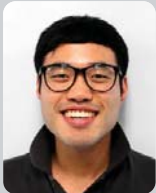


# 무인 자율 주행을 위한 Path-planning & Vehicle Control 기술



배 일  
연세대학교  
글로벌융합공학부



문 재 영  
연세대학교  
글로벌융합공학부



김 진 효  
연세대학교  
글로벌융합공학부



김 시 호  
연세대학교  
글로벌융합공학부

## I. 서론

테슬라의 전기자동차가 2013년 글로벌 자동차 업계의 핫 이슈였다면, 2014년은 ‘무인 자율 주행 자동차’의 해가 될 것이다. 자율 주행 자동차(또는 무인자동차)의 선두 주자는 놀랍게도 폭스바겐(Volkswagen), 도요타(Toyota)와 같은 글로벌 자동차 기업이 아닌, IT 기업 구글(Google)이다.

무인 자율 주행 자동차는 운전자의 별도 조작 없이 차량에 부착된 카메라, 라이다(LiDAR), 레이더(RADAR) 등의 센서를 통해 주변 환경을 분석하며 목적지까지 스스로 달리는 차를 의미한다. 사람이 전혀 타지 않는 것은 아니라는 점에서 ‘자율 주행(Autonomous Vehicle) 자동차’라 언급하기도 한다.

구글 스트리트뷰(Google Street View), 구글 맵스(Google Maps), 빅데이터 분석, 인공지능 등 앞선 S/W 기술을 보유한 구글은 이미 2010년부터 실제 도로에서 무인 자동차를 운행하였고, 2013년 현

**아직까지 법적, 제도적으로 해결해야 할 문제들이 남아있지만, 자율 주행 기술은 이미 자동차 경쟁력을 위한 핵심 기술**

재 약 50만 miles(80만 km) 무사고 주행에 성공하였다. 또한, 미국 캘리포니아 주를 비롯하여 뉴욕, 일리노이, 워싱턴, 네바다, 플로리다 주에서까지 무인 자동차 운행 라이선스를 취득하는 등 정책적으로도 앞서 나가고 있는 상황이다.

구글은 2018년까지 자율 주행 차량을 양산할 계획에 있으며, 최근 테슬라 모터스와의 협력을 통해 무인 전기자동차를 개발한다는 소식도 전해지고 있다. 아직까지 법적, 제도적으로 해결해야 할 문



〈그림 1〉 Google Self-Driving Car(구글 코리아)

제들이 남아있지만, 자율 주행 기술은 이미 자동차 경쟁력을 위한 핵심 기술로 자리 잡은 상태이다.

2020년에 이르러 무인 자동차가 상용화 될 지 아직 확신할 수는 없지만, 각 업체는 이미 운전자의 차량 조작 부담을 덜어주는 ADAS(Advanced Driver Assistance System) 기술들을 계속해서 쏟아내고 있다.

## II. Path-planning과 Control

무인 자동차의 시스템 구성은 크게 주변 환경과 차량의 현재 위치를 알 수 있는 센서 파트, 센서 정보를 처리하여 적합한 가속 및 조향 명령을 내리는 인지 파트, 명령에 따라 차량을 주행시키는 제어 파트로 이루어진다.

Path-planning과 차량 제어 명령 생성은 주로 인지 파트에서 처리하게 되는데, 이동 및 고정 장애물, 도로 및 차선, 교차로, 자차 위치 등의 정보를 적절히 통합하여 상황에 맞게 적절한 판단을 내리고 제어하는 것을 목적으로 한다.

일반적으로 path-planning은 global path-planning과 local path-planning으로 구별된다. 출발 지부터 목적지까지 전체적인 경로를 계획하는 것을 global path-planning이라 하고, 주변 환경을 인지하고 장애물을 회피하는 등의 임시 경로를 생성하는 것을 local path-planning이라 한다.

path-planning은 global path-planning과 local path-planning으로 구별

차량 제어도 크게 두 가지로 구별되며, lateral control(조향 제어), longitudinal control(가감속 제어)로 나뉜다.

### 1. 해외 사례

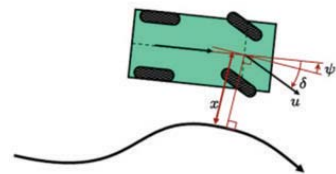
#### 1) Stanley at DARPA Grand Challenge

DARPA Grand Challenge는 전쟁터에서 전투 물자 운송 시 병사들의 희생을 줄이고자 하는 군사적인 목적으로 사막에서 개최되었으며, 2004년과 2005년 2회에 걸쳐 진행되었다. 3개의 터널과 100개 이상의 커브, 길이 좁은 낭떠러지 구간까지 통과해야 하는 난코스 구성되어 있었다<sup>[1]</sup>. 2004년 대회에서 완주한 차량은 전무하였으나, 2005년에 5대의 차량이 완주해내면서 급격한 기술의 발전을 이루어내었다. 이 중 미국 스탠포드 대학의 Stanley 차량은 약 240 km 구간을 6시간 54분에 걸쳐 완주하며 대회 우승을 차지하였는데, 자율 주행을 위한 각 시스템의 체계적인 구성은 물론 조향 및 가감속 컨트롤을 위한 각종 기술들이 주요하였다.

Stanley 차량의 lateral control의 기본 컨셉은 〈그림 2〉에서와 같이 생성된 경로에 차량의 앞바퀴가 평행하도록 조향 명령을 생성하고 제어한다.

$$\delta(t) = \psi(t) + \arctan \frac{kx(t)}{u(t)}$$

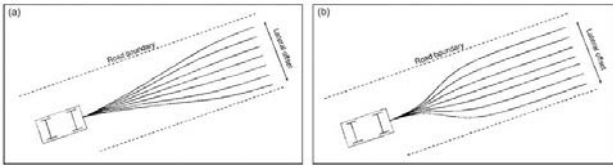
위 식에서 steering angle은 목표 경로와의 거리 오차인  $\delta(t)$ 가 커질수록 커지고, 차량 속도  $u(t)$ 가 커질수록 작은 조향각을 생성하도록 되어있다. 주어진 경로와



〈그림 2〉 Steering Control 기본 컨셉<sup>[2]</sup>



〈그림 3〉 Path-smoothing<sup>[2]</sup>



〈그림 4〉 Path-planning in a 2D space, (a) minimum lateral acceleration, (b) maximum lateral acceleration<sup>[2]</sup>

평행하도록 조향 명령을 생성한다면, 먼저 주어진 경로의 곡률이 부드럽게 구성될 수 있도록 해야 한다. 〈그림 3〉에서 미리 제공된 waypoints (a)를 연결하면 각 점들이 불연속적으로 급회전을 이루는 경로를 구성하지만, Stanley는 (b)와 (c)에서처럼 pre-processing 단계에서 path-smoothing을 적용하여 각 점의 전 후 경로 사이의 각도가 최소를 이루도록 벡터의 내적을 계산하고, cubic spline interpolation 방식의 구간 보정을 통해 부드러운 경로를 생성하였다.

Smoothing이 완료되면, 각 구간별로 3가지를 고려하여 제한 속도를 구성하는데, 주어진 RDDF(Route Description Data File)에서의 속도, lateral acceleration, deceleration constraint를 고려한다. 이때, lateral acceleration의 범위는 안전 주행 및 장애물 회피가 가능하도록 최대 0.75m/s<sup>2</sup>로 설정하였다.

〈그림 4〉는 lateral acceleration의 값이 최소로 주어졌을 경우(noughs) 곡률이 작은 후보 경로 (a), 최대로 주어졌을 경우(swerves) 곡률이 큰 후보 경로 (b)를 보여준다. 이처럼 path-planner는 lateral acceleration을 고려한 lateral offset에 따른 후보 경로를 생성하는데, noughs는 보통 centerline 경로를 따라 주행할 때, swerves는 장애물을 회피할 때와 같이 긴급한 상황에서 주로 사용된다.

## 2) Boss at DARPA Urban Challenge

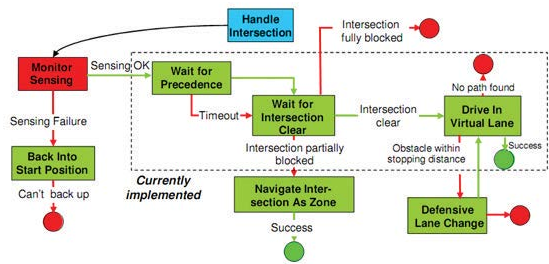
2007년 개최된 DARPA Urban Challenge는 캘리포니아 빅터빌 소재 조지 공군 기지에서 도시 환경의 자율 주행기술 개발을 목표로 진행되었다. 전체 코스는 길이는 약 96 km로 6시간 내에, 교통 수칙을 지키며, 일반 도시의 교통 상황에서의 주행 및 주차 등의 미션을 수행하도록 하였다. 이 대회 우승은 카네기 멜론 대학이 GM과 합작하여 개발한 Chevy Tahoe 차량 Boss가 차지하였다<sup>[1]</sup>.

Stanley와 구별되는 Boss만의 특징은 mission planning, behavior generation, motion planning, perception&world modeling 4개의 부분으로 구성된 planning 시스템이다.

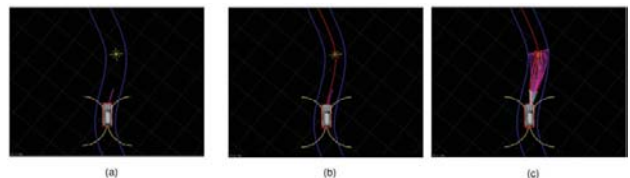
Mission planning은 RNDF(Route Network Definition File)라는 그래프 기반의 도로 및 차선 정보를 가지고 각 waypoint로부터 목적지까지 최소 비용 경로를 계산하는 역할을 담당한다.

Behavior generation은 lane selector, distance-keeping, handle intersection 등의 행동을 〈그림 5〉와 같이 우선순위에 따라 판단하고, 결정된 명령을 motion planning에 전달한다.

〈그림 6〉은 Boss의 local path-planning 방법을 잘 보여주고 있다. 먼저 그림에서 차량 옆의 2개의 흰색



〈그림 5〉 Intersection 상황에서의 행동<sup>[3]</sup>



〈그림 6〉 일반 주행 도로에서의 local path-planning<sup>[3]</sup>



반원은 차량의 최소 회전 반경(즉, 최대 조향각)을 의미하고, 파란색 선은 road boundary, 분홍색 선은 차량의 현재 곡률, 노란색 점은 다음 목표 지점, 빨간색 선은 centerline 경로를 의미한다. Boss차량은 vehicle state와 model 기반의 control trajectory 후보를 (c)와 같이 생성한 후, 예측 경로와 목표 점과의 에러를 최소화하는 등의 utilize function에 의해 최적 경로를 선택하여 주행한다. (Path-generation과 관련하여 자세한 내용은 'Constrained Optimization Path Following of Wheeled Robots in Natural Terrain', Springer, 2006 참고)

Perception & world modeling은 장애물의 위치를 실시간으로 추적하고, 장애물의 이동 경로를 예측하는 역할을 한다. 이 때, 라이다 및 레이더에서 들어오는 센서 데이터는 모듈 별로 처리하게 되는데, signal processing을 통한 feature extraction과 classification 과정은 sensor level에서 처리하고, 이를 통합하여 장애물의 이동 경로 및 상태를 예측하는 과정은 fusion level에서 처리한다.

복잡한 도시 환경에서는 이동하는 상대 차량의 움직임을 정확히 예측할 수 있어야 충돌 없는 안전 주행이 가능하다. Boss는 상대 차량의 움직임을 bicycle model 기반으로 EKF(Extended Kalman Filter)를 통해 추정하였으며, 이때 사용된 파라미터  $X$ 는 아래와 같다.

$$X = (x, y, \psi, v, \omega, a)$$

$x, y$  : position of vehicle

$\psi$  : yaw angle

$v$  : velocity

$\omega$  : yaw rate

$a$  : linear acceleration

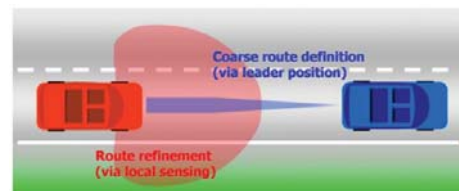
이와 같이 복잡한 도시 교통 환경에서 정확한 예측과 판단을 통해 행동을 결정하고, 명령을 전달하는 유기적인 시스템이 Boss의 장점이라고 할 수 있다.

### 3) Vislab Intercontinental Autonomous Challenge

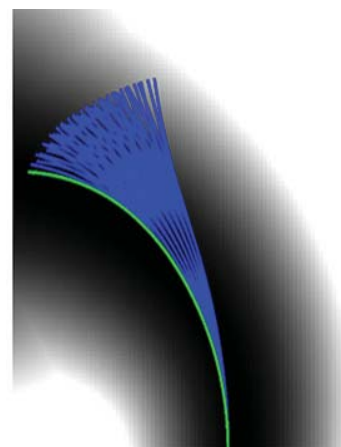
2010년, 이탈리아 파르마 대학에서 Artificial Vision and Intelligent Systems Lab(VisLab)이 뱅을 개조해 만든 무인 전기자동차 2대가 3개월에 걸쳐 이탈리아에서 중국까지 13,000 km의 자율 주행에 성공하였다. 여타 무인 자동차와 달리 VisLab만의 구별되는 특징은 non-polluting, non-oil 기반의 무인 전기자동차인 점, 맵이 없는 경우에서의 자율 주행을 위한 독창적인 해결 방법을 제시했다는 점이다.

러시아나 카자흐스탄, 중국의 일부 외곽 지역에서는 도로 정보나 맵이 없는 경우가 많아 경로 계획이 쉽지 않았는데, VisLab은 두 대의 차량으로 <그림 7>에서처럼 leader and follower 개념을 도입하여 이 문제를 해결하였다.

Leader vehicle은 불가피한 상황에서 사람의 선택적 개입을 허용한다. 맵 또는 도로정보가 없어 컴퓨터 스스로 경로 계획이 불가능한 경우, 사람이 직접 길을 선택했다. Leader가 먼저 주행한 waypoints 정보는



<그림 7> Leader-follower approach<sup>[4]</sup>



<그림 8> Cost map 기반 candidate path selection<sup>[5]</sup>

follower에게 전송되고, follower는 leader의 waypoints를 따라 100% 무인 자율 주행을 실현하였다. 여기에서 더욱 발전된 형태의 시스템이 볼보의 SARTRE(Safe Road Trains for the Environment) 주행 기술이라고 할 수 있다.

VisLab의 무인 자동차는 cost 기반 grid map을 통해 후보 경로를 생성하고 최적 경로를 선택한다. <그림 8>에서 어두운 부분은 low cost 지역, 밝은 부분은 high cost 지역을 의미하며 만약 장애물이 탐지되면 해당 지역의 cost value가 커지게 된다. Trajectory planner는 파란 선들로 이루어진 후보 경로를 생성하고, 이 중 최소 비용 경로를 선택하게 된다.

## 2. 국내 사례

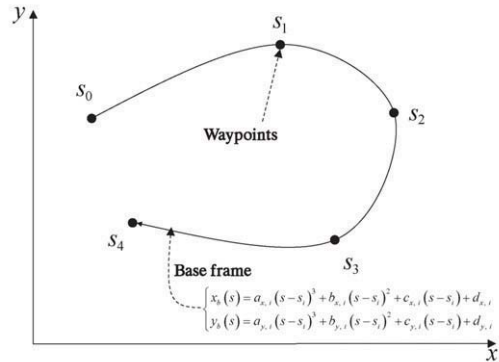
### 1) A1 at Hyundai Motors Autonomous Vehicle Competition

현대 NGV 주최 자율 주행 자동차 경진대회는 2010년 1회, 2012년 2회 대회가 개최되었고, 2014년 3회 대회가 개최될 예정이다. 대회 코스는 약 3.4km로, 포장 및 비포장 구간 주행, 차량 추월, 돌발 장애물 회피, 횡단보도 및 신호등 인지, 주차, 보행자 인식 등 총 9개 미션으로 구성되며, 각 미션 성공 여부 및 주행 시간을 합산하여 최종 우승을 가렸다. 1, 2회 대회 모두 한양대 A1 차량이 우승을 차지하였다<sup>[1]</sup>.

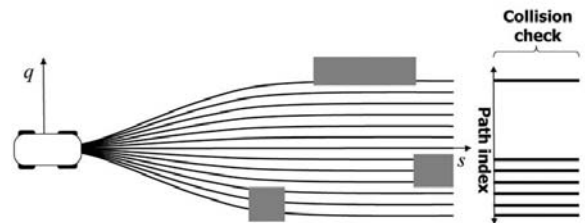
한양대는 Stanley와 Boss의 장점을 적절히 수용하면서도 독자적으로 발전시킨 형태의 아키텍처와 알고리즘을 통해 좋은 결과를 내었다. A1의 path-planning 알고리즘의 기본 구조는 아래와 같이 4단계로 이루어진다.

- (a) construction of the base frame;
- (b) localization on the base frame;
- (c) generation of path candidates;
- (d) selection.

먼저 base frame (a)를 생성하게 된다. 일반적으로



<그림 9> Waypoints와 Base Frame<sup>[7]</sup>



<그림 10> 후보 경로 생성과 장애물 회피<sup>[7]</sup>

GPS 위도, 경도 좌표로 구성된 waypoints들을 spline curve를 적용해 <그림 9>와 같이 부드러운 경로가 될 수 있도록 만들고, 자차의 위치로부터 base frame과의 different offsets으로 <그림 10>과 같이 후보 경로를 생성한다. Path-planner는 생성된 후보 경로들의 safety cost와 smoothness cost를 평가하여 최적의 경로를 선택하게 된다.

차량의 가감속 제어는 speed controller에서 이루어지는데, 이때 현재 속도와 목표 속도의 error를 고려하게 된다. 특히 목표 속도 계산 시 차량의 안전한 주행과 안정적인 제어를 위해서는 도로의 곡률과 차량의 횡가속도의 크기를 고려하는 것이 매우 중요하다. 아래 식에서 보는 것처럼 목표 속도를 경로의 곡률 \$K\$와 횡가속도 \$a\_y\$에 의해 계산하여 차량이 경로에서 이탈하지 않도록 하였다.

$$V_{ref} = \begin{cases} V_{min} & (V_{ref} < V_{min}) \\ \sqrt{a_{y,max}/K} & (V_{min} \leq V_{ref} \leq V_{max}) \\ V_{max} & (V_{ref} > V_{max}) \end{cases}$$

또한, speed controller는 accelerator와 brake의 값

의 전달을 위해 acceleration mode에서는 feed-forward gain을 가지는 P controller를, deceleration mode에서는 feed-back gain을 가지는 PI controller를 사용하였다.

$$\text{P Controller} \quad \begin{cases} u_a = k_{ap}(V_{ref} - V) \\ u_b = 0 \end{cases}$$

$$\text{PI Controller} \quad \begin{cases} u_a = 0 \\ u_b = k_{bp}(V - V_{ref}) - k_{bi} \int V - V_{ref} dt \end{cases}$$

## 2) Eagle-Eagle of Yonsei University

앞선 사례에서 살펴본 것처럼 무인 자동차의 주행 기술은 최근 몇 년간 급속히 발전하였고, 현재에 이르러 부분적으로는 상용화가 가능한 수준에 도달했다고 평가할 수 있다.

지금까지의 기술 개발이 자동차 관점에서 안전 및 회피 주행 중심이었다면, 미래에는 더욱 인간 친화적인 기술 개발이 이루어질 것으로 예상된다. 이에 연세대학교 Seamless Transportation Lab(STL)에서는 인간 공학 측면에서 승차감과 편의성을 극대화 할 수 있는 자율 주행 기술 개



〈그림 12〉 연세대학교 무인자동차 Eagle-Eagle

발을 진행 중이며, 좋은 연구 성과를 만들어 내고 있다.

최근 학계에서 보고된 바에 따르면, 운전자는 steering angle이 아닌 steering rate 기반으로 조향 제어를 한다<sup>[8]</sup>.

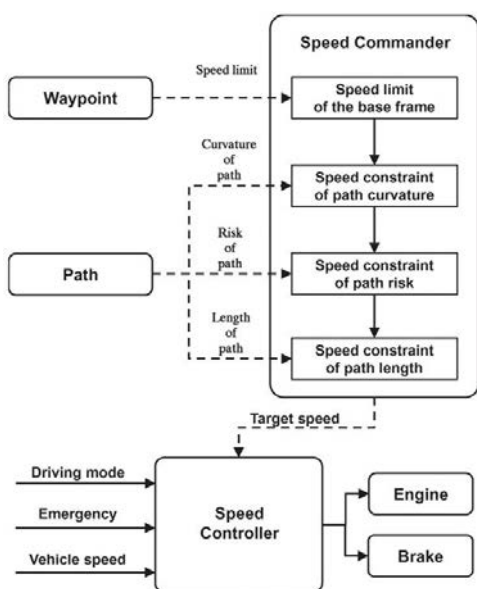
이에 STL은 운전자 성향에 맞춰 사람이 느끼기에 가장 편한 곡률로 구성된 경로를 생성하고, 무인자동차를 제어하는 path-planning과 제어 기술을 연구 중에 있다<sup>[9]</sup>.

또한, 차량에 부착된 센서들만을 활용한다는 일반적인 통념에서 벗어나 UAV(Unmanned Aerial Vehicle)를 외부 센서로 활용하는 무인 시스템을 개발하는 등 무인 자동차 이후의 패러다임에 관심을 갖고 활발한 연구를 진행 중이다<sup>[10]</sup>.

### 자동차 기술 개발의 패러다임이 자동차 중심에서 인간 중심으로 변화

## III. 결론 및 향후 전망

지금까지 각 대회에서 우수한 성적을 거둔 대학들의 무인 자동차의 path-planning과 control에 관한 내용을 살펴보았다. 2005년 개최된 DARPA Grand Challenge에 참가한 스탠포드 대학교의 Stanley는 우수한 path-planning 및 control 알고리즘을 구현하여 사막 완주에 성공하며 우승을 차지했고, 2007년 개최된 DARPA Urban Challenge에서는 카네기 멜론 대학교의 Boss가 계층적 아키텍처 설계에 기반한 체계적인 제어 방식으로 복잡한 도시 환경에서 우수한 성능을 입증하며 우승을 차지하였다. Vislab Intercontinental



〈그림 11〉 가감속 제어 전략<sup>[7]</sup>

Autonomous Challenge에서는 VisLab의 무인 전기자동차가 맵이 제공되지 않은 상황에서 leader and follower 개념을 도입해 13,000 km에 이르는 실크로드 구간을 무사히 완주해내었다.

국내에서도 역시 무인 자율 주행 기술에 대한 경쟁력 확보를 위해 각 기업 및 대학들이 발 빠른 움직임을 보이고 있다. 현대모비스는 2025년에 무인 자동차가 상용화될 것으로 보고 이에 발맞춘 기술 개발 로드맵을 제시하였고, 현대자동차도 NGV를 통해 Autonomous Vehicle Competition을 개최하며 각 대학들의 무인자동차 기술 개발을 독려하며 나섰다. 특히 한양대의 A1이 우승을 차지하며 두각을 나타내었으며, 다른 대학들도 자율 주행 기술에 대한 연구를 멈추지 않고 있다.

우리나라는 세계 5위 자동차 생산국이고 IT 기술 강

**국내 기업 및 대학들도 무인 자율 주행 기술에 대한 경쟁력 확보를 위해 빠르게 대응 중이며, 자동차와 IT 기술을 효과적으로 융합하면 단 시간 내 선진국 수준에 도달할 것으로 예상**

국인 만큼 자동차와 IT 기술을 효과적으로 융합할 수 있다면, 무인 자율 주

행 기술 분야에서도 빠른 시간 내 선진국 기술 수준에 도달할 수 있을 것으로 보인다. 100% 안전한 무인 자율 주행 기술을 확보하기 위한 경쟁이 학계에서 뿐만 아니라, 구글과 같은 IT 기업과 벤츠, 도요타와 같은 글로벌 완성차 기업 간 경쟁도 더욱 치열해질 것으로 예상된다.

### 참 고 문 헌

[1] 이웅희, 외. 무인자율 주행경진대회와 무인자동차 기술발전, 로봇과 인간, 2013  
 [2] Sebastian Thrun, et al. Stanley The Robot that Won the DARPA Grand Challenge, Journal of Field Robotics, 2006  
 [3] Chris Urmson, et al. Tartan Racing: A Multi-Modal Approach to the DARPA Urban Challenge, Robotics Institute, 2007

[4] M.Bertozzi, et al. The VisLab Intercontinental Autonomous Challenge: 13,000 km, 3 months, ... no driver, World Congress on ITS, 2010  
 [5] Alberto Broggi, et al. Development of the control system for the VisLab Intercontinental Autonomous Challenge, Annual Conference on Intelligent Transportation Systems, 2010  
 [6] Jo Kichun, et al. Overall Reviews of Autonomous Vehicle A1 - System Architecture and Algorithms, Intelligent Autonomous Vehicles, 2013  
 [7] Chu Keounyup, et al. Local Path Planning for Off-Road Autonomous Driving With Avoidance of Static Obstacles, Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on, 2012  
 [8] Han-Shue Tan, et al. Experimental Development of a New Target and Control Driver Steering Model Based on DLC Test Data, Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on, 2012  
 [9] Il Bae, et al. Steering Rate Controller based on Curvature of Trajectory for Autonomous Driving Vehicles, Intelligent Vehicles Symposium, 2013  
 [10] J. H. Kim, et al. Collaborative Navigation of UAV and UGV Using Vision and LIDAR Sensors, ION Pacific PNT Conference, 2013



배 일

2011년 2월 한국산업기술대학교 학사  
 2011년 3월~2012년 2월 한국과학기술기획평가원 연구원  
 2012년 3월~현재 연세대학교 통합 과정

<관심분야>  
 Intelligent Vehicle, Human-Vehicle Interface



문재영

2013년 2월 연세대학교 학사  
2013년 3월~현재 연세대학교 통합 과정

〈관심분야〉  
Intelligent Vehicle, Traffic Engineering



김시호

1986년 2월 연세대 전자공학과 학사  
1988년 2월 KAIST 전기전자공학과 석사  
1995년 2월 KAIST 전기전자공학과 박사  
1988년 2월~1991년 2월 LG전자, LG 반도체  
중앙연구소  
1995년 2월~1996년 8월 LG 반도체 중앙연구소  
1996년 9월~1997년 8월 특허청 심사관  
1997년 9월~2011년 2월 원광대학교,  
충북대학교 교수  
2000년 12월~2001년 2월 IMEC(벨기에) 초빙교수  
2011년 3월~현재 연세대학교 글로벌융합공학부 교수  
2013년 1월~현재  
대한전자공학회 자동차전자연구회 회장,  
IEEE SSCS 서울 챕터 회장

〈관심분야〉  
스마트카 전장 기술, Simulator(자동차 및 교통  
시스템관련), 전기자동차, 자동차 에너지 시스템



김진호

2009년 8월 연세대학교 학사  
2009년 6월~2011년 2월 LG디스플레이 연구원  
2011년 3월~현재 연세대학교 통합 과정

〈관심분야〉  
Intelligent Unmanned Systems, Positioning &  
Navigation Systems