

# 디지털트윈기반 교차로 교통 관제 시스템 구현 사례

서울과학기술대학교 ■ 박구만\*·장일식  
스탠스 ■ 강석호·손석훈  
토펜스 ■ 박태성·박주완

## 1. 서 론

디지털 트윈은 다양한 분야에서 도입되어 적용되고 있다. 그중의 하나가 스마트시티이다. 디지털 트윈 기반 스마트시티는 도시집중에 따른 다양한 구성요소에 대한 관리를 효율적으로 처리하고자 하는 요구를 반영하고 있다. 국내외 주요 도시의 스마트시티 정책 추진 확산으로, 수집되는 다양한 데이터의 통합적 모니터링 및 제어 체계 기술, 시각화 기술, 예측 및 시뮬레이션 기술에 대한 요구가 늘어나고 있다[1][2].

특히, 교통관제는 도시의 기능이 역동적이고 효율적으로 발휘되도록 하는 중요한 역할을 한다. 본 연구에서는 디지털트윈 개념을 도입하여 다중 교차로에서 실시간 교통 정보를 반영하는 교통관제 시스템 구현 예를 소개하고자 한다. 디지털트윈 기반 교차로 교통관제를 위해 실시간으로 다양한 교통 관련 데이터를 취득하고 동기화하였으며, 교통의 원활한 흐름을 위해 강화학습에 의한 시뮬레이션 기능을 구현하였다. 또한 본 연구는 디지털트윈에 의한 교통관제의 이론적 소개와 최신 기술의 학술적 비교보다는 구현 사례를 소개하는데 초점을 맞추었다.

## 2. 다중 스마트 교차로 구성

도시 교통 혼잡의 문제가 심각해지면서 스마트 교차로에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 심층 강화학습은 스마트 교차로의 교통 신호제어에 많이 사용되는 알고리즘이다. 단일 교차로 혹은 다중 교차로 환경을 위한 다양한 심층 강화학습 방법들이 연구되고 있다. 실제 강화학습을 위해서 교통 시뮬레이터를 환경으로 설정하여 사용하게 되는데 대표적으로 SUMO(Simulation of Urban MObility), VISSIM 등을

들 수 있다[3][4][5]. SUMO 시뮬레이터는 교차로에 대한 위치정보 즉 교차로 및 차선 정보 등 실제 OSM (OpenStreetMap)을 기반으로 하는 네트워크 파일을 필요로 한다. 하지만 실제 사용을 위해선 netedit를 사용하여 수동으로 조정해야 할 필요성이 있다. 본 절에서는 지도상에서 교차로 위치 및 차선 정보가 주어졌을 때, 네트워크 파일을 자동으로 생성하게 하는 방법을 소개한다. 실제 환경에서의 시뮬레이션을 위해서는 실제 차량 정보를 기반으로 하는 라우터 파일이 필요하다. 실제 차량 정보를 얻기 위해선 교차로에 설치된 카메라로부터 차량 정보를 받아서 저장한다. 저장된 차량 정보를 기반으로 라우터 파일을 생성한다. 스마트 교차로의 강화학습 시뮬레이터는 네트워크 및 라우터 파일을 필요로 하며, 지도상에서 사용자가 설정하도록 하였다. 본 연구에서는 실제 교차로에 설치된 카메라로부터 필요한 정보를 획득함으로써 강화학습기반 교통신호 제어를 구현하였다.

### 2.1 교차로 교통 시뮬레이터 시스템 구성[6]

스마트 교차로의 시스템 구성은 그림1과 같다. 첫 번째는 교차로에 설치된 카메라로부터 차량 객체 정보를 추출해야 하는 영상 분석부이다. 두 번째는 사용자가 다양한 설정 및 지도 정보로부터 교차로 및 도로 정보 그리고 교차로에 설치된 카메라가 보는 화면에 대한 위치 설정 및 실제 스마트 교차로 설정에 필요한 다양한 화면 인터페이스를 담당하는 UI 클라이언트부이다. 세 번째는 다양한 설정 정보 및 차량 객체 정보를 DB에 저장하고, 스마트 교통신호 제어 분석을 위한 인터페이스를 담당하는 서버단이다. 네 번째는 SUMO 시뮬레이터와 TraCI(Traffic Control Interface)를 통해 인터페이스 제어를 하고, 교통신호 제어를 위한 강화학습을 담당하는 스마트 신호부이다.

\* 종신회원

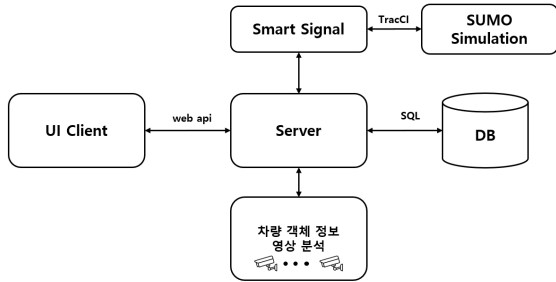


그림 1 교통 분석 시스템 구성

## 2.2 지도기반 네트워크 파일 생성

UI 클라이언트를 통해 지도에서 교차로를 선택한 후 해당 교차로의 중앙 및 각각의 도로 끝을 노드로 설정하였다. OSM 정보를 통한 정밀한 정보를 얻고 형태(shape) 속성정보를 통해 실제 도로의 정확한 표현이 가능하지만, 본 개발에서는 단순히 직선으로 가정했다. 그림2는 실제 지도에서 교차로가 설정된 예를 나타낸다.



그림 2 지도상에 교차로 설정

- Node : node별 id로 구분, x,y 좌표를 지정함.  

```

node id="144312282" x="408.50" y="9.86" type="priority"/>
node id="144312177" x="408.11" y="203.34" type="priority"/>
node id="144312178" x="412.12" y="438.80" type="priority"/>
node id="144312179" x="408.40" y="9.49" type="priority"/>
node id="144312180" x="408.42" y="233.31" type="priority" id="144312180"/>

```
- Edge : edge별 id로 구분, from node와 to node를 node의 id를 사용하여 지정함.  
 차선수와 속도 정보를 줌.  

```

edge id="144312181" from="144312177" to="144312178" name="3번교차로" priority="1" type="highway.secondary" num_lanes="2" speed="27.78" oneway="0"/>
edge id="144312182" from="144312178" to="144312179" name="3번교차로" priority="1" type="highway.secondary" num_lanes="2" speed="27.78" oneway="0"/>
edge id="144312183" from="144312179" to="144312180" name="3번교차로" priority="1" type="highway.secondary" num_lanes="2" speed="27.78" oneway="0"/>
edge id="144312184" from="144312180" to="144312177" name="3번교차로" priority="1" type="highway.secondary" num_lanes="2" speed="27.78" oneway="0"/>
edge id="144312185" from="144312177" to="144312181" name="3번교차로" priority="1" type="highway.secondary" num_lanes="2" speed="27.78" oneway="0"/>
edge id="144312186" from="144312178" to="144312182" name="3번교차로" priority="1" type="highway.secondary" num_lanes="2" speed="27.78" oneway="0"/>
edge id="144312187" from="144312179" to="144312183" name="3번교차로" priority="1" type="highway.secondary" num_lanes="2" speed="27.78" oneway="0"/>
edge id="144312188" from="144312180" to="144312184" name="3번교차로" priority="1" type="highway.secondary" num_lanes="2" speed="27.78" oneway="0"/>

```
- Connection  
 각 edge간의 연결 정보를 저장  

```

connection id="144312189" from="144312181" to="144312182" type="connection"/>
connection id="144312190" from="144312182" to="144312183" type="connection"/>
connection id="144312191" from="144312183" to="144312184" type="connection"/>
connection id="144312192" from="144312184" to="144312181" type="connection"/>
connection id="144312193" from="144312181" to="144312185" type="connection"/>
connection id="144312194" from="144312182" to="144312186" type="connection"/>
connection id="144312195" from="144312183" to="144312187" type="connection"/>
connection id="144312196" from="144312184" to="144312188" type="connection"/>

```
- Traffic Logic id로 구분 신호등의 phase 정보를 지정함.  

```

trafficlogic id="144312197" type="trafficlogic" phase="1" effects=""/>
trafficlogic id="144312198" type="trafficlogic" phase="2" effects=""/>
trafficlogic id="144312199" type="trafficlogic" phase="3" effects=""/>
trafficlogic id="144312200" type="trafficlogic" phase="4" effects=""/>

```
- Type : Edge에서 속성 정보로 사용  

```

type id="highway.primary" priority="1" num_lanes="2" speed="27.78" oneway="0"/>
type id="highway.secondary" priority="1" num_lanes="2" speed="27.78" oneway="0"/>
type id="highway.tertiary" priority="1" num_lanes="2" speed="27.78" oneway="0"/>

```

그림 3 네트워크 파일 생성을 위한 파일

그림3은 네트워크 파일 생성을 위한 파일 목록을 나타낸다. 네트워크 파일은 netconvert 명령을 통해 생성된다.

## 2.3 영상 정보 기반 라우터 파일 생성

교차로에 설치된 카메라로부터 입력되는 영상에 대한 분석을 통해 객체 정보를 얻을 수 있다. 분석 정확도는 적용하는 알고리즘의 성능에 영향을 받는다. 객체 정보는 객체의 고유 ID, 차량 종류, 위치, 속도 등 다양한 정보를 얻을 수 있다. 하지만 크게 두 가지의 어려움이 있다. 첫째 실제 지도상의 교차로 위치와 화면상의 위치가 달라진다. 이 부분은 초기 실제 위치와 화면 위치 간의 원근 변환을 통해 보정할 수 있다. 두 번째 다중교차로의 경우 객체의 고유 ID가 다른 교차로로 이동할 때 같은 ID를 보장할 수가 없다. 이러한 문제를 해결하기 위해 각각의 교차로 진입 정보와 진출 정보에 대해서 확률기반의 라우터 파일을 생성한다. 라우터 파일은 xml 파일로 생성되고, trip 엘리먼트를 사용한다. trip 엘리먼트는 depart, from, to를 사용하여 출발 시간, 출발 예지, 도착 예지 정보를 설정하게 된다. 그림 4는 다중 교차로에서 객체 정보 사용 예를 나타낸다.

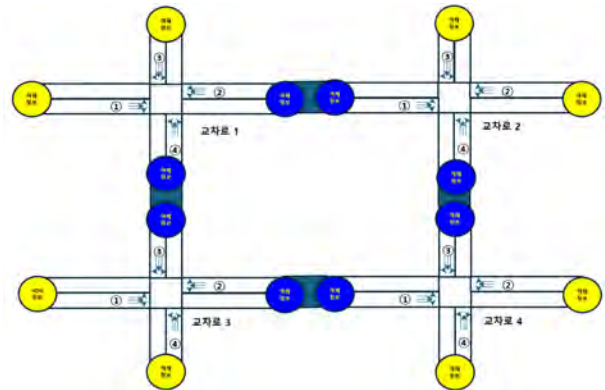


그림 4 다중 교차로에서 객체 정보 사용

## 3. 다중 교차로 스마트 신호등 제어

지도를 사용한 다중 교차로 제어 방법은 2가지로 구현하였다. 첫째는 직접 지도에서 사용자가 위치를 지정하여 설정하는 것이고 둘째는 OSM Web Wizard를 이용하여 설정하는 것이다.

### 3.1 지도에서 직접 위치 설정

사용자가 직접 원하는 교차로를 지정하여 설정하기 때문에 설정 정보가 상대적으로 단순하고 자동화하기에 수월하였다. 하지만 단점으로는 사용자가 직접 교

차로를 지정해야 하는 것이고, 또한 작은 골목 같이 설정하지 않는 도로 정보는 생성하지 않는다. 곡선 정보 같은 세부적인 정보에 대한 처리도 어렵다.

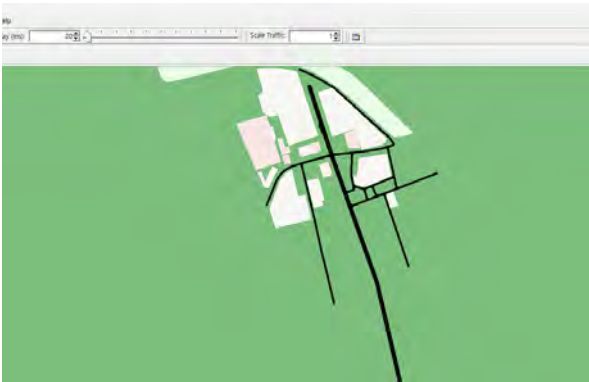
### 3.2 OSM Web Wizard

별도의 메뉴가 필요하지 않고 필요에 따라 교차로에 대한 도로 정보를 쉽게 추가할 수 있다. 하지만 단점으로는 SUMO의 `netedit`를 사용해서 편집을 해야 하기 때문에 별도의 지식이 필요하다. 생성된 xml 데이터에 대한 추가 수정이 필요하다.

그림5(a)는 원하는 영역을 선택하는 것이고, 그림5(b)는 교차로에 대한 도로 시나리오를 추가하고 편집하는 것이다.



(a) 추가할 교차로 영역 선택



(b) 교차로 시나리오를 추가 및 편집  
그림 5 교차로 시나리오

교차로를 추가하는 과정에서 입력해야 할 것들은 교차로 중앙의 위도와 경도, 선택된 범위에서 도로 끝의 위도와 경도이며, 곡선도로의 경우 중간값, 차선 수, 교통 표지(일방통행, 유턴 금지 등) 등이다.

### 3.3 다중 교차로 선택

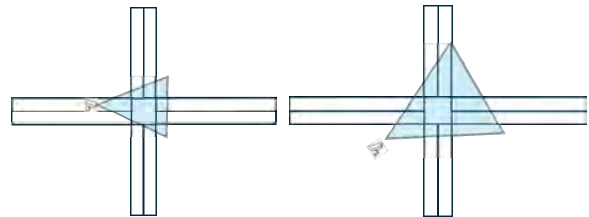
교차로 중간에는 다른 연결 정보(도로)가 없는 것으로 가정한다. 또한 교차로 차선간 연결 정보를 설정한다. 앞에서 본 그림2는 다중 교차로 표현 네트워크의 예이다.

모든 노드는 위도 경도 정보를 부여한다. 위도 경도 정보를 기반으로 다중 교차로의 거리를 구하고 거리 정보로부터 교차로 노드 파일을 생성한다. 검정 큰 박스가 다중 교차로 네트워크이다. 빨간 점은 교차로 중앙 노드로서 신호등이 위치한 곳으로 가정한다. 파란 점들이 교차로 노드이다. 신호등 유형은 SUMO에서 제시하는 8가지를 활용하였다. 우회전 허용도 선택적으로 표현 가능하였다.

## 4. 교통 정보 분석

### 4.1 CCTV 영상의 방향

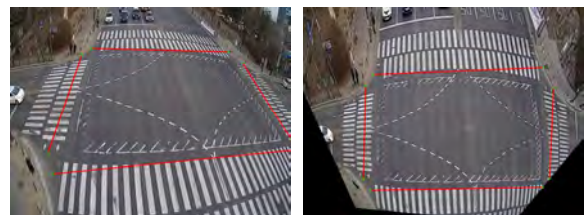
교차로에 있는 CCTV 카메라는 그림6과 같은 카메라 시야각을 가지고 있다. 이러한 시야각에서 촬영한 영상에서 차량 정보를 인식한다.



(a) 맞은편 차선을 촬영 (b) 맞은편 2개 차선 촬영  
그림 6 카메라 시야각의 예

### 4.2 CCTV 영상의 위치 변환

교차로에 있는 CCTV의 영상 위치를 경도와 위도로 변환한다. 각각의 영상은 일정 고도에서 도로를 촬영하는 구조이다. 카메라 시점 각도를 탐뷰에서 보는 구조로 변환해야 한다. 교차로에는 여러개의 CCTV가 하나의 교차로를 촬영하는 구도이고, 각각의 카메라 별 화각의 크기도 다르기 때문에 탐뷰로 변환 후 정합하는 과정을 거쳐야 한다. 그림7은 일반적인 카메라 각도에서 탐뷰로 변환한 결과를 보여준다.



(a) 변환전 카메라 뷰 (b) 변환후 탐뷰  
그림 7 영상의 각도 변환

### 4.3 VDS 정보 설정 및 흐름

수신된 VDS(Vehicle Detection System) 정보는 두가



지 방법으로 저장할 수 있다. 첫째는 데이터베이스에 저장하는 것이다. 이 경우 관리가 편하지만 처리 시간이 많이 든다. 둘째는 파일로 저장하는 것이다. 이 경우, 빠르지만 일반화를 할 수 없다. 폴더 선택, 적절한 저장공간 설정 등에서 판단 요소가 많아진다. 어느 경우든 영상의 용량이 크기 때문에 초당 몇 장을 저장할지 설정이 필요하다.

디지털트윈에서 실시간 정보를 제공하기 위한 시간 간격 설정에 따라 데이터 전송량에 큰 차이가 발생한다. 도로별, 차량별 교통량 및 평균 속도 정보, 속도 정보, 영상 정보 등의 제공 주기를 몇 분 단위로 할지 설정한다. 차량이 교차로에서 사라질 때까지 이러한 정보를 제공한다. 그림8은 VDS 정보 설정 및 흐름을 보여준다.

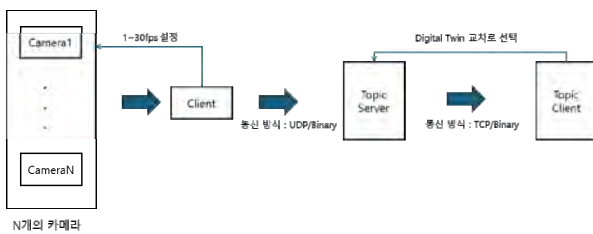


그림 8 VDS 정보 설정 및 흐름

#### 4.4 교통흐름 제어 시뮬레이션

교차로마다 방향에 대한 통계정보를 가지고 교통 흐름의 제어 시뮬레이션 기능을 구현하였다. 한 개의 교차로에는 여러 대의 카메라가 설치되어 있다. 각 카메라에 등장하는 차량 객체의 검출과 궤적 정보는 VDS를 통해서 제공한다. 각 차량은 고유 ID가 부여된다. 주요 정보는 차량의 진입과 진출, 차량의 방향, 차량의 속도이다. 차량의 진입은 객체의 검출과 추적의 시작 시점을 기준으로 판단하고 진출은 객체가 특정 지역을 지났을 때 차선 정보에서 'N'이 아니면 다

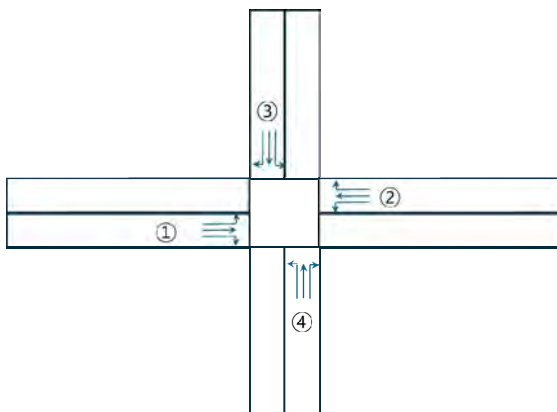


그림 9 교차로에서 4개 도로의 방향 정보

른 도로 영역이라고 판단한다. 차량의 방향 정보는 직진, 좌회전, 우회전, 유턴 등이다.

해당 정보를 가지고 교차로에서 각 방향별 차량의 이동 경로에 대한 통계를 구한다. 통계정보를 기반으로 SUMO 라우트 파일을 생성한다.

모든 정보는 도로별로 구한다. 4차로의 경우 4개의 정보를 구한다. 그림9와 같이 4개의 각 도로에서 들어오는 차량의 이동 경로가 확률적으로 정해진다.

차량마다 부여하는 식별 정보는 방향, 차종, 차종별 통행량, 차종별 평균 속도 등이다.

그림 9의 다중 교차로 그림에서 차량이 교차로 3의 ④에서 시작한 주행 차량이 있다고 하면 초기 VDS 정보의 직진, 좌회전, 우회전 정보를 가지고 경로를 선택한다. 만약 차량이 직진이었을 경우에는 교차로 1번으로 진입한다. 진입된 차량의 다음 이동 경로는 교차로 1의 ④번에 제공된 확률에 의해 직진, 좌회전, 우회전이 결정된다.

차량이 우회전일 경우, 교차로 4번으로 진입한다. 진입한 차량의 다음 이동 경로는 교차로 4번의 ①번의 확률에 의해 직진, 좌회전, 우회전이 결정된다.

#### 4.5 3D 교차로 시각화

교차로에서의 차량 흐름 분석 결과를 유니티를 사용해서 시각화하였다. 그림10(a)는 다채널 2D 입력 영상이면 이를 변환하여 그림10(b)에 보는 바와 같이 3D 영상으로 시각화하였다.



(a) 다채널 2D CCTV 영상 (b) 3D 시각화 결과  
그림 10 교차로에서 다채널 영상과 3D 시각화



그림 11 평면시각화에 의한 교차로 정보 표출

그림11은 평면시각화에 의한 교차로 정보 표출 결과물을 보여준다.

## 5. 강화학습 기반 교통흐름 예측

### 5.1 강화학습을 위한 알고리즘 비교

교차로에서의 차량 흐름을 분석하고 예측하기 위해 모델들을 비교하였다. 비교 대상은 IDQN, IPPO, Fix Time, Stochastic으로 하였으며, 성능 비교 지표는 큐 길이(queue length)와 수행시간이다. 수행시간은 100 epoch 학습시의 시간이다. 표1에 보는 바와 같이 IDQN 방법이 비교 조건하에서는 가장 우수했다.

표 1 강화학습 알고리즘 비교

소요 시간	Fix		Stochastic		IDQN		IPPO	
	Queue Length	Time(sec)	Queue Length	Time(sec)	Queue Length	Time(sec)	Queue Length	Time(sec)
15분	5.237	199.635	3.96	184.82	1.38	332.95	3.9111	264.49
30분	5.378	309.4	4.316	287.07	1.55	580.13	3.869	447.72
60분	6.38	606.54	5.09	564.688	1.75	1153.18	4.778	895.8379
120분	7.13	1230.3	5.91	1158.47	2.03	2303.6	9.95	2294.318

큐 길이는 현재 각각의 차선별로 일정 속도(SUMO에서는 1m/sec) 이하의 차량 수를 의미한다. SUMO 환경에서 큐 길이를 구하였고 VDS 정보로 부터 구한 큐 길이와 비교하여 교통흐름 개선율을 표시했다.

## 6. 디지털트윈에서 제공할 정보

수십 채널의 영상관제용 CCTV 영상을 유니티 시각화 환경에서 표출하고, 지역의 기본 정보(날씨, 일출, 일몰 시간), 차량 관련 정보(차종, 색상), 도로 상태(결빙, 노면 온도 등), 교통안전 복합정보(정지, 역주행 등), 교통량(도시 전체 교통량, 교차로 교통량, 시간별 교통량, 차종별 교통량, 도로별 교통량, 차로별 교통량, 시간별 교통량), 차량속도(교차로, 차종별, 시간별)를 제공한다. 일정 주기로 정보를 갱신하고 동기화함으로써 다양한 교통정보를 제공할 뿐만 아니라 원활한 교통 흐름을 위한 시뮬레이션 기능도 제공한다.

## 7. 결 론

본 연구에서는 다중 스마트 교차로 디지털트윈을 구현하여 실시간 교통 정보를 취득하고 정보를 제공함과 동시에 가상세계와 동기화하였다. 가상세계에서 교통 흐름을 원활히 하기 위한 강화학습 기반 시뮬레이션 기능이 포함된 교통관제 시스템 구현 예를 소개

하였다. 본 연구는 디지털트윈에 의한 교통관제의 이론적 소개와 최신 기술의 학술적 비교보다는 구현 사례를 소개하는데 초점을 맞추어 작성하였다.

다중 스마트 교차로 구성, 다중 교차로 스마트 신호등 제어, 교통정보 분석 및 강화학습기반 교통 흐름 예측 모델을 구현한 예를 소개하였다.

구현한 스마트 교차로 디지털 트윈을 통해 도로 상황 인식, 차량 식별에 의한 다양한 정보를 제공 및 교통의 원활한 흐름 방안을 제공할 수 있게 되었다.

개발과정에서 노출된 개선 요구 사항들은 후속 개발을 통해 보완할 예정이다.

## 참고문헌

- [1] 백명선, 김기덕, “ICT 응용 분야 별 디지털 트윈 기술/서비스 수요 및 우리나라 디지털 트윈 기술경쟁력 선도방안 연구,” 정보와통신, vol.41, No.4, pp.24-31, 2024.4.
- [2] Mladen Miletic, et al. “A review of reinforcement learning applications in adaptive traffic signal control”. IET INTELLIGENT TRANSPORT SYSTEMS OCT. 2022.
- [3] Hua Wei, et al. “A Survey on Traffic Signal Control Methods”. arXiv:1904.08117. 2020.
- [4] Behrisch, M., et al. “SUMO - Simulation of urban mobility: An overview”. Proceedings of SIMUL. 2011.
- [5] <https://eclipse.dev/sumo/>
- [6] 장일식, 박구만, “영상 정보를 이용한 스마트 교차로 구현을 위한 전처리 연구,” 2024 한국방송미디어공학회 하계학술대회논문집, 2024.6.

## 약 력



### 박 구 만

1991 연세대학교대학원 전자공학과 졸업(박사)  
1999~현재 서울과학기술대학교 스마트ICT융합공학과 교수  
1984~1996 삼성전자 신호처리연구소 선임연구원  
관심분야: 컴퓨터비전, 실감미디어  
Email : gmpark@seoultech.ac.kr



### 장 일 식

2020.3~현재 서울과학기술대학교 IoT 융복합기술연구소 책임연구원  
2020.9~현재 서울과학기술대학교 나노IT디자인융합대학원 정보통신미디어공학과 박사과정  
Email : ischang@hanmail.net



### 강 석 호

2023 서울과학기술대학교 정보통신미디어공학과  
(석사 재학중)

2023 국가평생교육진흥원 정보통신공학과 졸업(학사)  
2000~2021 (주)하이트론씨스템즈 지능형 영상분  
석팀 책임연구원

2021~현재 (주)스탠스 디지털트윈, 지능형영상분석  
사업총괄

관심분야: 지능형영상분석, 디지털트윈, XR 교육훈련  
Email : logan@stans.co.kr



### 손 석 훈

2022 국가평생교육진흥원 경영학과 졸업(학사)

2015 서울예술대학교 음악학부 졸업(전문학사)

2022~현재 (주)스탠스 디지털트윈, 지능형영상분석  
사업부

관심분야: 지능형영상분석, 디지털트윈, XR 교육훈련  
Email : seokhoon.son@stans.co.kr



### 박 태 성

2022~현재 (주)토펬스 솔루션영업본부 본부장

관심분야: ITS 통합관제

Email : pts8663@topes.com



### 박 주 완

2020~현재 (주)토펬스 기술연구소 책임연구원

관심분야: ITS 통합관제

Email : jypark@topes.com