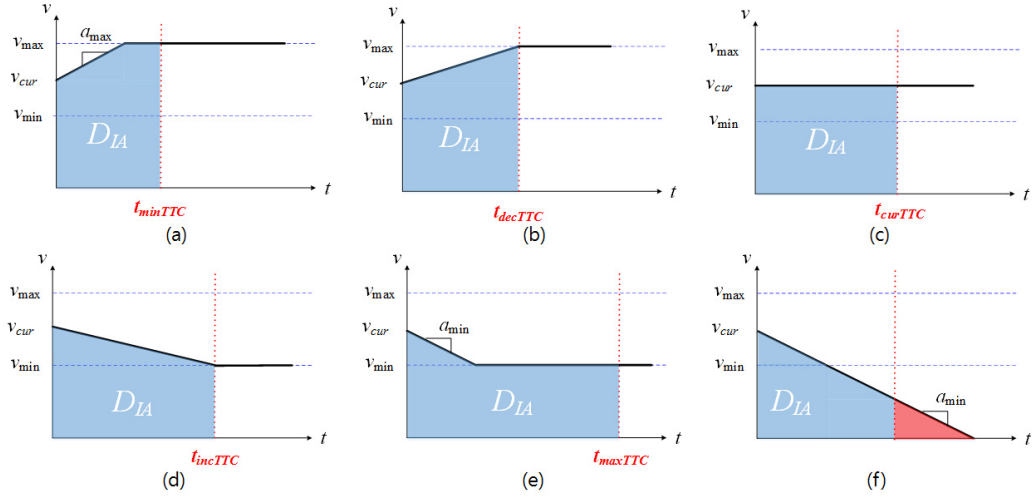


그림 4. 교차로 통과기준 시각 계산을 위한 참조이동모형
 Fig. 4. Reference mobility model to compute the time to go across the intersection (TTC).

(a)에 나타난 최소 교차로 통과기준 시각($t_{\min TTC}$)은 자동차가 현재 위치에서 최대 가속도($a_{\max} > 0$)로 가속하여 최대속도(v_{\max})에 도달한 이후부터 등속 운동을 통해 교차로를 통과할 때까지 걸리는 시간으로 다음과 같이 주어진다.

$$t_{\min TTC} = \frac{D_{IA} + \frac{(v_{\max} - v_{cur})^2}{2a_{\max}}}{v_{\max}} \quad (1)$$

그림 4 (b)에 나타난 등가속 교차로 통과기준 시각(t_{decTTC})은 자동차가 교차로를 통과할 때 최대속도(v_{\max})로 주행하도록 등가속운동을 할 때 걸리는 시간으로 다음과 같이 주어진다.

$$t_{decTTC} = \frac{2D_{IA}}{v_{cur} + v_{\max}} \quad (2)$$

그림 4 (c)에 나타난 등속 교차로 통과기준 시각(t_{curTTC})은 자동차의 현재 속도를 교차로를 통과할 때까지 그대로 유지하면서 진행할 때 걸리는 시간으로 다음과 같이 주어진다.

$$t_{curTTC} = \frac{D_{IA}}{v_{cur}} \quad (3)$$

그림 4 (d)에 나타난 등감속 교차로 통과기준 시각(t_{incTTC})은 자동차가 교차로를 통과할 때 최소속도

(v_{\min})로 주행하도록 등감속운동을 할 때 걸리는 시간으로 다음과 같이 주어진다.

$$t_{incTTC} = \frac{2D_{IA}}{v_{cur} + v_{\min}} \quad (4)$$

그림 4 (e)에 나타난 최대 교차로 통과기준 시각($t_{\max TTC}$)은 자동차가 현재 위치에서 최대 감속도($a_{\min} < 0$)로 감속하여 최소속도(v_{\min})에 이른 이후부터 등속 운동을 통해 교차로를 통과할 때까지 걸리는 시간으로 다음과 같이 주어진다.

$$t_{\max TTC} = \frac{D_{IA} + \frac{(v_{cur} - v_{\min})^2}{2a_{\min}}}{v_{\min}} \quad (5)$$

3.2 GLOSA-RMM 알고리즘

일반적으로 GLOSA 알고리즘은 교차로를 향해 주행하는 자동차가 교차로를 녹색/적색신호 구간의 경계 영역에서 통과할 때 교차로 정지시간과 연료 소모를 크게 줄일 수 있다. 반면, 자동차가 녹색/적색 신호구간의 중간 영역에서 교차로를 통과하면 GLOSA 알고리즘의 사용 여부와 성능과의 상관관계는 낮아진다. 본 절에서는 녹색신호의 경계 영역에서 GLOSA-RMM 알고리즘의 동작을 설명한다. 이를 위해 교통신호등의 주기를 T , 녹색신호 시작/종료 시점까지의 시간을 각각 t_{GS}/t_{GE} 로 정의한다. 단, 현재 시점(t_0)의 교통신호등이 녹색일 경우, 식 (6)에 의해 녹색신호

시작 시점이 녹색신호 종료시점보다 클 수 있다.

$$t_{GS} = T - (t_{GS} - t_0) > t_{GE} \quad (6)$$

그림 5에서는 녹색신호의 경계 영역에서 자동차가 교차로를 통과할 때 GLOSA-RMM 알고리즘의 동작을 나타낸다. 그림에서 X 축은 시간을 나타내고 Y 축은 현재 위치에서 교차로까지의 거리를 나타낸다. X 축에 평행한 축들은 서로 다른 교차로 거리(D_{IA})를 나타내고, 각각의 축에 표시한 색은 그 시점에서의 교통신호등의 상태를 나타낸다.

그림 5 (a)는 녹색신호 구간의 시작시점 근처에서 자동차가 교차로를 통과하는 경우를 나타낸다. 교차로 교통사고 위험성을 줄이기 위해 녹색신호등이 켜지고 이후 일정한 시간(τ)이 지난 시점을 GLOSA-RMM을 적용하기 위한 기준 시점으로 설정한다. 그림에서 교차로 통과기준 시각들을 도출하는 참조이동모형들의 주행 궤적을 청색 대시선들로 나타내었다. GLOSA-RMM 알고리즘은 각각의 교차로 통과기준 시각들과 교차로 교통신호 상태의 비교를 통해 적절한 속도조언을 생성한다.

[GS-1] $t_{GS} + \tau < t_{curTTC}$ 인 경우($D_{IA} \approx D_4$): 현재 속도를 유지하면 녹색신호등에서 교차로를 통과할 수 있으므로 **속도조언이 불필요**하다.

[GS-2] $t_{curTTC} < t_{GS} + \tau < t_{incTTC}$ 인 경우($D_{IA} \approx D_3$): 녹색신호 구간에 교차로를 통과하기 위해서는 **완만한 감속**이 필요하다.

[GS-3] $t_{incTTC} < t_{GS} + \tau < t_{maxTTC}$ 인 경우($D_{IA} \approx D_2$): 녹색신호 구간에 교차로를 통과하기 위해서는 **급한 감속**이 필요하다.

[GS-4] $t_{maxTTC} < t_{GS} + \tau$ 인 경우($D_{IA} \approx D_1$): 녹색신호 구간에 교차로 통과가 불가하기 때문에 **교차로 앞에서 정지**해야 한다.

그림 5 (b)는 녹색신호 구간의 종료시점 근처에서 자동차가 교차로를 통과하는 경우를 나타낸다. 녹색신호 종료시점 이후 황색신호등이 점등되어 운전자들이 대비할 수 있는 시간이 있으므로 GLOSA-RMM의 기준 시점을 녹색신호 종료시점(t_{GE})으로 설정한다. 그림에서 교차로 통과기준 시각들을 도출하는 참조이동모형들의 주행 궤적을 청색 대시선으로 도시하였다. GLOSA-RMM 알고리즘은 위와 동일한 비교를 통해 적절한 속도조언을 생성한다.

[GE-1] $t_{curTTC} < t_{GE}$ 인 경우($D_{IA} \approx D_1'$): 현재 속도를 유지하면 녹색신호등에서 교차로를 통과할 수 있으므로 **속도조언이 불필요**하다.

[GE-2] $t_{decTTC} < t_{GE} < t_{curTTC}$ 인 경우($D_{IA} \approx D_2'$): 녹색신호 구간에 교차로를 통과하기 위해서는 **완만한 가속**이 필요하다.

[GE-3] $t_{minTTC} < t_{GE} < t_{decTTC}$ 인 경우($D_{IA} \approx D_3'$): 녹색신호 구간에 교차로를 통과하기 위해서는 **급한 가속**이 필요하다.

[GE-4] $t_{GE} < t_{minTTC}$ 인 경우($D_{IA} \approx D_4'$): 녹색신호 구간에 교차로 통과가 불가하기 때문에 **교차로 앞에서 정지**해야 한다.

GLOSA-RMM에서 [S-4]와 [E-4]의 경우, 최대로 감속할 때 자동차의 제동 거리(D_{min})가 (7)을 만족하면 적색 교통신호등에 교차로를 통과하게 되므로 교통사고의 위험이 매우 커진다. 이를 해결하기 위해 (7)을 만족하는 경우 다음의 동작을 수행한다.

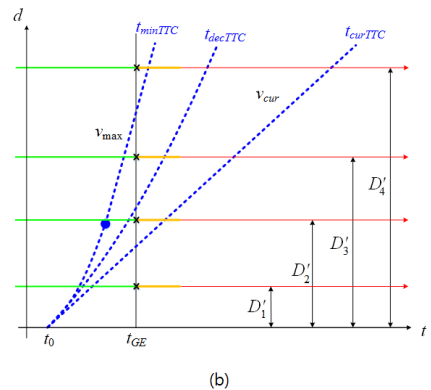
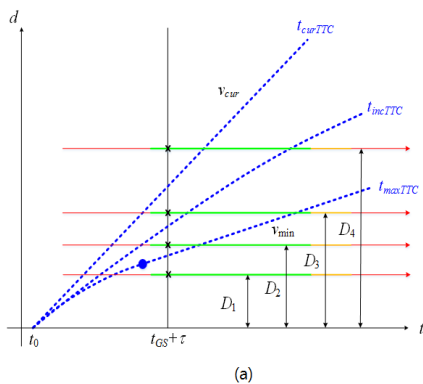


그림 5. 녹색신호 경계 영역에서 참조이동모형: (a) 녹색신호 시작시점 (b) 녹색신호 종료시점
Fig. 5. Reference mobility model at the boundary of the green light: (a) start and (b) end.

$$D_{IA} < \frac{v_{cur}^2}{-2a_{min}} \quad (7)$$

[ES-1] 교통사고를 방지하기 위해 **자동차 제동 능력이 허용하는 범위 내에서 최대감속**을 통해 자동차를 제동해야 한다.

그림 6에서는 위의 경우들을 모두 고려하여 GLOSA-RMM 알고리즘의 순서도를 도시하였다. 순서도에서 GLOSA-RMM 알고리즘은 위에서 제시한 9개의 속도조연을 최종 결과로 도출한다. GLOSA-RMM은 가속 기반 교차로 통과기준 시각들 (t_{minTTC} , t_{decTTC} , t_{curTTC})과 녹색신호 구간의 종료시점(t_{GE})과의 비교를 통해 **가속 이동이 필요한 지의 여부를 결정**한다. 가속 이동이 필요하지 않은 경우 ① 현재의 교통신호가 녹색일 경우($t_{GS} > t_{GE}$) 속도조연이 불필요하다. 반면 현 시점의 교통신호가 적색인 경우, 감속 기반 교차로 통과기준 시각들(t_{maxTTC} , t_{incTTC} , t_{curTTC})과 녹색신호 구간의 시작시점(t_{GS})과의 비교를 통해 **감속 이동이 필요한 지의 여부를 결정**한다.

3.3 GLOSA-RMM의 운전자 인터페이스

GLOSA-RMM의 주요 특징은 스마트폰과 자동차 통신단말의 연동을 통해 운전자의 부주의를 최소화하는 멀티미디어 기반의 운전조연을 제공하여 주행의

안전성을 크게 향상하는데 있다.

GLOSA-RMM 알고리즘은 스마트폰의 GPS 수신기가 약 1초 내외의 주기로 위치를 갱신할 때마다 호출된다. 결과적으로 속도조연 음성파일의 재생 시간이 GLOSA-RMM의 주기보다 커지는 문제점이 발생한다. 이 문제를 해결하기 위해 교통사고 위험상황 ([ES-1])을 제외한 모든 경우에 (운전자의 운전부주의를 최소화하기 위해) 현재 속도조연 음성파일의 재생이 완료된 이후 다음 속도조연 음성파일의 재생이 수행될 수 있도록 스마트폰 자원을 예약한다. 만약 속도조연 음성파일을 재생하는 도중 다수의 음성파일들이 예약될 경우, **가장 최근에 예약된 음성파일만 운전자에게 제공**하여 운전 부하를 최소화한다.

IV. 실험 결과

CPIS 시작품 기반의 실험 수행을 위해 그림 7 (a)에 보인 바와 같이 임베디드 C 프로그래밍을 통해 개발한 노변기지국을 부산대학교 대운동장 주변 교차로 (IA0005)에 설치하였다. 교차로 IA0005에서는 세 개의 도로구간이 교차하는데, 각 구간의 녹색신호 기간은 30초로 설정하였고, 황색 신호 기간은 3초, 그리고 보행자 녹색신호 기간을 34초로 설정하여 교통신호의 주기는 $T=133$ 초이다. 안드로이드 프로그래밍을 통해 개발한 스마트폰 앱과 임베디드 시스템 기반의 자

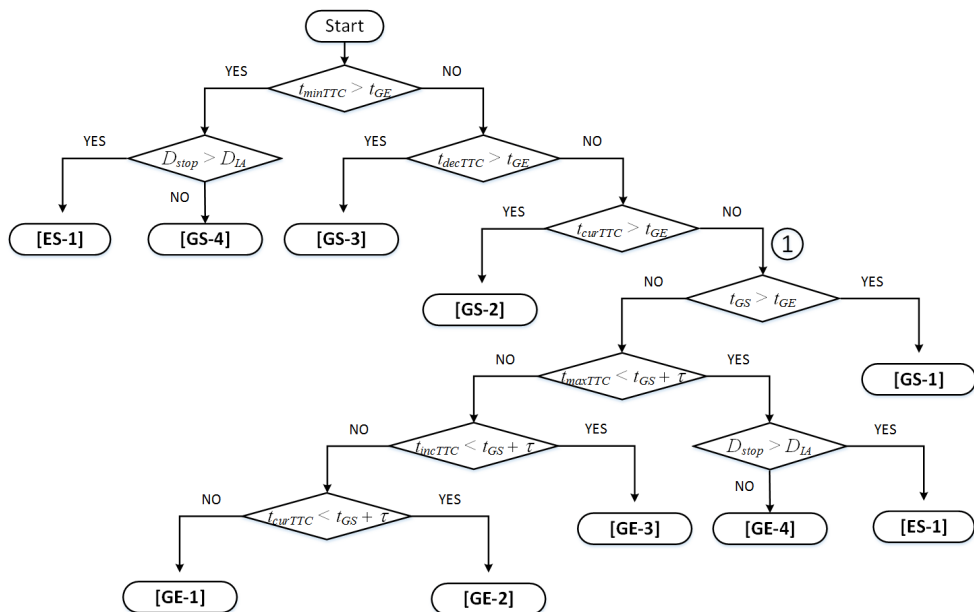


그림 6. GLOSA-RMM 알고리즘의 순서도
Fig. 6. Flowchart of the GLOSA-RMM algorithm.

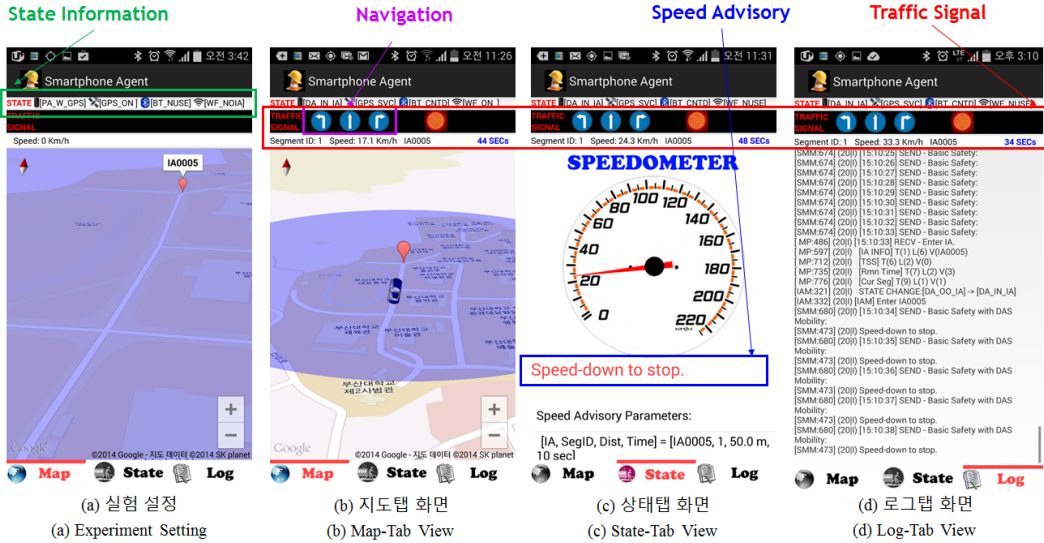


그림 7. 실험 환경 및 안드로이드 스마트폰 앱의 실행화면
 Fig. 7. Experiment setting and screen shots of the android smartphone app.

동차통신단말을 자동차 내에서 블루투스로 연동하여 실험을 수행하였다^[13]. 각 실험값은 동일한 조건에서 다섯 번의 반복 실험을 통해 수집한 평균값이다. 실험의 안전을 위해 도로 주행의 최대/최소 속도는 각각 40/20 Km/h로 설정하였고, 주행의 안락함을 유지하기 위한 최대 가속도와 최대 감속도는 미국도로교통안전국(NHTSA) 보고서를 참조하여 $a_{max} = -a_{min} = 3.82 \text{ m/s}^2$ 로 설정하였다^[14].

개발한 안드로이드 스마트폰 앱은 그림 7 (b) - (d)에서 각각 나타낸 바와 같이 지도/상태/로그 탭의 세 가지 탭으로 구성된다. 뿐만 아니라, 개발한 스마트폰 앱은 네트워크 인터페이스의 상태와 교차로 주행방향을 나타내는 네비게이션 버튼, 그리고 도로구간 교통 신호 정보를 함께 보여준다.

그림 7 (b)에서는 지도 탭의 동작 화면을 나타낸다.

그림에서 자동차 아이콘은 실험을 수행 중인 실제 차량의 현재 위치를 나타내고, 마커(Marker)는 교차로의 위치를 나타낸다. 그림 7 (c)에서는 상태 탭의 동작화면을 도시하였다. 상태 탭은 현재 이동속도를 나타내는 속도계와 음성과 함께 화면에 표시되는 속도조건 메시지, 그리고 교차로와의 거리 등의 부가 정보들을 함께 보여준다. 그림 7 (d)에서는 로그 탭 화면을 보여준다. 로그 탭 화면은 스마트폰 앱의 다양한 이벤트들과 송·수신 메시지들의 내용을 나타내어 사이버-물리 교차로 시스템의 디버깅을 용이하게 해준다.

그림 8에서는 교차로와의 거리(D_{IA})가 각각 (a) 50 m, (b) 100 m, (c) 150 m, (d) 200 m 일 때 현 시점부터 녹색 신호등 종료시점까지 시간($t_{diff} = t_0 - t_{GE}$)에 따른 교차로 정지시간(IST)의 분포를 나타낸다. GLOSA-RMM의 IST는 실선으로, GLOSA-RMM

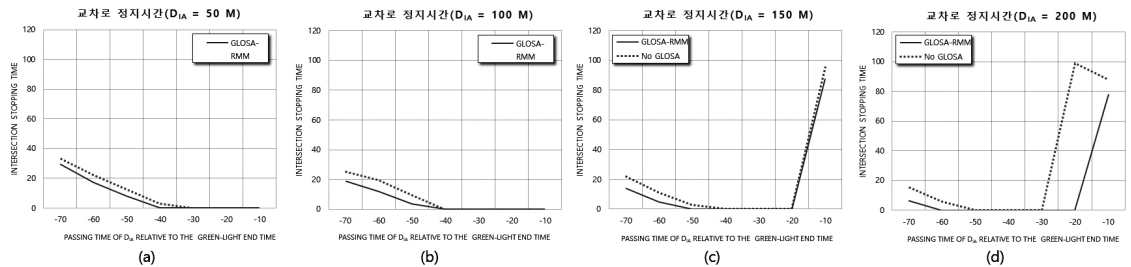


그림 8. 교차로 정지시간: (a) $D_{IA} = 50 \text{ m}$, (b) $D_{IA} = 100 \text{ m}$, (c) $D_{IA} = 150 \text{ m}$, (d) $D_{IA} = 200 \text{ m}$.
 Fig. 8. Intersection stopping time (IST): (a) $D_{IA} = 50 \text{ m}$, (b) $D_{IA} = 100 \text{ m}$, (c) $D_{IA} = 150 \text{ m}$, and (d) $D_{IA} = 200 \text{ m}$.

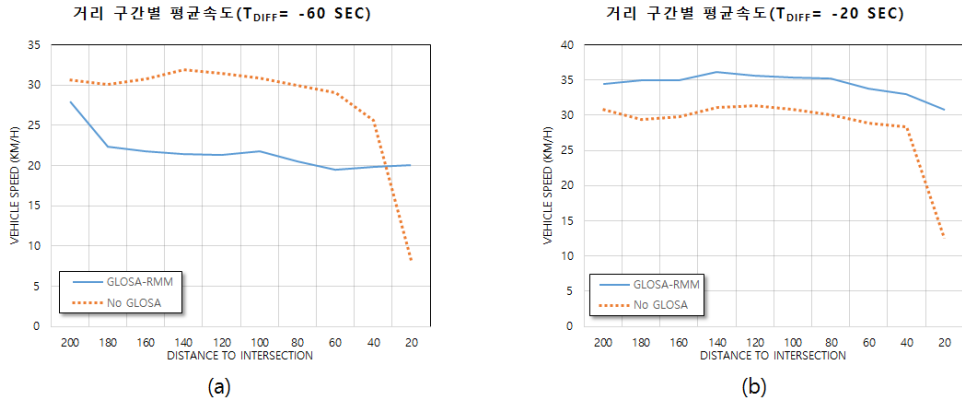


그림 9. 교차로 거리에 따른 자동차 속도 프로파일: (a) $t_{diff} = -60$ 초, (b) $t_{diff} = -20$ 초
 Fig. 9. Vehicle speed profile vs. distance to intersection: (a) $t_{diff} = -60$ sec, and (b) $t_{diff} = -20$ sec

사용하지 않은 IST는 점선으로 나타내었다. 그림에서 자동차는 기준 거리(D_{IA})를 주어진 시각에 $v_{cur} \approx 30$ Km/h의 속도로 주행한다. 그림에서 IST가 0인 구간이 자동차가 교차로에 진입할 때 교통신호등이 녹색인 구간이다.

실험에서 사용한 모든 매개변수 설정에 대하여 GLOSA-RMM의 IST가 GLOSA를 사용하지 않는 경우보다 항상 작거나 같음을 알 수 있다. GLOSA-RMM을 사용하지 않는 IST는 녹색신호등 종료시점 이후에 적색신호등 기간(99초)만큼 증가했다가 그 이후 선형적으로 감소함을 확인할 수 있는 반면, GLOSA-RMM을 사용하는 경우의 IST는 값이 0인 시간이 약 10 ~ 20초 정도 더 길고 IST의 최대값도 그만큼 더 적음을 확인할 수 있다.

그림 9에서는 $D_{IA} = 200$ 이고, (a) $t_{diff} = -60$ 초, (b) $t_{diff} = -20$ 초일 때 교차로부터의 거리에 따른 속도 프로파일을 나타낸다. 자동차는 그림 9 (a)에서 녹색신호등의 시작시점 부근에 교차로에 진입하고, 그림 9 (b)에서 녹색신호등의 종료시점 부근에 진입한다. 두 그림에서 GLOSA-RMM을 사용하지 않는 경우에는 교통신호 변경 시점을 알 수 없기 때문에 교차로 근처까지 등속도로 도달해서 급하게 정지하는 경우가 발생하여 교차로 정지시간과 에너지 소모가 상대적으로 크다. 반면, GLOSA-RMM을 사용할 경우에는 교차로에 진입하기 200 미터 이전부터 교통신호상태에 맞추어 속도조인을 제공하기 때문에 미리 가/감속 주행을 통해 속도를 조절할 수 있어서 교차로 정지시간과 에너지 낭비를 크게 줄일 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 사이버-물리 교차로 시스템(CPIS)에서 안드로이드 스마트폰 앱과 임베디드 시스템 기반 자동차통신단말을 상호 연동하여 교차로에 접근하는 자동차의 이동 효율성을 향상하는 참조이동모형 기반 녹색신호 최적화 속도조인 (GLOSA-RMM)을 소개하였다. GLOSA-RMM은 교차로의 교통신호상태 정보와 자동차의 주행속도, 교차로까지의 거리, 최대 가/감속도 등의 다양한 매개변수를 고려하여 상황을 인지하고, 이를 기반으로 교차로 정지시간과 연료 낭비를 최소화하는 속도 조인을 운전자에게 화면과 음성으로 제공한다. 향후, 실제 도로 상황에서 보다 나은 속도조인을 제공하기 위해 도로 교통상황과 운전자들의 반응지연시간을 고려한 속도조인 알고리즘에 관한 연구를 진행할 예정이다.

References

- [1] KoRoad, Traffic Accident Analysis System (TAAS), Retrieved Aug. 8, 2014, from <http://taas.koroad.or.kr>
- [2] IEEE Computer Society, "IEEE standard for information technology-Telecommunications and information exchange between systems-Local and metropolitan area networks-Specific requirements, Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, Amendment 6: Wireless access in vehicular

environments,” IEEE Std 802.11p-2010, 2010.

[3] IEEE Vehicular Technology Society, “*IEEE standard for wireless access in vehicular environments (WAVE). Multi-channel operation*,” IEEE Std 1609.4-2010, 2010.

[4] SAE International, “*Dedicated short range communications (DSRC) message set dictionary*,” SAE J2735 Standard, Nov. 2009.

[5] R. Naja, *Wireless vehicular networks for car collision avoidance*, Springer, Jun. 2013.

[6] R. Daher and A. Vinel, *Roadside networks for vehicular communications: Architectures, applications, and test fields*, IGI Global, Oct. 2012.

[7] K. Katsaros, R. Kernchen, M. Dianati, and D. Rieck, “Performance study of a green light optimized speed advisory (GLOSA) application using an integrated cooperative ITS simulation platform,” in *Proc. IWCMC'08*, pp. 918-923, Istanbul, Turkey, Jul. 2011.

[8] M. Seredynski, W. Mazurczyk, and D. Khadraoui, “Multi-segment green light optimal speed advisory,” in *Proc. IEEE IPDPSW'13*, pp. 459-465, Cambridge, MA, USA, May 2013.

[9] D. Eckhoff, B. Halmos, and R. German, “Potentials and limitations of green light optimal speed advisory systems,” in *Proc. IEEE VNC'13*, pp. 103-110, Boston, MA, USA, Dec. 2013.

[10] E. Koukoumidis, M. Martonosi, and L.-S. Peh, “Leveraging smartphone cameras for collaborative road advisories,” *IEEE Trans. Mobile Computing*, vol. 11, no. 5, pp. 707-723, May 2012.

[11] H.-Y. Jeong, T. A. Suramadan, and H.-H. Nguyen, “Connectivity Management of a Pedestrian Smartphone App in the Cyber-Physical Intersection Systems (CPIS),” *J. KICS (Under review)*

[12] A. S. Huang and L. Rudolph, *Bluetooth essentials for programmers*, Cambridge University Press, 2007.

[13] Google Inc., *Android developer web site*, Retrieved Aug. 08, 2014, from [r.android.com](http://develope</p>
</div>
<div data-bbox=)

[14] R. Kiefer, D. LeBlanc, M. Palmer, J. Salinger, and M. Shulman, *Development and Validation of Functional Denitions and Evaluation Procedures For Collision Warning/Avoidance Systems*, NHTSA Technical Report DOT HS 808 964, DOT, Aug. 1999.

정 한 유 (Han-You Jeong)



1998년 2월: 서울대학교 전기공학부

2000년 2월: 서울대학교 전기컴퓨터공학부 석사

2005년 2월: 서울대학교 전기컴퓨터공학부 박사

2005년 3월~2007년 7월: 삼성 전자 정보통신총괄 책임연구원

2008년 1월~8월: 미네소타대학교 박사후연구원

2008년 9월~현재: 부산대학교 차세대물류IT기술연구사업단 조교수/부교수

<관심분야> 자동차 네트워크, 무선 메쉬 네트워크, 광통신망

수라마다 토미 잇히야사 (Tommy Adhyasa Suramardharan)



2011년 8월: 인도네시아 ITS대학 정보공학과 학사

2013년 9월~현재: 부산대학교 빅데이터학과 석사과정

<관심분야> 자동차 통신 및 네트워크

응옌 호아 흥 (Hoa-Hung Nguyen)



2009년 4월: 베트남 호치민공과대학(HCMUT) 컴퓨터공학과 학사

2013년 8월: 부산대학교 빅데이터학과 석사

2013년 9월~현재: 부산대학교 빅데이터학과 박사과정

<관심분야> 자동차 통신 및 네트워크